



Patrícia da Silva Chaves

**ARGAMASSA AUTONIVELANTE  
COM ADIÇÃO MINERAL (FÍLER) DE  
RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
MÁRMORE E GRANITO.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2019

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Patrícia de Silva Chaves**

**Argamassa Autonivelante com adição mineral (*filler*) de resíduo de  
beneficiamento de Mármore e Granito.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém  
2019

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Patrícia da Silva Chaves.

TÍTULO: argamassa autonivelante com adição mineral (*filler*) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito.

GRAU: Mestre ANO: 2019

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta qualificação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos.

O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa qualificação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

### Patrícia da Silva Chaves

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará. CEP 66075-970

---

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Biblioteca Central/ UFPA, Belém – PA

C512 Chaves, Patrícia de Silva, 1989 -

Argamassa autonivelante com adição mineral (*filler*) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito/ Patrícia da Silva Chaves – 2019.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2019.

1. Argamassa-Aditivos. 2. Mármore – Reaproveitamento.  
3. Materiais de construção. I. Título.

CDD - 23. ed. – 6 9 1 . 5

---



**ARGAMASSA AUTONIVELANTE COM ADIÇÃO MINERAL  
(FILER) DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
MÁRMORE E GRANITO**

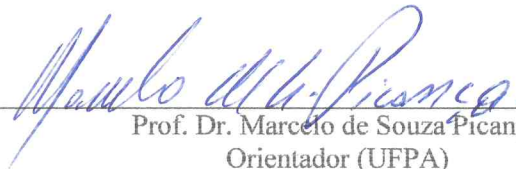
AUTORA:

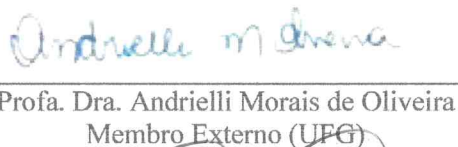
**PATRÍCIA DA SILVA CHAVES**

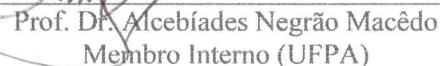
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 04 / 02 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Orientador (UFPA)

  
Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira  
Membro Externo (UFG)

  
Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

  
Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Venceslau Chaves, Maria Henrique e Sueli Chaves, e ao meu esposo David Durval, pela paciência, compreensão e apoio em todos os momentos.*

## **Agradecimentos**

Agradeço à Deus por toda benevolência em minha vida, e principalmente, por me dar força e sabedoria para atravessar as adversidades ao longo da caminhada.

A todos que ajudaram na doação de materiais e equipamentos para que fosse possível a realização do trabalho experimental. Obrigada pela disponibilidade, gentileza e paciência com que fui atendida.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC), em especial, ao Professor Dr. Marcelo Picanço que me orientou na pesquisa e, sempre disponível, me ajudou nos imprevistos que apareceram na fase experimental. Obrigada!

À Prof. Dra. Luciana Cordeiro pela sugestão do tema, por toda disponibilidade, pelos conselhos e orientações informais que foram imprescindíveis para o delineamento desta pesquisa. Obrigada pelo apoio, sempre!

A todos os amigos do mestrado e do Laboratório de Engenharia Civil que me acompanharam e colaboraram na realização desta pesquisa, em especial, a Carla, integrante do GPMAC, pela disponibilidade, compartilhando informações, angústias, equipamentos e materiais; ao Denisson Braun, colega de mestrado, sempre solícito, compartilhando dúvidas e conhecimento; ao Samuel, aluno de graduação, que mesmo sem bolsa me ajudou, tornando mais leve o desenvolvimento do trabalho experimental; ao Francisco Neto (Chaaamps!), que me acompanha deste a graduação, amigo de todas as horas; ao Vander, pela ajuda e incentivo na fase final do desenvolvimento experimental; e, ao laboratorista Joel, pelo apoio na realização dos ensaios, sempre presente nos momentos em que precisei. Muito obrigada!!!

À toda família Chaves, por toda educação, apoio, carinho e incentivo. Os bons princípios transmitidos e o ensinamento do caminho do aprendizado e do conhecimento foram extremamente significativos para o alcance do mestrado. Amo a todos!

Ao meu esposo David Durval, por ser presente em todas as ocasiões, apesar da distância. Por todo amor e paciência que encarou a ausência e a saudade. Muito obrigada meu amor, sem teu apoio, incentivo e carinho, a concretização deste mestrado seria muito mais difícil.

A todos, que de alguma forma ou de outra, contribuíram para essa realização pessoal e profissional. MUITO, MUITO, OBRIGADA!!!

## Resumo

CHAVES, P. S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

O processo de beneficiamento das rochas de mármore e granito gera resíduos sólidos ao longo de sua cadeia produtiva. Estes resíduos possuem potencial de impacto ambiental, quando não gerenciados adequadamente. O resíduo produzido na fase de polimento das chapas de mármore e granito, pode ser incorporado à indústria da construção civil como um material alternativo para produção de concretos e argamassas, contribuindo para o desempenho técnico, viabilidade econômica e ambiental. Nessa vertente, este trabalho tem como objetivo caracterizar o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), em seu estado natural, e utiliza-lo como adição em argamassa autonivelante para promover coesão, similar ao aditivo modificador de viscosidade (VMA). Para isso, foram produzidas uma argamassa de referência, uma com adição de RBMG e outra com adição de VMA. Onde, primeiramente foi analisado o comportamento reológico das pastas e argamassas. Em seguida, foram mensuradas as propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutural das argamassas autonivelantes. Os resultados mostram que o RBMG não possui potencial pozolânico. A argamassa com RBMG apresentou propriedades mecânicas e de durabilidade otimizadas em relação a argamassa de referência, e similares a argamassa com VMA. O ensaio microestrutural demonstrou que o RBMG promoveu refinamento dos poros da estrutura cimentícia, provavelmente devido à variação granular das partículas do resíduo, proporcionando maior compacidade com a otimização do empacotamento dos grãos. Concluindo-se que o RBMG pode ser utilizado como um material alternativo em substituição ao VMA, que é um produto caro e de difícil acesso em Belém/PA.

Palavras-chave: RBMG; resíduo; não pozolânico; argamassas autonivelantes;

## ABSTRACT

CHAVES, P. S. **Self-compacting mortar with mineral addition (filer) of marble and granite processing residue**. MSc Thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

The process of processing marble and granite rocks generates solid waste along its production chain. These residues have environmental impact potential when not properly managed. The waste produced in the polishing phase of marble and granite slabs can be incorporated into the construction industry as an alternative material for the production of concrete and mortar, contributing to technical performance, economic and environmental viability. In this aspect, this work aims to characterize the marble and granite beneficiation residue (RBMG), in its natural state, and uses it as a self-leveling mortar addition to promote cohesion, similar to the viscosity modifying additive (VMA). For this, a reference mortar was produced, one with addition of RBMG and one with addition of VMA. Where, first, the rheological behavior of the pastes and mortars was analyzed. Then, the mechanical properties, durability and microstructural properties of self-leveling mortars were measured. The results show that the RBMG has no pozzolanic potential. The mortar with RBMG presented optimized mechanical properties and durability in relation to the reference mortar, and similar to the mortar with VMA. The microstructural assay demonstrated that RBMG promoted pore refinement of the cementitious structure, probably due to the granular variation of the particles of the residue, providing greater compactness with the optimization of grain packing. It is concluded that the RBMG can be used as an alternative material to replace the VMA, which is an expensive and difficult to reach product in Belém / PA.

Keywords: RBMG; residue; not pozzolanic; self-leveling mortars;



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1 - Fluxograma das etapas de geração do RBMG.....	7
Figura 2.1– Aspecto da argamassa autonivelante durante sua aplicação. ....	15
Figura 2.2 – Aplicação da argamassa em contrapiso convencional. ....	16
Figura 2.3 – Dispersão das partículas componentes da argamassa autonivelante.....	18
Figura 2.4 – Representação esquemática da intensificação do processo da hidratação do cimento em matrizes com e sem adição mineral inerte. ....	22
Figura 2.5. Representação esquemática do mecanismo de dispersão dos superplastificantes com base policborxilato .....	23
Figura 2.6. Representação esquemática do mecanismo de atuação do VMA sobre os grãos de cimento. ....	24
Figura 2.7 – Classificação dos fluídos segundo seu comportamento reológico.....	28
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do programa experimental.....	29
Figura 3.2 – Organograma da caracterização do RBMG. ....	30
Figura 3.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).....	32
Figura 3.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo. ....	33
Figura 3.5 – Etapas da matriz experimental .....	35
Figura 3.6 – Aspecto do resíduo antes e após o beneficiamento.....	35
Figura 3.7 – Viscosímetro .....	43
Figura 3.8 - Equipamento para determinação do tempo de fluxo e consistência das argamassas autonivelantes.....	44
Figura 3.9 – Equipamento “anel de fluxo” para o ensaio de retenção de fluxo. ....	45
Figura 3.10 – Equipamento mini Slump-test utilizado para o ensaio de retenção de fluxo. ....	46
Figura 3.11 – Ensaio de densidade de massa.....	46
Figura 3.12 – Modelo esquemático dos corpos de prova posicionados no equipamento para o ensaio de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral...	48
Figura 3.13 – Equipamento de ensaio de resistência à tração na flexão com detalhamento correspondente ao sistema de ensaio do corpo de prova. ....	49
Figura 3.14 – Equipamento de ensaio de módulo de elasticidade.....	50

Figura 3.15 – Procedimento de ensaio de determinação da densidade de massa aparente. .....	50
Figura 3.16 – Procedimento de ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	51
Figura 3.17 – Equipamentos utilizados na análise microestrutural das argamassas autonivelantes. ....	52
Figura 3.18 – Esquema de extração dos cps para o ensaio de resistência de aderência à tração (dimensões em cm). ....	52
Figura 3.19 – Equipamento utilizado para o ensaio de resistência de aderência à tração. .....	53
Figura 3.20 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração. ....	53
Figura 3.21 – Substrato de concreto, no estado fresco. ....	55
Figura 3.22 – Preparo do substrato antes da aplicação das argamassas. ....	55
Figura 3.23 – Argamassas autonivelantes após aplicadas aos substratos. ....	56
Figura 4.1 – Curva granulométrica do cimento CP V e do RBMG. ....	58
Figura 4.2 - Difratograma de raios X do RBMG. ....	59
Figura 4.3 – Caracterização Microestrutural: (a) MEV: morfologia das partículas, com aumento de 1000 x; (b) EDS: mapa colorido dos elementos químicos presentes na amostra; (c) espectro de EDS. ....	61
Figura 4.4 – Avaliação IAP com cal. ....	62
Figura 4.5 – Avaliação IAP com cimento Portland. ....	63
Figura 4.6 – Expansões ao longo do tempo. ....	64
Figura 4.7 - Comportamento reológico da pasta sem adição de PSA: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento. ....	65
Figura 4.8 - Comportamento reológico das pastas com adição de RBMG: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento. ....	66
Figura 4.9 – Comportamento reológico da pasta com adição de VMA: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento. ....	67
Figura 4.10 – Tensão de cisalhamento e viscosidade aparente das pastas cimentícias em função do teor de adição: (a) pasta com RBMG e (b) pastas com VMA. ....	69
Figura 4.11 – Curvas de tempo de escoamento das argamassas produzidas em função do teor de aditivo SP. ....	70
Figura 4.12 – Consistência das argamassas produzidas em função do teor de aditivo SP. .....	70

Figura 4.13 – Aspecto visual das argamassas autonivelantes produzidas utilizando o teor de aditivo SP 0,40%: (a) APSA; (b) AMG20%; (c) AMV0,5%. .....	71
Figura 4.14 – Comportamento das argamassas autonivelantes para a retenção de fluxo ao longo do tempo. n=5. (S) variância significativa; (NS) variância não significativa. $P < 0,05$ . Teste ANOVA por Tukey e Kruskal-wallis. ....	73
Figura 4.15 – Densidade de massa das argamassas autonivelantes. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. n=4. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.....	74
Figura 4.16 – Resistência à compressão simples (a, b, c – resistência à compressão simples nas idades de 1, 7 e 28 dias, respectivamente). n = 6. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	76
Figura 4.17 – Resistência à tração por compressão diametral (a, b, c – resistência à tração por compressão diametral nas idades de 1, 7 e 28 dias, respectivamente). n = 4. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	79
Figura 4.18 – Resistência à tração por flexão para a idade de 28 dias. n = 4. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	80
Figura 4.19 – Módulo de estático de elasticidade na idade de 28 dias. n = 4. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	82
Figura 4.20 – Densidade de Massa Aparente na idade de 28 dias. n = 4. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	83
Figura 4.21 – Coeficiente de capilaridade na idade de 28 dias. n = 4. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.....	85
Figura 4.22 – Micrografias por MEV da superfície das argamassas fraturadas – (a) APSA, (c) AMG20% e (e) AVM0,5%; e Espectro de EDS (b) APSA, (d) AMG20% e (f) AVM0,5%. .....	86
Figura 4.23 – Média das resistências de aderência à tração das argamassas autonivelantes. n = 12. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ....	90

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 3.1 – Caracterização física do cimento CP V-ARI. ....	31
Tabela 3.2 – Caracterização física do agregado miúdo. ....	32
Tabela 3.3 – Caracterização física do agregado graúdo. ....	33
Tabela 3.4 – Características dos aditivo superplastificante. ....	34
Tabela 3.5 – Características dos aditivo superplastificante. ....	34
Tabela 3.7 – Variáveis controláveis no estudo da composição da pasta. ....	42
Tabela 3.8 – Variáveis controláveis no estudo da composição da argamassa. ....	44
Tabela 3.9 – valores do concreto produzido para confecção das placas ....	54
Tabela 4.1 – Caracterização física da adição mineral. ....	58
Tabela 4.2 – Composição química do RCMG por FR-X. ....	60
Tabela 4.3 – Resultado IAP com cal. ....	62
Tabela 4.4 – Resultado IAP com cimento Portland. ....	63
Tabela 4.5 – Valores das médias obtidas com o teor de 0,4% de aditivo SP nos ensaios de tempo de fluxo e consistência. ....	71
Tabela 4.6 – Consistências médias obtidas no ensaio de retenção de fluxo. ....	72
Tabela 4.7 – Densidades de massa médias para 4 amostras distintas. ....	74
Tabela 4.8 – Média das resistências à compressão simples das argamassas autonivelantes. ....	75
Tabela 4.9 – Média das resistências à tração por compressão diametral das argamassas autonivelantes. ....	78
Tabela 4.10 – Média das resistências à tração na flexão das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade. ....	80
Tabela 4.11 – Média dos módulos de elasticidade das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade. ....	81
Tabela 4.12 – Média das densidades de massa aparente das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade. ....	83
Tabela 4.13 – Médias do ensaio absorção de água por capilaridade das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade. ....	84
Tabela 4.14 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante APSA. ....	88
Tabela 4.15 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante AMG20%. ....	89

Tabela 4.16 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante AMV0,5%.	
.....	89
Tabela 4.17 – Média do ensaio resistência à compressão simples do substrato de concreto.	
.....	91
Tabela 5.1 – Requisitos de desempenho alcançados pelas argamassas.....	92

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. Objetivos específicos.....	3
1.4. Estrutura da dissertação.....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO (RBMG).....	5
2.1.1 Processo de geração de resíduos.....	6
2.1.2 Efeitos do uso de RBMG em matrizes cimentícias.....	8
2.2. ARGAMASSA AUTONIVELANTE.....	9
2.2.1 Definição.....	9
2.2.2 Breve Histórico.....	10
2.2.3 Propriedades da Argamassa Autonivelante.....	11
2.2.4 Aplicações.....	14
2.2.5. Vantagens e Desvantagens da Argamassa Autonivelante.....	16
2.2.6 Materiais constituintes.....	17
2.2.7 Aspectos reológicos.....	25
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	30
3.1.1 Cimento Portland.....	30
3.1.2. Agregados.....	31
3.1.3 Água de amassamento.....	33
3.1.4 Aditivos Químicos.....	33
3.1.5. Adição Mineral (Fíler).....	34
3.2 ETAPA 2: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....	40
3.2.1. Estudo em pasta: Determinação do teor de adição de RBMG e VMA.....	41
3.2.2. Estudo em Argamassa: Determinação do Teor de Aditivo Superplastificante (SP).....	43
3.3 ETAPA 3: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES, NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	45
3.3.1. Tempo de retenção de fluxo.....	45

3.3.2. Densidade de massa.....	46
3.3.3. Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral.....	46
3.3.4. Resistência à Tração na flexão.....	48
3.3.5. Módulo Estático de Elasticidade.....	49
3.3.6. Densidade de Massa Aparente.....	50
3.3.7. Absorção de Água por Capilaridade.....	51
3.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	51
3.3.9. Determinação da resistência de aderência à tração.....	52
3.4. ETAPA 4: PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EMPREGADO COMO SUBSTRATO.....	54
3.5.1. Produção do concreto.....	54
3.5.2. Moldagem das placas e corpos-de-prova de concreto.....	54
3.5.3. Método de ensaios de caracterização e controle do concreto, no estado endurecido.....	56
3.5. ANÁLISE DOS DADOS.....	57
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1. RESULTADOS DA ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	58
4.1.1. Adição Mineral (fíler).....	58
4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....	64
4.2.1. Estudo em pasta: Determinação do teor de adição de RBMG e VMA.....	64
4.2.2. Estudo em argamassa: determinação do teor de aditivo superplastificante (SP)...	70
4.3. RESULTADOS DA ETAPA 3: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.....	75
4.3.1. Retenção de fluxo.....	75
4.3.2. Densidade de massa .....	77
4.3.3. Resistência à Compressão Simples.....	79
4.3.4. Resistência à Tração por compressão diametral.....	82
4.3.5. Resistência à Tração na flexão.....	84
4.3.6. Módulo Estático de Elasticidade .....	85
4.3.7. Densidade de Massa Aparente.....	87
4.3.8. Absorção de Água por Capilaridade.....	88
4.3.9. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	89
4.3.10. Determinação da resistência de aderência à tração.....	91

4.3. RESULTADOS DA ETAPA 4: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EMPREGADO COMO SUBSTRATO.....	95
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>96</b>
5.1. QUANTO À CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO (RBMG).....	97
5.2. QUANTO AOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DAS PASTAS DE CIMENTO COM ADIÇÃO DE RBMG E VMA.....	97
5.3. QUANTO AOS RESULTADOS ALCANÇADOS PELAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES PRODUZIDAS, NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	98
5.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
APÊNDICE A.....	108



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

É uma tendência da construção civil o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e viáveis que contribuam para o aumento da produtividade da construção, da melhoria das atividades laborais na obra e do gerenciamento de resíduos sólidos. A escolha do material a ser utilizado no processo construtivo deve considerar a racionalização e a mínima geração de resíduos da obra. Ou ainda, prevê o uso de resíduos como um material alternativo, viabilizando seu uso e sua possível contribuição para os custos econômicos da obra.

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

A argamassa autonivelante é um material bastante utilizado em outros países, principalmente europeus, e se configura como um material ainda pouco utilizado no mercado brasileiro. Pois, são poucas as pesquisas e estudos bibliográficos no âmbito nacional. O método de dosagem empregado e as prescrições normativas são baseados em métodos para concretos auto-adensáveis (CAA). Não havendo normas brasileiras, que considerem as características dos materiais aqui utilizados, para a avaliação do desempenho da argamassa autonivelante. Além disso, a falta de conhecimento tecnológico e o fato de não existir normativos técnicos nacionais são um obstáculo para a expansão do uso do material no país.

Sabe-se que, os primeiros compostos autonivelantes surgiram na década de 70 na Finlândia. Rapidamente ganhou popularidade e na década de 80 já era produzido em larga escala na Suécia (RUBIN, 2015). Porém, segundo Martins (2009), somente em 1999 cresce o interesse de algumas empresas espanholas sobre os materiais e métodos para a confecção desse novo material emergente no mercado da construção civil. No Brasil, as argamassas autonivelantes despertam o interesse de pesquisadores e empresas somente a partir de 2008.

O contrapiso autonivelante utiliza uma argamassa autoadensável, de base cimentícia, constituída por aglomerante, areia, água e aditivos. Caracteriza-se por sua elevada fluidez,

capacidade de nivelamento sem a necessidade de vibração ou adensamento, mantendo-se coesa e homogênea. Onde, seu adensamento e compactação é realizado pela ação da gravidade, com seu peso próprio e sua aplicação é através de sistemas mecânicos (bomba), de forma rápida e simples (RUBIN, 2015).

Para alcance das características autonivelantes dessas argamassas, esta pesquisa propõe a adição de dois tipos de materiais com ação diferentes, utilizados separadamente. São eles: o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e o aditivo modificador de viscosidade (VMA - *Viscosity Modify Admixture*). O RBMG é uma adição mineral sugerida como uma alternativa sustentável para a incorporação em matrizes cimentícias, podendo promover coesão e aumento da viscosidade das mesmas. Já o VMA é uma adição química que atua promovendo a viscosidade de concretos e argamassas.

O RBMG é um resíduo gerado no processo de corte e polimento de placas de mármore e granito em marmorarias. Geralmente é descartado sem nenhum tratamento e quando acumulado torna-se um resíduo com potencial de impacto ambiental. Em virtude disso, o anseio desta pesquisa tem como enfoque o uso do RBMG em detrimento do VMA, com vistas ao benefício econômico e ambiental deste material. Visto que, que na região metropolitana de Belém o VMA é um produto caro e de difícil acesso. Diferentemente, o RBMG empregado é facilmente encontrado a um custo mínimo e seu emprego em produtos de construção civil pode contribuir para a eliminação desses resíduos, tornando-se de suma importância o desenvolvimento tecnológico, através da investigação científica para a melhoria do desempenho, compreensão do comportamento reológico, das propriedades mecânicas e de durabilidade desses materiais.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Profissionais de várias áreas vêm sendo desafiados no desenvolvimento de tecnologias ambientalmente eficientes e seguras para reciclagem de resíduos que resultem em produtos com desempenho técnico adequado e que possam ser economicamente competitivas. Visando atender esses requisitos, a argamassa autonivelante apresenta-se como uma evolução tecnológica perante aos métodos normalmente utilizados no país. O mesmo pode suportar o tráfego de equipamentos, veículos e pessoas, de forma rápida e segura, em pouquíssimo tempo após aplicada, sem perder a qualidade. Em contrapartida, o método tradicional necessita de mais dias para sua liberação (SOUZA *et al.*, 2013).

Além das vantagens técnicas intrínsecas do sistema construtivo, tem-se como justificativa econômica para a relevância deste estudo a produção de argamassas autonivelantes por meio de uma dosagem racional, a partir do estudo reológico da pasta cimentícia, visando menor desperdício de material para definição e entendimento do comportamento da adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e do aditivo modificador de viscosidade (VMA), que garanta estabilidade dimensional da argamassa no estado fresco, prevendo um bom desempenho mecânico no estado endurecido.

Acrescentando, tem-se a justificativa ambiental com o emprego do RBMG, que culmina em uma destinação adequada desse material, evitando o desperdício e contaminação no meio ambiente. A elevada finura desse resíduo é uma característica que viabiliza seu aproveitamento como uma alternativa sustentável, incorporando-o a matrizes cimentícias como fíler. Evitando que esse rejeito acabe depositado em rios, córregos, esgotos ou até mesmo em tanques feitos inadequadamente, provocando a contaminação de lençóis freáticos e gerando conflitos entre os órgãos ambientais e as populações vizinhas (SILVA *et al.*, 2005).

### **1.3. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho consiste na produção de argamassas autonivelantes a partir do estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e aditivo modificador de viscosidade (VMA). Além de comparar o comportamento das argamassas produzidas, no estado fresco e endurecido, investigando e viabilizando o uso de RBMG, em substituição ao VMA.

#### **1.3.1. Objetivos específicos**

- Caracterizar física, química e mineralógica, o RBMG empregado neste estudo;
- Investigar a influência da adição de RBMG e VMA nas pastas cimentícias por meio da caracterização do comportamento reológico;
- Analisar o comportamento das argamassas autonivelantes produzidas por meio de parâmetros de controle, no estado fresco e endurecido;
- Verificar a estrutura microscópica da argamassa autonivelante sem e com adição de RBMG e VMA;

#### **1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente pesquisa se desenvolverá em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O primeiro capítulo terá uma introdução abordando o contexto e as justificativas para o desenvolvimento do tema, os objetivos principais e específicos almejados e a estruturação da pesquisa.

O segundo capítulo será constituído por uma revisão bibliográfica, onde inicialmente será feita uma breve descrição sobre o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) contendo seus tipos de classificação e seu procedimento geração e beneficiamento. Seguindo, abordará o assunto principal: argamassa autonivelante. Assim como, sua definição, histórico, aplicações, materiais constituintes e seus efeitos nas propriedades reológicas, propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. Ainda contemplará os aspectos conceituais relacionados a reologia.

O terceiro capítulo abordará a parte do programa experimental (materiais e métodos), descreverá os materiais a serem utilizados; o método experimental será apresentado em quatro etapas: caracterizações físicas, químicas, mineralógica e microestrutural do RBMG, dosagem de argamassas autonivelante a partir do estudo reológico da pasta cimentícia e do estudo da argamassa, por meio de ensaios de caracterização e controle das argamassas autonivelante, no estado fresco e endurecido.

O quarto capítulo apresentará os resultados obtidos dos ensaios, seguidos de sua análise e discussão. A disposição dos resultados seguirá a ordem apresentada no capítulo anterior.

O quinto capítulo finalizará o trabalho com as considerações finais, conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) abordando conceitos, processos de geração e pesquisas científicas sobre o efeito da sua incorporação em materiais de base cimentícia. Também aborda, de forma central a argamassa autonivelante, o produto escolhido para a aplicação deste resíduo, com subitens como: definição, breve histórico, propriedades, principais características, aplicações, vantagens e desvantagem. Por fim, discorre sobre aspectos conceituais relacionados a reologia, por meio de conceitos que visem o melhor entendimento do comportamento de matrizes cimentícias.

### **2.1. RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MÁRMORE E GRANITO (RBMG)**

As atividades relacionadas à construção civil provocam enorme impacto ambiental. O setor é o maior consumidor individual de recursos naturais. Estima-se que seja responsável por 15% a 50% do consumo naturais extraídos. No Brasil, a quantidade estimada da geração conjunta do resíduo proveniente do corte do mármore e granito é de 240.000 toneladas/ano, distribuídas, principalmente, entre os estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba (KUMAYAMA, 2014).

Kumayama (2014) distingue três tipos principais de resíduo gerados pelo setor de rochas ornamentais:

- retalhos de rocha: este tipo de resíduo é proveniente de sobras e quebras de peças, chegando a alcançar uma perda de 10% a 20%, onde muitas vezes são descartados no pátio da própria empresa;
- lama de serraria: é a lama proveniente da serragem dos blocos de rochas (após a extração), além do polimento e lustro das chapas. Essa lama é o resíduo gerado em maior quantidade, chegando a atingir entre 30% e 40%, em volume, dos blocos serrados. Nesse processo são usados abrasivos (granalha - material metálico) e cal, os quais se misturam à lama gerada, dificultando a reciclagem do material;
- lama de marmoraria: está ocorre em forma de finos formados a partir do processo de recorte, polimento e lustro de peças, produzidas a partir das chapas geradas nas serrarias. Essas peças podem ser tanto personalizadas, como pias, balcões

etc., como também padronizadas como placas, revestimentos, peitoris, entre outros.

Entre os três tipos resíduos citados por Kumayama (2014) destaca-se que a lama de marmoraria é o que gera menos resíduos (2% do total de volume processado), mas que não pode ser desconsiderado. Pois, quando pensado em produção em grande escala ou acumulativa, como por exemplo na produção de um mês bem como de várias empresas, o torna em um resíduo com potencial de impacto ambiental.

### **2.1.1 Processo de geração de resíduos**

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define como resíduo sólido materiais que resultem de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. De acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) a elaboração de planos de gerenciamento dos resíduos devem ser integrados ao sistema de gestão com vistas à melhoria dos processos produtivos e ao aproveitamento de resíduos sólidos. Devendo o produtor, agente público ou privado, ser o responsável pela destinação e reaproveitamento desses resíduos gerados.

Assim, as empresas do setor de rochas ornamentais devem desenvolver planos de gestão ao longo de toda cadeia produtiva do processo de beneficiamento das rochas de mármore e granito. Visto que, esta atividade causa problemas ambientais desde fase de extração da rocha da natureza. O processo de geração do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), procede de uma pesquisa mineral, onde é necessário desmatar a área de intervenção, causando grandes problemas hidrológicos. A extração é realizada em blocos com dimensões padronizadas: 0,9 a 2,40m (Larg.), 2,90m (Comp.) e 1,70m (Alt.), que são determinadas pelo tamanho do tear utilizado pela empresa. Nesta é gerado a maior quantidade de resíduos do processo de beneficiamento na forma de polpa abrasiva (lama) gerada pela obtenção dos blocos (LISBOA, 2004).

A polpa utilizada nos teares é geralmente constituída de água, granalha e cal moída ou calcário moído ou escória de alto forno. A granalha de aço tem função abrasiva para facilitar o processo de corte, que gera resíduos com maior teor de ferro. Neste perde-se até 30% dos blocos, na forma de costaneiras e lamas abrasivas. Outras perdas costumam ocorrer causadas por quebra de placas, falhas de empilhamento, defeitos de corte, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, lâminas de corte pouco tensionadas e blocos fraturados (NEVES, 2002 *apud* LISBOA, 2004).

Após o processo de corte e obtenção de chapas brutas, as mesmas são submetidas aos processos de acabamento para obtenção do produto final, como mostra a Figura 1.1. O processo seguinte ao corte é o polimento da superfície superior. Nesta fase a quantidade de resíduo gerado é muito menor que no processo de corte, porém tem a característica particular de ser desprovido de granalha, visto que as lâminas de corte são de diamante, formando um resíduo mais “puro”. Contudo, diferentes tipos de rochas passam pelas serras, gerando um resíduo diversificado, portanto, sua caracterização física, química e mineralógica é imprescindível para uso em novos produtos (APOLINÁRIO, 2014).

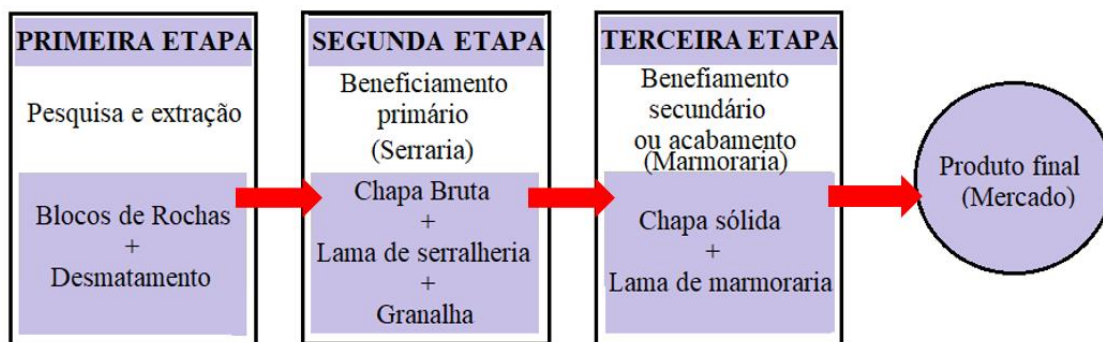


Figura 1.1 - Fluxograma das etapas de geração do RBMG.

Fonte: autora.

O resíduo é gerado neste último processo do beneficiamento utiliza água para a realização do corte, formando uma fração viscosa de lama. Esta lama, geralmente, é depositada em lagoas de sedimentação diretamente no solo da própria empresa. Após a secagem do material nos tanques de decantação, o material é transportado e disposto em aterros sem nenhum tratamento prévio, o que gera despesas consideráveis para as empresas (REIS e TRISTÃO, 2007 *apud* APOLINÁRIO, 2014).

A sustentabilidade do setor de rochas ornamentais envolve, entre outras alternativas para mitigar os riscos ambientais do seu processo produtivo, a reciclagem do resíduo gerado. De acordo com Martins (2009), para minimizar esses riscos ambientais, algumas empresas construíram unidades de tratamento de efluentes, como caixas de decantação e, com isso, o resíduo pode ser utilizado para diversos fins, como, por exemplo, matéria prima de concretos e argamassas. Assim, com o seu reaproveitamento os depósitos poderão ser reduzidos ou até mesmo eliminados.

### 2.1.2 Efeitos do uso de RBMG em matrizes cimentícias

Lisboa (2004), analisou as propriedades mecânicas do concreto auto-adensável com a adição do RBMG como fíler mineral, com uma relação de resíduo/ cimento de 50%. Para encontrar a quantidade adequada de RBRO e o percentual ótimo de superplastificante, estudos preliminares da pasta (Cone de *Marsh* e *Mini-slump*) e da argamassa (Cone de *Marsh* e Tronco de cone da mesa de consistência), foram definidos. Verificou que, no estado fresco, o resíduo aumentou a velocidade de fluxo, considerando que este resultado estava relacionado com uma baixa coesão da mistura, porém o concreto fluiu sem apresentar instabilidade; e, no estado endurecido, a resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na compressão diametral foram consideradas satisfatórias, concluindo a viabilidade do uso do RBRO na produção de concretos auto-adensáveis.

Freire *et al.* (2009) utilizaram o resíduo do corte de granito (RCG) em blocos paisagísticos, utilizando o traço de 1:2:1 (cimento: areia: água), onde se adicionou 10% e 25% de RCG em relação à massa de cimento. Durante a pesquisa, constatou-se que a resistência à compressão axial com 10% de adição de resíduo obteve ganho médio maior que as argamassas com 25% de adição. Da mesma forma, os blocos contendo 10% de adição de resíduo produziram uma barreira física melhor à absorção da água, diminuindo a porosidade.

Li *et al.* (2013) investigou os efeitos do RBMG como agregado miúdo em misturas de concreto feitas com cimento sorel, formado a partir da combinação de óxido de magnésio e da solução de cloreto de magnésio. Este cimento foi desenvolvido depois do cimento Portland, contendo oxiclreto de magnésio e apresentando endurecimento rápido, resistência inicial alta e ideal para rápidas reparações. O estudo em questão substituiu o agregado miúdo por resíduo em 10%, 20%, 30% e 40% e realizaram-se os ensaios de resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Concluiu-se que as amostras que apresentaram o melhor desempenho foram as que continham 10% de resíduo.

Em outra pesquisa, o RBMG melhorou a resistência de argamassas e concretos, principalmente quando foram adicionadas quantidades pequenas de resíduo, entre 5 e 6% em relação à massa de cimento. Os resultados indicaram que os agregados de resíduo de mármore e granito podem ser usados para melhorar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a resistência química do concreto convencional (KRSTULOVIC *et al.*, 1994 *apud* APOLINÁRIO, 2014).



Já Uliana (2014), inicialmente tratou termicamente o RBMG a uma temperatura de 1200°C e utilizou o resíduo em substituição a massa de cimento nos teores de 5%, 10%, 15% e 20% para verificação da atividade pozolânica das argamassas produzidas, comparando também com os resultados obtidos das argamassas com o resíduo sem tratamento térmico, avaliadas pela resistência à compressão e pelo módulo de elasticidade dinâmico. Concluiu-se que as argamassas com substituição de cimento por resíduo obtiveram resultados inferiores aos da argamassa de referência. Os resultados de módulo de elasticidade não apresentaram a regularidade dos dados obtidos de resistência à compressão. Observou-se também que o resíduo tratado termicamente se apresentou como um material com características de pozolanicidade.

Sato (2015) utilizou conceitos de reologia para investigar a influência da incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) nas propriedades reológicas de pastas cimentícias, analisando as interações que ocorrem entre este rejeito e os outros constituintes das pastas (cimento e água), em três teores de adição 5%, 10% e 15% e relações a/c 0,45, 0,55 e 0,65. Concluiu que o teor de adição de RBRO que proporcionou melhor desempenho quanto às propriedades estudadas foi o de 5%, em relação à massa do material cimentício; e que é possível correlacionar os parâmetros reológicos das pastas de cimento com adição de RBRO com a consistência do concreto no estado fresco e a resistência à compressão do concreto no estado endurecido.

Acredita-se que o principal problema enfrentado quanto aos efeitos do uso do RBMG é decorrente da alta finura desses pós, e conseqüente elevada superfície específica. As misturas que contenham pós de mármore e granito requerem o uso de superplastificantes, caso contrário, será necessária mais quantidade de água para uma trabalhabilidade satisfatória, o que, conseqüentemente, reduz a resistência mecânica. Por outro lado, a alta finura de pós de mármore e granito pode ser benéfica para proporcionar boa coesão aos compostos autonivelantes.

## **2.2. ARGAMASSA AUTONIVELANTE**

### **2.2.1 Definição**

A argamassa autonivelante é um produto de elevada fluidez, capaz de se auto adensar, sem segregar, mantendo-se coesa e homogênea, podendo ser definida como uma argamassa autoadensável. Sua aplicação é por meio de sistemas mecânicos (bomba), de forma rápida e simples, em superfícies horizontais, tais como pisos e contrapisos, sem necessitar de uma

grande exigência na qualificação do operário. Seu adensamento e compactação é realizado pela ação da gravidade, com seu peso próprio (RUBIN, 2015).

De acordo com Martins (2009), a argamassa autonivelante é proveniente da argamassa autoadensável, com a diferença que a argamassa autonivelante obrigatoriamente deve ser constituída de uma superfície horizontalmente nivelada de espessura reduzida, quando comparado aos sistemas convencionais, aceitando um desnível de 1mm a cada 4m de comprimento do elemento estrutural. Essas características são obtidas com o equilíbrio entre alta fluidez com a grande capacidade de movimentação e moderada viscosidade e coesão entre as partículas que constituem a mistura.

Dentre as propriedades exigidas em um sistema de argamassa autonivelante devem ser consideradas sua viabilidade e suas características finais. As mais importantes são: o auto nivelamento, baixa viscosidade, adensamento rápido, tempo de pega rápido, rápido ganho de resistência, secagem rápida, estabilidade dimensional, resistência final elevada, durabilidade da superfície e uma forte adesão com o substrato (SEIFERT *et al.*, 2012).

A principal proposta dessa argamassa é de possibilitar uma moldagem adequada, isenta de defeitos provenientes da falha de aplicação ou de técnica inadequada de moldagem. Seus materiais constituintes devem possuir características específicas e teores na mistura que proporcionem a fluidez adequada, não necessitando de adensamento e nivelamento, sem haver segregação das argamassas. Após executada, podem ser colocados todos os tipos de revestimentos sobre a argamassa autonivelante, tais como: madeira, pisos vinílicos, cerâmica, dentre outros.

### **2.2.2 Breve Histórico**

Os primeiros compostos autonivelantes surgiram na década de 70 na Finlândia. Rapidamente ganhou popularidade e na década de 80 já era produzido em larga escala na Suécia (RUBIN, 2015). Porém, segundo Martins (2009), somente em 1999 cresce o interesse de algumas empresas espanholas sobre os materiais e métodos para a confecção desse novo material emergente no mercado da construção civil. Para os pesquisadores este material é concebido sob uma perspectiva de inovação tecnológica decorrente da sua proposta autonivelante em detrimento dos métodos tradicionais existentes.

Apesar da popularidade na Europa, somente em 2002, o Reino unido publicou as primeiras normas para produtos de revestimentos de pisos, incluindo as argamassas autonivelantes.

Estas, descrevem as características e os métodos pelas quais essas características devem ser determinadas, além de um conjunto de testes para ensaios com o produto (FERFA, 2005 *apud* RUBIN, 2015).

No Brasil, as argamassas autonivelantes despertaram o interesse de pesquisadores e empresas. Estas, configuram como tendência no mercado brasileiro, no entanto, ainda são poucas as pesquisas e estudos bibliográficos no âmbito nacional. As prescrições normativas e a tecnologia empregada pelas construtoras são baseadas em métodos de outros países, não considerando as características dos materiais aqui utilizados, além disso os procedimentos de dosagem não são normatizados. Assim, a falta de conhecimento tecnológico e o fato de não existir normativos técnicos nacionais podem ser um obstáculo para a expansão do uso do material no país.

### **2.2.3 Propriedades da Argamassa Autonivelante**

#### **2.2.3.1 Estado Fresco**

As propriedades da argamassa autonivelante no estado fresco, devem ser analisadas afim de garantir a qualidade no estado endurecido. Como citado anteriormente, as propriedades fundamentais para definir a auto compactação dessas argamassas são a alta fluidez e estabilidade dimensional, resistência 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 (SILVA, 2016).

As argamassas autonivelantes devem apresentar uma boa capacidade de fluxo, por sua propriedade de autonivelamento, além de forma homogênea e coesa. Duas características se destacam entre as propriedades características da argamassa autonivelante no estado fresco, são elas: consistência e resistência à segregação. A consistência é a capacidade de preencher completamente todos os espaços em que foi lançado, apenas sob a ação do peso próprio, se espalhando sob o substrato formando uma superfície plana adequada à finalidade, seja ela, camada de regularização ou de acabamento. Já a resistência à segregação é compreendida pela capacidade de resistir a separação das partículas, que ocorre devido a elevada fluidez, e assim manter a mistura sempre homogênea sem essa dissolução de partículas (MARTINS, 2009).

Katsiadramis *et al.* (2010), em seu estudo relata que caso a fluidez seja elevada com o aumento do teor de água, o produto final deve apresentar menor densidade, e

consequentemente, maior risco para exsudação e segregação dos agregados. Já, com o uso de aditivos químicos compatíveis, como aditivos SP, torna-se viável preservar a alta resistência e durabilidade do material, principalmente com os aditivos de terceira geração que tem demonstrado grandes vantagens com alta eficiência. Contudo, além de encarecer o sistema, caso a dosagem seja realizada de maneira errônea, pode requerer em maior tempo de cura da argamassa, implicando no atraso da liberação do local.

Libre *et al.* (2010) demonstra que o aumento da relação a/c e uso de aditivos SP, parece ser bastante eficaz para aumentar a fluidez das argamassas autonivelantes, no entanto, são prejudiciais para a estabilidade. Por outro lado, o uso de aditivos modificadores de viscosidade ou de adições minerais, podem ser uma solução para melhorar a estabilidade deste produto, porém pode reduzir a fluidez da mistura.

Essas características são influenciadas pelas suas características reológicas pautadas na viscosidade plástica e na tensão de escoamento. Segundo Larrard (1999 apud MARTINS, 2009), a viscosidade é um fator que necessita de um certo controle, visto que elevada viscosidade dificulta o espalhamento e a capacidade de ultrapassar obstáculos. Porém, se baixa viscosidade afeta a estabilidade da mistura acarretando em segregação e exsudação. A tensão de escoamento está ligada ao estado de aglomeração e dispersão das partículas, ou seja, a resistência de segregação. Esta é alcançada reduzindo a relação a/ms, ou até mesmo uma combinação entre a utilização de um aditivo superplastificante com uma grande quantidade de materiais finos, de forma que a relação a/ms seja suficientemente viscosa para manter homogênea a pasta com os agregados.

De acordo com Silva (2016), a fluidez da mistura da mistura é influenciada pela ação do aditivo superplastificante que promoverá a dispersão das partículas. 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. De forma similar, o ajuste do aditivo promotor de viscosidade permite a uniformidade visual das partículas que é adquirida pela ideal coesão entre as mesmas.

Adições minerais e aditivos químicos são componentes essenciais para sistemas de argamassa autonivelantes. Pois, a alta fluidez é adquirida com o uso de aditivos Superplastificantes (SP) e a resistência à segregação é obtida através da utilização de adições minerais, uma baixa relação de água/aglomerante, e/ou, em alguns casos, a adição de um

aditivo modificador de viscosidade. O teor adequado de adições minerais em formulações de argamassas autonivelantes é importante para que propriedades como a demanda de água do sistema, teor de cimento, retração, calor de hidratação, adensamento e a microestrutura possam ser otimizados e assim possamos obter maior resistência e durabilidade em sistemas de auto adensamento (RIZWAN e BIER, 2012).

Para Silva (2016), as adições minerais são responsáveis por promover a fluidez através do efeito filer de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de maior e menor dimensão. A forma, textura e granulometria das partículas influenciam no comportamento das adições exercido na mistura, a exemplo, sabe-se que partículas com forma esférica facilitam o contato entre as demais partículas, reduzindo o atrito resultando no aumento da fluidez de pastas cimentícias. No entanto, ressalta-se que o emprego excessivo das adições minerais aumenta a segregação e exsudação das argamassas auto adensáveis.

A dosagem da argamassa autonivelante tem grande influência nas 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. Já a retenção de água ocorre quando esta é absorvida pelo substrato rapidamente a hidratação dos grãos de cimento é prejudicada diminuindo, conseqüentemente, a resistência mecânica do material. Esta propriedade é controlada pela própria composição do material, a presença de materiais finos pode contribuir na retenção da água da mistura (SILVA, 2016).

### **2.2.3.2 Estado Endurecido**

As argamassas autonivelantes constituem-se como um tipo especial de argamassa, considerada de alto desempenho (MEHDIPOUR *et al.*, 2013). No estado endurecido, devem apresentar uma superfície pouco porosa, principalmente se o material for aplicado para piso acabado. Essa propriedade pode ser obtida facilmente através das adições de finos que permitem o refinamento de poros. Além disso, essas argamassas não devem apresentar fissuras causadas pelo fenômeno da retração. Assim, são empregados aditivos, como o aditivo redutor de retração para amenizar esse problema, bem como o uso de fibras poliméricas (SILVA, 2016).

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

- Resistência à compressão: 25 a 35 MPa;
- Resistência à tração na flexão: 8 a 11 MPa;
- Resistência ao arrancamento 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 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup> ou 1,2 mm de espessura;

Contudo, a EFNARC (2001), prescreve os requisitos de desempenho de pisos cimentícios autonivelantes modificado por polímeros, com base na UNE-EN 13892-2 (AENOR, 2003), que é a norma europeia, indicando os seguintes valores:

- resistência à compressão:  $\geq 20$  MPa;
- resistência à tração na flexão:  $\geq 5$  MPa;

Além desses requisitos, NENEVÊ (2017) propõe em seu estudo os valores:

- Densidade de massa aparente:  $\geq 1,75$  g/cm<sup>3</sup>;
- Variação dimensional:  $\geq 0,80$  mm/m;
- Módulo de elasticidade dinâmico:  $\geq 5$  GPa;

#### **2.2.4 Aplicações**

No mercado brasileiro é encontrado dois tipos de argamassas autonivelantes: argamassa ensacada (industrializada) e argamassa produzida em central. A primeira é uma mistura seca, fornecida em sacos, necessitando apenas ser misturada com a água, de acordo com a quantidade indicada pelo fabricante, para ser utilizada. Já a segunda é dosada e misturada por centrais, sendo transportada em caminhão betoneira pronta para a aplicação (SOUZA, 2013).

A argamassa autonivelante pode ser utilizada como contrapiso propriamente dito, aderido ou não ao substrato, sobre manta acústica ou térmica. Sobre ele pode ser utilizado

revestimentos ou materiais de acabamento como: madeira, pisos vinílicos, cerâmica, dentre outros; os mesmos também podem servir como a própria superfície final do piso.

Para o caso das argamassas dosadas em centrais, a aplicação é feita por sistemas mecânicos (bombeamento), de forma rápida e fácil. Através de uma mangueira que espalha a argamassa em estado fluído sobre a superfície. Seu adensamento e compactação é realizado pela ação da gravidade, em função de seu próprio peso próprio, não necessitando de vibração ou nivelamento (SCHAEFER, 2013).

Dependendo da qualidade da argamassa autonivelante, a sua aplicação é realizada em camadas finas, entre 10 e 20 mm de espessura, em diferentes tipos de substratos como: concreto, argamassa e madeira (SEIFERT *et al.* 2012). De acordo com Schaefer (2013), estas argamassas são consideradas como de alto desempenho e caracterizadas por sua capacidade de se espalhar rapidamente e auto consolidar, devendo apresentar mecânica em curto período de tempo (24 horas). Assim, a homogeneidade destes compostos é necessária para assegurar características de resistência e durabilidade do produto final, sendo imprescindível que a mistura apresente alta estabilidade.

A Figura 2.1 mostra a consistência fluída da argamassa autonivelante. Seu processo de aplicação mecanizado é realizado em movimentos de vai e vem, para melhor distribuição do material.



Figura 2.1– Aspecto da argamassa autonivelante durante sua aplicação.  
Fonte: (GUGELMIN, 2013)

As principais aplicações das argamassas autonivelantes são: locais com grandes superfícies, imóveis comerciais, centros esportivos, escolas, hospitais, centros de lazer, estabelecimentos novos e também de renovação. O sistema de execução do contrapiso autonivelante é simples, possui menor quantidade de mão de obra e possui maior agilidade e rapidez na aplicação

quando comparado ao sistema convencional. Visto que, o sistema convencional utiliza argamassa denominada como tipo “farofa”, que apresenta consistência seca, geralmente, é dosada em obra e aplicada manualmente (RUBIN, 2015).

A Figura 2.2 demonstra o método de aplicação do sistema convencional e a consistência desta argamassa. Esse método é bastante questionado quanto a sua ergonomia, pois é considerado degradante para o trabalhador devido à posição de trabalho – abaixado e com a coluna curvada.



Figura 2.2 – Aplicação da argamassa em contrapiso convencional.  
Fonte: (SOUZA, 2013)

### **2.2.5. Vantagens e Desvantagens da Argamassa Autonivelante**

Dentre as vantagens do uso de sistemas com argamassa autonivelante estão a rapidez na execução, liberação da superfície aplicada em poucas horas para tráfego do tipo leve, o maior controle de qualidade, cura mais rápida, maior resistência à compressão e ao arrancamento, e melhor acabamento, quando comparada com a argamassa convencional. Além disso, em sua composição pode ser utilizado diversos resíduos oriundos de outros processos, como fonte de adições para substituir parte do cimento Portland, ou melhorar as características do produto final, influenciando nas propriedades reológicas e consequentemente, na redução do custo através da eliminação do desperdício de material e da economia com mão de obra, conferindo vantagens ambientais e econômicas (ALRIFAI *et al.*, 2013).

A redução do cronograma da obra é um dos principais fatores que podem levar empresas empregarem essa tecnologia. Diversos Pesquisadores (EGLE, 2010; GOMES, 2013; BLANCO E BRITO, 2014) concluem que, quando comparada, a produtividade da produção do sistema de piso autonivelante é muito maior que os sistemas de piso convencionais. Onde



uma aplicação que demoraria 4 ou 5 dias no sistema convencional, passa a ser executada em 4 ou 5 horas, no sistema autonivelante, para uma equipe de mão de obra com 5 pessoas, por exemplo. Possibilitando a diminuição do número de mão de obra. Outra vantagem, é a possibilidade da redução da espessura do contrapiso, que variam de 5 a 2 mm para pisos industriais e de 2 a 6 mm para pisos residenciais ou comerciais, implicando na diminuição do peso final do sistema de piso (RUBIN, 2015).

Em sua pesquisa, Rubin (2015) verificou que as argamassas autonivelantes estudadas ofereceram propriedades mecânicas mais satisfatórias do que as argamassa de contrapiso do tipo “farofa” com traço 1:6 especificadas pela NBR 13753 (ABNT, 1996). Além disso, explana outras vantagens técnicas do contrapiso autonivelante em detrimento do método convencional, como: aceleração da produtividade na execução, diminuição do número de trabalhadores para a produção e aplicação da argamassa, redução das perdas de materiais e melhor controle da espessura do contrapiso, favorecendo a diminuição do peso final do sistema de piso.

Contudo, poucas empresas tem o domínio da técnica de produção e aplicação deste material. Além disso, as argamassas autonivelantes possuem desvantagens técnicas como não poder ser empregada em superfícies inclinadas em função da sua fluidez, pois dificultaria o nivelamento. Outra dificuldade é a sua grande demanda de água necessária para que possa atingir a fluidez satisfatória, garantindo suas propriedades de resistência e durabilidade.

### **2.2.6 Materiais constituintes**

A argamassa autonivelante não requer nenhum tipo de material especial. Os materiais devem possuir características específicas e teores na mistura que proporcionem a fluidez adequada sem haver segregação da argamassa (MARTINS, 2009). Para isso, é importante levar em consideração no preparo da mistura as propriedades físicas dos compostos, como forma, superfície específica, índice de finura, tamanho, distribuição e empacotamento das partículas, bem como as propriedades físico-químicas, como as reações de hidratação e interações entre a quantidade de água/ materiais secos (FELEKOĞLU *et al.*, 2006).

Ainda segundo Felekoğlu *et al.* (2006), a dosagem dessas argamassas deverá ser definida quando o traço escolhido proporcionar uma melhor otimização dos seus compostos para a consistência requerida. Contudo, não há procedimentos de dosagens normatizados, nem

equipamentos, logo, não há um parâmetro fixado sobre os efeitos de todos os fatores que determinam as propriedades das argamassas autonivelantes e suas complexas formulações.

De acordo com Nakakura e Bucher (1997), a formulação das argamassas autonivelantes é composta por um aglomerante, como o cimento Portland (de 25 a 45% da massa total) e agregado miúdo (de 40% a 60%). Uma série de aditivos químicos e adições minerais ocupam de 10 a 15% da composição da massa, esses têm por objetivo modificar as características reológicas da pasta no estado fresco e suas propriedades físico-mecânicas, no estado endurecido. A água de amassamento corresponde a cerca de 20 a 30% da massa seca total da mistura, dependendo dos requisitos operacionais e a finalidade almejada (acabamento ou regularização).

No que se refere à microestrutura da argamassa autonivelante, exemplificada na Figura 2.3, por se tratar de uma concentração de sólidos, o equilíbrio da suspensão de partículas exerce influência no desempenho reológico da argamassa.

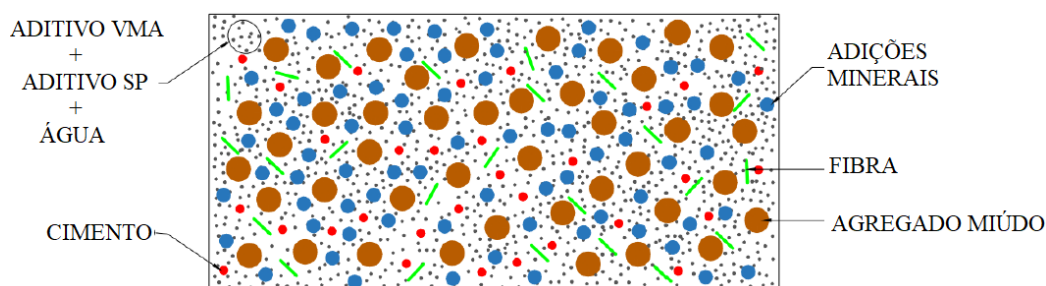


Figura 2.3 – Dispersão das partículas componentes da argamassa autonivelante.  
Fonte: (SILVA, 2016) - Adaptado

Embora existam argamassas autonivelantes de diferentes bases (cimento, sulfato de cálcio, magnésio, entre outras), este trabalho abordará somente as argamassas autonivelantes cimentícias, que tenham como materiais de composição agregado miúdo (areia), adição mineral (RBMG), aditivos (superplastificante e modificador de viscosidade) e água.

### 2.2.6.1 Cimento

Conforme Martins (2009), na confecção de autonivelantes não existe um cimento específico a ser utilizado. No entanto, o cimento deve ser escolhido conforme as características almeçadas, devendo apresentar características fundamentais e indispensáveis que irão influenciar nas propriedades mecânicas e reológicas das argamassas autonivelantes, como elevada resistência à compressão inicial e final, aumento da fluidez da argamassa -

dependendo da finura e superfície específica do cimento; e aumento da reatividade e velocidade das reações químicas durante a pega e o endurecimento da argamassa.

Os cimentos mais finos propiciam que as reações de hidratação ocorram mais rapidamente deixando o material mais suscetível ao processo de retração e o alto consumo de cimento produz materiais menos deformáveis, por conseguinte, com maior risco de fissuração (BAUER e SOUSA, 2005). A EFNARC 2002 determina limites para o consumo do cimento, sendo o máximo 500 kg/m<sup>3</sup> e mínimo de 300 kg/m<sup>3</sup> para controlar a retração. A substituição de uma porcentagem de cimento por algum tipo de adição mineral em sua composição pode ser a solução para evitar ou diminuir problemas ocasionados pelo cimento.

Dentre as características do cimento a ser escolhido deve-se levar em consideração, principalmente, as características de a capacidade de adsorver o aditivo superplastificante. Quando se trata de finura e de parâmetros reológicos, quanto maior a superfície específica do cimento, maior a quantidade destas partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre elas, reduzindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura (MELO, 2005).

#### ***2.2.6.2. Agregado miúdo***

Para a produção de argamassas autonivelantes deve-se levar em consideração a distribuição granulométrica do agregado miúdo, para que este não apresente problemas de fluidez. Areias naturais com granulometria fina são as mais indicadas para o uso nas argamassas autonivelantes. Sendo assim, as areias encontradas na região metropolitana de Belém propícias para o desenvolvimento deste tipo de material, devido ao seu baixo módulo de finura. Alguns autores (LIBRE et al., 2010; RIZWAN e BIER, 2012) utilizaram grãos com dimensões máximas de 2mm.

Souza (2013), diz que na composição das argamassas é necessário adequar a composição granulométrica do agregado miúdo conforme a sua aplicação. Devendo levar em consideração o preenchimento dos vazios existentes na zona de transição agregado miúdo na pasta, pois, a composição da curva granulométrica é um fator relevante na análise do teor de areia e finos da argamassa.

Para Martins (2009), a escolha do agregado miúdo a ser utilizado nas formulações das argamassas autonivelantes deve ser em função da granulometria, de preferência contínua e mais fina possível, pois esta propriedade é responsável pela coesão e viscosidade do material. Os agregados que possuem frações mais grossas podem aumentar a viscosidade da matriz, e

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. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a seleção do agregado miúdo está condicionada à demanda de água, fator essencial por sua influência sobre a coesão e fluidez. Agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas são preferíveis para produção de argamassas autonivelantes porque aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água. Quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, maior será a resistência ao cisalhamento das argamassas, dificultando a deformabilidade. Deve-se levar em conta ainda que os autonivelantes necessitam adição de finos e, quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo, mais adequado para a produção de concretos de elevada coesão.

Christianto (2004) recomenda que para que se atinja o autoadensamento dos componentes da mistura, os teores de areia devem se limitar a 40% do volume total da argamassa. Em contrapartida, pesquisadores como Nakakura e Bucher (1997) sugerem limites que variam de 40 a 70% da massa total da mistura, pois argumenta que, com o aumento do teor de areia, perde-se resistência de aderência. Por outro lado, a compactidade da massa aumenta, diminuindo a quantidade de ar incorporado e garantindo uma resistência mecânica maior.

Nesta pesquisa, uma questão importante é o fato de se produzir a argamassa autonivelante com areias da região de Belém-PA, que são muito finas (módulo de finura < 1,90), com forma arredondada e textura lisa, de modo que se possa avaliar a sua eficácia dada o seu efeito positivo nas propriedades reológicas das argamassas com e sem adição mineral. Pois, apesar de aumentar a superfície específica, podem contribuir para o aumento da coesão da argamassa, sendo a maior demanda de água compensada com o uso do superplastificante.

### ***2.2.6.3. Adição mineral***

Adições minerais são uns dos componentes essenciais para sistemas de argamassa autonivelantes. Pois, a resistência à segregação é uma das características almejadas para esse tipo de produto, sendo controlada pela viscosidade adequada. De acordo com Rizwan e Bier (2012), esta propriedade é obtida através da utilização de adições minerais e uma baixa relação de água/aglomerante, necessitando ou não de algum aditivo químico modificador de viscosidade.

O teor adequado de adições minerais em formulações de argamassas autonivelantes é importante para que a demanda de água do sistema, teor de cimento, retração, calor de

hidratação, adensamento e a microestrutura possam ser otimizados e assim possamos obter maior resistência e durabilidade em sistemas de auto adensamento. Conforme Seifert *et al.* (2012), esses atributos influenciam no auto nivelamento, viscosidade controlada, adensamento rápido, tempo de pega rápido, rápido ganho de resistência, secagem rápida, estabilidade dimensional, resistência final elevada, durabilidade da superfície e na aderência com o substrato.

Conforme Silva (2016) tais adições alteram a viscosidade, de modo a aumentar a densidade da coesão da argamassa, controlando a exsudação e a segregação. No entanto, para Martins (2009) há um limite no uso das adições minerais, pois a presença de finos requer maior consumo de água em função do aumento da área específica e possibilita a ocorrência de retardo de pega e aumento de retração devido ao aumento do calor de hidratação que acarretará no surgimento de fissuras.

Dentre as possibilidades de adições minerais empregadas em matrizes cimentícias, tem-se o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), a qual será utilizada no presente estudo. Esta é um material inerte, ou seja, não apresenta reação química com os outros componentes da mistura. Nesse sentido, ele é normalmente utilizado com o intuito de preencher os vazios existentes entre os grãos, de modo a contribuir para com o empacotamento das partículas. Kumayama (2014), em sua pesquisa, verificou que o resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) apresentou finura semelhante à do cimento, e mostra-se adequado para a utilização como finos na fabricação do concreto autoadensável.

A composição química do RBMG é diversificada, e no geral, o resíduo é formado, em grande parte, por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) e óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), contudo, encontra-se também o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que pode aparecer em maior quantidade devido ao desgaste das lâminas de corte (APOLINÁRIO, 2014). Sua contribuição no processo de hidratação nas primeiras idades pode ser mais intensa que nos traços sem adição. A intensificação da hidratação pode ser explicada pela distribuição de pequenas partículas em torno do grão de cimento, que torna a camada de hidratos mais fina e mais espalhada, acelerando o processo de hidratação do cimento, conforme observado na Figura 2.4 (LAWRENCE *et al.*, 2003 *apud* NENEVÊ, 2017).

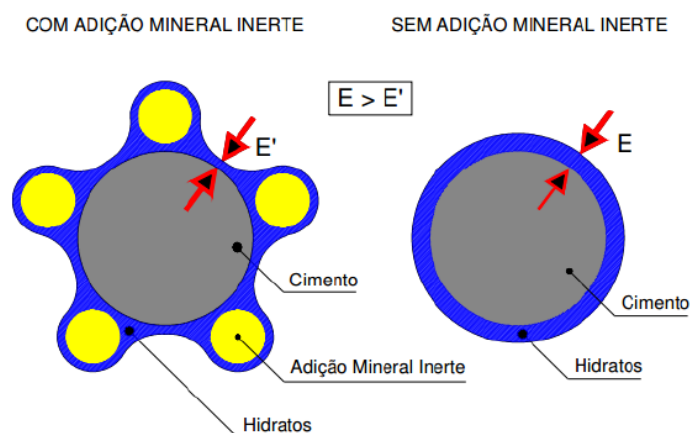


Figura 2.4 – Representação esquemática da intensificação do processo da hidratação do cimento em matrizes com e sem adição mineral inerte.

Fonte: Lawrence *et al.* (2003) *apud* Nenevê (2017).

#### 2.2.6.4. Aditivos Químicos

Para o estudo de argamassas autonivelantes, é indispensável o uso de aditivos químicos, que visa obter características reológicas desejadas. Todavia, conforme os estudos de Silva (2016) são possíveis obter formulações com uma diversidade significativamente reduzida de aditivos, porém sem descartar seu uso. Dentre os aditivos químicos existentes, os aditivos superplastificantes e os aditivos modificadores de viscosidade são considerados os mais importantes para a formulação e produção de argamassas autonivelantes (CHRISTIANO, 2004). Sendo o aditivo superplastificante utilizado para garantir uma fluidez adequada e reduzir a tensão de escoamento, além de reduzir o volume de água da mistura; e o aditivo modificador de viscosidade para auxiliar na estabilidade da mistura (MARTINS, 2009).

Castro (2007) relata quanto a importância do controle da influência dos aditivos sobre o comportamento reológico das argamassas e concretos no estado fresco. Pois, a incorporação destes regulam a dosagem da mistura à sua finalidade (ex: bombeamento), visto que é necessário fluidez suficiente e compacidade ótima, com teor de água limitado, para se obter uma resistência mecânica aceitável.

A seguir serão apresentados os aditivos superplastificante e modificador de viscosidade utilizados nesta pesquisa para a produção das argamassas autonivelantes.

##### a) Aditivos Superplastificantes (SP)

Geralmente, os SP são à base de policarboxilatos, e tem como função promover uma melhor dispersão das partículas de cimento; as partículas de cimento absorvem as partículas dos

superplastificantes que por sua vez possuem base polimérica orgânica hidrossolúveis, estes são relativamente caros, contudo, ao serem produzidos para um fim específico, suas características são otimizadas tornando a aplicação do produto viável (METHA e MONTEIRO, 2014). A Figura 2.5. demonstra uma representação esquemática do mecanismo de dispersão dos superplastificantes a base de policarboxilatos.

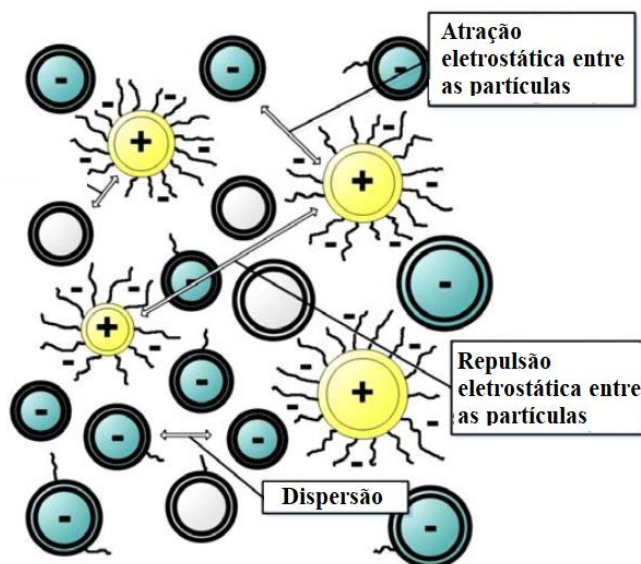


Figura 2.5. Representação esquemática do mecanismo de dispersão dos superplastificantes com base policarboxilato  
Fonte: Carvalho (2015) - adaptado.

O efeito redutor de água nas argamassas e concretos é verificado através do aumento da fluidez. Essa fluidez é consequência da dispersão por repulsão eletrostática, onde os polímeros aumentam a carga negativa do cimento, fazendo com que suas partículas de hidratos, que possuem o mesmo sinal se dispersam (TUTIKAN e DAL MOLIN, 2008).

Libre *et al.* (2010) avaliaram a estabilidade e fluidez de argamassas autonivelantes compostas por aditivos químicos e adições minerais. Os resultados dos experimentos realizados demonstraram que a relação a/c e o conteúdo de aditivo SP têm uma grande influência na fluidez das misturas. Em sua pesquisa a adição de 1% de aditivo SP, com base policarboxílico, em massa de aglomerante, melhorou a fluidez da argamassa em até 30%. Concluindo-se que é preferível aumentar o teor de aditivo SP do que aumentar a relação a/c para conseguir o escoamento necessário, e a obtenção de misturas mais estáveis.

Martins (2009) sintetiza a finalidade dos aditivos SP. São elas:

- redução do consumo de água para uma mesma consistência, consequentemente, aumentando a resistência e a durabilidade de concretos e argamassas;
- aumento da fluidez da mistura sem modificar a quantidade de água;
- redução no consumo de cimento, mantendo a consistência e a resistência à compressão com o objetivo de reduzir custos e ainda reduzir a retração, fluência e tensões térmicas;

### b) Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA)

O aditivo modificador de viscosidade (VMA – do inglês: *Viscosity Modifying Admixtures*) pode ser empregado quando o teor de finos for limitado, com objetivo de promover a viscosidade adequada e garantir a resistência à segregação, homogeneidade da mistura e diminuição da exsudação (MELO, 2005). Em contrapartida, Libre *et al.* (2010) ressalta que este produto tem efeito insignificante sobre a viscosidade, e seu efeito é mais expressivo sobre a estabilidade da mistura.

Li *et al.* (2018) explica que o VMA atua na viscosidade melhorando a interação entre as partículas existentes no interior da pasta de cimento, por meio da formação de uma “rede”, que detém a água e mantém as partículas finas da mistura em suspensão, fornecendo maior coesão, e consequentemente, evitando a ocorrência de segregação e exsudação. Entretanto, o aditivo possui a capacidade de reduzir a tensão superficial da água da mistura, aumentando a possibilidade de incorporação de bolhas de ar na mistura.

A Figura 2.6 demonstra uma representação esquemática sobre a atuação do VMA, por meio da formação de uma “rede”, sobre os grãos de cimento.

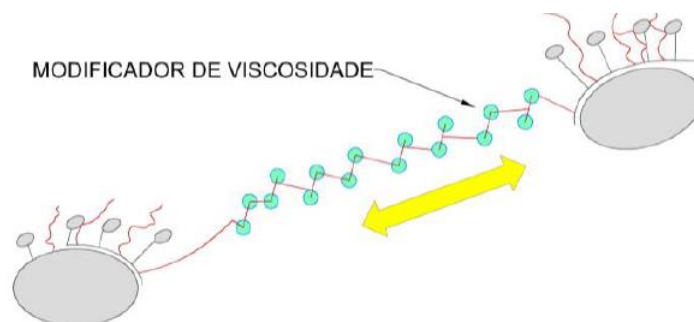


Figura 2.6. Representação esquemática do mecanismo de atuação do VMA sobre os grãos de cimento.

Fonte: Souza *et al.* (2013)



Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) é necessário um controle quanto ao teor do modificador de viscosidade e sua compatibilização com o superplastificante para evitar problemas com retardamento da pega, alteração no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, coesão excessiva e aumento da retração por secagem, que deve ser esperado quando se empregam promotores de viscosidade em dosagens elevadas.

Martins (2009) indicou para pasta fluida e sem segregação, teores de 0,9% de VMA e 0,5% de SP em relação à porção de cimento. O mesmo sintetiza algumas vantagens observadas com a utilização do VMA, são elas:

- flexibilidade na escolha de materiais e procedimentos de lançamentos;
- obtenção de níveis de fluidez que fazem com que o concreto alcance grandes distâncias horizontais;
- melhoria da homogeneidade na mistura;
- permanência da coesão durante queda livre.

Para Melo (2005), a utilização desse aditivo pode gerar em concretos e argamassas um comportamento reológico chamada pseudoplástico, ou seja, redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Como a argamassa autonivelante trata-se de um material fluido, com uma alta taxa de cisalhamento, a viscosidade diminui, facilitando a execução. Desta forma, após a aplicação da argamassa fluida, a viscosidade tende a aumentar e garante a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas.

### **2.2.7 Aspectos reológicos**

A Reologia é a ciência que estuda o fluxo e as deformações dos materiais quando submetidos a determinadas ações mecânicas (KIRYU, 2006). Para entender as características reológicas dos materiais de base cimentícia, como pastas, argamassas ou concretos, é necessário entender as propriedades reológicas: tensão de cisalhamento e viscosidade aparente. Visto que, estes materiais apresentam-se como fluidos, no estado fresco, e esses parâmetros reológicos irão influenciar diretamente o seu comportamento no estado endurecido, de forma que o domínio de suas características é fundamental e deve ser levado em conta na hora da produção e aplicação do produto.

De acordo com Castro (2007), a tensão de cisalhamento, também chamada de tensão de escoamento, pode ser entendida como a tensão mínima necessária para que o processo de

escoamento se inicie, a mesma está relacionada ao estado de dispersão das partículas. A viscosidade aparente, por sua vez, é uma medida de resistência ao escoamento induzido pelo cisalhamento, podendo também ser compreendida como o atrito interno do sistema. Complementando, Kiryu (2006) aponta que a viscosidade é um indicativo de coesão e estabilidade entre as partículas que constituem o fluido.

Geralmente, esses parâmetros são descritos na literatura para a pasta de cimento, não levando em consideração a contribuição dos agregados, devendo a pasta imitar o cisalhamento que é submetido em argamassas e concretos. Quando o concreto ou a argamassa são submetidos a uma determinada tensão de cisalhamento, a velocidade de cisalhamento no interior das partículas sólidas de agregados é zero, uma vez que as partículas sólidas de agregação não podem se deformar (RAMACHANDRAN; BEAUDOIN; HACKLEY; FERRARIS, 2001 *apud* SATO, 2015).

Controlar o comportamento quanto ao escoamento das pastas de cimento é fundamental para a produção de argamassas e concretos bem-sucedidos. As propriedades da argamassa, em seu estado fresco, podem ser relacionadas com o comportamento da pasta cimentícia. Pois, caso as propriedades da argamassa no estado fresco não forem satisfatórias, é improvável que as desejáveis propriedades do material endurecido poderão ser alcançadas (SATO, 2015). Diversos métodos possibilitam o estudo dos parâmetros reológicos, dentre eles, os mais utilizados são o ensaio de miniabatimento e o método do cone de Marsh.

O ensaio de miniabatimento está relacionado com a tensão de escoamento, demanda pouco material para realização do ensaio e avalia a pasta a partir de um comportamento muito “estático”. Já o método de Marsh está relacionado com a viscosidade plástica, demanda muito material e avalia a pasta em condições “dinâmicas”. Contudo, tanto o ensaio do miniabatimento e o método de Marsh são considerados ensaios empíricos, cada um avalia um único parâmetro, portanto sugere-se o uso em conjunto. Têm como desvantagem a limitação dos mesmos para pastas que não apresentam alta fluidez (CASTRO, 2007).

De uma forma mais automatizada, o viscosímetro ou reômetro também possibilitam a avaliação das propriedades de fluxo e escoamento, porém de forma simultânea, diferentemente dos métodos empíricos. Esse método demanda pouquíssimo material e relaciona parâmetros reológicos por meio de curvas “tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento” e “viscosidade aparente *versus* taxa de cisalhamento”. Segundo De Larrard *et al.* (1996 *apud* SATO, 2015), a utilização desses equipamentos não tem a finalidade somente de medir o maior número de parâmetros possíveis, mais também, avalia-se as quantidades

físicas que podem estar cientificamente relacionadas aos diversos estágios de utilização de argamassas e concretos.

Quanto ao estudo de sistemas autonivelantes, para que avanços tecnológicos sejam realizados na compreensão e controle desses sistemas perante as constantes reológicas, muitos autores acreditam que os procedimentos de ensaio devem ser direcionados para bases quantitativas mais fundamentais (taxa de cisalhamento, tensão de escoamento, viscosidade, perfil reológico do material) que não são possíveis de se obter através dos ensaios empíricos. Contudo, é necessário a designação de um método para determinar as proporções de materiais constituintes.

Sob o ponto de vista reológico argamassas autonivelantes atuam como uma suspensão de partículas, ou seja, mistura do tipo sólido/líquido na qual as partículas se distribuem de forma relativa e uniforme através do meio líquido; e é formada por agregado miúdo e pela pasta cimentícia (MARTINS, 2009). Nestas, a tensão de cisalhamento e a viscosidade aumentam devido ao contato entre partículas e do aumento da superfície de contato. Segundo Castro (2007), as adições influenciam o comportamento do escoamento da pasta de cimento sem qualquer alteração da composição ou das características dos agregados. Se o escoamento for facilitado pelo cisalhamento ou pela vibração, a viscosidade aparente geralmente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (fluido pseudoplástico). Assim, torna-se justificável tentar selecionar adições químicas e minerais apenas ensaiando pasta, como é realizado no presente estudo.

Pastas de cimento muito concentradas, indicam estabilidade da mistura, visto que estão sob um regime reológicos onde as suspensões podem aproximarem do conceito de empacotamento máximo quanto as propriedades físicas e mecânicas de materiais granulares necessário para preencher os vazios. Para compreender o comportamento reológico dessas pastas, no estado fresco, diversos modelos têm sido utilizados para uma classificação reológica dos fluidos denominados como newtoniano e não-newtoniano. Entre os modelos mais utilizados estão os modelos de Bingham (comportamento linear) e de Herschel-Bulkley (comportamento não-linear), que leva em consideração o comportamento pseudoplástico dessas suspensões concentradas (CASTRO, 2007)

A Figura 2.7 demonstra a classificação dos fluidos conforme seu comportamento reológico.

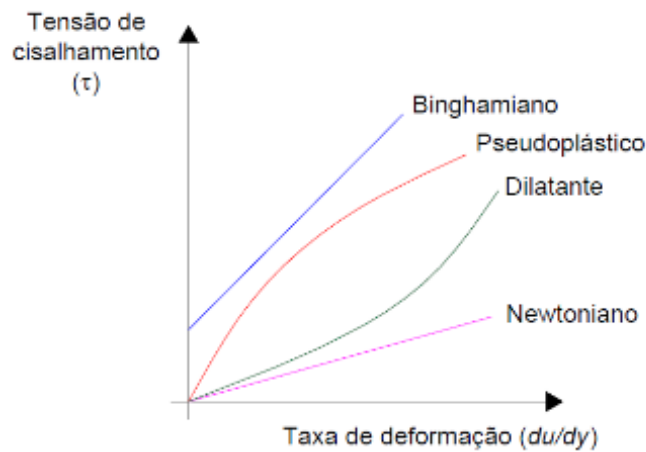


Figura 2.7 – Classificação dos fluidos segundo seu comportamento reológico.  
 Fonte: (FOX e McDONALD, 1998 *apud* CASTRO, 2007)

A reologia de concretos e argamassas no estado fresco é muito complexa devido às suas composições e às mudanças químicas acompanhadas. Os modelos reológicos que relacionam a concentração das misturas com a viscosidade são usados para descrever somente o comportamento do escoamento de pastas de cimento. Um modelo puramente viscoso (caso particular do modelo de Binghamiano) pode ser suficiente para descrever corretamente o comportamento de pastas frescas estáveis (CASTRO, 2007).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, propôs-se o desenvolvimento de argamassas autonivelantes empregando-se separadamente dois materiais com diferentes modos de atuação, sendo eles: resíduo do beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e o aditivo promotor de viscosidade (VMA), utilizados como adição sobre a massa de cimento. Para a dosagem, primeiramente foi realizado o estudo reológico das pastas cimentícias com adição do RBMG ou do VMA, visando avaliar o efeito da incorporação dessas adições. A posteriori, o estudo da argamassa para definição do teor de aditivo superplastificante (SP). Assim, foram estudadas três argamassas autonivelantes:

- argamassa de referência (sem adições);
- argamassa com adição de RBMG;
- argamassa com adição de VMA;

O programa experimental empregado foi organizado em quatro etapas de forma a estabelecer fatores controláveis em todas as fases da matriz experimental, para assim, obter variáveis de reposta, por meio dos ensaios realizados. E assim, confrontá-las com os parâmetros normativos e as referências bibliográficas estudadas, avaliando e compreendendo o comportamento das argamassas autonivelantes.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma das etapas da matriz experimental desta pesquisa e a Figura 3.2 apresenta um organograma da caracterização do RBMG, para melhor entendimento da metodologia experimental empregada.

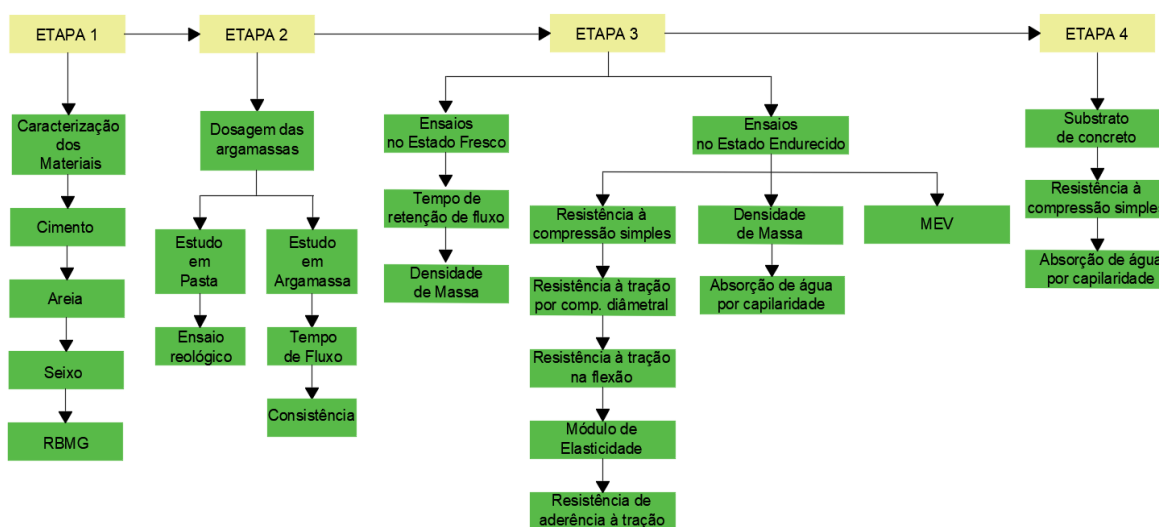


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do programa experimental

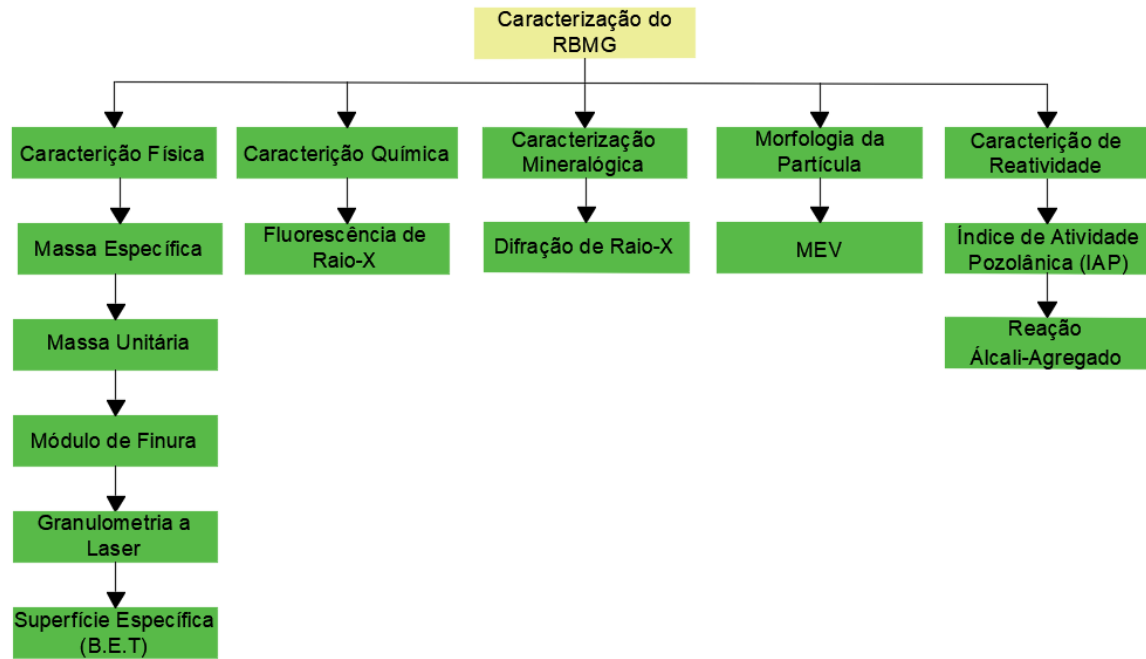


Figura 3.2 – Organograma da caracterização do RBMG.

### 3.1. ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Pois, este cimento possui elevada finura, podendo contribuir para uma maior fluidez da mistura. Suas características físicas foram obtidas por meio dos ensaios de massa específica conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), massa unitária de acordo com a NBR 45 (ABNT, 2006), determinação do índice de finura por meio da peneira nº 200 conforme NBR 11579 (ABNT, 2013), realizados no Laboratório de Engenharia Civil – LEC/UFPA.

Também foram realizados os ensaios para determinação de área superficial específica e volume do poro, pelo método B.E.T. (Brunauer Emmett Teller) por adsorção de nitrogênio, realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Engenharia Química da UFPA. E, o ensaio para determinação da granulometria do cimento por meio da análise granulométrica a laser, materializada por um granulômetro à laser da marca Fritsch GmbH, modelo “Analysette 22” Micro Tec Plus, com um intervalo de medida de 0,08 a 2.000  $\mu\text{m}$ , que permite precisão necessária pela presença de grãos finos menores que 0,075mm, realizada no Laboratório de Análise Mineralogia, Geoquímica e Aplicações da Universidade

Federal do Pará. Este último, foi realizado com o objetivo de comparar as granulometrias do cimento e do RBMG, este resultado é apresentado em conjunto com a granulometria do RBMG, no Capítulo 4.

A Tabela 3.1 apresenta o resultado da caracterização física desse material. Conforme a mesma, o cimento utilizado atende a todos os requisitos normativos indicados nos métodos de ensaios de sua caracterização.

Tabela 3.1 – Caracterização física do cimento CP V-ARI.

<b>Características avaliadas</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificações</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,99	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,41	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Índice de Finura (%)	< 6,00	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /g)	9,194	B.E.T
Volume do Poro	0,0012	B.E.T

### **3.1.2. Agregados**

Foram empregados neste trabalho agregados graúdo e miúdo, ambos disponíveis na região metropolitana de Belém-PA. Para a caracterização e utilização, os materiais tiveram sua umidade controlada por meio de secagem em ambiente natural, exposto ao sol. Todos os ensaios para a caracterização foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil – LEC/UFPA.

#### **3.1.2.1. Agregado Miúdo**

Na confecção das argamassas autonivelantes foi utilizada areia quartzosa de origem natural. O agregado foi caracterizado quanto suas propriedades físicas, de acordo com os ensaios de massa específica recomendado pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa unitária conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006), a determinação da distribuição granulométrica segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003) e índice de vazios, conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A Tabela 3.2 apresenta as características físicas e a Figura 3.3 demonstra a curva granulométrica do agregado miúdo utilizado nas argamassas autonivelantes.

Tabela 3.2 – Caracterização física do agregado miúdo.

Características avaliadas	Resultados	Especificações
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,57	ABNT NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,61	ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura (mm)	1,95	ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios	37%	ABNT NBR NM 45 (2006)

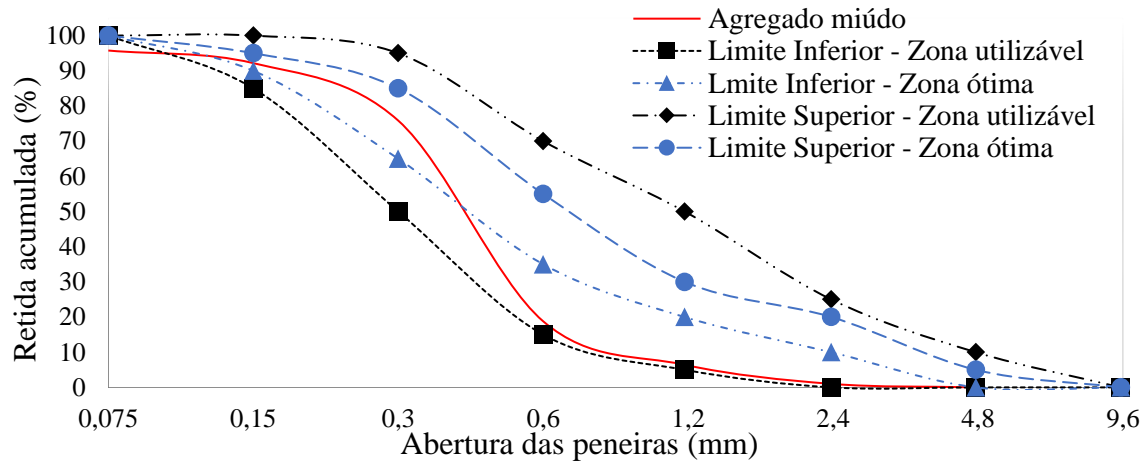


Figura 3.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) a areia foi classificada como fina e contínua. Sendo assim, propícia para o uso na argamassa estudada por poder promover homogeneidade, além de melhorar a fluidez e deformabilidade da mistura.

### 3.1.2.2. Agregado Graúdo

Na confecção dos substratos de concreto para aplicação das argamassas, foi utilizado o seixo rolado de origem quartzosa e de maior abundância na região, proveniente de leitos dos rios. O agregado foi caracterizado quanto suas propriedades físicas, massa específica recomendado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), massa unitária conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006) e composição granulométrica segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A Tabela 3.3 apresentam as características físicas e a Figura 3.4 demonstra a curva granulométrica do agregado graúdo contido na produção do substrato de concreto utilizado para a aplicação das argamassas.



Tabela 3.3 – Caracterização física do agregado graúdo.

Características avaliadas	Resultados	Método
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,50	ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura	6,25 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima	19 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)

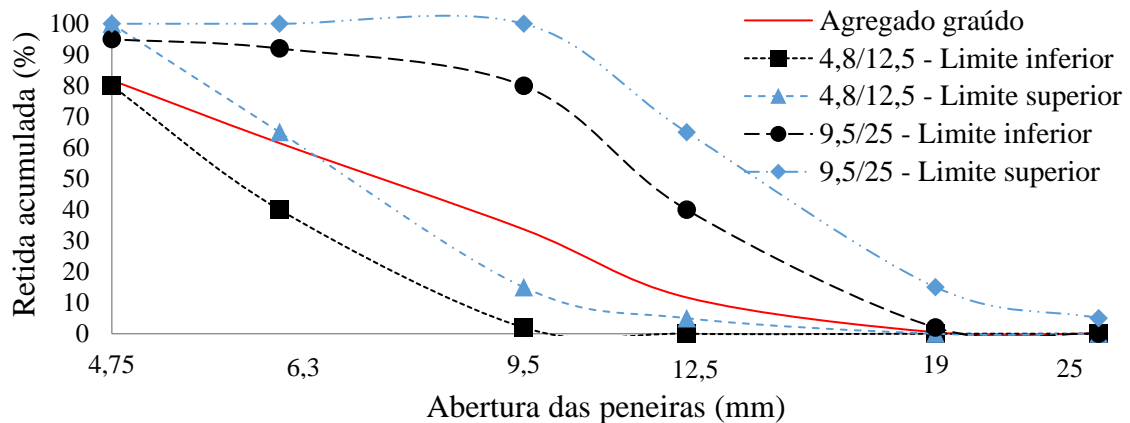


Figura 3.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

### 3.1.3 Água de amassamento

Utilizou-se água proveniente da rede pública de abastecimento local, fornecida e tratada pela Universidade Federal do Pará – UFPA.

### 3.1.4 Aditivos Químicos

A fim de se obter as características reológicas desejadas é indispensável o emprego de aditivos na argamassa autonivelante. Foram utilizados o aditivo superplastificante, para garantir maior fluidez pela redução da tensão de escoamento, e o aditivo modificador de viscosidade, para promover uma viscosidade adequada, mantendo a estabilidade da mistura sem a ocorrência de segregação, com o propósito de comparar seu desempenho como o RBMG.

Os aditivos estão especificados a seguir.

#### 3.1.4.1. Aditivo Superplastificante (SP)

O superplastificante utilizado é constituído por uma solução aquosa a base de polímeros policarboxílatos. A sua caracterização foi obtida com o fabricante e está apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características dos aditivo superplastificante.

<b>Características</b>	<b>Dados do Fabricante</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,09
Dosagem recomendada (%) (sobre a massa de cimento)	0,2 a 5
Estado físico	Líquido
Cor	Marrom

### **3.1.4.2. Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA)**

O modificador de viscosidade empregado é uma solução líquidoviscoso a base de polímeros. A sua caracterização foi obtida com o fabricante e está apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características dos aditivo superplastificante.

<b>Características</b>	<b>Dados do Fabricante</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,01
Dosagem recomendada (%) (sobre a massa de cimento)	0,1 a 0,6
Estado físico	Líquidoviscoso
Cor	levemente amarelada a cinza

### **3.1.5. Adição Mineral (Fíler)**

#### **3.1.5.1. Procedência**

Empregou-se nesta pesquisa, como adição mineral, o resíduo do beneficiamento de mármore e granito (RBMG), obtido em uma marmoraria da região metropolitana de Belém. Este resíduo é decorrente do corte e polimento das chapas de mármore e granito (Figura 3.5), sendo sua produção gerada no processo final da cadeia produtiva de comercialização das rochas ornamentais de mármore e granito. As rochas que originaram as placas de mármore e granito são da Jazida Icarai, localizada no município Cachoeiro de Itapemirim, no Estado do Espírito Santo.



a) Placas de mármore e granito.

b) Lâmina de corte das placas.

Figura 3.5 – Etapas da matriz experimental  
Fonte: empresa fornecedora do resíduo.

### 3.1.5.2. Beneficiamento

Como no processo de produção do RBMG é utilizado água nas lâminas de corte, este encontrava-se extremamente úmido em sua coleta, em forma de lama. Assim, o Beneficiamento do resíduo foi realizado, primeiramente, por meio da secagem do material ao ar livre, seguido da secagem em estufas à 100°C, até que o material atingisse forma de pó. Não foi realizado peneiramento para separação granulométrica. A Figura 3.6 - (a) apresenta o resíduo antes do beneficiamento, em forma de lama; e (b) mostra o resíduo seco após o beneficiamento, em forma de pó.



a) Lama de RBMG



b) RBMG seco (pó)

Figura 3.6 – Aspecto do resíduo antes e após o beneficiamento.  
Fonte: autora

### 3.1.5.3. Caracterização do RBMG

Para o conhecimento da composição do material e suas características, o RBMG foi submetido a diversos ensaios para análise de suas características físicas, químicas, mineralógicas, microestrutural e de seu potencial reativo.

#### 3.1.5.3.1. Caracterização Física

A caracterização física do RBMG incluiu os ensaios descritos na Tabela 3.7.

Tabela 3.6 - Ensaios de Caracterização Física do RBMG

<b>Características Físicas</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Laboratório</b>
Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	LEC/UFPA
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	LEC/UFPA
Módulo de Finura	NBR 11579 (ABNT, 2012)	LEC/UFPA
Granulometria	Granulometria à laser	LAMIGA/UFPA
Superfície específica	B.E.T	LACER/UFRGS

A massa específica do RBMG foi determinada pelo método aplicado ao cimento portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de *Le Chatelier*. Por conseguinte, a massa unitária foi determinada pelo método “C” descrito na norma, empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto; e, a determinação do módulo de finura por meio da peneira nº 200.

Com relação a definição da granulometria do resíduo foi realizada a análise granulométrica à laser, que foi materializada por um granulômetro à laser da marca Fritsch GmbH, modelo “Analysette 22” Micro Tec Plus, com um intervalo de medida de 0,08 a 2.000  $\mu\text{m}$ , que permite precisão necessária pela presença de grãos finos menores que 0,075mm.

Por fim, a determinação de área superficial específica ocorreu pelo método B.E.T. (Brunauer Emmett Teller) por adsorção de nitrogênio. Tal método é baseado na determinação da quantidade de nitrogênio gasoso necessário para cobrir a superfície de uma amostra.

#### 3.1.5.3.2. Caracterização Química

A caracterização química do RCMG ocorreu por meio da Fluorescência de raios-X (FRX), realizada por Espectrometria de Fluorescência de raios-X, realizada no Laboratório de Análises Químicas de Rochas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O equipamento utilizado foi um espectrômetro WDS seqüencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. Na preparação utilizou-se: Pastilha Prensada - 5 g de amostra + 1,5 g de aglomerante (cera de parafina), respectivamente, a mistura foi prensada com uma carga de 20 toneladas. As 66 aquisições e tratamento dos dados foram realizados por meio do software SuperQ Manager da PANalytical.

#### *3.1.5.3.3. Caracterização Mineralógica*

A caracterização mineralógica ocorreu por meio da Difração de raios X (DRX), pelo método do pó. Esta técnica identifica as fases mineralógicas (amorfa ou cristalina) presentes em um material. A mesma foi realizada no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

O equipamento utilizado foi um difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com goniômetro PW 3050/60 ( $\Theta/\Theta$ ) e com tubos de raios-X cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha$  1,540598 Å), modelo PW3373/00 com foco fino longo (2200 W – 60 Kv) e filtro  $K\beta$  de Níquel. O detector utilizado foi do tipo RTMS, X'Celerator. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0,5s e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg ( $2\Theta$ ) de 0° e 70°. A aquisição de dados dos registros foi realizada com o software *X'Pert Data Collector*, versão 2.1ª, e os tratamento dos dados como o software *X'Pert HighScore*, versão 2.1b, da PANalytical.

#### *3.1.5.3.4. Morfologia da Partícula*

A morfologia da partícula foi determinada por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado ao sistema de espectroscopia por energia dispersiva (EDS). As imagens microscópicas são geradas com aparência tridimensional que possibilitam a análise visual da forma e tamanho dos grãos. A análise da microscopia fornece informações estruturais e a composição química das partículas do resíduo.

O equipamento utilizado para a produção das micrografias foram um microscópio eletrônico de varredura, modelo VEJA 3 LMU, marca TESCAN e um sistema de micro-análise via EDS, do modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV, marca Oxford. Esta análise foi realizada no Instituto Federal do Pará, no Laboratório de Metalografia.

As amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas, e posteriormente, submetidas a duas metalizações com finas camadas de ouro, durante 80 segundos.

### 3.1.5.3.5 Caracterização de Reatividade

Para avaliar o índice de atividade pozolânica (IAP) do resíduo, seu desempenho foi analisado com cal e cimento. Além disso, foi realizado o ensaio de reação álcali-agregado (RAA) para conhecer sua potencialidade reativa.

- Índice de atividade pozolânica com cal -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

De acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015) o índice de atividade pozolânica com cal é o obtido por meio da resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos moldados conforme a NBR 7215 (ABNT, 1997), os quais possuem dimensão de 100x50 mm. A resistência deve ser superior a 6 MPa para que o material seja caracterizado como pozolana conforme a NBR 12653 (ABNT, 2015).

O traço da argamassa foi o mesmo prescrito pela NBR 5751 (ABNT, 2015), onde são necessários 104g de hidróxido de cálcio, 936g de agregado miúdo em conformidade com a NBR 7214 (ABNT, 2015) - sendo 234g de cada uma das quatro frações; e, a quantidade de material pozolânico calculado pela Equação 3.1.

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104g \quad \text{Equação 3.1}$$

Sendo:

m = quantidade de pozolana em massa;

$\delta_{poz}$  = valor da massa específica do material pozolânico;

$\delta_{cal}$  = valor da massa específica do hidróxido de cálcio (podendo ser fornecido pelo fabricante).

A quantidade de água é estabelecida pelo o índice de consistência de  $(225 \pm 5)$  mm, determinado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997).

Para este ensaio, foram moldados três corpos de prova, os mesmos foram rompidos nas idades de 1 dia e 6 dias. Na idade de 1 dia, os moldes permaneceram em ambiente à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. Já na idade de 6 dias, os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de  $(55 \pm 2)$  °C, armazenados ainda dentro dos seus moldes.

- Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014) o índice de atividade pozolânica com cimento Portland é obtido aos 28 dias de idade dos corpos de prova. Onde apesar da referida norma indicar a utilização do cimento Portland CP I, o mesmo não foi possível ser adotado por não ter sido encontrado em Belém. Por essa razão, foi utilizado o cimento Portland CP V ARI para a realização deste ensaio, por ser o tipo de cimento com menor teor de adições disponível.

Este índice é calculado pela relação entre a resistência à compressão da argamassa sem material pozolânico (argamassa A) e da argamassa com material pozolânico (argamassa B), descrita pela Equação 3.2.

$$I_{cimento} = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

$I_{cimento}$  = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, onde o resultado é expresso em porcentagem (%);

$f_{CA}$  = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento Portland CP V como material cimentício (argamassa A).

$f_{CB}$  = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento Portland CP V e substituição de 25% de material pozolânico (argamassa B);

Para este ensaio foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos moldados conforme a NBR 7215 (ABNT, 1997), nas dimensões de 100x50mm, para argamassa A e para argamassa B.

- Reação Álcali-Agregado (RAA)

A reação álcali-agregado é uma reação química lenta que ocorre entre alguns minerais presentes nos agregados e hidróxidos alcalinos presentes nos poros de concreto e argamassas, produzindo um gel sílico-alcalino hidrófobo, que gera aumento de volume quando em contato com a água, levando à intensa fissuração da estrutura. São considerados potencialmente reativos aos álcalis, os agregados que apresentarem expansões maiores que 0,19% e, potencialmente inócuos, agregados com expansões inferiores a esse valor (ABNT NBR 15577-4, 2008).

O ensaio é realizado por meio do método da ASTM C 1260, que foi normalizado no Brasil pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008). De acordo com esta norma foram moldados três corpos de prova prismáticos contendo o RBMG. Onde, o traço da argamassa de referência foi o mesmo prescrito pela presente norma, descrevendo que são necessários 440g de cimento Portland padrão, 990g de RBMG e 206,8 litros de água.

Os corpos de prova foram colocados em câmara úmida por 24 horas, e após esse período o procedimento do ensaio seguiu com o desmolde e armazenamento dos prismas de argamassa em um recipiente com água e levados a estufa com temperatura a 80°C durante 24 horas. Posteriormente, foram submetidos a um banho térmico em torno de 80°C de solução de hidróxido de sódio (NaOH), por 28 dias de imersão, somando 30 dias de idade. Foram realizadas leituras periódicas do comprimento das barras conforme preconiza a norma.

Os resultados de expansão são avaliados após 30 dias, contados a partir da data da confecção das barras. O cálculo considera a média do percentual de expansão dos três corpos de prova de argamassa. A depender do resultado pode-se classificar o grau de reatividade do agregado, sendo considerado potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

### **3.2 ETAPA 2: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES**

A dosagem das argamassas autonivelantes foi realizada em duas etapas simultâneas, são elas: estudo em pasta para determinar o teor de adição de RBMG ou VMA, separadamente; e o estudo em argamassa para determinar o teor de aditivo superplastificante. O critério de seleção da pasta, para prosseguimento da dosagem das argamassas, visou o mínimo desperdício de material e o máximo aproveitamento das adições de RBMG ou VMA, supondo-se que pastas de cimento muito concentradas indicam estabilidade e coesão da mistura. Já para a argamassa, o parâmetro utilizado foi a escolha do teor de SP que atendesse aos limites de consistência e tempo de fluidez propostos pela EFNARC (2002).

A ordem do procedimento de dosagem utiliza, de forma adaptada, a sequência do método de Repette-Mello (2005) para concretos auto adensáveis (CAA), que procede pelas seguintes fases: seleção e caracterização dos materiais, determinação da relação a/c, estudos reológicos da pasta cimentícia e da argamassa, permitindo uma produção de CAA com uma dosagem racional dos seus constituintes.



Dessa forma, com o objetivo de produzir três traços de argamassas autonivelantes, sendo um de referência (sem adição) para fins comparativos; outro com adição de RBMG e outro com o emprego do VMA, a dosagem foi realizada empregando a sequência:

- fixação de uma relação água/cimento;
- determinação do teor de adição de RBMG e VMA, no estudo em pasta cimentícia;
- fixação de um traço;
- determinação do teor de aditivo superplastificante (SP), no estudo em argamassa;

### **3.2.1. Estudo em pasta: Determinação do teor de adição de RBMG e VMA.**

O estudo da fase da pasta foi realizado por meio do ensaio reológico com o viscosímetro. A partir do comportamento reológico promovido pelo RBMG e VMA foram fixados os teores de adição para as fases seguintes da pesquisa.

A incorporação de RBMG à pasta de cimento foi em incrementos de 5% sobre a massa de cimento, até que se observasse que a pasta não possuía trabalhabilidade. Assim, foram analisados os teores 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de RBMG. Já a adição de VMA foi de acordo com a dosagem recomendada pelo fabricante, testadas em incremento de 0,1% sobre a massa de cimento. Logo, foram analisados os teores de 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,5% e 0,6% de VMA.

Quanto à relação a/c foi utilizada 0,5, conforme a referência bibliográfica (ONISHI e BIER, 2010; LIBRE *et al.* 2010; KATSIADRAMIS *et al.*, 2010; CARVALHO, 2015).

Foram testadas treze misturas de pasta cimentícia, conforme apresenta a tabela 3.8. Para entendimento da tabela, explica-se a nomenclatura adotada: PSA significa “pasta sem adição”, PMG é a “pasta com mármore e granito” seguido do número percentual adicionado e PVM é a “pasta com o aditivo modificador de viscosidade” seguido do número percentual adicionado. Após a análise dessas pastas, foram escolhidas três composições finais de pasta para prosseguimento da dosagem.

Tabela 3.7 – Variáveis controláveis no estudo da composição da pasta.

Nomenclatura	a/c	Adições	
		RBMG	VMA
PSA		0%	0%
PMG5		5%	-
PMG10		10%	-
PMG15		15%	-
PMG20		20%	-
PMG25		25%	-
PMG30	0,5	30%	-
PMV01		-	0,1%
PVM02		-	0,2%
PVM03		-	0,3%
PVM04		-	0,4%
PVM05		-	0,5%
PVM06		-	0,6%

O procedimento de mistura das pastas foi realizado manualmente, devido a pequena quantidade de material necessária para o ensaio reológico, aproximadamente 40 ml, sempre realizada por um único operador para controlar a energia de amassamento. Além disso, foi fixado uma sequência e o tempo de mistura dos materiais. O tempo total de mistura foi de 10'30'', adotando-se a sequência a seguir:

- homogeneização do cimento e água, durante 30 segundos;
- adição de RBMG ou VMA, misturando durante 10 minutos (o tempo mínimo de mistura indicado pelo fabricante do VMA é de 5 min);

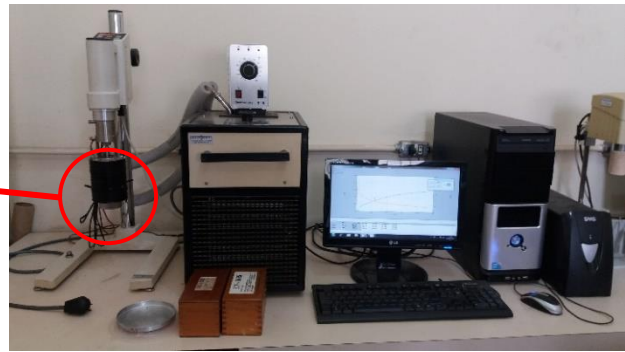
### 3.2.1.1. Ensaio reológico

Neste ensaio, são obtidos os parâmetros reológicos (tensão de cisalhamento, viscosidade e taxa de cisalhamento). De posse destes dados, pode-se elaborar gráficos, que consistem em curvas tensão *versus* taxa de cisalhamento e viscosidade *versus* taxa de cisalhamento que permitem a determinação das propriedades reológicas do material em função da taxa de cisalhamento. Além de se verificar o efeito de diferentes percentuais de adição de RBMG e de VMA no seu comportamento reológico, para determinação da composição das pastas cimentícias.

O equipamento utilizado foi um viscosímetro modelo Haake VT 550 que possui um sensor tipo cilindros coaxiais  $SV_1$  (*spindle*), que utiliza um software próprio do viscosímetro para a análise dos resultados. Este é apresentado na Figura 3.7.



a) Conjunto cilindro coaxial: copo SV e *spindle* SV<sub>1</sub>



b) Viscosímetro Haake VT 550

Figura 3.7 – Viscosímetro  
Fonte: autora

As pastas foram submetidas à ciclos de cisalhamento em escada, com uma taxa de cisalhamento, pré-determinada, variando de 0 a  $150 \text{ s}^{-1}$ , para um período de tempo de 600 s a uma temperatura constante de  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . O ensaio foi realizado no Laboratório de Reologia de Engenharia Química da UFPA.

### 3.2.2. Estudo em Argamassa: Determinação do Teor de Aditivo Superplastificante (SP)

Após obter três composições finais de pasta, com a fixação dos teores de adição de RBMG ou VMA, a segunda etapa para a dosagem da argamassa autonivelante foi determinar o teor de aditivo SP, sobre a massa de cimento, para ser utilizado nos três traços de argamassas produzidos. Para isso, foi estabelecido um traço para as argamassas de 1:2 (cimento/areia), com o objetivo de alcançar elevadas resistências mecânicas nas primeiras idades, conforme bibliografia (LIBRE *et al.*, 2010; RIZWAN e BIER, 2012; BENABED *et al.*, 2012; MEDIPOUR *et al.*, 2013; CARVALHO, 2015).

A dosagem de SP foi realizada variando o seu percentual até encontrar o tempo de fluxo e a consistência recomendados pela EFNARC (2002) por meio dos métodos de ensaio do Mini Funil-V e Mini Slump-test, respectivamente. E, em incrementos de 0,1% iniciou-se a incorporação de aditivo superplastificante às argamassas. No entanto, após o início do ensaio com 0,1% foi observado que o espalhamento das argamassas foi muito inferior ao parâmetro normativo, e os incrementos posteriores foram 0,3%, 0,4% e 0,5%, conforme demonstra a Tabela 3.9. De acordo com a mesma, APSA é correspondente a argamassa produzida da pasta sem adição, AMG20% é a argamassa produzida com o RBMG seguido do número percentual adicionado de resíduo e AVM0,5% é a argamassa produzida com modificador de viscosidade seguido do número percentual adicionado de aditivo.

Tabela 3.8 – Variáveis controláveis no estudo da composição da argamassa.

Traço	a/c	APSA			AMG20%			AVM0,5%		
		Teor de SP (%)			Teor de SP (%)			Teor de SP (%)		
1:2	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5

O procedimento de mistura das argamassas foi realizado em uma argamassadeira mecânica de eixo planetário, sempre em velocidade lenta para controlar a energia de amassamento. Antes da utilização de qualquer equipamento de ensaio, estes foram umedecidos para não haver perda de água de amassamento. Também, foi fixado uma sequência e o tempo de mistura dos materiais, apresentados a seguir:

- homogeneização do cimento com 80% da água, durante 30 segundos;
- adição de RCMG ou VMA, misturando durante 10 minutos;
- adição da areia, com mistura durante 1 minuto;
- adição do aditivo superplastificante com o restante da água, misturando por 3 min;

### 3.2.2.1. Tempo de fluxo (Mini Funil-V) e consistência (Mini Slump-test)

Os ensaios para obtenção do tempo de fluxo e da consistência das argamassas teve como parâmetro as prescrições da EFNARC (2002), que utiliza os equipamentos mini Funil-V e mini Slump-test, apresentados na Figura 3.8. Esses equipamentos são utilizados em conjunto e são semelhantes aos utilizados atualmente para a avaliação de concretos auto adensáveis no estado fresco, porém em uma versão reduzida e dimensionada para argamassas.

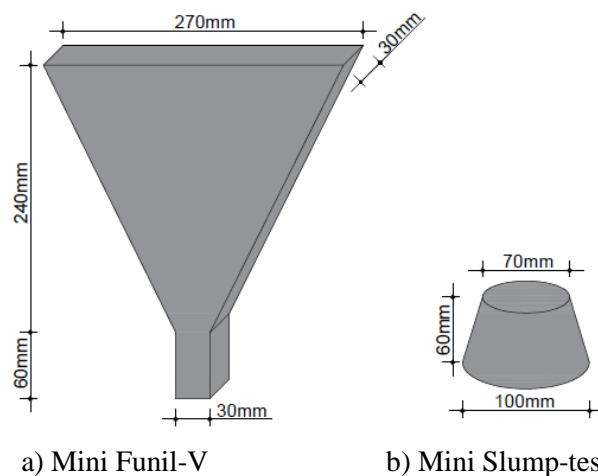


Figura 3.8 - Equipamento para determinação do tempo de fluxo e consistência das argamassas autonivelantes.

Fonte: EFNARC (2002) – adaptado.

O mini Funil-V, define a viscosidade plástica da argamassa em um determinado tempo de queda que deve estar compreendido entre 7 a 11 segundos. O ensaio consiste em medir, com ajuda de um cronômetro, o tempo decorrido para o escoamento total da argamassa pelo orifício do equipamento. Já o método do mini Slump-test, define a consistência ideal da argamassa através da média de dois diâmetros perpendiculares do espalhamento do material, que deve estar compreendido entre 24cm e 26cm, sem adensamento.

### **3.3 ETAPA 3: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES, NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.**

- **Ensaio no estado fresco**

#### **3.3.1. Tempo de retenção de fluxo**

O tempo de retenção de fluxo (perda da trabalhabilidade) das argamassas autonivelantes é determinado pela ASTM C1708 (2012), que recomenda utilizar um equipamento denominado “anel de fluxo”, conforme apresentado na Figura 3.9, que possui as dimensões de diâmetro interno de 50mm e altura de 30 mm.



Figura 3.9 – Equipamento “anel de fluxo” para o ensaio de retenção de fluxo.  
Fonte: Guimarães, 2013.

Contudo, neste trabalho, o método de ensaio foi adaptado utilizando-se o mesmo equipamento empregado para medir a consistência inicial das argamassas autonivelantes, o mini Slump-test, conforme a Figura 3.10. Este ensaio consistiu em medir o diâmetro de espalhamento das argamassas, em tempos de 20min em 20min, até que houvesse significativa diferença de espalhamento e a argamassa apresentar visível perda de trabalhabilidade.



Figura 3.10 – Equipamento mini Slump-test utilizado para o ensaio de retenção de fluxo.  
Fonte: autora.

### 3.3.2. Densidade de massa

O ensaio de densidade de massa foi realizado conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), porém não foi realizado os golpes de adensamento do material previstos na norma. A realização do ensaio é apresentada pela Figura 3.11, com o recipiente plástico utilizado e a balança para aferição do peso.



Figura 3.11 – Ensaio de densidade de massa.  
Fonte: autora

- **Ensaio no estado endurecido**

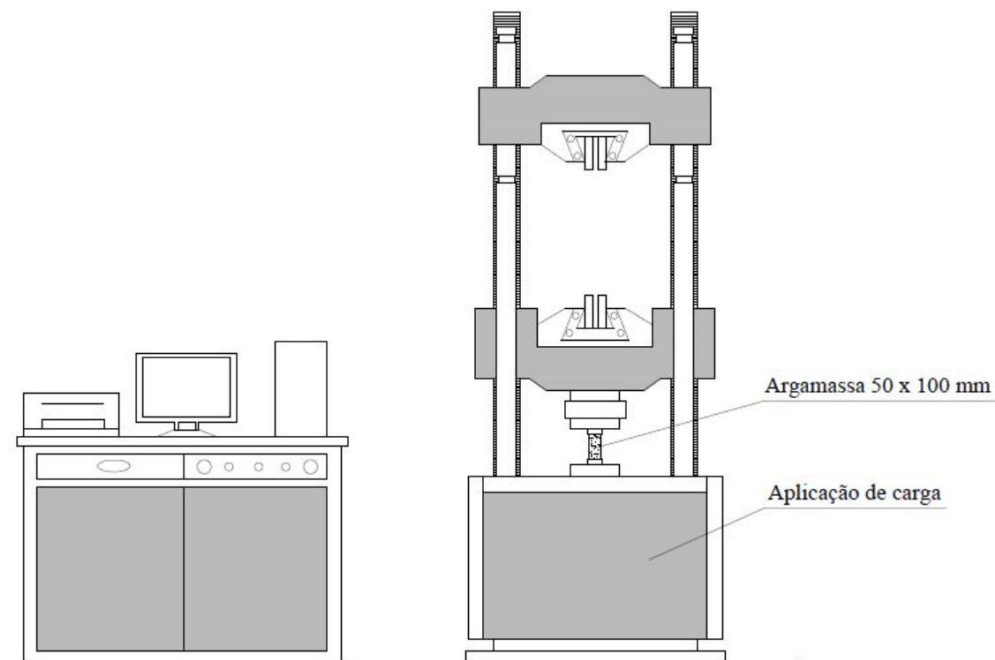
### 3.3.3. Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral.

A determinação da resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral foi realizada conforme a NBR 12041 (ABNT, 2012). Contudo, não se faz necessário o adensamento da argamassa no processo de moldagem dos corpos de prova, como previsto na norma. Ressalta-se que a referida norma é empregada para pisos de argamassas de alta

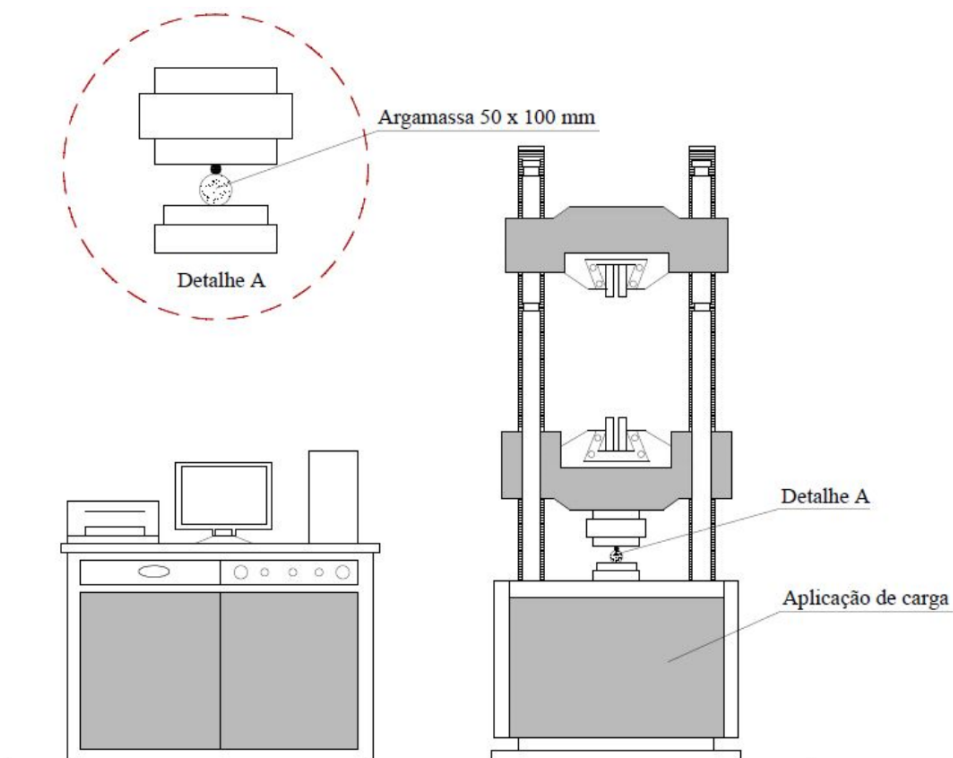
resistência mecânica, sendo esta escolhida por ser a que mais se aproxima da aplicação do material em sistemas de pisos.

Para cada argamassa avaliada foram moldados, para o ensaio de resistência à compressão simples, 6 corpos de prova (cp's) cilíndricos, com dimensões de 5x10cm, e para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, outros 4 cp's cilíndricos, com as mesmas dimensões. Os ensaios foram realizados em 1, 7 e 28 dias após a moldagem e cura dos cp's.

O equipamento de ensaio foi uma prensa hidráulica universal modelo WAW – 1000C com velocidade de ensaio de 2mm/minuto, apresentada na Figura 3.12. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.



a) Modelo esquemático do ensaio de resistência à compressão simples.



b) Modelo esquemático do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 3.12 – Modelo esquemático dos corpos de prova posicionados no equipamento para o ensaio de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral.

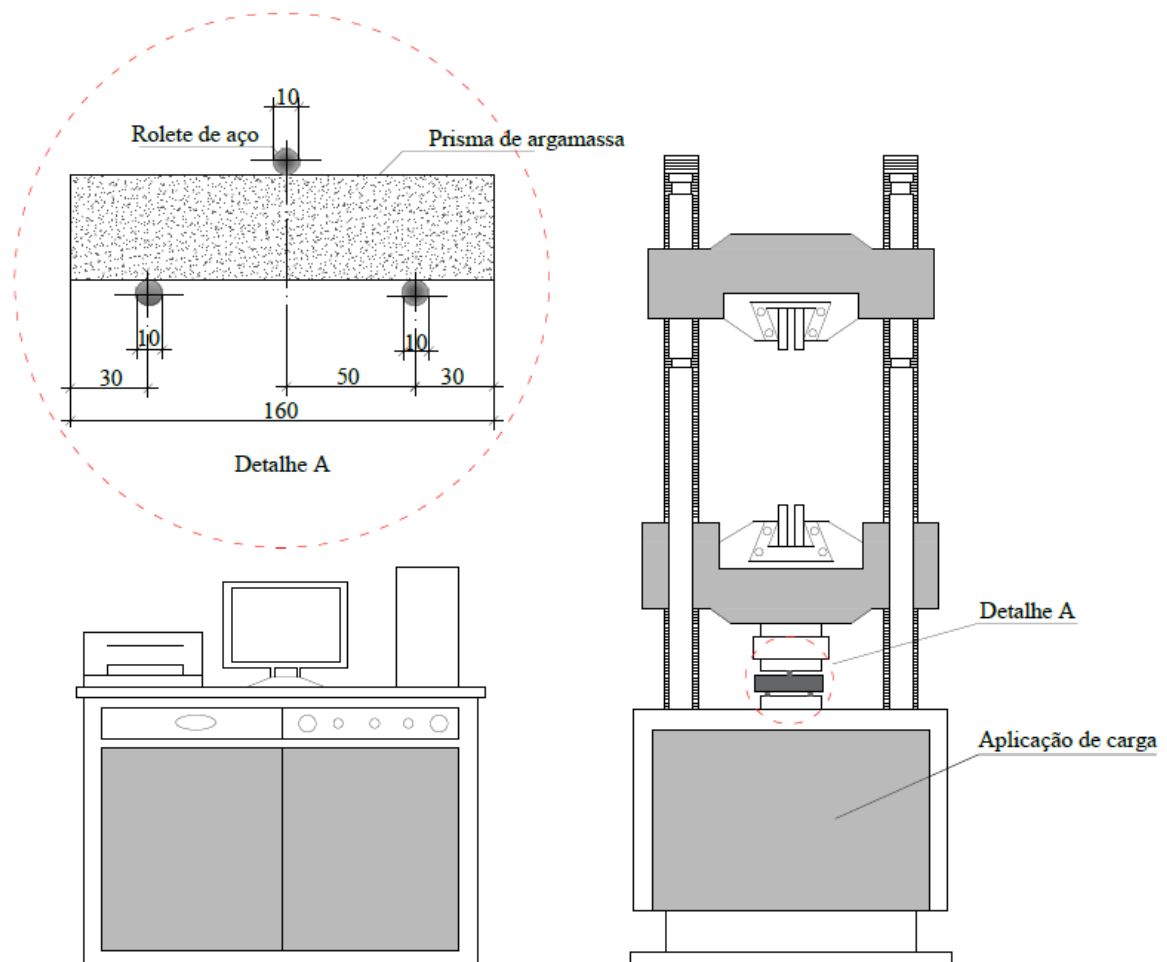
Fonte: autora.

### 3.3.4. Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005). Entretanto, não foi necessário realizar o procedimento de adensamento da argamassa no processo de moldagem dos corpos de prova, conforme previsto na norma. Para este ensaio foram moldados 4 cp's, como dimensões de 4x4x16 cm, para cada argamassa avaliada. Os ensaios foram realizados na idade de 28 dias após a moldagem e cura dos cp's.

O equipamento de ensaio foi uma prensa hidráulica universal modelo WAW – 1000C com velocidade de ensaio de 2mm/minuto, apresentada na Figura 3.13. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.





\*Dimensões em mm.

Figura 3.13 – Equipamento de ensaio de resistência à tração na flexão com detalhamento correspondente ao sistema de ensaio do corpo de prova.

Fonte: autora.

### 3.3.5. Módulo Estático de Elasticidade

O módulo estático de elasticidade foi determinado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017). Sob carregamento estático, à compressão simples, foi verificada a deformação longitudinal dos corpos de prova. O equipamento utilizado foi uma prensa EMIC PC 200 S, sendo que para medir as deformações foram utilizados extensômetros elétricos, conforme a Figura 3.14.

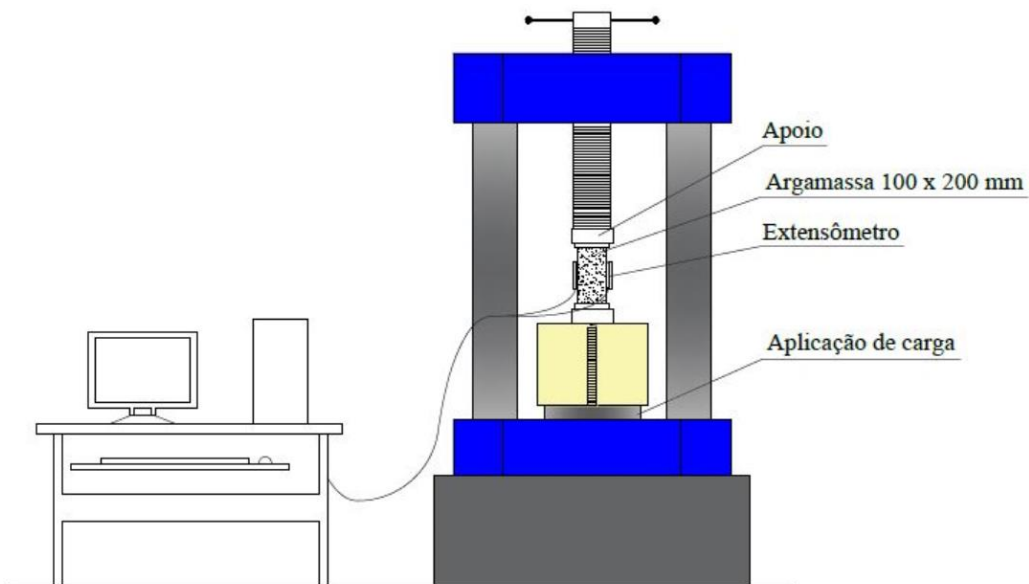


Figura 3.14 – Equipamento de ensaio de módulo de elasticidade.

Fonte: autora

Foram moldados quatro cp's cilíndricos, com dimensão de 10x20 cm, para cada argamassa. Estes cp's foram ensaiados aos 28 dias de cura úmida, após serem secos. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.

### 3.3.6. Densidade de Massa Aparente

O ensaio de determinação da densidade de massa aparente das argamassas produzidas, foi realizado conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005). Como o mesmo não é um método destrutivo, visto que o procedimento restringe-se a registrar as dimensões e a massa dos cp's (Figura 3.15), foi possível utilizar os cp's moldados para outros ensaios, como: o ensaio de resistência à compressão axial.

Para cada argamassa foram ensaiados quatro cp's, com dimensão de 5x10 cm, na idade de 28 dias após a moldagem e cura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.



Figura 3.15 – Procedimento de ensaio de determinação da densidade de massa aparente.

Fonte: autora

### 3.3.7. Absorção de Água por Capilaridade

As argamassas foram avaliadas quanto a absorção de água por capilaridade de acordo com o procedimento prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005), demonstrado na Figura 3.16. Os cp's utilizados para este ensaio foi o mesmo utilizado no ensaio de densidade de massa aparente. Onde, para cada argamassa foram ensaiados quatro cp's, com dimensão de 5x10 cm, na idade de 28 dias após a moldagem e cura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.



Figura 3.16 – Procedimento de ensaio de absorção de água por capilaridade.  
Fonte: autora

### 3.3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As argamassas foram analisadas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado ao sistema de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), com o objetivo de conhecer sua morfologia, microestrutura e os produtos existentes na mesma.

As amostras foram retiradas de fragmentos dos corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à compressão após 28 dias de moldagem e cura dos cp's. Para o preparo destas, as mesmas foram previamente secas em estufa por 24 horas, e posteriormente, submetidas a duas metalizações com finas camadas de ouro, durante 80 segundos.

O equipamento utilizado para a produção das micrografias foram um microscópio eletrônico de varredura, modelo VEJA 3 LMU, marca TESCAN e um sistema de micro-análise via EDS, do modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV, marca Oxford, como mostra a Figura 3.17. Esta análise foi realizada no Instituto Federal do Pará, no Laboratório de Metalografia.

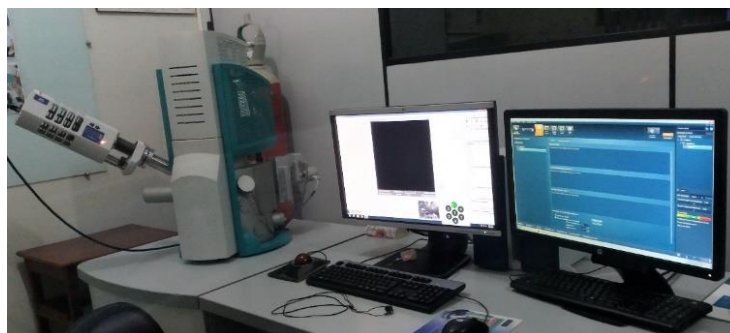


Figura 3.17 – Equipamentos utilizados na análise microestrutural das argamassas autonivelantes.  
Fonte: autora.

### 3.3.9. Determinação da Resistência de Aderência à Tração

No ensaio para a determinação da resistência de aderência à tração das argamassas foi avaliado a tensão máxima suportada pela argamassa e sua aderência com o substrato de concreto, quando submetida a um esforço normal de tração. A demarcação dos cp's na superfície das argamassas seguiu a metodologia adotada por Stolz (2011), onde utilizando uma serra copo foram perfurados 6 cp's de seção circular, com diâmetro de 5cm, de cada placa de argamassa, conforme demonstra o esquema de extração apresentado na Figura 3.18, para posterior colagem das pastilhas de arrancamento.

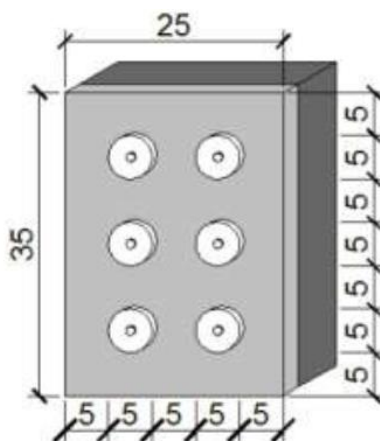


Figura 3.18 – Esquema de extração dos cps para o ensaio de resistência de aderência à tração (dimensões em cm).  
Fonte: Stoz (2011).

O método de arrancamento foi realizado conforme a NBR 13528 (ABNT, 2010), que prescreve que os cp's devem ser arrancados com um esforço normal de tração perpendicular a partilha, aplicado pelo equipamento chamado de dinamômetro, com uma taxa de carregamento até a ruptura do corpo de prova, conforme mostra Figura 3.19.



Figura 3.19 – Equipamento utilizado para o ensaio de resistência de aderência à tração.

Fonte: autora.

A resistência de aderência à tração de cada corpo de prova é determinada pela razão entre a força de ruptura (N) e a área da seção do corpo de prova (mm<sup>2</sup>). Quanto à forma de ruptura, a norma estabelece que ela deve ser expressa em porcentagem de ocorrência e apresentada juntamente com o valor da resistência de cada corpo de prova. A Figura 3.20 mostra as possíveis formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração.

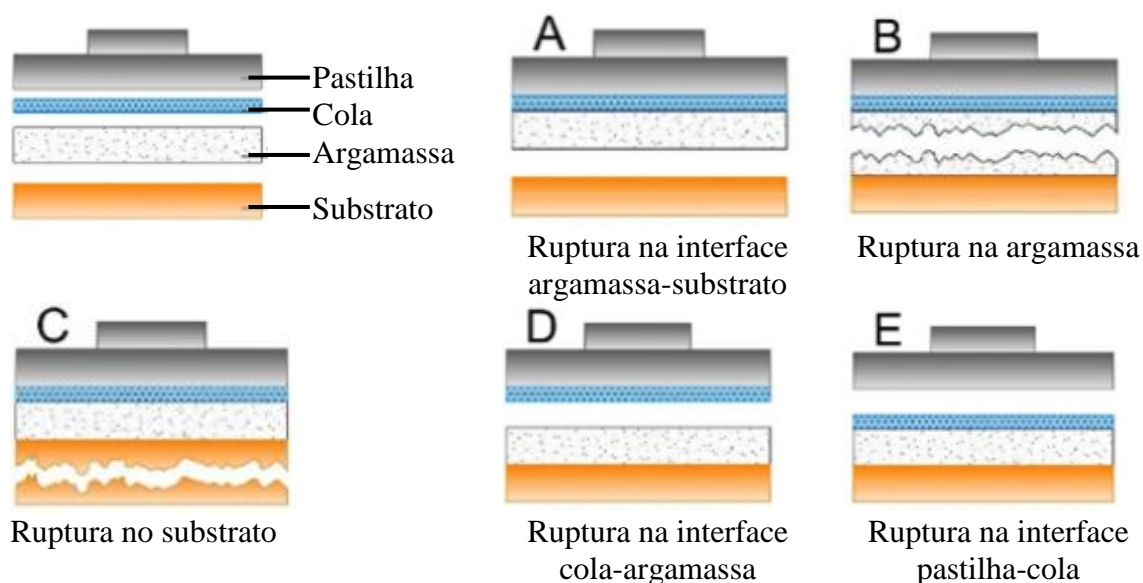


Figura 3.20 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração.

Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2010) – Adaptado.

### **3.4. ETAPA 4: PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EMPREGADO COMO SUBSTRATO**

O concreto foi produzido para ser utilizado como substrato para a aplicação das argamassas autonivelantes com objetivo de analisar o comportamento das mesmas frente ao ensaio de determinação da resistência de aderência à tração.

#### **3.4.1. Produção do concreto**

Foi pré-estabelecida uma resistência à compressão de 30 MPa para o concreto produzido aos 28 dias de idade. O método de dosagem adotado foi IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992), o qual possuiu como parâmetro de controle o ajuste o teor ótimo de argamassa para obtenção de um abatimento do tronco de cone de  $100 \pm 20$  mm.

O processo de mistura dos materiais foi realizado em uma betoneira de eixo inclinado, previamente imprimida, com uma mistura de cimento, areia e água. A ordem de mistura foi a seguinte: agregado graúdo, cerca de 25% da água, cimento, cerca de 25% da água, agregado miúdo e o restante da água necessário para atingir o abatimento estabelecido. O controle do abatimento do concreto foi realizado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os valores do proporcionamento do concreto produzido para a confecção dos substratos estão expostos na Tabela 3.10.

Tabela 3.9 – valores do concreto produzido para confecção das placas

<b>A</b>	<b>Traço unitário</b>	<b>a/c</b>	<b>Abatimento</b>	<b>Consumo</b>	<b>fck</b>
50%	1 : 2,5 : 3,5	0,56	$10 \pm 20$ mm	313,86 kg/m <sup>3</sup>	30 MPa

#### **3.4.2. Moldagem das placas e corpos-de-prova de concreto**

A moldagem das placas e dos corpos de prova de concreto foram referentes a uma única betonada, e ambos foram moldados simultaneamente, com objetivo de que os resultados representassem de maneira íntegra o material em questão. Além disso, foi aplicado desmoldante em todas as fôrmas, para facilitar o processo de desmoldagem, após 24h.

Foram moldadas 6 placas de concreto em moldes de Madeirit com dimensão 25x25x5cm, sendo 2 para cada traço de argamassa, para serem utilizadas no ensaio de resistência de aderência à tração; e, 4 corpos de prova cilíndricos com dimensão de 10x20cm para serem utilizados nos ensaios de controle de resistência à compressão simples e absorção de água por capilaridade, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016). A cura das placas e os corpos de prova ficaram em cura submersa em água durante 28 dias.

Com intuito de melhorar a aderência entre o substrato e a argamassa, foram produzidas ranhuras no sentido transversal do substrato, no estado fresco, utilizando uma desempenadeira dentada. A Figura 3.21 demonstra as placas de concreto produzidas após moldados.



Figura 3.21 – Substrato de concreto, no estado fresco.  
Fonte: autora.

O preparo das placas para a aplicação das argamassa ocorreu após 28 dias da data de moldagem, onde todas as placas foram desmoldadas e lavadas com água conforme demonstra a Figura 3.22, de modo a retirar qualquer resquício de óleo desmoldante que tenha ficado na superfície das placas durante a moldagem, e que pudessem influenciar no resultado da resistência de aderência da argamassa ao substrato. E seguida, as placas foram colocadas em uma estufa aonde permaneceram por 24h, para sua secagem.



Figura 3.22 – Preparo do substrato antes da aplicação das argamassas.  
Fonte: autora.

Após a secagem do substrato foi realizado a aplicação das argamassas. Para isto, inicialmente foram colocadas em torno das placas de concreto um gabarito de Madeirit, para que a espessura da argamassa pré-estabelecida no planejamento experimental de 2 cm fosse alcançada. Em seguida, os vãos entre as placas e o gabarito foram fechados com silicone, para evitar que a argamassa autonivelante escoasse pelos vãos no momento da aplicação. Não foi realizado nenhum tipo de adensamento ou nivelamento nas argamassas aplicadas, e durante 15 dias, 1 vez ao dia, foi colocado um pano úmido sobre as argamassas. A Figura 3.23 demonstra o aspecto das argamassas autonivelantes no estado fresco, após serem aplicadas no substrato.



Figura 3.23 – Argamassas autonivelantes após aplicadas aos substratos  
Fonte: autora.

### **3.4.3. Método de ensaios de caracterização e controle do concreto, no estado endurecido.**

Para caracterização e controle tecnológico do concreto utilizado como substrato das argamassas autonivelantes foram realizados os ensaios de resistência a compressão simples de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) e de absorção de água por capilaridade conforme a NBR 9779 (ABNT, 2013). Como o ensaio de absorção de água por capilaridade não é destrutivo foram utilizados os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios.

Primeiramente, aos 24 dias de idade, foi iniciado o ensaio de absorção de água por capilaridade, em 4 cp's cilíndricos com dimensão de 10x20cm cada, sendo realizada leituras de forma continuada em 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Posterior ao término do ensaio, os cp's



foram encaminhados a estufa para secagem dos mesmos. E, aos 28 dias de idade foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples nos mesmos 4 cp's.

### **3.5. ANÁLISE DOS DADOS**

Os dados das argamassas (Apêndice A) foram analisados quanto a sua normalidade e sua homocedasticidade utilizando-se os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, pois são testes recomendados para número de amostras inferior a 20. Atestando a normalidade e a homocedasticidade, estes foram analisados estatisticamente de acordo com os testes de análise de variância de Tukey e Kruskal Wallis, sendo considerado diferenças significativas quando  $P < 0,05$ .

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados e indicados na metodologia desta dissertação, conforme o programa experimental estabelecido no capítulo 3.

### 4.1. RESULTADOS DA ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.

#### 4.1.1. Adição Mineral (fíler)

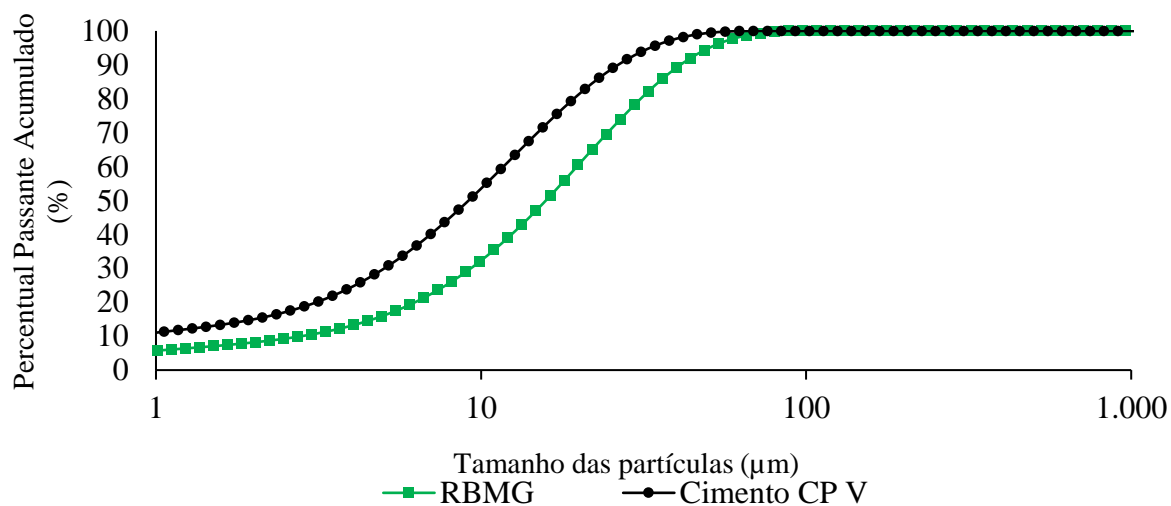
##### 4.1.1.1. Caracterização Física do RBMG

Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização física da adição mineral.

Características avaliadas	Resultados	Método
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,78	NBR NM 16605 (ABNT, 2017)
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,60	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Índice de Finura	17%	NBR 11579 (ABNT, 2013)

A curva granulométrica à laser do RBMG e cimento CP V encontram-se na Figura 4.1. Verifica-se que as partículas de cimento são mais finas que as de RBMG.



#### 4.1.1.2. Caracterização Mineralógica

A Figura 4.2 apresenta o difratograma de raios-X obtido da amostra de RBMG.

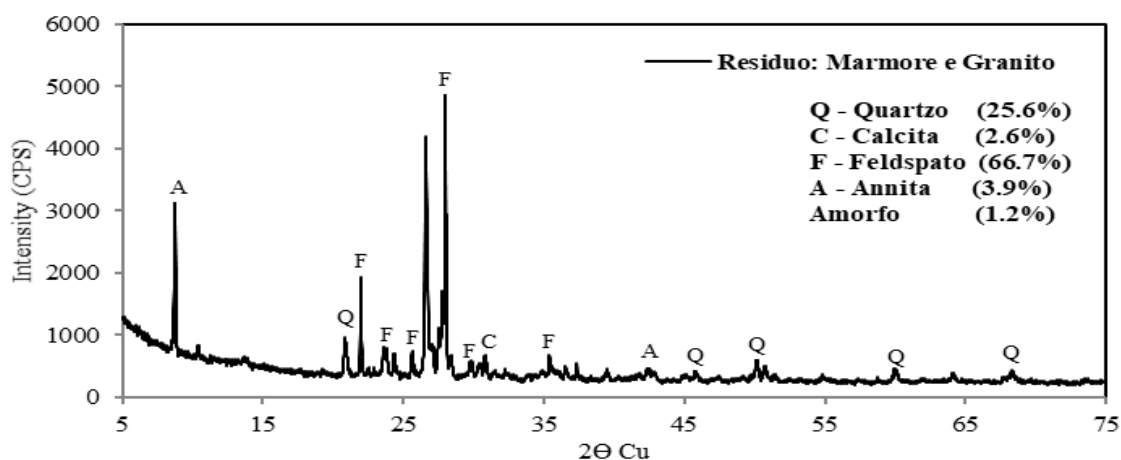


Figura 4.2 - Difratograma de raios X do RBMG.

A análise mineralógica qualitativa das fases presentes no resíduo realizada por meio da Figura 4.2, constatou que a mineralogia do resíduo é constituída por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), feldspatos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e mica como annita. Onde, nota-se que sua composição é essencialmente feldspatos e quartzo, minerais oriundos, predominantemente, de rochas graníticas (granito). Contudo, mesmo em pequenas proporções, também apresenta calcita que é um mineral característico das rochas carbonáticas (mármore).

Além disso, o ensaio de Difração de raios-X auxiliou na avaliação da reatividade do material, identificando as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais. Por meio da Figura 4.2, também é possível observar que o resíduo não possui potencial pozolânico. Pois, de acordo com Callister (2014), os materiais com fases cristalinas (baixa atividade) apresentam em seus difratogramas formas com intensa quantidade de picos, enquanto que os materiais com fases amorfas (maior potencial pozolânico) caracterizam-se por apresentar curvas com ausência ou raros picos.

#### 4.1.1.3. Caracterização Química

A Tabela 4.2 apresenta a composição química do RBMG obtida por FR-X.

Tabela 4.2 – Composição química do RCMG por FR-X.

Composto químico	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	61,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,71
CaO	6,58
K <sub>2</sub> O	5,04
TiO <sub>2</sub>	1,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,84
MgO	0,38
Na <sub>2</sub> O	0,28
SO <sub>3</sub>	0,20
MnO	0,13
ZrO <sub>2</sub>	0,07
SrO	0,05
CuO	0,04
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
CO <sub>2</sub>	1,48

A análise química quantitativa em função dos principais óxidos, apresentada na Tabela 4.2, obtida pelo método FR-X, indica que o RBMG está em conformidade com os requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2015), quanto a um material classificado como pozolânico, onde a somatória de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deve ser maior ou igual a 70% da somatória para classes N e C e 50% para classe E. Assim como, o percentual de SO<sub>3</sub> é menor ou igual a 4% para classe N e 5% para classes C e E. Porém, a partir do resultado obtido por meio do DR-X, com o auxílio dos resultados obtidos na FR-X, foi possível efetuar análise qualitativa e quantitativa, observando-se que apesar do material ter apresentado elevada quantidade de óxidos, somente 1,2% das suas fases minerais são amorfas, classificando o material como predominantemente *filler*.

#### 4.1.1.4. Caracterização Microestrutural

As micrografias obtidas por meio do MEV, possibilitou a verificação da morfologia e o arranjo de partículas do RBMG, assim como foi possível constatar a presença dos elementos

químicos já identificados em outros ensaios de caracterização do resíduo por meio do EDS. O resultado desta caracterização é mostrado na Figura 4.3.

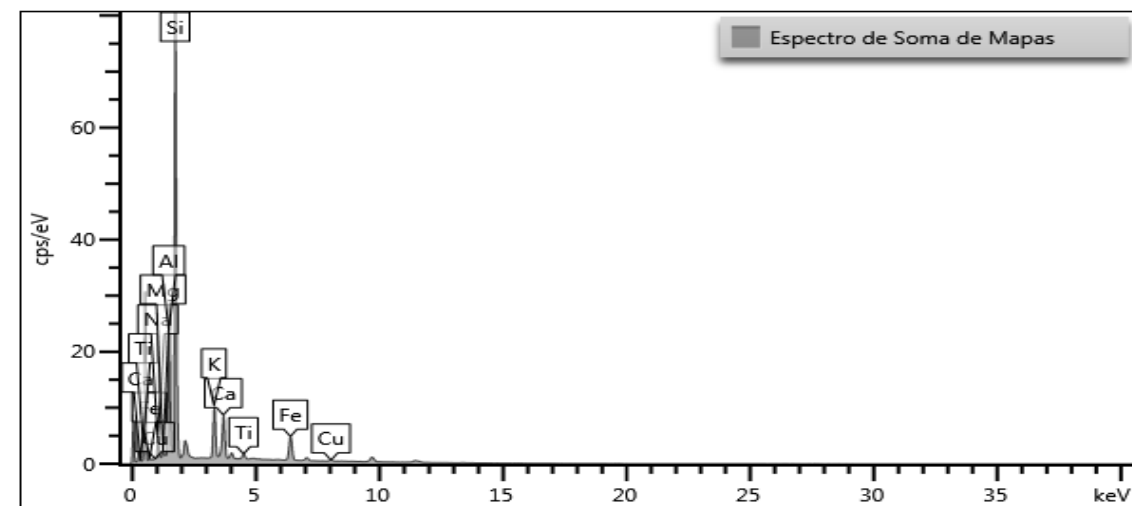
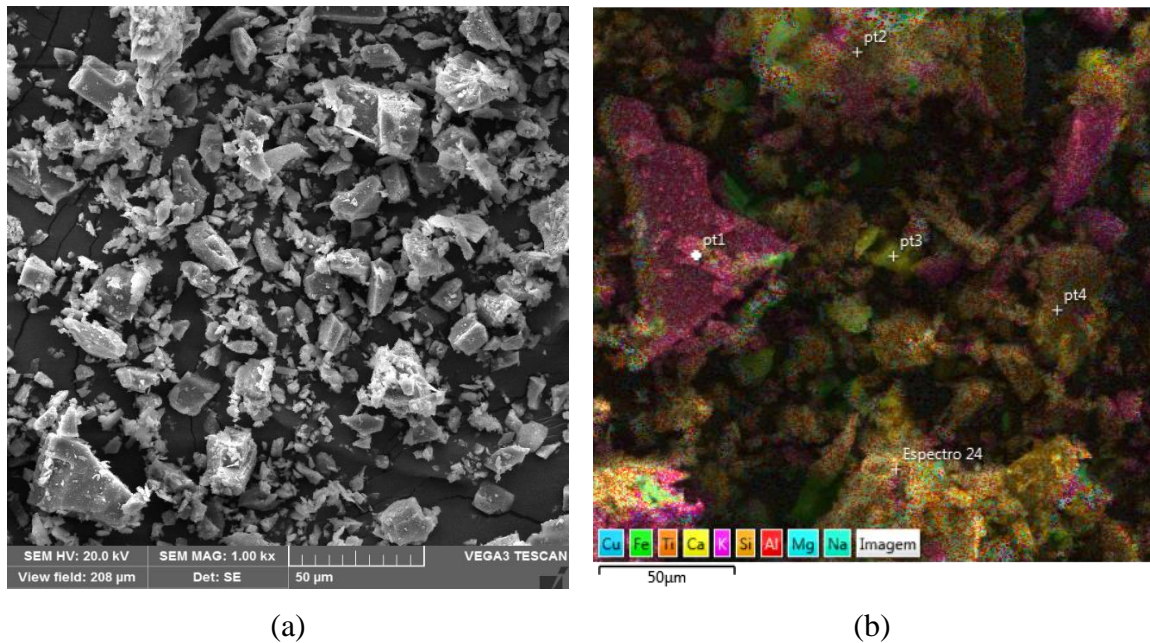


Figura 4.3 – Caracterização Microestrutural: (a) MEV: morfologia das partículas, com aumento de 1000 x; (b) EDS: mapa colorido dos elementos químicos presentes na amostra; (c) espectro de EDS.

A análise por meio da micrografia da Figura 4.3 (a), observa-se que as partículas de RBMG apresenta morfologia irregular de formato angular. A Figura 4.3 (b) mostra que o RBMG apresenta os elementos químicos: Cu, Fe, Ti, Ca, K, Si, Al, Mg e Na; sendo que, conforme a Figura 4.3 (c) apresenta pico elevado de Si (silício), que como já verificado na caracterização mineralógica e química é um dos elementos químicos do quartzo e feldspatos,

presentes no granito. Porém, o espectro de EDS também apresenta Ca (Cálcio), elemento presente na calcita, oriundo da rocha de mármore.

#### 4.1.1.5 Caracterização de Reatividade

Como a análise quantitativa dos compostos químicos, por meio do ensaio de FR-X, resultou que RBMG poderia ser classificado como um material pozolânico, buscou-se avalia-lo quanto ao índice de atividade pozolânica (IAP). Já o ensaio de RAA foi necessário visto que os silicatos reativos mais comuns são o quartzo e minerais da classe dos filossilicatos, como quartzitos e granulitos, sendo alguns desses encontrados no ensaio de DR-X do RBMG.

- Índice de atividade pozolânica com cal -  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Os resultados obtidos no ensaio de IAP com cal estão dispostos na Tabela 4.3 e a Figura 4.4 possibilita a visualização do comparativo entre a resistência mínima prevista pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e a resistência obtido neste ensaio.

Tabela 4.3 – Resultado IAP com cal.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Exigências NBR 12653 (ABNT, 2015)
Corpo de prova CP 1	1,25		
Corpo de prova CP 2	1,28	1,25	6 MPa
Corpo de prova CP 3	1,23		

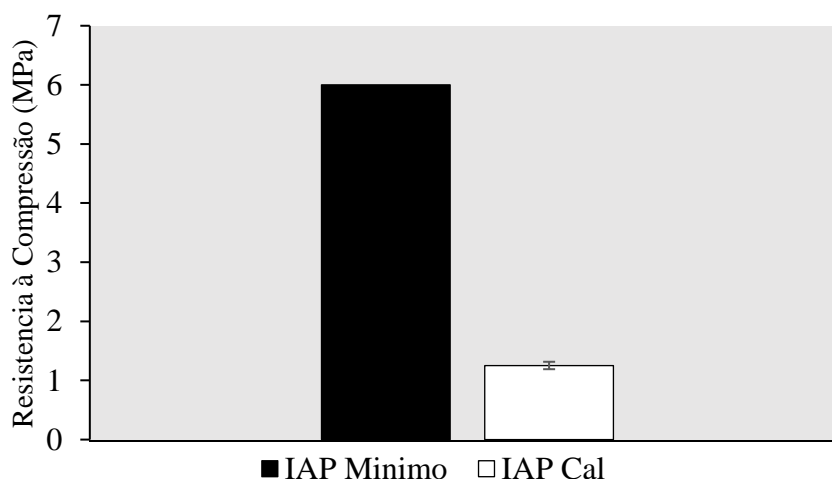


Figura 4.4 – Avaliação IAP com cal

Através da Tabela 4.3 e Figura 4.4 pode-se dizer que as argamassas produzidas neste ensaio não atingiram o valor mínimo de 6 MPa, exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Portanto, o RBMG não pode ser considerado como um material pozolânico.

- Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Os resultados obtidos no ensaio de IAP com cimento Portland estão dispostos na Tabela 4.4 e a Figura 4.5 possibilita a visualização do comparativo entre a resistência mínima prevista pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e a resistência obtido neste ensaio.

Tabela 4.4 – Resultado IAP com cimento Portland.

Argamassa	Nomenclatura	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)
A (Referência)	A1	23,1	22,14
	A2	20,21	
	A3	23,31	
	A4	21,92	
B (CP + 25% RBMG)	B25RBMG 1	7,46	7,21
	B25RBMG 2	6,78	
	B25RBMG 3	6,97	
	B25RBMG 4	7,61	
<b>Icimento</b>			33%
<b>Exigências NBR 12653 (ABNT, 2015)</b>			75%

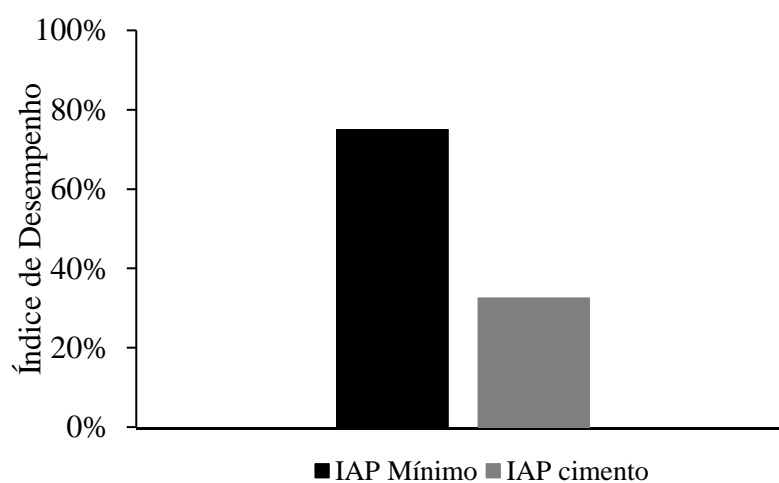


Figura 4.5 – Avaliação IAP com cimento Portland.

Por meio da Tabela 4.4 e Figura 4.5 pode-se dizer que as argamassas produzidas neste ensaio não atendem ao percentual mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015), visto que seu índice de desempenho foi inferior a 75%. Portanto, o RBMG não foi considerado como um material pozolânico, como o esperado. Porém o resíduo pode desempenhar efeito físico de preenchimento dos vazios e densificação das misturas, sendo utilizado como fíler em argamassas e concretos.

- Reação Álcali-Agregado (RAA)

A Figura 4.6 apresenta o gráfico das expansões ao longo do tempo. A partir deste resultado pode-se dizer que o RBMG utilizado neste estudo caracterizou-se como material potencialmente inócuo, por apresentar expansões inferiores a 0,19%, conforme classifica a NBR 15577-4 (ABNT, 2008).

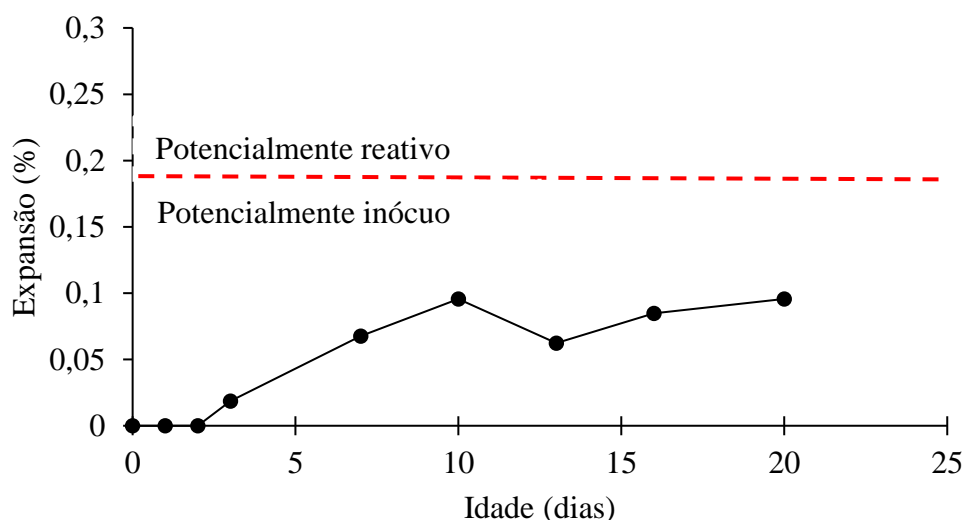


Figura 4.6 – Expansões ao longo do tempo

## 4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES

### 4.2.1. Estudo em pasta: Determinação do teor de adição de RBMG e VMA.

#### 4.2.1.1. Ensaio Reológico

Com objetivo de determinar o teor de adição de RBMG e VMA nas pastas cimentícias foram obtidos os parâmetros reológicos (tensão de escoamento, tensão de cisalhamento e viscosidade) por meio do ensaio no viscosímetro. De posse destes dados, foi traçado curvas relacionando os parâmetros reológicos de tensão de cisalhamento e viscosidade em função



da taxa de cisalhamento aplicada, permitindo a verificação do comportamento do fluido e o efeito dos diferentes percentuais de adição de RBMG e VMA no comportamento reológico da pasta cimentícia. As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 apresentam o ao comportamento reológico obtidos no ensaio das pastas cimentícias.

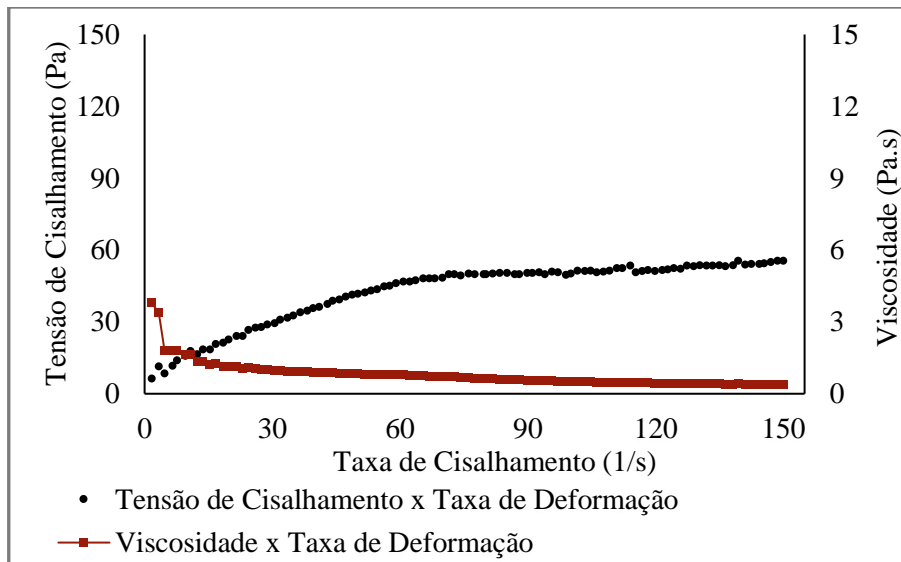
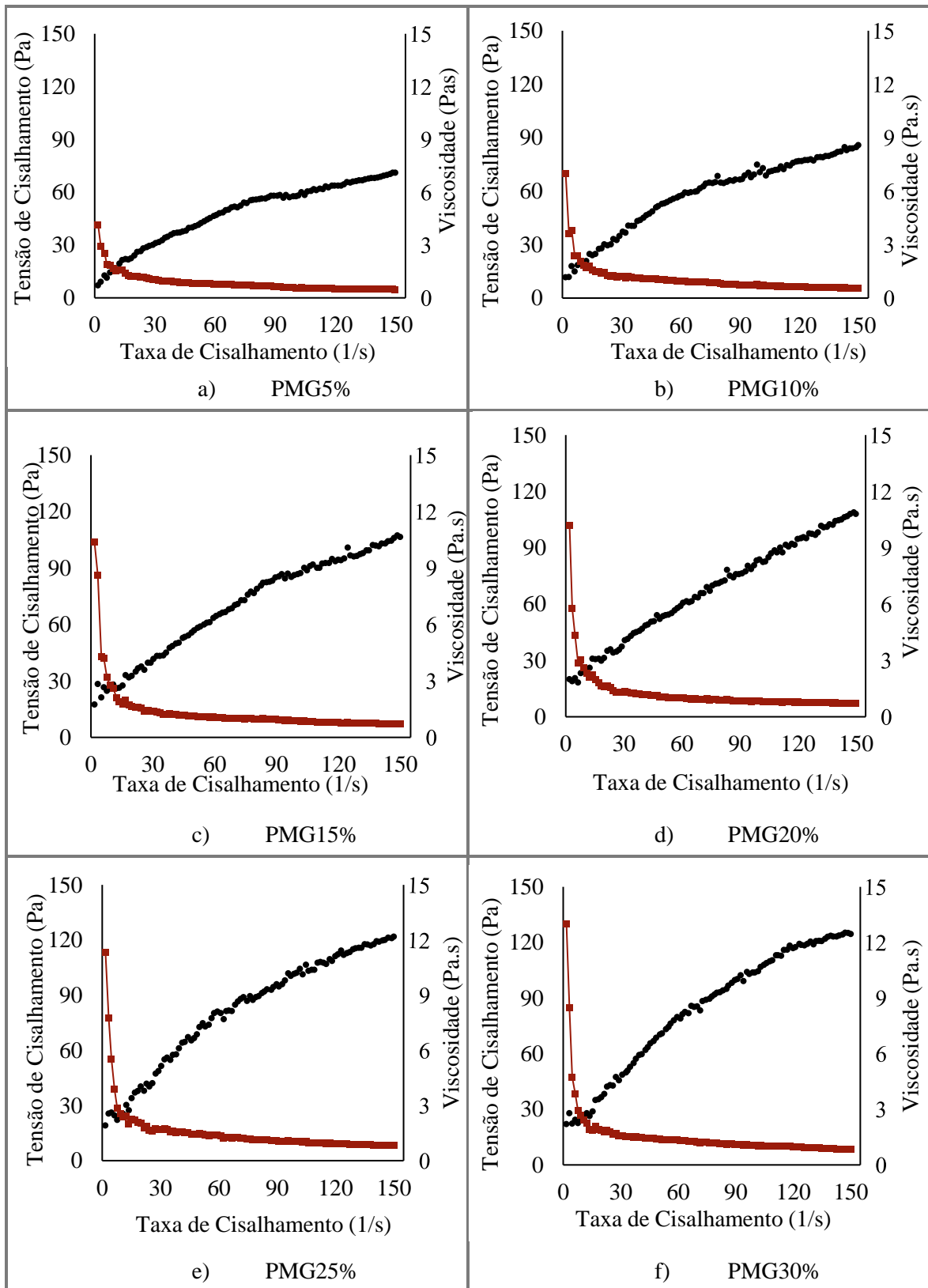
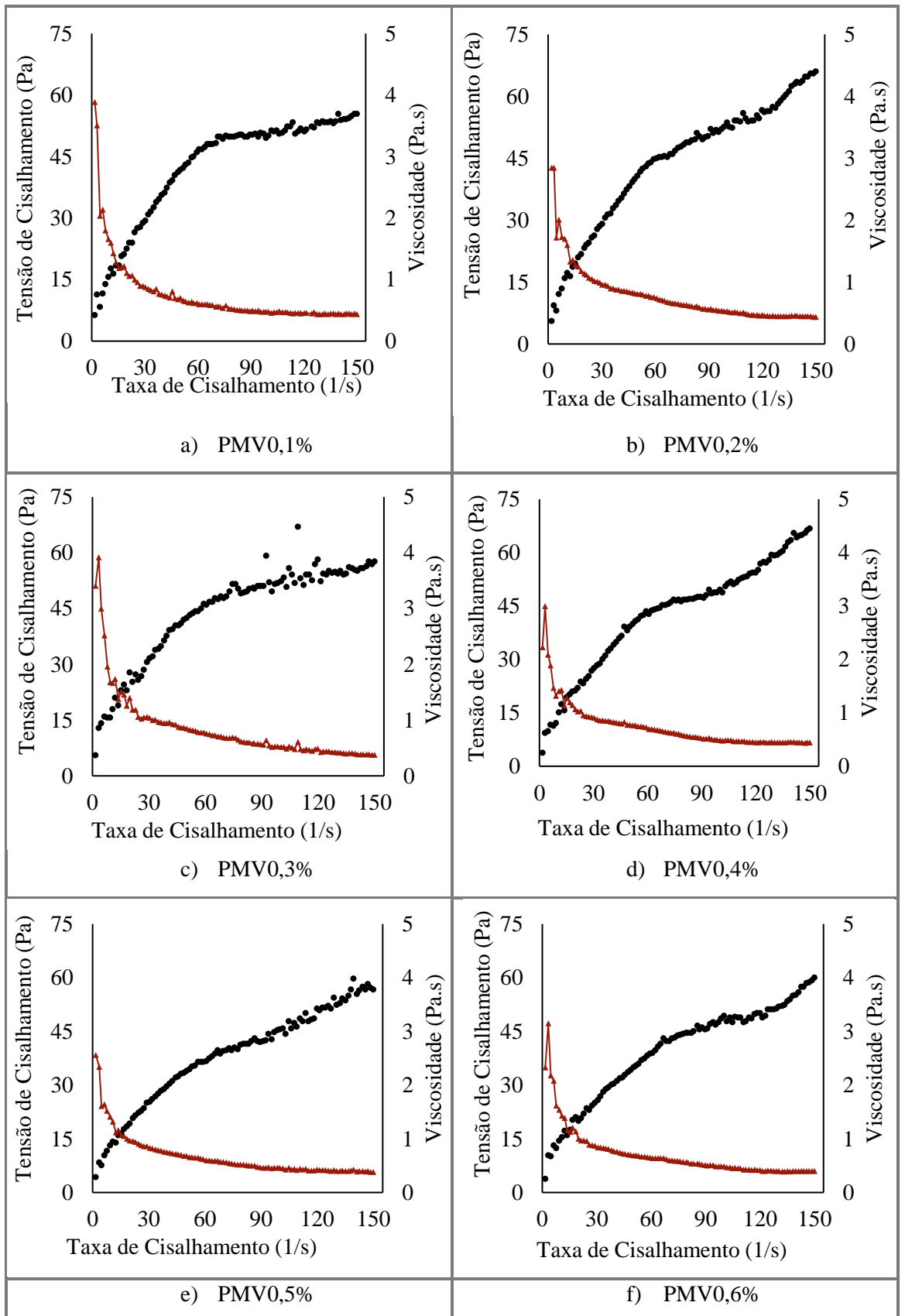


Figura 4.7 - Comportamento reológico da pasta sem adição de PSA: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento.



- Tensão de Cisalhamento x Taxa de cisalhamento
- Viscosidade x Taxa de cisalhamento

Figura 4.8 - Comportamento reológico das pastas com adição de RBMG: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento.



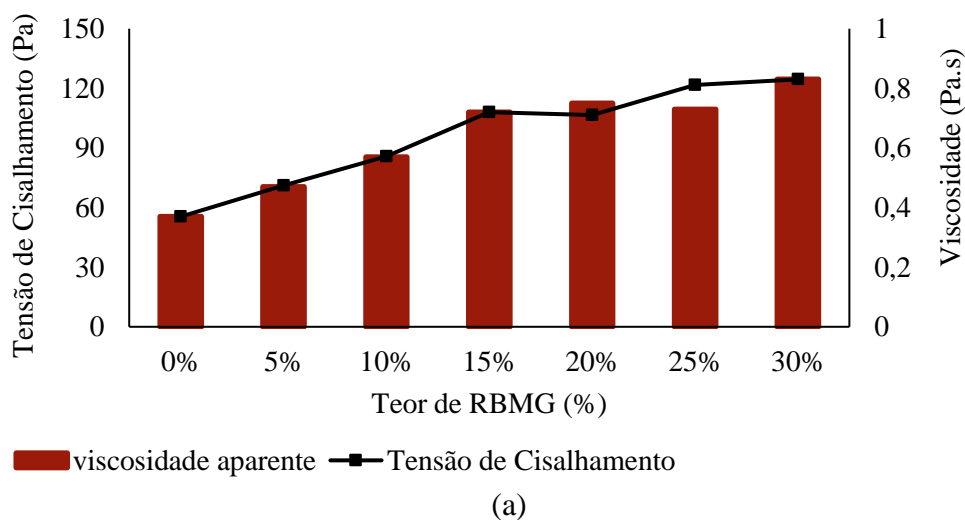
- Tensão de Cisalhamento x Taxa de cisalhamento
- Viscosidade x Taxa de cisalhamento

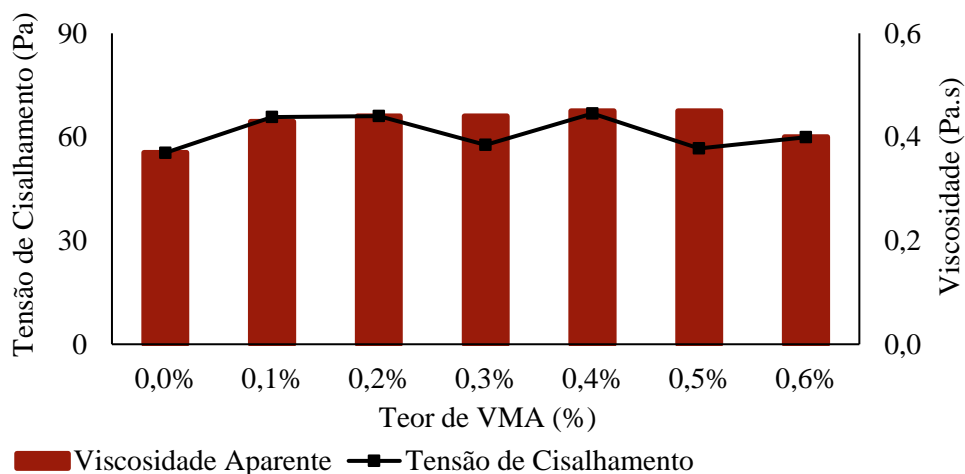
Figura 4.9 – Comportamento reológico da pasta com adição de VMA: tensão de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento.

Observa-se, por meio das Figura 4.7, 4.8 e 4.9, que as pastas cimentícias apresentaram um comportamento não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, mostrando uma tendência semelhante aos fluidos do modelo de Herschel-Bulkley, como o esperado. Pois, é o mais adequado para caracterizar misturas cimentícias autonivelantes, conforme (FELEKOGU, 2014). Já a viscosidade diminuiu em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada, exibindo um comportamento pseudoplástico, que pode ser explicado pelo enfraquecimento e diminuição das interações existentes entre as partículas da mistura, devido a tensão de cisalhamento aplicada à pasta (CASTRO, 2007).

Comportamento similar ao exibido pelas pastas cimentícias desse estudo foi encontrado por Sato (2015) ao analisar o comportamento reológico de pastas com adição mineral de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO); e por Ma *et al.* (2018), ao analisar pastas cimentícias com incorporação de aditivos modificadores de viscosidade (VMA). Contudo, visando prever o comportamento do material durante seu manuseio e aplicação, requer-se que a tensão de cisalhamento torne-se diretamente proporcional a taxa de cisalhamento, após excedida uma tensão inicial, como o comportamento de fluidos Binghamianos, esperado para misturas cimentícias homogêneas e estáveis (CASTRO, 2007). O modelo Bingham é um caso especial do Modelo Herschel-Bulkley (FELEKOGU, 2014).

Logo, conforme as Figuras 4.8 e 4.9, as pastas estudadas que apresentam tendência semelhante ao comportamento dos fluidos Binghamianos são as pastas PMG20% - Figura 4.8 (d); e PMV0,5% - Figura 4.9 (e). A Figura 4.10(a) e 4.10(b) apresenta a Tensão de cisalhamento e a viscosidade aparente das pastas cimentícias em função dos teores de adição de RBMG e VMA, respectivamente, para uma taxa de cisalhamento constante.





(b)

Figura 4.10 – Tensão de cisalhamento e viscosidade aparente das pastas cimentícias em função do teor de adição: (a) pasta com RBMG e (b) pastas com VMA.

A Figura 4.10 compara a viscosidade aparente e a tensão de cisalhamento após aplicada a taxa de cisalhamento entre as pastas cimentícias com adição de RBMG e VMA. A Figura 4.10 (a) indica que com o aumento do teor de adição de RBMG a viscosidade aparente e a tensão de cisalhamento aumentam de forma progressiva até a pasta PMG20%. Assim, a pasta PMG20% foi a escolhida dentre as outras para dar prosseguimento a dosagem da argamassa autonivelante com adição de RBMG. Pois, a pasta apresentou alta viscosidade, mesmo possuindo menor tensão de cisalhamento em relação as pastas PMG25% e PMG30%, que apresentaram descontinuidade de comportamento, provavelmente devido as suas trabalhabilidades ficarem muito reduzidas em decorrência da elevada superfície específica do resíduo, acarretando em pontos de aglomeração de material no equipamento de ensaio.

Em contraste, a Figura 4.10 (b) demonstra que com o aumento de adição de VMA a viscosidade permanece relativamente constante até a pasta PMV0,5%, enquanto a tensão de cisalhamento é descontínua. Assim, como a pasta PMV0,5% apresentou maior coesão em relação às outras pastas, escolheu-se a mesma para o prosseguimento da pesquisa na produção da argamassa autonivelante. Visto que, durante o ensaio observou-se que este aditivo atua na viscosidade de forma moderada, incorporando de bolhas de ar na mistura, provavelmente devido ao princípio de ação do aditivo, que reduz a tensão superficial da água da mistura, aumentando a possibilidade de incorporação de bolhas de ar, efeito também relatado em outros estudos por Martins (2009), Libre *et al.* (2010) e Li *et al.* (2018). Segundo Libre *et al.* (2010), o aditivo modificador de viscosidade tem efeito insignificante sobre a viscosidade, porém tem efeito sobre a estabilidade da mistura. Em seu estudo essa estabilização foi mais expressiva em relações a/c acima de 0,55.

## 4.2.2. Estudo em argamassa: determinação do teor de aditivo superplastificante (SP).

### 4.2.2.1. Tempo de fluxo (Mini Funil-V) e consistência (Mini Slump-test)

Após a determinação dos teores de adição de 20% de RBMG e 0,5% de VMA nas pastas cimentícias, estabelecimento do traço 1:2 e relação a/c 0,5, prosseguiu-se os ensaios de controle para dosagem das argamassas autonivelante, a fim de determinar o teor de aditivo Superplastificante (SP). Por meio dos ensaios prescritos pela EFNARC (2002) as argamassas atingiram os parâmetros de tempo de fluxo e consistência estabelecidos pela mesma. A média dos resultados obtidos no Mini Funil-V e Mini *Slump-test* são mostrados nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

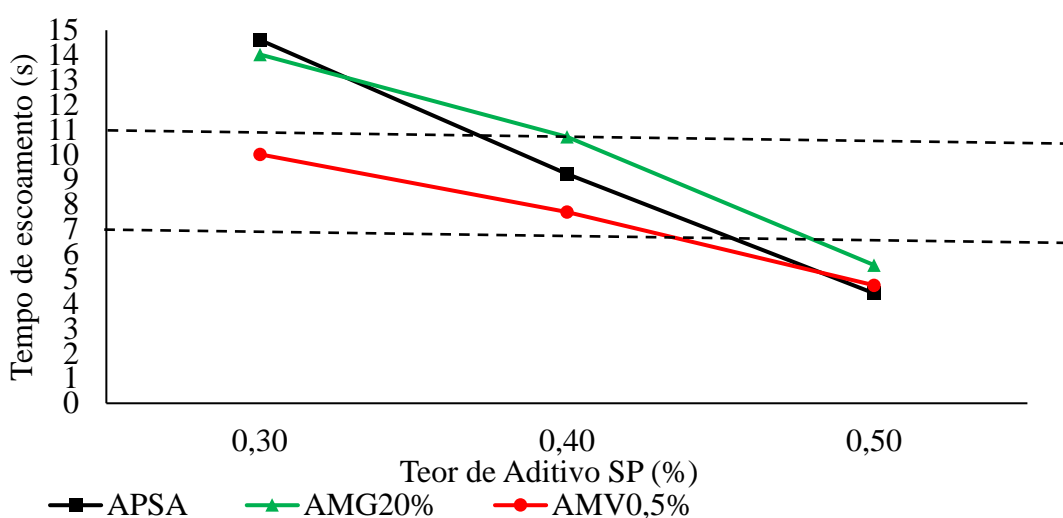


Figura 4.11 – Curvas de tempo de escoamento das argamassas produzidas em função do teor de aditivo SP.

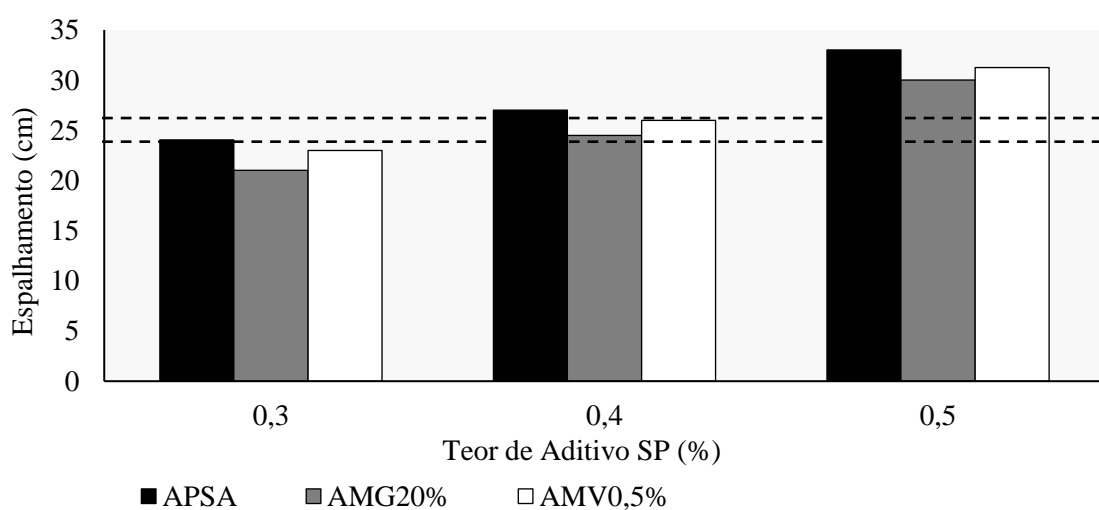


Figura 4.12 – Consistência das argamassas produzidas em função do teor de aditivo SP.

De acordo com as Figuras 4.11 e 4.12, quanto maior a incorporação de aditivo SP, menor será o tempo de fluxo e maior será o espalhamento das argamassas. Observa-se que o aumento da dosagem deste aditivo está diretamente ligado ao aumento da fluidez da argamassa, contudo também interfere na estabilidade da mesma. Ao comparar os resultados, verifica-se que com o teor de aditivo SP 0,40%, as argamassas AMG20% e AMV0,5% atendiam aos parâmetros estabelecidos pela EFNARC (2002) e não apresentaram exsudação. Já a argamassa APSA, apesar de atender o parâmetro de tempo de fluxo, a mesma apresentou consistência superior ao limite estabelecido pela EFNARC (2002), além de exibir um princípio de exsudação. Contudo, para fins comparativos a argamassa APSA continuou na pesquisa.

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos no ensaio de tempo de fluxo (Mini Funil-V) e consistência (Mini *Slump-test*) para o teor de 0,40% de aditivo SP.

Tabela 4.5 – Valores das médias obtidas com o teor de 0,4% de aditivo SP nos ensaios de tempo de fluxo e consistência.

<b>Ensaio</b>	<b>APSA</b>	<b>AMG20%</b>	<b>AMV0,5%</b>	<b>Parâmetro EFNARC (2002)</b>
Tempo de fluxo (s)	9,22	10,71	7,69	7 a 11
Consistência (cm)	27,00	24,50	26,00	24 a 26

A Figura 4.13 demonstra o aspecto visual das argamassas autonivelantes produzidas utilizando o teor de 0,40% de aditivo SP.

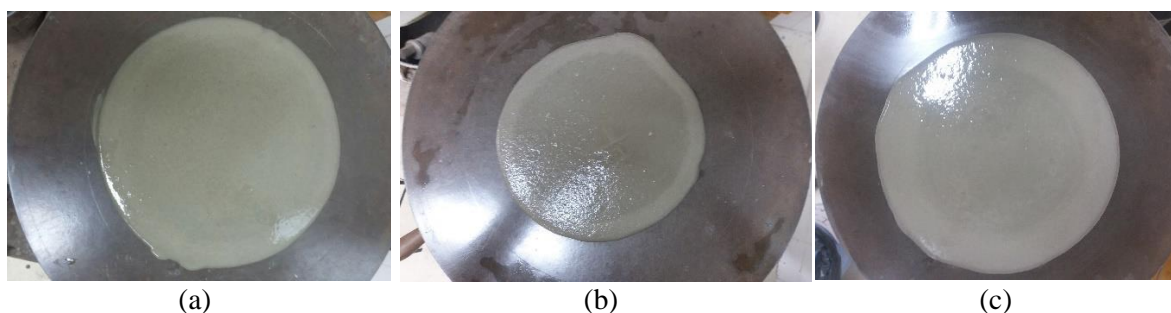


Figura 4.13 – Aspecto visual das argamassas autonivelantes produzidas utilizando o teor de aditivo SP 0,40%: (a) APSA; (b) AMG20%; (c) AMV0,5%.

### 4.3. RESULTADOS DA ETAPA 3: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES.

- **Estado Fresco**

#### 4.3.1. Retenção de fluxo

O ensaio de retenção de fluxo demonstrou o tempo necessário para a perda da trabalhabilidade das argamassas autonivelantes, conforme as diretrizes da ASTM C1708 (2012). Inicialmente, as leituras dos diâmetros de espalhamento das argamassas foram realizadas em tempos de 10min em 10min, no entanto, todas as argamassas apresentaram trabalhabilidade constante até os primeiros 20 min, somente a partir desta leitura começaram a apresentar retenção de fluxo. Assim, as medições passaram a ser efetuadas em tempos 20min em 20min. As medições foram interrompidas quando as argamassas apresentaram dificuldade de espalhamento, em decorrência da perda de trabalhabilidade. Os resultados médios obtidos estão na tabela 4.6. Os resultados individuais encontram-se no apêndice A.

Tabela 4.6 – Consistências médias obtidas no ensaio de retenção de fluxo.

Leituras (min)	Retenção de Fluxo (cm)		
	APSA	AMG20%	AMV0,5%
0	27,00	24,50	26,00
20	27,00	24,50	26,00
40	24,00	22,47	23,25
60	21,00	19,25	20,09
80	16,00	16,06	15,91

Analisando a tabela 4.6, observa-se que as três argamassas apresentaram perda gradual de trabalhabilidade, onde aos 40min somente a argamassa APSA manteve a consistência caracterizada como adequada para argamassa autonivelante, segundo os parâmetros da EFNARC (2002). Por conseguinte, aos 80min todas as argamassas deram indícios de enrijecimento. A tendência do comportamento quanto a retenção do fluxo pode ser observada na Figura 4.14.



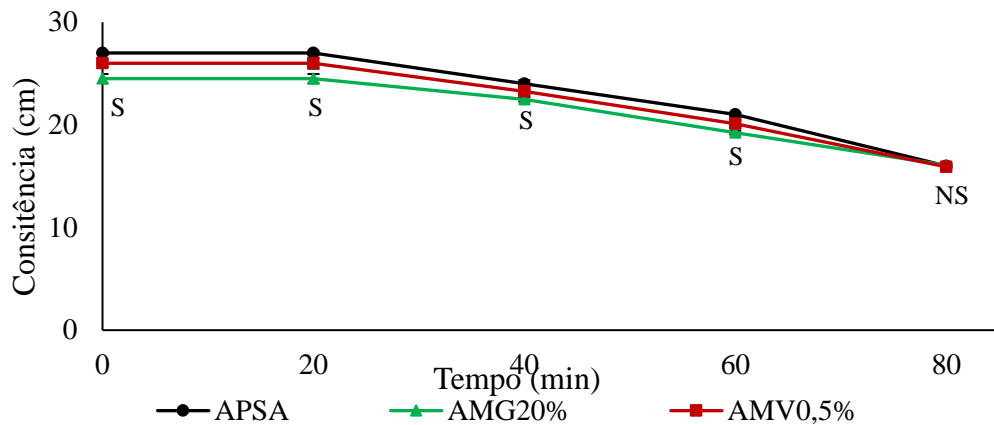


Figura 4.14 – Comportamento das argamassas autonivelantes para a retenção de fluxo ao longo do tempo. n=5. (S) variância significativa; (NS) variância não significativa.  $P < 0,05$ . Teste ANOVA por Tukey e Kruskal-wallis.

Foi realizado testes de comparação múltipla dos resultados para verificar quais argamassas apresentaram diferença estatística de comportamento entre si nas leituras realizadas. Conforme demonstra a Figura 4.14, foi constatado que os valores de retenção de fluxo das argamassas apresentam diferenças significativas para as leituras 0 min, 20 min, 40 min e 60 min, quando comparadas entre si em um mesmo tempo. Porém, no tempo de 80 min as argamassas apresentam diferença de retenção não significativa.

Pode-se dizer que a capacidade de manter a fluidez ao longo do tempo é um fator resultante das reações de hidratação, do tempo de pega e da capacidade de retenção de água das argamassas, que varia em função da composição e propriedades dos materiais empregados na mistura. Acredita-se que a adição de RBMG, por aumentar o teor de finos na argamassa AMG20%, pode ter contribuído para a retenção de fluxo por meio da retenção de água da mistura. Assim como, a adição de modificador de viscosidade na argamassa AMV0,5%, pode ter contribuído para a retenção de fluxo por meio dos polímeros, possivelmente presentes em sua composição. Visto que ambas possuíram maiores retenções de fluxo em relação a argamassa APSA.

Rubin (2015), comparou a retenção de fluxo entre três argamassas autonivelantes industrializadas. O teste obteve três intervalos de tempo de retenção diferentes como resultado, sendo estes: 30 min para argamassa F1, 70 min para argamassa F2 e 10 min para argamassa F3. A mesma explica que tais valores podem variar em função dos aditivos e materiais empregados na mistura.

Sabe-se que a norma ASTM C1708 (2012) não define limites mínimos e máximos de consistência para este ensaio, porém a mesma ressalta a necessidade da argamassa apresentar

um tempo de fluxo em que a trabalhabilidade seja adequada para a aplicação e acabamento do material, principalmente para sua aplicação em obras de grande porte, onde há a necessidade da aplicação do material por vias mecanizadas (bombas).

#### 4.3.2. Densidade de massa

Os valores médios dos resultados obtidos no ensaio de densidade de massa realizado conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005) estão dispostos na Tabela 4.7. Os resultados individuais encontram-se no apêndice A. Para melhor visualização esses valores estão ilustrados na Figura 4.15 juntamente com o comparativo da análise estatística das argamassas.

Tabela 4.7 – Densidades de massa médias para 4 amostras distintas.

Argamassa	Média de Densidade de Massa (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Coef. De Variação (%)
APSA	2,24	0,00	0,00
AMG20%	2,14	0,00	0,00
AMV0,5%	2,17	0,00	0,00

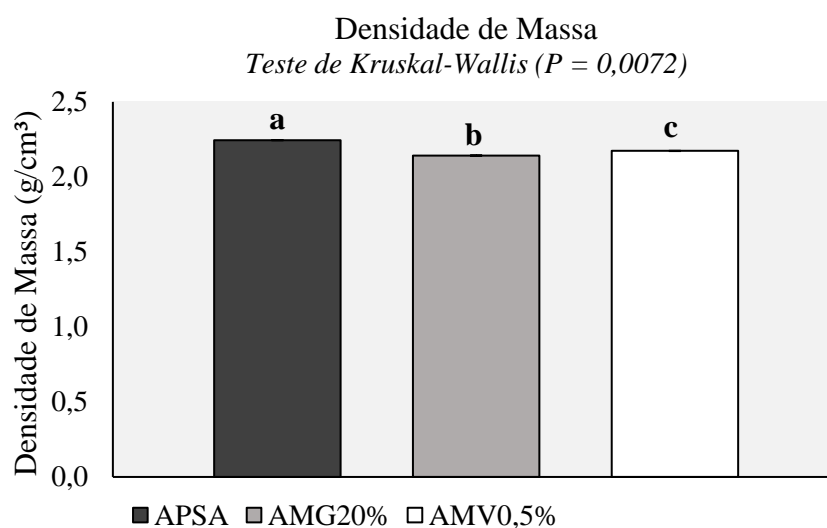


Figura 4.15 – Densidade de massa das argamassas autonivelantes. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão.  $n=4$ . Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Conforme observado na Tabela 4.7 e Figura 4.15, a argamassa APSA apresentou maior densidade de massa, seguida da argamassa AMV0,5% e AMG20%, respectivamente. Sendo que, a argamassa AMG20% apresentou diferença estatística significativa em relação a

argamassa APSA. Tal fato pode ser explicado pelo arranjo granular das partículas de cada formulação.

Durante a adição do VMA no processo de mistura da argamassa AMV0,5% foi observado a incorporação de bolhas de ar na mesma. Porém, supõe-se que pela baixa dosagem, tal fato não é significativo em relação a argamassa APSA. O mesmo fenômeno foi constatado por Li *et al.*, (2018), que relata que o VMA atua na melhoria da interação entre as partículas existentes no interior da pasta de cimento. Contudo, o aditivo possui a capacidade de reduzir a tensão superficial da água da mistura, aumentando a possibilidade de incorporação de bolhas de ar na mistura.

Quanto a incorporação do RBMG na argamassa AMG20%, acredita-se que, por apresentar distribuição granulométrica desigual do resíduo e pelo formato angular de suas partículas, o efeito fíller foi amenizado. Contudo, a baixa densidade é benéfica para a aplicação da argamassa, pois, quanto mais leve será mais trabalhável a longo prazo, reduzindo o esforço na aplicação (CARASEK, 2007).

- **Estado Endurecido**

#### **4.3.3. Resistência à Compressão Simples**

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado nas argamassas autonivelantes nas idades de 1, 7 e 28 dias. Os resultados das médias das resistências dos 6 cps ensaiados estão dispostos na Tabela 4.8 e os demais valores estão apresentados no apêndice A.

Tabela 4.8 – Média das resistências à compressão simples das argamassas autonivelantes.

Argamassa	Resistência à compressão simples (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
<b>APSA</b>	9,37	18,96	29,08
<b>Desvio Padrão</b>	1,00	0,86	2,31
<b>Coef. de Variação</b>	10,67%	4,51%	7,94%
<b>AMG20%</b>	10,03	23,37	38,63
<b>Desvio Padrão</b>	0,33	2,93	6,26
<b>Coef. de Variação</b>	3,31%	12,53%	16,20%
<b>AMV0,5%</b>	11,22	21,19	45,28
<b>Desvio Padrão</b>	0,51	2,61	5,08
<b>Coef. de Variação</b>	4,54%	12,33%	11,22%

A partir dos resultados apresentados na tabela 4.8, verifica-se que a argamassa APSA apresentou maior incremento de resistência na idade de 28 dias em relação a 7 dias de idade, que foi de 65,18%; assim como, a argamassa AMG20%, que apresentou incremento de 60,49% em relação as mesmas idades; já a argamassa AMV0,5%, exibiu maior incremento na idade de 7 dias em relação a 1 dia de idade, 52,96%.

A Figura 4.16 exibe a análise estatística das resistências resultantes para cada argamassa estudada ao longo do tempo.

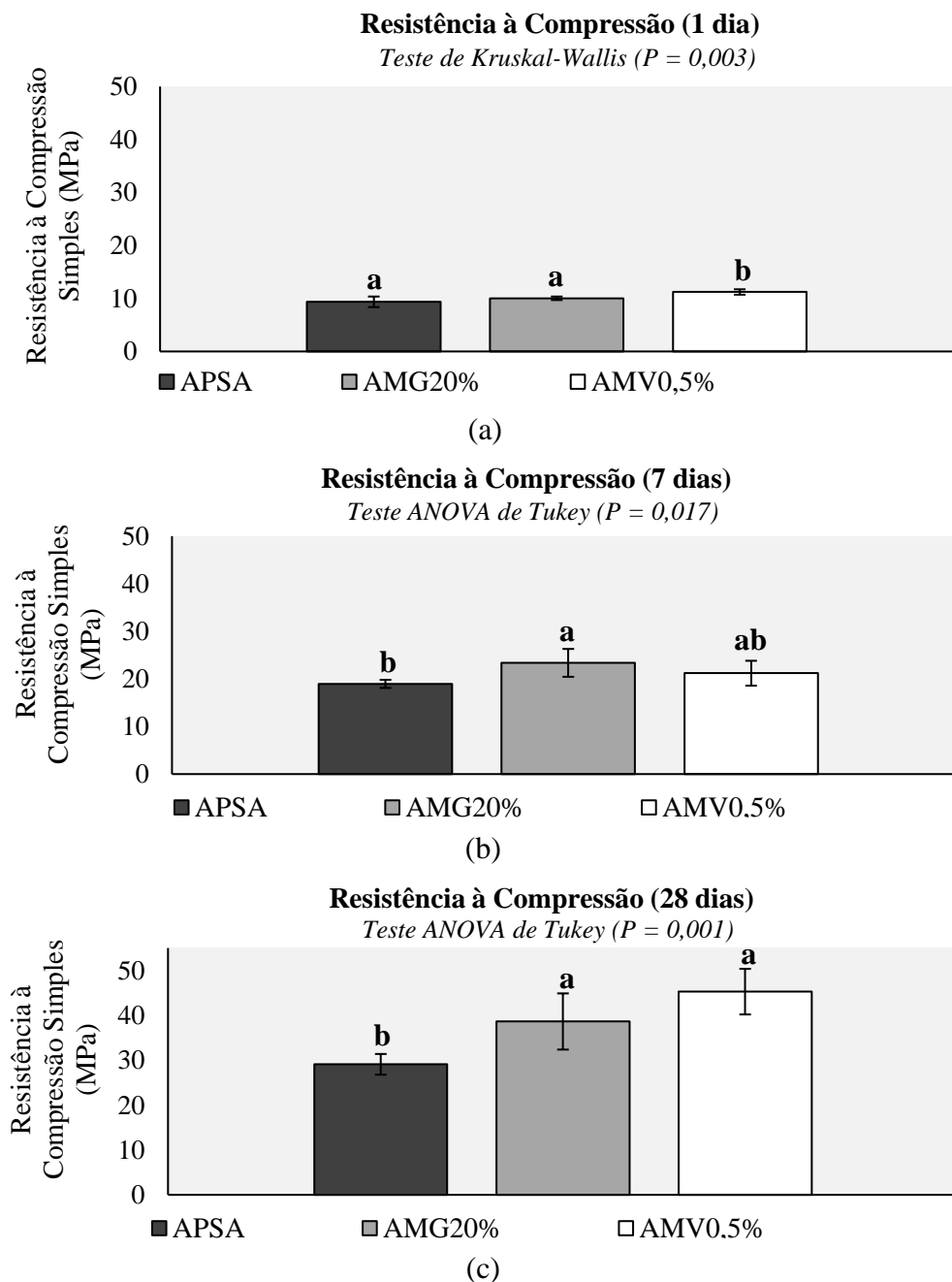


Figura 4.16 – Resistência à compressão simples (a, b, c – resistência à compressão simples nas idades de 1, 7 e 28 dias, respectivamente). n = 6. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Na idade de 1 dia, conforme demonstra a Figura 4.16 (a), a argamassa AMG20% apesar de ter apresentado resistência maior em relação a argamassa APSA, a diferença de valores não foi significativa. Diferentemente, a argamassa AVM0,5% apresentou diferença significativa em relação as argamassas APSA e AMG20%. Explica-se o comportamento pela ação química do VMA que promove a interação entre partículas, favorecendo a formação dos produtos de hidratação do cimento (LI *et al.*, 2018). Contudo, acredita-se que as resistências encontradas em até 24 horas idades seriam suficientes para a liberação da superfície para o tráfego de operários.

Quanto a idade de 7 dias, conforme exibe a Figura 4.16 (b), a argamassa AVM0,5% apesar de ter apresentado resistência superior em relação a argamassa APSA, a variação de valores não foi significativa. Já a argamassa AMG20% apresentou maior resistência entre as três argamassas, com variação significativa em relação as argamassas APSA, porém não significativa em relação a AVM0,5%. Tal fato pode ser explicado por o RBMG não deter características pozolânicas, sendo seus maiores ganhos de resistências acontecem em idades entre 7 a 28 dias, em decorrência do efeito *filler*. Pois, como o resíduo possui elevada superfície específica, a absorção inicial de água do mesmo dificulta as reações de hidratação do cimento nas primeiras idades, e somente com o decorrer do tempo está umidade é reestabelecida na argamassa, hidratando os grãos de cimento (CARVALHO, 2015).

Já aos 28 dias de idade, como mostra a Figura 4.16 (c), as argamassas AMG20% e AVM0,5% apresentaram incremento de resistência significativo em relação a argamassa APSA, porém não significativo entre si. Assim, pode-se dizer que as argamassas AMG20% e AVM0,5% poderiam ser classificadas como argamassa de alta resistência mecânica para pisos, conforme a NBR 11801 (ABNT, 2012), por apresentarem resistência aproximadamente ou superior a 40MPa. Contudo, todas as argamassas apresentaram resistência mecânica superior ao critério de 20 MPa requerido pela EFNARC (2001).

A elevada resistência é um parâmetro necessário em argamassas autonivelantes (SEIFERT *et al.*, 2012). Sabe-se que, argamassas produzidas com resultados de alta resistência mecânica geralmente apresentam uma microestrutura pouco porosa e com isso podem ser mais resistentes a agentes agressivos externos que geram degradação no material. Os valores alcançados desta pesquisa assemelham-se aos resultados de Benabed *et al.* (2012), que utilizando um traço 1:2 produziram argamassas autonivelantes com diversos teores de *filler* calcário, obtendo-se resultados entre 35 e 50 MPa; Carvalho (2015), que também utilizou traço 1:2 para produzir argamassas autonivelantes utilizando uma mistura ternária de adição

de filler calcário, cinza volante e resíduo de demolição de construção, alcançando resistências entre 30 e 35 MPa. E, Lisboa (2004), que produziu argamassa auto-adensável usando traço 1:2, 50% de adição de RBMG e relação a/c = 0,50, encontrando resistência igual a 43 MPa.

#### 4.3.4. Resistência à Tração por compressão diametral.

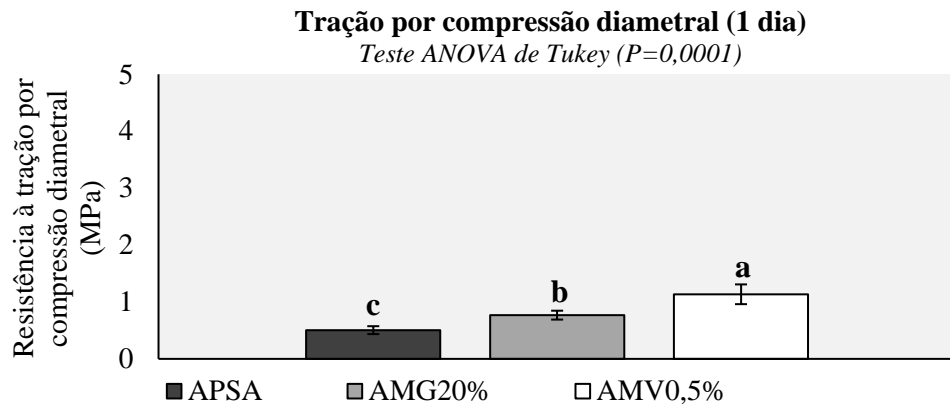
O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nas argamassas autonivelantes nas idades de 1, 7 e 28 dias. Os resultados das médias das resistências dos 4 cps ensaiados estão dispostos na Tabela 4.9 e os demais valores estão apresentados no apêndice A.

Tabela 4.9 – Média das resistências à tração por compressão diametral das argamassas autonivelantes.

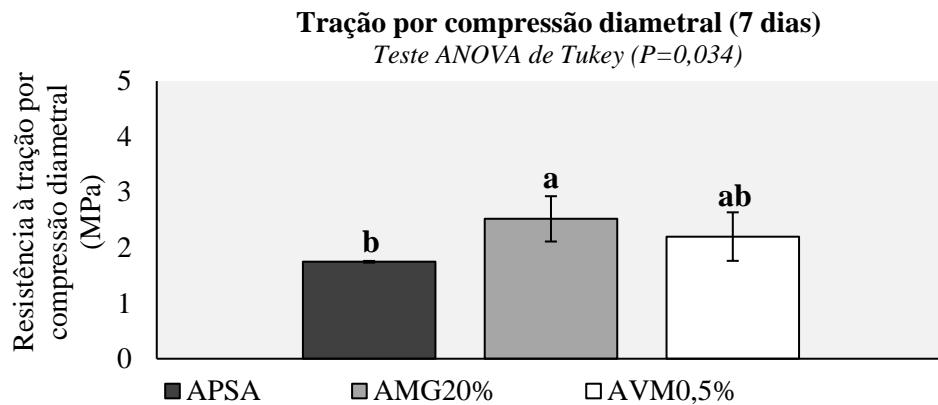
Argamassa	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
<b>APSA</b>	0,50	1,75	2,39
<b>Desvio Padrão</b>	0,07	0,02	0,03
<b>Coef. de Variação</b>	13,75%	0,86%	1,10%
<b>AMG20%</b>	0,77	2,52	3,77
<b>Desvio Padrão</b>	0,08	0,41	0,29
<b>Coef. de Variação</b>	10,17%	16,19%	7,77%
<b>AMV0,5%</b>	1,14	2,20	4,41
<b>Desvio Padrão</b>	0,17	0,44	0,40
<b>Coef. de Variação</b>	15,30%	19,87%	9,01%

A partir dos resultados apresentados na tabela 4.9, verifica-se que a argamassa APSA apresentou maior incremento de resistência na idade de 28 dias em relação a 7 dias de idade, que foi de 73,22%; assim como, a argamassa AMG20%, que apresentou incremento de 66,84% em relação as mesmas idades; já a argamassa AMV0,5%, exibiu maior incremento na idade de 7 dias em relação a 1 dia de idade, 51,82%.

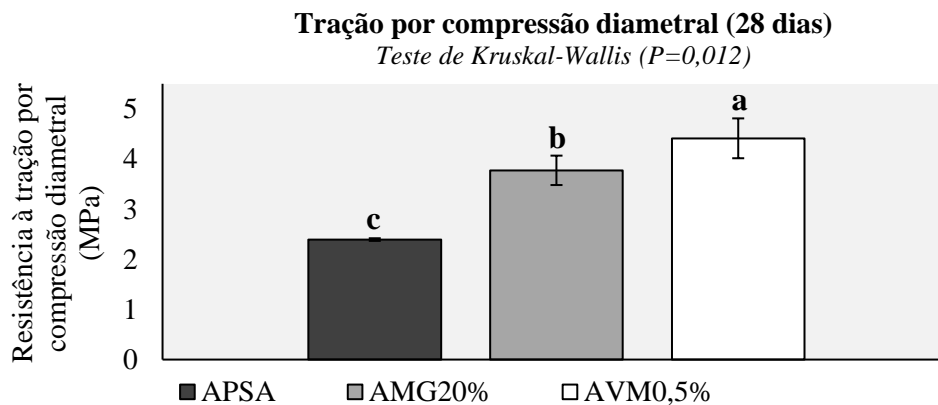
A Figura 4.17 exibe a análise estatística das resistências resultantes para cada argamassa estudada ao longo do tempo.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17 – Resistência à tração por compressão diametral (a, b, c – resistência à tração por compressão diametral nas idades de 1, 7 e 28 dias, respectivamente). n = 4. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

A análise estatística dos resultados deste ensaio apresentou proporcionalidade à análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão. Na idade de 1 dia, conforme demonstra a Figura 4.17 (a) todas as argamassas apresentaram diferenças significativas de comportamento. Já na idade de 7 dias, conforme exibe a Figura 4.17 (b), a argamassa AVM0,5% apesar de ter apresentado resistência maior em relação a argamassa APSA, a

variação de valores não foi significativa. Já a argamassa AMG20% apresentou maior resistência entre as três argamassas, com variação significativa em relação as argamassas APSA e não significativa em relação a AVM0,5%. Para a idade de 28, todas as argamassas apresentaram variação de resistências significativas entre si, como mostra a Figura 4.17 (c). Entretanto, somente a argamassas AVM0,5% apresentou incremento de resistência significativo em relação a argamassa APSA.

A partir dos resultados, considera-se que as argamassas autonivelantes AMG20% e AVM0,5% podem ser consideradas como argamassas de alta resistência mecânica para pisos, conforme a NBR 11801 (ABNT, 2012) por terem atingido resistências à tração por compressão diametral aproximadamente ou igual à 4 MPa.

#### 4.3.5. Resistência à Tração na Flexão

Os resultados das médias das resistências dos 4 cps ensaiados aos 28 dias estão dispostos na Tabela 4.10 e os demais valores estão apresentados no apêndice A. Os mesmos podem ser comparados por meio da Figura 4.18 que contempla sua análise estatística.

Tabela 4.10 – Média das resistências à tração na flexão das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade.

Argamassas	Média (MPa)	Desvio padrão	Coef. de variação
APSA	9,93	0,93	9,36%
AMG20%	16,61	1,99	11,98%
AVM0,5%	13,83	1,33	9,61%

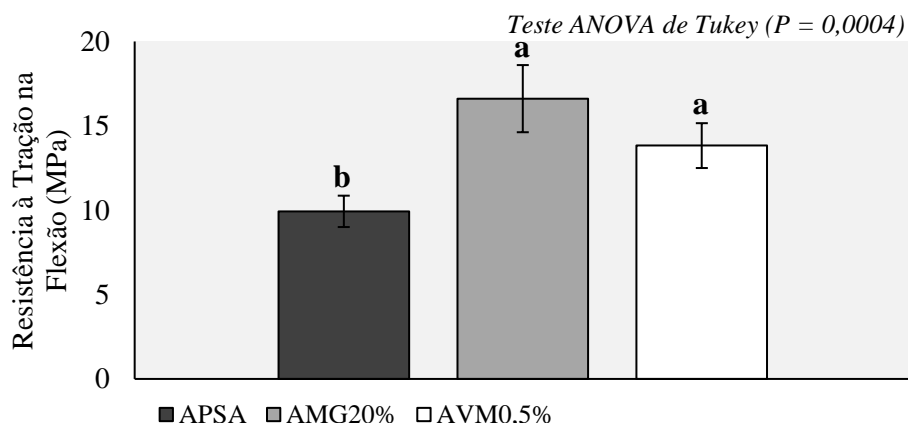


Figura 4.18 – Resistência à tração por flexão para a idade de 28 dias.  $n = 4$ . Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.



A partir da observação da tabela 4.10, pode-se inferir que a argamassa AMG20% apresentou maior resistência à tração na flexão em relação às argamassas APSA e AVM0,5%. Contudo, conforme a análise estatística, apresentada por meio da Figura 4.18, a variação de valores entre a argamassa AMG20% e AVM0,5% não é significativa. E ambas apresentam valores superiores significativos em relação a argamassa APSA.

Se mensuradas pelas prescrições da EFNARC (2001), cuja resistência mínima almejada à tração na flexão de pisos cimentícios autonivelantes deve ser superior a 5 MPa, todas as argamassas produzidas estão em conformidade e apresentam o comportamento mínimo de desempenho. Em comparação aos valores estabelecidos por Nakakura e Bucher (1997) para resistência à tração na flexão: 8 a 11 MPa, nota-se que apenas a argamassa APSA atende a este requisito. Contudo, os valores encontrados nesta pesquisa são próximos ou superiores aos resultados obtidos por Silva (2016), que produziu argamassas autonivelantes utilizando um traço 1:1,25 empregando cinza volante e fibras de Celulose e PVA, de diversas formas, atingiu resistências à tração na flexão entre 7 e 12 MPa.

#### 4.3.6. Módulo Estático de Elasticidade

Sob carregamento estático, à compressão simples, foram ensaiados 4 cps ensaiados aos 28 dias. As médias dos resultados estão dispostas na Tabela 4.11 e os demais valores estão apresentados no apêndice A. Os mesmos podem ser observados por meio da Figura 4.19 que contempla sua análise estatística.

Tabela 4.11 – Média dos módulos de elasticidade das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade.

<b>Argamassas</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coef. de variação</b>
<b>APSA</b>	17,30	1,78	10,26%
<b>AMG20%</b>	13,49	1,93	14,33%
<b>AVM0,5%</b>	11,86	2,22	18,75%

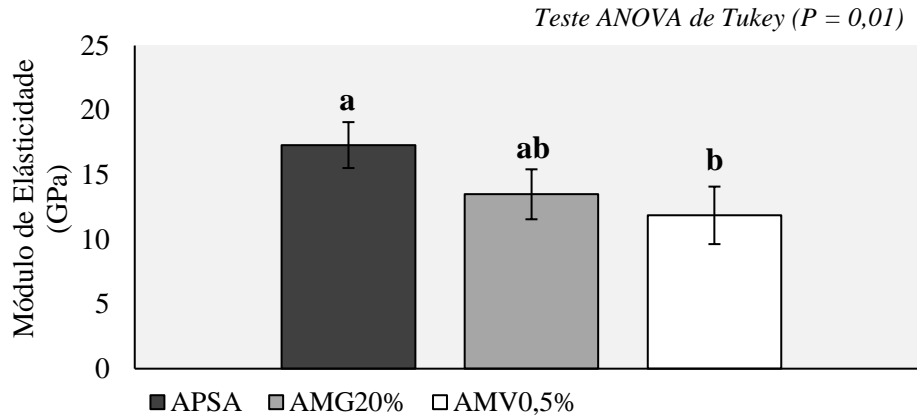


Figura 4.19 – Módulo de estático de elasticidade na idade de 28 dias.  $n = 4$ . Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Constata-se na tabela 4.11, que os dados obtidos para as argamassas APSA e AVM0,5% não são diretamente proporcionais aos resultados de resistência a compressão simples, como geralmente acontece para argamassas e concretos convencionais. Melo (2005) explica que argamassas e concretos autoadensáveis tendem a resultar em módulo de elasticidade menores, pois essa propriedade é bastante influenciada pelo módulo de elasticidade de cada material constituinte, especialmente dos agregados, que nesses tipos de produto são empregados em menor quantidade. Contudo, altos módulos implicam em elevada capacidade de deformação, e em contrapartida, baixos módulos colaboram com a ausência de fissuras por retração plástica nas argamassas (RUBIN, 2015).

Por meio da análise estatística, demonstrada na Figura 4.19, é possível observar que o módulo obtido para a argamassa AMG20% não apresenta diferença significativa de valor em relação as argamassas APSA e AVM0,5%, que possuem módulo numericamente superior e inferior a mesma, respectivamente. Já a argamassa AVM0,5% apresentou diferença significativa de valores em relação a argamassa APSA.

A partir dos resultados, explica-se que, a argamassa AVM0,5% possuiu menor módulo de elasticidade por apresentar em sua composição a combinação dos aditivos VMA e SP, visto que ambos são polímeros solúveis. A adição de polímeros confere menor rigidez às matrizes cimentícias, e conseqüentemente menores módulos as argamassas (RIBEIRO, 2012 *apud* RUBIN, 2015). Contudo, esse comportamento não é observado quando a mistura possui somente o aditivo SP, como é o caso da argamassa APSA.

Quanto a argamassa AMG20%, acredita-se que o RBMG atribuiu capacidade de deformação, por meio da sua alta resistência à compressão resultante do efeito *filer*,

suficiente quando comparada as outras argamassas. O efeito da adição de RBMG no módulo de elasticidade foi estudado por Lisboa (2004) em argamassa autoadensável, com um traço 1:2, 50% de adição de RBMG, em relação à massa de cimento, e relação  $a/c = 0,50$ , encontrando um módulo de elasticidade igual a 26,66 GPa. Este resultado é superior ao encontrado nesta pesquisa supostamente em decorrência da utilização de maior teor de adição de RBMG. No entanto, o resultado deste trabalho foi similar aos encontrados em trabalhos como Rubin (2015), que estudou argamassas autonivelantes industrializadas e encontrou módulos de elasticidade de 8,45, 10,51 e 13,31 GPa.

#### 4.3.7. Densidade de Massa Aparente

Os resultados das médias dos 4 cps ensaiados para cada argamassa, desvio padrão e coeficiente de variação estão dispostos na Tabela 4.12 e os demais valores estão apresentados no apêndice A. Estes, podem ser observados por meio da Figura 4.20 que contempla sua análise estatística.

Tabela 4.12 – Média das densidades de massa aparente das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade.

Argamassas	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Coef. de variação
APSA	2023	10,53	0,52%
AMG20%	2088	18,14	0,87%
AVM0,5%	2042	18,87	0,92%

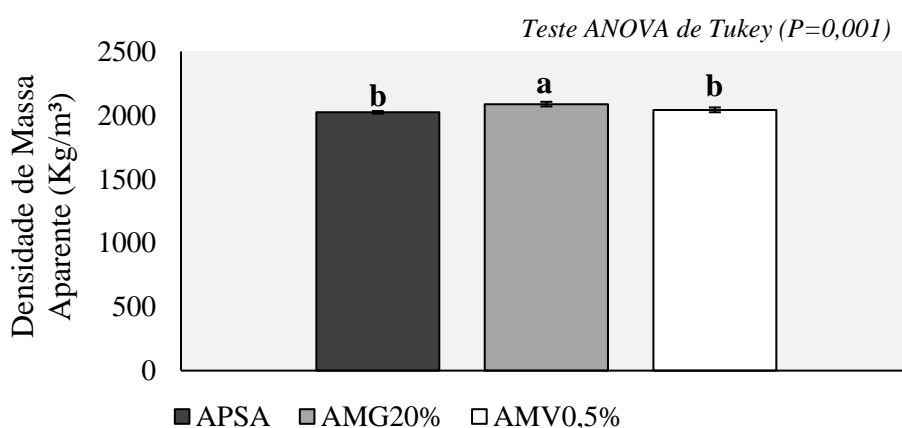


Figura 4.20 – Densidade de Massa Aparente na idade de 28 dias.  $n = 4$ . Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Ao observar a Tabela 4.12 e a Figura 4.20, nota-se que diferentemente do ocorrido na análise da densidade de massas no estado fresco, no estado endurecido, a adição de RBMG resultou

para a argamassa AMG20% maior densidade da massa aparente, com diferença de valor significativo, em relação as argamassas APSA e AMV0,5%. Acredita-se que, o RBMG por não deter características pozolânicas, o efeito *filler* age em consonância com a formação dos produtos de hidratação com o decorrer da idade do material. Como visto no resultado de resistência à compressão simples, seus maiores ganhos de resistências acontecem em idades entre 7 a 28 dias, onde com a maior formação dos produtos de hidratação pode-se ter menos espaços vazios na estrutura da argamassa, o que resulta num menor teor de vazios e maior densidade da argamassa no estado endurecido.

Já argamassa AMV0,5%, apesar de apresentar densidade de massa numericamente superior a argamassa APSA, essa diferença não foi significativa como esperava-se em decorrência do seu resultado de resistência à compressão simples. Tem-se que a forma de atuação do VMA interfira na quantidade de ar incorporado na mistura. Pois, o VMA atua na água da argamassa para promover a viscosidade por meio da formação de redes que suspendem as partículas finas da mistura podendo resultar na formação de vazios. Kraus (2006) produziu argamassas e concretos autoadensáveis, e observou que para seis misturas com VMA, quatro delas apresentaram um comportamento fora do esperado, com teores de vazios mais elevados. O mesmo explica que essa incorporação de ar indesejada pode ser ocasionada pelo tipo de misturador ou energia de mistura e pelo teor de aditivo.

#### 4.3.8. Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em 4 cps para cada argamassa autonivelante aos 28 dias de idade. A tabela 4.13, apresenta a média dos resultados e os demais resultados estão dispostos no apêndice A. Esses resultados também são observados por meio da Figura 4.21 que contempla sua análise estatística.

Tabela 4.13 – Médias do ensaio absorção de água por capilaridade das argamassas autonivelantes aos 28 dias de idade.

Argamassas	C Médio (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Desvio padrão	Coef. de variação
APSA	3,04	0,13	4,18%
AMG20%	2,23	0,48	21,38%
AVM0,5%	2,74	0,58	21,31%

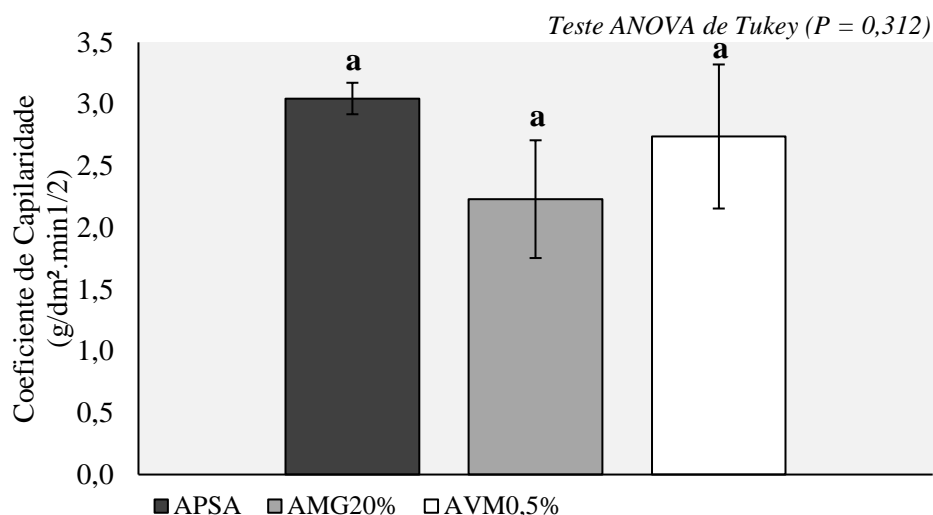


Figura 4.21 – Coeficiente de capilaridade na idade de 28 dias. n = 4. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Constata-se na tabela 4.13, que o coeficiente de capilaridade é numericamente maior na argamassa APSA, seguido da argamassa AVM0,5% e, por conseguinte, da argamassa AMG20%, com o menor coeficiente de capilaridade e maior densidade de massas entre as demais. Uma hipótese para essa ocorrência pode ser o melhor empacotamento dos grãos gerado pela interação entre os finos de RBMG e dessa forma provavelmente ocorreu diminuição nas conexões entre os poros e/ou na porosidade aberta. Conforme Rizwan e Bier (2012), a absorção de água não é simplesmente uma função do tamanho de poro máximo, mas da porosidade e das conexões entre os poros. Contudo, conforme a análise estatística apresentada na Figura 4.21, os resultados não possuem diferenças significativas.

#### 4.3.9. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após 28 dias de cura foram retirados fragmentos das argamassas autonivelantes fraturadas para as análises da microestrutura das argamassas, a natureza mineralógica dos materiais constituintes e os produtos de hidratação do cimento que se formaram no processo químico de endurecimento da pasta por meio do MEV e EDS. A Figura 4.22 mostra as micrografias obtidas e seus espectros de EDS.

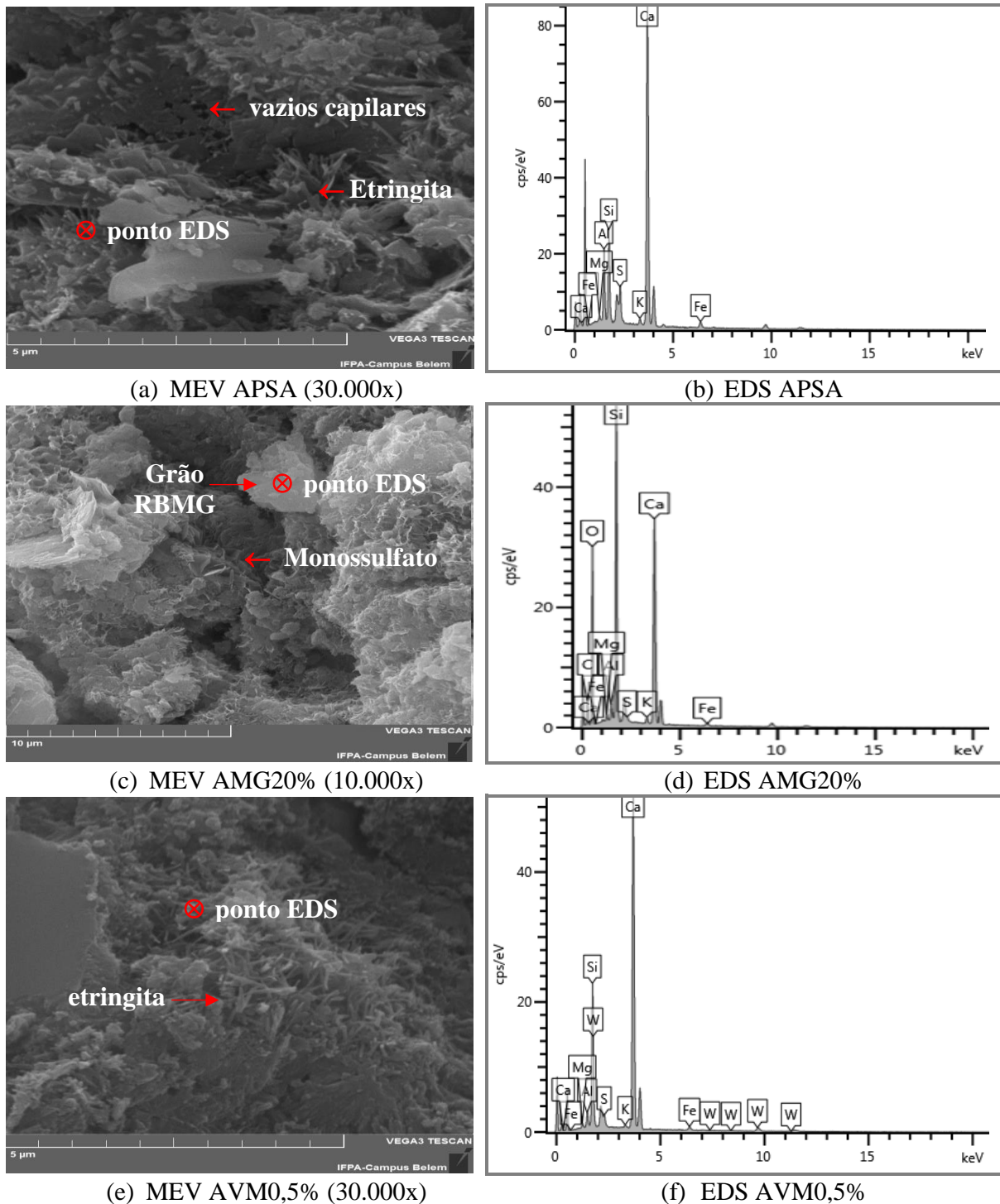


Figura 4.22 – Micrografias por MEV da superfície das argamassas fraturadas – (a) APSA, (c) AMG20% e (e) AVM0,5%; e Espectro de EDS (b) APSA, (d) AMG20% e (f) AVM0,5%.

Ao observar a Figura 4.22, é possível constatar que em (a) a matriz da argamassa APSA apresenta fase cristalina da etringita, que possui morfologia acicular (agulha); além de vazios capilares, considerados como poros de tamanho compreendidos entre 10nm – 5  $\mu$ m (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Seu espectro de EDS, apresentado em (b), detectou os elementos Cálcio (Ca), Silício (Si), alumínio (Al) e enxofre (S), cujos os picos são típicos

da etringita, conforme Melo (2010). Ademais, picos de magnésio (Mg), Ferro (Fe) e potássio (K) também foram encontrados.

Segundo Ferreira Júnior e Camarini (2003 *apud* Lopes, 2016), a etringita pode apresentar-se na fase retardada, caracterizada por gulhas mais curtas e mais grossas do que as agulhas de etringita primária que são longas e finas. Esta pode vir a provocar uma expansão da pasta de cimento, levando à ocorrência de fissuras nos concretos e argamassas, como o observado somente na superfície argamassa APSA. Ainda segundo os autores, a etringita retardada aumenta com o uso de cimento de alta resistência inicial, como o cimento Portland CP V.

Em (c) observa-se que a matriz da argamassa AMG20% apresenta cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado. O monossulfato (fase estável) se forma a partir da decomposição da etringita (fase instável) quando todo o sulfato de cálcio for consumido (MEHTA e MONTEIRO, 2014). De acordo com Melo (2010), as adições minerais no material cimentício favorece a formação da fase estável da etringita. Por conseguinte, o espectro de EDS em (d) apresenta picos elevados de Silício (Si) e cálcio (Ca), que conforme o verificado na caracterização mineralógica e química das partículas de RBMG, o Si é um dos elementos químicos do quartzo e feldspatos, presentes no granito; e, o Ca é um elemento presente na calcita, oriundo da rocha de mármore. O que leva a acreditar que o ponto de EDS sinalizado em (c) corresponde a um grão de RBMG, devido aos elementos no EDS e o tamanho da partícula. Ademais, picos de silício também refletem a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) junto a partícula. Este tem grande influência na resistência mecânicas dos materiais cimentícios.

A Figura (e) apresenta a matriz cimentícia da argamassa AVM0,5% apresenta um emaranhado de agulhas, morfologia típica da etringita. Seu espectro de EDS, apresentado em (f), detectou os elementos Cálcio (Ca), Silício (Si), alumínio (Al) e enxofre (S), cujos os picos são típicos da etringita, similar ao encontrado na argamassa APSA. Contudo, surge um novo elemento a wollastonita – w; que se apresenta em quantidade numerosa. Segundo Vitorino (2017), a wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) promove o refinamento da estrutura de poros da pasta cimentícia. Esta pode ser encontrado em aditivos poliméricos, como é o caso dos aditivos VMA e SP, materiais constituintes da argamassa AVM0,5%.

#### **4.3.10. Determinação da resistência de aderência à tração**

A determinação da resistência de aderência à tração ocorreu após 28 dias da aplicação da argamassa no substrato de concreto. Pode-se dizer que as ranhuras no substrato como

mecanismo de aderência entre a placa e argamassa foi eficiente. Pois, não houve deslocamento da argamassa do substrato. Os resultados de resistência de aderência à tração e a forma de ruptura dos cps das argamassas autonivelantes estão apresentados nas Tabelas 4.14, 4.15 e 4.16. O valor destacado (em vermelho) na Tabela 4.14, inserido no conjunto de dados referentes a argamassa APSA, foi descartado por ser muito discrepante da média obtida.

Tabela 4.14 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante APSA.

<b>Argamassa APSA</b>						
<b>CP</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Forma de Ruptura (%)</b>				
		<b>sub</b>	<b>sub/arg</b>	<b>arg</b>	<b>arg/cola</b>	<b>cola</b>
<b>1</b>	1,72		100			
<b>2</b>	1,68			90	10	
<b>3</b>	1,60	5	95			
<b>4</b>	1,87	55	45			
<b>5</b>	0,18			15	85	
<b>6</b>	1,23		90	10		
<b>7</b>	1,68		15	85		
<b>8</b>	1,67		15	85		
<b>9</b>	1,54		60	40		
<b>10</b>	1,68		10	90		
<b>11</b>	1,75			100		
<b>12</b>	1,68		10	90		
<b>Média (MPa)</b>	1,65					
<b>Desvio Padrão</b>	0,16					
<b>Coef. variação</b>	9,66%					



Tabela 4.15 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante AMG20%.

<b>Argamassa AMG20%</b>					
<b>CP</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Forma de Ruptura (%)</b>			
		<b>sub</b>	<b>sub/arg</b>	<b>arg</b>	<b>arg/cola</b>
1	1,88			90	10
2	1,85			85	15
3	1,83			85	15
4	2,34			100	
5	1,88		20	80	
6	1,36		80	20	
7	1,87		25	75	
8	2,33			95	5
9	2,34			100	
10	2,33			80	20
11	1,13	55	45		
12	1,86			95	5
<b>Média (MPa)</b>	1,92				
<b>Desvio Padrão</b>	0,39				
<b>Coef. variação</b>	20,24				

Tabela 4.16 – Resistência de aderência à tração da argamassa autonivelante AMV0,5%.

<b>Argamassa AMV0,5%</b>					
<b>CP</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Forma de Ruptura (%)</b>			
		<b>sub</b>	<b>sub/arg</b>	<b>arg</b>	<b>arg/cola</b>
1	2,53			100	
2	1,41			30	70
3	1,86		80	20	
4	2,41		10	90	
5	1,88		70	30	
6	1,80		90	10	
7	1,80		95	5	
8	2,53			95	5
9	2,34		40	60	
10	2,52			100	
11	1,88	20	80		
12	1,86			5	95
<b>Média (MPa)</b>	2,07				
<b>Desvio Padrão</b>	0,38				
<b>Coef. variação</b>	18,21				

De acordo com a tabela 4.14, a forma de ruptura da argamassa APSA aconteceu principalmente na argamassa e/ou na interface substrato/argamassa. Já a argamassa AMG20% (Tabela 4.15) apresentou a maioria das rupturas na argamassa. E, a argamassa

AVM0,5% (Tabela 4.16) apresentou a maioria das rupturas na argamassa ou na interface substrato/argamassa.

A média dos resultados obtidos para cada argamassa podem ser observados por meio da Figura 4.23, que contempla sua análise estatística.

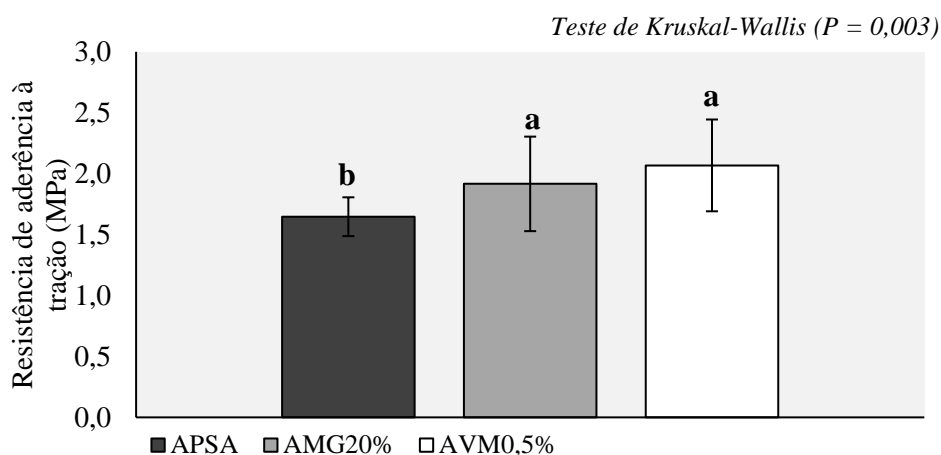


Figura 4.23 – Média das resistências de aderência à tração das argamassas autonivelantes. n = 12. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos.

Conforme observado na Figura 4.23, a argamassa APSA apresentou a menor resistência, de forma significativa, em relação as argamassas AMG20% e AMV0,5%. Em quanto que, apesar que a argamassa AMV0,5% apresentar a maior das resistências entre as mesmas, esta diferença não foi significativa em relação a argamassa AMG20%.

A EFNARC (2001) estipula como parâmetro para pisos cimentícios autonivelantes quanto ao ensaio de aderência ao arrancamento quando utiliza-se substratos de concreto, valores acima de 1MPa. Assim, pode-se dizer que todos os resultados de resistência de aderência à tração deste trabalho apresentaram valores superiores a esta prescrição, estando em conformidade com a mesma. E, comprovando que as argamassas autonivelantes produzidas apresentaram elevada resistência à tração e uma boa aderência com substrato, aumentado as possibilidades de durabilidade, visto que argamassas com baixos valores de aderência são mais propensas a se desprender do substrato a vida útil do material pode ser reduzida.

#### 4.4. RESULTADOS DA ETAPA 4: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EMPREGADO COMO SUBSTRATO.

Para caracterização físico-mecânica do concreto utilizado no substrato foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água por capilaridade. A seguir são apresentados os resultados médios desses ensaios na tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Média do ensaio resistência à compressão simples do substrato de concreto.

Propriedades	Média	Desvio padrão	Coef. de variação
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	30,91	2,81	9,08%
<b>Absorção por Capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b>			
<b>3h</b>	0,10	0,04	38,49%
<b>6h</b>	0,19	0,04	19,02%
<b>24h</b>	0,33	0,10	28,57%
<b>48h</b>	0,45	0,10	23,33%
<b>72h</b>	0,51	0,10	20,41%

A partir dos resultados obtidos e demonstrados na Tabela 4.17, verifica-se que o concreto produzido alcançou a resistência pré-estabelecida de 30 MPa. E, quanto ao coeficiente de absorção final de 0,51g/cm<sup>2</sup> às 72h, pode-se dizer que o mesmo é superior aos valores obtidos por Stolz (2011), que utilizando um cimento CP IV e uma relação a/c 0,47, encontrou 0,36 g/cm<sup>2</sup>, após 72h. Contudo, o concreto produzido nesta pesquisa é considerado de absorção moderada.

## 5. CONCLUSÕES

Esta dissertação proporciona uma contribuição ao desenvolvimento de argamassas autonivelantes a partir do estudo reológico de pastas cimentícias. Seus objetivos foram alcançados por meio de avaliações laboratoriais. Ressalta-se que os resultados obtidos e as conclusões apresentadas não devem ser tomados como forma absoluta, apesar de estarem em consonância com a maior parte das biografias citadas. Visto que, os mesmos correspondem exclusivamente às argamassas produzidas neste trabalho, com os materiais e métodos mencionados. A representatividade do comportamento dos materiais aqui estudados deve ser ratificada com a realização de novas pesquisas, com o intuito de confirmar e/ou complementar os dados obtidos.

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese do padrão de desempenho, com seus diversos parâmetros de análise e respectivos resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 5.1 – Requisitos de desempenho alcançados pelas argamassas

	Propriedades	Argamassas		
		APSA	AMG20%	AMV0,5%
Estado Fresco	Tempo de fluxo (s)	9,11	10,71	7,69
	Consistência (cm)	27	24,50	26
	Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	2,24	2,14	2,17
Estado Endurecido	Resistência à compressão simples (MPa)			
	1 dia	9,37	10,03	11,22
	7 dias	18,96	23,37	21,09
	28 dias	29,08	38,63	45,28
	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	1 dia	0,50	0,77	1,14
	7 dias	1,75	2,52	2,20
	28 dias	2,39	3,77	4,41
	Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias	9,93	16,61	13,83
	Módulo estático de elasticidade (MPa) – 28 dias	17,30	13,49	11,86
	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2023	2088	2042
Absorção de água por capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	3,04	2,23	2,74	
Resistência de aderência à tração (MPa)	1,65	1,92	2,07	

Conclui-se que o RBMG estudado, este apresentou características físicas próximas a do cimento CP V ARI, com partículas de formato irregular e angular. A sua composição é essencialmente de minerais oriundos de rochas graníticas com pequenas proporções de minerais de rochas carbonática. Em sua mineralogia apresenta-se como de fase cristalina, onde somente 1,2% das suas fases minerais são amorfas. Conforme as análises de DR-x, FR-x e de reatividade, o resíduo não possui potencial pozolânico e apresenta baixa reatividade.

Quanto a caracterização do comportamento reológico, verificou-se que as pastas cimentícias apresentam um comportamento não newtoniano, pseudoplástico, mostrando uma tendência semelhante aos fluidos do modelo de Herschel-Bulkley. Contudo, Os teores 20% de RBMG e 0,5% de VMA promoveram nas pastas PMG20% e PMV0,5% características homogêneas e estáveis, tendendo ao comportamento dos fluidos Binghamianos.

No estado fresco, a argamassa AMG20% apresentou valor de espalhamento menor que as argamassas APSA e AMV0,5%, além de apresentar melhor aspecto visual. Contudo, devido ao modo de atuação do RBMG e VMA, o efeito desses materiais aumenta a retenção de fluxo das argamassas, sendo uma propriedade importante a ser estudada em pesquisas futuras. Assim, como o efeito do procedimento de mistura ideal na densidade de massa das argamassas autonivelantes.

Acredita-se que o comportamento das argamassas autonivelante no estado endurecido é muito influenciado pelo estado fresco. Evidenciando isto, os resultados de resistência mecânica de todas as argamassas estudadas apresentaram altos valores, como o exigido em sistemas autonivelantes. Logo nas primeiras idades (24 h) as argamassas AMG20% e AMV0,5% apresentaram resistências à compressão simples próximas ou superiores a 10MPa, possibilitando a redução de custos e do cronograma de obra, por meio da rápida liberação para o uso do piso. Aos 28 dias todas as argamassas apresentaram resistência mecânica superior ao critério de 20 MPa requerido pela EFNARC (2001).

Considera-se que as argamassas autonivelantes AMG20% e AVM0,5% podem ser consideradas como argamassas de alta resistência mecânica para pisos, conforme a NBR 11801 (ABNT, 2012) por terem atingido resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral aproximadamente ou igual a 40 MPa e 4 MPa, respectivamente, aos 28 dias de idade. Quanto a resistência à tração na flexão, se mensuradas pelas prescrições da EFNARC (2001), cuja resistência mínima almejada à tração na flexão de pisos cimentícios autonivelantes deve ser superior a 5 MPa, todas as argamassas produzidas estão em conformidade e apresentam o comportamento mínimo de desempenho.

Quanto ao módulo estático de elasticidade, os dados obtidos para as argamassas APSA e AVM0,5% não são diretamente proporcionais aos resultados de resistência à compressão simples, como geralmente acontece para argamassas e concretos convencionais, requerendo mais estudos quanto a esta propriedade em argamassas autonivelantes com a verificação da influência do método utilizado por meio da análise do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando um equipamento de ondas ultrassônicas, como observado na maioria das pesquisas em argamassas.

A argamassa AMG20% apresentou melhores resultados de durabilidade quanto aos propriedade de densidade de massa e absorção de água por capilaridade, provavelmente devido ao melhor empacotamento dos grãos proporcionados pela adição de RBMG. Como observado na microestrutura por meio de MEV, a argamassa apresentou poucos vazios na sua microestrutura. E, por conseguinte, maior densidade da argamassa no estado endurecido. Além disso, as argamassas produzidas apresentaram uma boa aderência ao substrato, com valores acima de 1 MPa como prescrito pela EFNARC (2001).

Portanto, considera-se que as argamassas autonivelantes produzidas mostraram-se eficientes, quanto suas propriedades mecânicas e de durabilidade, e o RBMG tem potencial de aproveitamento como adição mineral (*filler*), em sua condução natural, tendo em vista, a substituição do uso VMA quando almeja-se estabilidade dimensional e coesão de argamassas autonivelantes. Essa proposição considera que, na região metropolitana de Belém, o VMA é um produto caro e de difícil acesso. Em quanto, o RBMG é um material de fácil obtenção, sem custos. Além disso, a reutilização deste resíduo promoverá vários benefícios ambientais, proporcionando um destino útil e plausível para o material que é descartado no meio ambiente pelas empresas brasileiras de beneficiamento de rochas ornamentais.

## **5.1. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Após análise dos resultados e verificação das possibilidades de continuidade e aprimoramento em pesquisa científica, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Realizar um estudo em relação a outros traços, como por exemplo, 1:2,5; e, a outras relações a/c;
- Verificar a resistência superficial das argamassas analisadas e o comportamento de possíveis tipos de materiais de revestimento empregados;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738.** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739.** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova. 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211.** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8522.** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro. 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9779.** Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9935.** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11768.** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12041.** Argamassa de alta resistência mecânica para pisos – Determinação da resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13278.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massas e teor de ar incorporado. 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13280.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13528.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência de aderência à tração. 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15259.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15577-4.** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009.

- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23.** Cimento Portland – Determinação e massa específica. 2000.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52.** Agregados miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **C 1708:** Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. 2012.
- ALRIFAI, A.; AGGOUN, S.; KADRI, A.; KENAI, S.; KADRI, E.H. **Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, v. 47, p. 969-976, 2013.
- APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.
- BARROS, M. M. S. B., SABABBATINI, F. H. **Tecnologia de Produção de contrapiso para Edifícios Habitacionais e Comerciais.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/ PCC/44. São Paulo: EPUSP, 1991.
- BRANCO, A. C., BRITO, M. **Contrapiso Autonivelante.** 2ª caderno de casos de inovação na construção civil. 2014.
- BAUER, E.; SOUSA, J. G. C. **Materiais constituintes e suas funções.** Revestimentos de Argamassas: Características e Peculiaridades. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005.
- BENABED, B. KADRI, E. H. AZZOUZ, L. KENAI, S. **Properties of self-compacting mortar made with various types of sand.** Cement & Concrete Composites, v. 34, p.1167-1173, 2012.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada.** / William D. Callister, Jr.; Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CARASEK, H. **Argamassas.** In: ISAIA, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. São Paulo: Arte Interativa, 2007. Cap. 26, p. 863-904
- CARVALHO, H. D. S. **Análise da retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do cimento Portland.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.



CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Tese Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade São Paulo, 2007.

CHRISTIANTO, 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.

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

\_\_\_\_\_. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** United Kingdom, 2002.

EGLE, T. **Contrapiso autonivelante.** Revista Técnica. Edição 164. Novembro, 2010.

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

FELEKOĞLU, B. *et al.*. **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. pag. 1719-1726, 2006.

FREIRE, L. C., QUEIROZ, J. P. C., CARANASSIOS, A. **Utilização de resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos paisagísticos.** XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2009.

GOMES, A. O.; GONÇALVES, J.P. **Inovações Tecnológicas em Canteiro de Obras.** XSBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Fortaleza, 2013.

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

GUGELMIN, L. A. M. **contrapiso autonivelante.** X SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Fortaleza, 2013.

KATSIADRAMIS, A.B.; SOTIROPOULOU; PANDERMARAKIS, Z.G. **Rheological and Mechanical Response Modifications for a Self-Leveling Mortar.** EPJ Web of Conferences 6, 23002, 2010.

KIRYU, H. S. **Investigação Reológica e Análise Mecânica de Compósitos Não-Newtonianos.** Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2006.

KRAUS, Z. F. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECC. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

- KUMAYAMA, R. **Estudo da Viabilidade do Emprego do Pó de Mármore para Produção de Concreto Autoadensável e Substituição Parcial dos Agregados por Pérolas de Poliestireno Expandido (EPS)**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: estruturas, 2014.
- LI, C. L. M.; YOU, Q. S. H.; FANG, H. **Effects of viscosity modifying admixture (VMA) on workability and compressive strength of structural EPS concrete**. *Construction and Building Materials* 175 (2018) 342–350
- LIBRE, N.A.; KHOSHNAZAR, R.; SHEKARCHI, M. **Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1262-1271, 2010.
- LISBOA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2004.
- LOPES DA SILVA, S. H. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2016.
- MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- 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.
- MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ed. Ibracon, 2014.
- NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. **Pisos auto-nivelantes. Propriedades e Instalações**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Salvador, 1997.
- NENEVÊ, B. L. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para contrapiso e proposição de requisitos de desempenho**. Curso de engenharia civil da universidade federal do paraná, 2017.
- NETO J. B. **Viabilidade da implementação da norma de desempenho NBR15575**. 9ª Encontro regional AsBEA. São Paulo. 2010.
- RUBIN, A. P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. Dissertação

(Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre - RS, 2015.

SILVA, S. H. L. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2016.

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.

SOUSA, A.L.R.; MELHADO, S.B. **Projeto e execução de lajes racionalizadas de concreto armado.** 1 Ed. São Paulo. v. 1. 2002.

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

SOUZA, A. S; FERREIRA, A. Z.; AZEVEDO, B. L. O. **Estudo para o desenvolvimento de argamassa autonivelante para contrapiso.** Trabalho de Final de Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

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

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

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

SATO, V. Y. **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. **Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas.** Ind. Cerâmica. 51, (2005) 325-330

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

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

ULIANA, J. G. **Estudo de tratamento térmico para aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial de cimento.**

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.

VITORINO, F. C. **Influência de Copolímeros de Estireno-Butadieno e de Fibras de Wollastonita na Hidratação, Reologia e Comportamento Mecânico a Altas Temperaturas de Pastas Dúcteis de Cimento Portland.** Tese (doutorado) – Programa de Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

MA, S.; QIAN, Y.; KAWASHIMA, S. **Experimental and modeling study on the non-linear structural build-up of fresh cement pastes incorporating viscosity modifying admixtures.** Cement and Concrete Research 108 (2018) 1–9.

## APÊNDICE A

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES, NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.

### A.1. Ensaio de retenção de fluxo das argamassas.

#### A.1.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.1 – Consistências individuais obtidas no ensaio de retenção de fluxo.

Grupos	Consistência (cm)				
	0 min	20 min	40 min	60 min	80 min
APSA	27,5	27,5	24	21,25	16
	26,75	26,75	24,25	21	15,75
	26,5	26,5	23,75	20,8	16
	27,25	27,25	24	20,95	16,25
<b>Média</b>	27	27	24	21	16
<b>Desvio padrão</b>	0,46	0,46	0,20	0,19	0,20
<b>Coef. Variação</b>	1,69%	1,69%	0,85%	0,89%	1,28%
AMG20%	24,75	25	22,63	19,75	16
	24	24,25	22,5	19	16,25
	24,5	24,875	22,25	19,25	16
	24,75	23,875	22,5	19	16
<b>Média</b>	24,5	24,5	22,47	19,25	16,06
<b>Desvio padrão</b>	0,35	0,53	0,16	0,35	0,13
<b>Coef. Variação</b>	1,44%	2,16%	0,70%	1,84%	0,78%
AMV0,5%	26	26	23,25	20	16
	25,75	25,75	23	20,25	15,875
	26	26,25	23,75	20,25	15,75
	26,25	26	23	19,875	16
<b>Média</b>	26	26	23,25	20,09	15,91
<b>Desvio padrão</b>	0,20	0,20	0,35	0,19	0,12
<b>Coef. Variação</b>	0,79%	0,79%	1,52%	0,93%	0,75%

### A.1.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.2. Teste de normalidade dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes.

Grupo	Tempo (min)	Shapiro-Wilk	
		Estatística	P-valor
APSA		0,949	0,714
AMG20%	0 min	0,827	0,161
AMV0,5%		0,945	0,683
APSA		0,949	0,714
AMG20%	20 min	0,912	0,492
AMV0,5%		0,945	0,683
APSA		0,945	0,683
AMG20%	40 min	0,895	0,406
AMV0,5%		0,827	0,161
APSA		0,961	0,783
AMG20%	60 min	0,827	0,161
AMV0,5%		0,849	0,224
APSA		0,945	0,683
AMG20%	80 min	0,629	0,001
AMV0,5%		0,863	0,272

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.3 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados de retenção de fluxo para as argamassas autonivelantes ao longo do tempo.

Tempo (s)	Levene	
	Estatística	P-valor
0 min	1,8	0,220
20 min	4,5	0,044
40 min	0,84	0,463
60 min	0,624	0,557
80 min	0,290	0,755

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes ( $n > 2$ ).

- *Para consistência inicial ( $T = 0$  min)*

Tabela A.4 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo  $T=0$ min.

ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P. valor
Fator	2	12,667	6,334	50,667	1,26448E-05
Resíduos	9	1,125	0,125		

Tabela A.5 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo  $T=0$ min.

Comparações Múltiplas					
	Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
	AMV0,5%-AMG20%	1,5	0,802	2,198	0,001
	APSA-AMG20%	2,5	1,802	3,198	9,568E-06
	APSA-AMV0,5%	1	0,302	1,698	0,008

- *Para consistência ( $T = 20$  min)*

Tabela A.6 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo  $T=20$ min.

Kruskal-Wallis	
Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	9,880
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,007

Tabela A.7 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo  $T=20$ min.

Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)					
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Estatística	P-valor	P-valor ajustado
AMG20% - AMV0,5%	4	6,103	1,569	0,116	0,349
AMG20% - APSA	8	6,103	3,137	0,002	0,005
AMV0,5% - APSA	4	6,103	1,568	0,117	0,349

- *Para consistência (T = 40 min)*

Tabela A.8 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=40min.

<b>Anova</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat.F</b>	<b>P.valor</b>
Fator	2	4,690	2,345	36,755	4,675E-05
Resíduos	9	0,574	0,063		

Tabela A.9 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=40min.

<b>Comparações Múltiplas</b>				
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
AMV0,5%-AMG20%	0,781	0,282	1,279	0,005
APSA-AMG20%	1,531	1,032	2,029	3,377E-05
APSA-AMV0,5%	0,75	0,251	1,248	0,006

- *Para consistência (T = 60 min)*

Tabela A.10 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=60min.

<b>Anova</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P. valor</b>
Fator	2	6,127	3,063	47,097	1,708E-05
Resíduos	9	0,585	0,065		

Tabela A.11 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=60min.

<b>Comparações Múltiplas</b>				
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
AMV0,5%-AMG20%	0,843	0,340	1,347	0,003
APSA-AMG20%	1,75	1,246	2,253	1,227E-05
APSA-AMV0,5%	0,906	0,402	1,409	0,002

- *Para consistência (T = 80 min)*

Tabela A.12 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=80min.

<b>Kruskal-Wallis</b>	
<b>Informação</b>	<b>Valor</b>
Kruskal-Wallis qui-quadrado	2,400
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,301



Tabela A.13 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados de retenção de fluxo das argamassas autonivelantes no tempo T=80min.

<b>Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)</b>					
<b>Fatores Comparados</b>	<b>Diferença Observada</b>	<b>Diferença Crítica</b>	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>	<b>P-valor ajustado</b>
AMG20% - AMV0,5%	3,5	6,103	1,372	0,169	0,509
AMG20% - APSA	1,375	6,103	0,539	0,589	1
AMV0,5% - APSA	2,125	6,103	0,833	0,404	1

## A.2. Ensaios de densidade de massa, no estado fresco.

### A.2.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.14 – Densidades de massa individuais obtidas no ensaio.

<b>Grupos</b>	<b>Mv (g)</b>	<b>Vr (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Mc (g)</b>	<b>A (g/cm<sup>3</sup>)</b>
APSA	45,09	437	1026,03	2,24
			1025,59	2,24
			1026,02	2,24
			1026,06	2,24
<b>Média</b>				2,24
<b>Desvio padrão</b>				0,00
<b>Coef. De variação</b>				0,00
AMG20%	45,09	437	981,10	2,14
			981,00	2,14
			981,25	2,14
			981,10	2,14
<b>Média</b>				2,14
<b>Desvio padrão</b>				0,00
<b>Coef. De variação</b>				0,00
AMV0,5%	45,09	437	994,68	2,17
			994,90	2,17
			994,03	2,17
			995,01	2,17
<b>Média</b>				2,17
<b>Desvio padrão</b>				0,00
<b>Coef. De variação</b>				0,00

### A.2.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.15. Teste de normalidade dos resultados de densidade de massas, no estado fresco.

<b>Grupo</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA	0,694	0,01
AMG20%	0,926	0,572
AMV0,5%	0,873	0,312

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.16 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados de densidade de massa, no estado fresco.

<b>Tipo de comparação</b>	<b>Levene</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA x AMG20% x AMV0,5%	1,2297853	0,3371582

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes (n > 2).

Tabela A.17 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados de densidade de massa, no estado fresco.

<b>Kruskal-Wallis</b>	
<b>Informação</b>	<b>Valor</b>
Kruskal-Wallis qui-quadrado	9,880
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,007

Tabela A.18 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados de densidade de massa, no estado fresco.

<b>Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)</b>					
<b>Fatores Comparados</b>	<b>Diferença Observada</b>	<b>Diferença Crítica</b>	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>	<b>P-valor ajustado</b>
AMG20% - AMV0,5%	4	6,103	1,569	0,116	0,35
AMG20% - APSA	8	6,103	3,137	0,002	0,005
AMV0,5% - APSA	4	6,103	1,568	0,117	0,35

### A.3. Ensaio de resistência à compressão simples.

#### A.3.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.19 – Resultados individuais do ensaio de resistência à compressão simples.

Grupos	Resistência à compressão simples		
	1 dia (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
APSA	8,10	17,86	26,29
	8,10	18,52	27,13
	9,63	18,70	27,95
	10,09	18,90	30,04
	10,09	19,36	30,90
	10,19	20,38	32,18
<b>Média</b>	9,37	18,96	29,08
<b>Desvio padrão</b>	1,00	0,86	2,31
<b>Coef. De variação</b>	10,67%	4,51%	7,94%
AMG20%	9,63	19,29	37,66
	9,73	21,53	38,83
	9,94	21,68	40,00
	10,19	25,30	41,25
	10,19	25,94	27,52
	10,52	26,47	46,55
<b>Média</b>	10,03	23,37	38,63
<b>Desvio padrão</b>	0,33	2,93	6,26
<b>Coef. De variação</b>	3,31%	12,53%	16,20%
AMV0,5%	10,45	18,06	38,52
	10,75	20,08	39,82
	11,39	20,08	44,84
	11,46	20,87	49,50
	11,52	22,37	49,50
	11,77	25,71	49,50
<b>Média</b>	11,22	21,19	45,28
<b>Desvio padrão</b>	0,51	2,61	5,08
<b>Coef. De variação</b>	4,54%	12,33%	11,22%

### A.3.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.20. Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão simples.

Grupo	Idade	Shapiro-Wilk	
		Estatística	P-valor
APSA		0,755	0,022
AMG20%	1 dia	0,953	0,763
AMV0,5%		0,887	0,304
APSA		0,962	0,836
AMG20%	7 dias	0,890	0,32
AMV0,5%		0,927	0,56
APSA		0,947	0,717
AMG20%	28 dias	0,909	0,433
AMV0,5%		0,835	0,118

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.21 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados de resistência à compressão simples.

Tipo de comparação	Idade	Levene	
		Estatística	P-valor
APSA x AMG20% x AMV0,5%	1 dia	1,545	0,245
APSA x AMG20% x AMV0,5%	7 dias	3,569	0,054
APSA x AMG20% x AMV0,5%	28 dias	1,415	0,274

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes (n > 2).

Tabela A.22 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples para idade de 1 dia.

Kruskal-Wallis	
Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	11,578
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,003

Tabela A.23 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples para idade de 1 dia.

<b>Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)</b>					
<b>Fatores Comparados</b>	<b>Diferença Observada</b>	<b>Diferença Crítica</b>	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>	<b>P-valor ajustado</b>
AMG20% - AMV0,5%	7,417	7,379	2,406	0,016	0,048
AMG20% - APSA	2,667	7,379	0,865	0,386	1
AMV0,5% - APSA	10,084	7,379	3,271	0,001	0,003

Tabela A.24 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de idade.

<b>ANOVA</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P. valor</b>
Fator	2	58,398	29,199	5,430	0,017
Resíduos	15	80,652	5,377		

Tabela A.25 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de idade.

<b>Comparações Múltiplas</b>					
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>	
AMV0,5%-AMG20%	-2,174	-5,651	1,303	0,266	
APSA-AMG20%	-4,412	-7,889	-0,935	0,013	
APSA-AMV0,5%	-2,238	-5,715	1,239	0,248	

Tabela A.26 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de idade.

<b>ANOVA</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P. valor</b>
Fator	2	864,164	432,082	16,528	0,0002
Resíduos	15	392,137	26,142		

Tabela A.27 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de idade.

<b>Comparações Múltiplas</b>					
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>	
AMV0,5%-AMG20%	7,376	-0,292	15,043	0,060	
APSA-AMG20%	-9,55	-17,218	-1,882	0,014	
APSA-AMV0,5%	-16,925	-24,593	-9,258	0,0001	

#### A.4. Ensaio à tração por compressão diametral.

##### A.4.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.28 – Resultados individuais do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Grupos	Resistência à tração por compressão diametral		
	1 dia (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
APSA	0,41	1,73	2,39
	0,50	1,74	2,39
	0,56	1,76	2,36
	0,56	1,76	2,43
<b>Média</b>	0,50	1,75	2,39
<b>Desvio padrão</b>	0,07	0,02	0,03
<b>Coef. De variação</b>	13,75%	0,86%	1,10%
AMG20%	0,67	1,95	4,02
	0,74	2,91	3,58
	0,82	2,54	3,47
	0,84	2,67	4,03
<b>Média</b>	0,77	2,52	3,77
<b>Desvio padrão</b>	0,08	0,41	0,29
<b>Coef. De variação</b>	10,17%	16,19%	7,77%
AMV0,5%	1,16	1,61	3,82
	0,97	2,31	4,54
	1,05	2,66	4,63
	1,37	2,22	4,66
<b>Média</b>	1,14	2,20	4,41
<b>Desvio padrão</b>	0,17	0,44	0,40
<b>Coef. De variação</b>	15,30%	19,87%	9,01%

#### A.4.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.29. Teste de normalidade dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Grupo	Idade	Shapiro-Wilk	
		Estatística	P-valor
APSA	1 dia	0,846	0,213
AMG20%		0,941	0,662
AMV0,5%		0,954	0,739
APSA	7 dias	0,848	0,22
AMG20%		0,930	0,596
AMV0,5%		0,949	0,708
APSA	28 dias	0,926	0,572
AMG20%		0,820	0,143
AMV0,5%		0,737	0,029

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.30 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Tipo de comparação	Idade	Levene	
		Estatística	P-valor
APSA x AMG20% x AMV0,5%	1 dia	1,597	0,255
APSA x AMG20% x AMV0,5%	7 dias	1,749	0,228
APSA x AMG20% x AMV0,5%	28 dias	1,595	0,255

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes (n > 2).

Tabela A.31 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para 1 dia de idade.

ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P. valor
Fator	2	0,802	0,401	29,276	0,0001
Resíduos	9	0,123	0,014		

Tabela A.32 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para 1 dia de idade.

<b>Comparações Múltiplas</b>				
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
AMV0,5%-AMG20%	0,367	0,136	0,598	0,004
APSA-AMG20%	-0,264	-0,495	-0,033	0,027
APSA-AMV0,5%	-0,630	-0,861	-0,399	8,66E-05

Tabela A.33 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de idade.

<b>ANOVA</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P. valor</b>
Fator	2	1,206	0,603	5,061	0,034
Resíduos	9	1,072	0,119		

Tabela A.34 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de idade.

<b>Comparações Múltiplas</b>				
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
AMV0,5%-AMG20%	-0,319	-1,001	0,362	0,426
APSA-AMG20%	-0,773	-1,454	-0,091	0,028
APSA-AMV0,5%	-0,453	-1,135	0,228	0,206

Tabela A.35 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

<b>Kruskal-Wallis</b>	
<b>Informação</b>	<b>Valor</b>
Kruskal-Wallis qui-quadrado	8,8
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,012

Tabela A.36 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

<b>Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)</b>					
<b>Fatores Comparados</b>	<b>Diferença Observada</b>	<b>Diferença Crítica</b>	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>	<b>P-valor ajustado</b>
AMG20% - AMV0,5%	3	6,103	1,177	0,239	0,718
AMG20% - APSA	4,5	6,103	1,765	0,077	0,233
AMV0,5% - APSA	7,5	6,103	2,942	0,003	0,01



## A.5. Ensaaios à tração na flexão.

### A.5.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.37 – Resultados individuais do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

<b>Amostras</b>	<b>APSA</b>	<b>AMG20%</b>	<b>AMV0,5%</b>
CP 1	8,55	14,06	12,66
CP 2	10,20	16,05	12,77
CP 3	10,43	17,81	15,35
CP 4	10,55	18,52	14,53
<b>Média</b>	9,93	16,61	13,83
<b>Desvio padrão</b>	0,93	1,99	1,33
<b>Coef. De variação</b>	9,36%	11,98%	9,61%

### A.5.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.38. Teste de normalidade dos resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

<b>Grupo</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA	0,765	0,052
AMG20%	0,947	0,695
AMV0,5%	0,868	0,289

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.39 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

<b>Tipo de comparação</b>	<b>Levene</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA x AMG20% x AMV0,5%	1,778	0,223

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes ( $n > 2$ ).

Tabela A.40 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

<b>ANOVA</b>					
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P. valor</b>
Fator	2	90,063	45,031	20,501	0,0004
Resíduos	9	19,769	2,1965		

Tabela A.41 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

<b>Comparações Múltiplas</b>				
<b>Níveis</b>	<b>Centro</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>P-valor</b>
AMV0,5%-AMG20%	-2,783	-5,7091	0,143	0,062
APSA-AMG20%	-6,68	-9,606	-3,754	0,0003
APSA-AMV0,5%	-3,896	-6,822	-0,971	0,012

## **A.6. Ensaio de Módulo Estático de Elasticidade.**

### **B.A.1. Resultados individuais dos ensaios**

Tabela A.42 – Resultados individuais do ensaio de módulo estático de elasticidade.

<b>Amostras</b>	<b>APSA</b>	<b>AMG20%</b>	<b>AMV0,5%</b>
CP 1 (GPa)	16,02	11,32	10,19
CP 2 (GPa)	16,33	13,12	10,38
CP 3 (GPa)	16,95	13,49	11,88
CP 4 (GPa)	19,90	16,02	15,00
<b>Média (GPa)</b>	17,30	13,49	11,86
<b>Desvio padrão</b>	1,78	1,93	2,22
<b>Coef. de variação</b>	10,26%	14,33%	18,75%

## A.6.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.43. Teste de normalidade dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade. Aos 28 dias de idade.

Grupo	Shapiro-Wilk	
	Estatística	P-valor
APSA	0,811	0,124
AMG20%	0,964	0,801
AMV0,5%	0,851	0,228

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.44 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade. Aos 28 dias de idade.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P-valor
APSA x AMG20% x AMV0,5%	0,106	0,900

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes (n > 2).

Tabela A.45 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade. Aos 28 dias de idade.

ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P. valor
Fator	2	62,292	31,146	7,896	0,010
Resíduos	9	35,498	3,944		

Tabela A.46 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade. Aos 28 dias de idade.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
AMV0,5%-AMG20%	-1,629	-5,55	2,292	0,504
APSA-AMG20%	3,808	-0,113	7,729	0,057
APSA-AMV0,5%	5,437	1,516	9,358	0,009

## A.7. Ensaios de Densidade de Massa Aparente, no Estado Endurecido.

### A.7.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.47 – Resultados individuais do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

<b>Amostras</b>	<b>APSA</b>	<b>AMG20%</b>	<b>AMV0,5%</b>
CP 1 (kg/m <sup>3</sup> )	2030,19	2112,73	2033,91
CP 2 (kg/m <sup>3</sup> )	2030,57	2086,96	2026,76
CP 3 (kg/m <sup>3</sup> )	2021,71	2080,23	2069,66
CP 4 (kg/m <sup>3</sup> )	2008,08	2070,25	2039,42
<b>Média (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2023	2088	2042
<b>Desvio padrão</b>	10,53	18,14	18,87
<b>Coef. de variação</b>	0,52%	0,87%	0,92%

### A.7.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.48. Teste de normalidade dos resultados do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

<b>Grupo</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA	0,86	0,24
AMG20%	0,931	0,599
AMV0,5%	0,865	0,278

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.49 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

<b>Tipo de comparação</b>	<b>Levene</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA x AMG20% x AMV0,5%	0,199	0,823

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes ( $n > 2$ ).

Tabela A.50 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P. valor
Fator	2	8852,95	4426,47	16,68	0,001
Resíduos	9	2388,44	265,38		

Tabela A.51 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
AMV0,5%-AMG20%	-45,108	-77,269	-12,946	0,009
APSA-AMG20%	-64,907	-97,068	-32,745	0,001
APSA-AMV0,5%	-19,7989	-51,960	12,362	0,251

## A.8. Ensaios de Absorção de Água por Capilaridade

### A.8.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela A.52 – Resultados individuais do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Amostra	APSA	AMG20%	AVM0,5%
CP 1 (g/dm <sup>2</sup> .min1/2)	2,78	1,53	2,00
CP 2 (g/dm <sup>2</sup> .min1/2)	3,05	2,33	2,57
CP 3 (g/dm <sup>2</sup> .min1/2)	3,07	2,56	3,05
CP 4 (g/dm <sup>2</sup> .min1/2)	3,28	2,50	3,33
<b>Média</b>	3,04	2,23	2,74
<b>Desvio padrão</b>	0,13	0,48	0,58
<b>Coef. De variação</b>	4,18%	21,38%	21,31%

### A.8.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.53. Teste de normalidade dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Grupo	Shapiro-Wilk	
	Estatística	P-valor
APSA	0,955	0,745
AMG20%	0,911	0,487
AMV0,5%	0,968	0,828

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.54 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P-valor
APSA x AMG20% x AMV0,5%	1,384	0,299

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes (n > 2).

Tabela A.55 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P. valor
Fator	2	1,161	0,581	1,327	0,312
Resíduos	9	3,937	0,437		

Tabela A.56 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de densidade de massa aparente aos 28 dias.

Comparações Múltiplas				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
AMV0,5%-AMG20%	0,212	-1,093	1,518	0,894
APSA-AMG20%	0,74	-0,566	2,046	0,302
APSA-AMV0,5%	0,527	-0,778	1,833	0,522

## A.9. Ensaios de Determinação de Resistência de Aderência

### A.9.1. Resultados individuais dos ensaios

Tabela B.57 – Resultados individuais do ensaio de determinação de resistência de aderência à tração.

<b>Amostra</b>	<b>APSA</b>	<b>AMG20%</b>	<b>AMV0,5%</b>
CP 1	1,72	1,88	2,53
CP 2	1,68	1,85	1,41
CP 3	1,60	1,83	1,86
CP 4	1,87	2,34	2,41
CP 5		1,88	1,88
CP 6	1,23	1,36	1,80
CP 7	1,68	1,87	1,80
CP 8	1,67	2,33	2,53
CP 9	1,54	2,34	2,34
CP 10	1,68	2,33	2,52
CP 11	1,75	1,13	1,88
CP 12	1,68	1,86	1,86
<b>Média</b>	1,65	1,92	2,07
<b>Desvio padrão</b>	0,16	0,39	0,38
<b>Coef. De variação</b>	9,66%	20,24%	18,21%

### A.9.2. Análise estatística

I - Teste de Normalidade: normalidade p-valor < 0,05.

Tabela A.58. Teste de normalidade dos resultados do ensaio de determinação de resistência de aderência à tração.

<b>Grupo</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA	0,803	0,011
AMG20%	0,851	0,037
AMV0,5%	0,858	0,046

II - Teste de homogeneidade

Tabela A.59 - Teste de Levene para homogeneidade dos resultados do ensaio de determinação de resistência de aderência à tração.

<b>Tipo de comparação</b>	<b>Levene</b>	
	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>
APSA x AMG20% x AMV0,5%	2,303	0,116

III - Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes ( $n > 2$ ).

Tabela A.60 - Teste de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, dos resultados do ensaio de determinação de resistência de aderência à tração.

<b>Kruskal-Wallis</b>	
<b>Informação</b>	<b>Valor</b>
Kruskal-Wallis qui-quadrado	11,808
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,003

Tabela A.18 - Teste de Kruskal-Wallis (comparações múltiplas) dos resultados do ensaio de determinação de resistência de aderência à tração.

<b>Comparações Múltiplas - FWER (Bonferroni)</b>					
<b>Fatores Comparados</b>	<b>Diferença Observada</b>	<b>Diferença Crítica</b>	<b>Estatística</b>	<b>P-valor</b>	<b>P-valor ajustado</b>
AMG20% - AMV0,5%	3,541	10,015	0,846	0,397	1
AMG20% - APSA	10,625	10,239	2,484	0,012	0,039
AMV0,5% - APSA	14,167	10,239	3,312	0,001	0,003