



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

ANA CAROLINNE VIEIRA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DE ADITIVO PLASTIFICANTE E METACAILIM NAS
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO
COM VERMICULITA EXPANDIDA**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

ANA CAROLINNE VIEIRA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DE ADITIVO PLASTIFICANTE E METACAILIM NAS
PROPRIEDADES DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM
VERMICULITA EXPANDIDA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal
de Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação
em Engenharia Civil.

Orientador(a): Profa. Dra. Aline
Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

ANA CAROLINNE VIEIRA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DE ADITIVO PLASTIFICANTE E METACAULIM NAS
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO
COM VERMICULITA EXPANDIDA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal
de Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação
em Engenharia Civil.

Orientador(a): Profa. Dra. Aline
Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo

Apresentado e aprovado em ____ de _____ de 2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo

Orientadora

Profa. Dra. Carina Silvani

Examinador Interno

Profa. Dr. Givanildo Alves de Azerêdo

Examinador Externo

Eng. Francisco de Assis da Costa Neto

Examinador Externo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por sua misericórdia, por sua graça e por todas suas maravilhas.

A minha mãe, Edilma, por seu amor, por sua dedicação, pelo seu apoio, pelos seus incentivos, por sempre querer o melhor para mim, pelas suas orações, pelos conselhos e por todos seus esforços (muitíssimos), que me permitiram chegar aqui.

A meu irmão, Júnior, por sua companhia, por seu apoio e pelos seus incentivos.

Aos meus amigos Bianca, Artur, Tiago e Helton que me acompanharam e me apoiaram durante toda graduação.

A minha orientadora, Professora Aline Azerêdo, pela paciência, pela atenção e pelos conhecimentos transmitidos.

Meus sinceros agradecimentos!

INFLUÊNCIA DE ADITIVO REDUTOR DE ÁGUA E METACAULIM NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA

ARAÚJO, Ana Carolinne Vieira¹

AZERÊDO, Aline Figueiredo Nóbrega de²

RESUMO

As argamassas têm função importante dentro da construção civil, e cada vez mais tem-se buscado melhorias tecnológicas para esses compósitos cimentícios visando diminuir impactos ambientais e atender exigências da norma de desempenho de edificações, a NBR 15575 (2013), que impõe requisitos mínimos para o comportamento térmico das edificações. Com isso, alguns materiais vêm sendo adicionados às argamassas com o intuito lhes proporcionar característica de isolamento térmico, sendo esses, os agregados leves, em especial, a vermiculita expandida. Diversos estudos realizados com esse agregado leve mostram que essas argamassas consomem mais água para atingir trabalhabilidade e apresentam baixa resistência mecânica. Em contrapartida, os aditivos redutores de água são utilizados com intuito de diminuir a água de amassamento das misturas, e as pozolanas (em destaque o metacaulim) são empregadas para promover maiores resistências e durabilidade aos revestimentos. Portanto, o objetivo desse estudo foi analisar a utilização de aditivo plastificante e do metacaulim nas propriedades das argamassas com vermiculita expandida. As análises dessas propriedades foram feitas no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa fresca e teor de ar incorporado) e endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e condutividade térmica). As misturas foram separadas em 3 grupos, sendo eles: o Grupo 1 contendo apenas argamassas de cimento de referência sem o agregado leve e variando o teor de aditivo plastificante; o Grupo 2 contendo misturas com 25% de vermiculita expandida em substituição da areia natural, variando o teor de aditivo plastificante e a proporção de cal e o Grupo 3 foi composto das mesmas misturas do Grupo 2 com a adição de 10% de metacaulim. Observou-se que a substituição da areia natural por 25% de vermiculita provocou alteração nas propriedades da argamassa, uma vez que a sua estrutura interferiu na densidade de massa, teor de água incorporado, parâmetros esses que influenciam outras propriedades. O aditivo plastificante apesar de reduzir a quantidade de água nas misturas com vermiculita, não proporcionou melhoras na resistência à compressão; as argamassas com vermiculita e metacaulim apresentaram os melhores valores de resistência mecânica e tiveram menor isolamento térmico em comparação às argamassas contendo apenas a VE, entretanto, ainda apresentam melhor desempenho térmico do que as argamassas comuns.

Palavras-chave: Vermiculita expandida. Metacaulim. Argamassa Térmica.

¹ Acadêmica do Curso de Engenharia Civil – UFCG, e-mail: carolinnev@outlook.com

² Professora Orientadora do Curso de Engenharia Civil – UFCG

ABSTRACT

Mortars play an important role within civil construction, and technological improvements are increasingly being sought for these cement composites in order to reduce environmental impacts and meet the requirements of the building performance standard, NBR 15575 (2013), which imposes minimum requirements for mortars. the thermal behavior of buildings. Thus, some materials have been added to mortars in order to provide them with thermal insulation characteristics, which are light aggregates, especially expanded vermiculite. Several studies with this lightweight aggregate show that these mortars consume more water to achieve workability and have low mechanical strength. In contrast, water reducing additives are used to reduce the mixing water of mixtures, and pozzolans (especially metakaolin) are employed to promote higher strength and durability of coatings. Therefore, the aim of this study was to analyze the use of plasticizer additive and metakaolin in the properties of expanded vermiculite mortars. The analyzes of these properties were made in the fresh state (consistency index, fresh mass density and incorporated air content) and hardened (apparent mass density, compressive strength, capillarity water absorption and thermal conductivity). The mixtures were separated into 3 groups, as follows: Group 1 containing only reference cement mortars without light aggregate and varying the plasticizer additive content; Group 2 containing mixtures with 25% expanded vermiculite as a substitute for natural sand, varying the plasticizer additive content and lime ratio and Group 3 was composed of the same mixtures as Group 2 with the addition of 10% metakaolin. It was observed that the replacement of natural sand by 25% of vermiculite caused changes in the properties of the mortar, since its structure interfered with the mass density, incorporated water content, parameters that influence other properties. The plasticizer additive, despite reducing the amount of water in the vermiculite mixtures, did not improve the compressive strength; The vermiculite and metakaolin mortars had the best mechanical strength values and had lower thermal insulation compared to the mortars with only VE, however, they still have better thermal performance than ordinary mortars.

Keywords: Expanded vermiculite. Metakaolin. Thermal mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes camadas de revestimento: (a) chapisco + emboço + reboco + acabamento (b) chapisco + camada única + acabamento.....	17
Figura 2 – Fotografias de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): a) vermiculita natural; b) vermiculita expandida.....	24
Figura 3 - Fluxograma experimental.....	33
Figura 4 – Recipiente utilizado para determinação da massa unitária da Cal Hidratada e Cimento Portland.....	35
Figura 5 - Determinação da massa específica da vermiculita expandida: a) infusor com fita crepe sendo pesado; b) infusor submerso em água na proveta graduada para determinação do volume deslocado.....	36
Figura 6 – Curva granulométrica da Vermiculita Expandida (VE).....	37
Figura 7 – Curva granulométrica da Areia Natural (AN).....	37
Figura 8 – Curva granulométrica da VE e NA.....	38
Figura 9 – Curva granulométrica do CP-V.....	39
Figura 10 - Curva granulométrica do MC.....	39
Figura 11 – Curva Granulométrica da CH-II.....	40
Figura 12 – Difração de raios-x do CP-V.....	42
Figura 13 – Difração de raios-x do MC.....	42
Figura 14 – Difração de raios-x da CH-II.....	43
Figura 15 – Micrografias obtidas por MEV com aumento de: a)100x; b) 200x.....	44
Figura 16 – Processo de amassamento de argamassa com o misturador.....	46
Figura 17 – Ensaio da mesa consistência.....	47
Figura 18 – Ensaio de densidade de massa.....	48
Figura 19 – Cura dos corpos-de-prova.....	49
Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão: a) equipamento Shimadzu Servopulser; b) ruptura de corpo-de-prova.....	50
Figura 21 – Ensaio de absorção por capilaridade.....	51
Figura 22 – Placa sendo posta para análise no condutivímetro K30.....	52
Figura 23 – Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 1.....	53
Figura 24 –Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 2.....	54
Figura 25 –Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 3.....	54
Figura 26 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo.....	56

Figura 27 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo 2	56
Figura 28 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo 3	57
Figura 29 – Densidade de massa do estado endurecido.	58
Figura 30 – Resistência a compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 1.	60
Figura 31 – Resistência a compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 2.	60
Figura 32 – Resistência a compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 3.	61
Figura 33 – Absorção por capilaridade das argamassas aos 10 (A,10) e 90 minutos (A,90).....	63
Figura 34 – Coeficiente de capilaridade das argamassas.	64
Figura 35 - Condutividade térmicas das argamassas.....	66
Figura 36 – Resistividade térmica das argamassas.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação granulométrica de vermiculita.....	25
Tabela 2 – Requisitos químicos das normas de materiais pozolânicos.	31
Tabela 3 – Características físicas dos materiais.	34
Tabela 4 – Módulo de finura e diâmetro máximo dos agregados.....	38
Tabela 5 – Composição química por fluorescência de raios-x (% em massa) do CP-V e MC.....	41
Tabela 6 – Misturas do Grupo 1 (Referências).....	45
Tabela 7 – Misturas do Grupo 2.	45
Tabela 8 – Misturas do Grupo 3.	45

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM - American Society for Testing and Materials
BET - Brunauer, Emmett e Teller
CP-V - Cimento Portland
DMS - Departmental Materials Specification
DRX - Difração de Raios-X
EVA – Etileno Acetato de Vinila
FRX - Fluorescência de Raios-X
IS – Indian Standart
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia
PNEF – Plano Nacional de Eficiência Energética
MC - Metacaulim
MNE – Ministério de Minas e Energia
NBR - Norma Brasileira
NF - Normalisation en France
NM - Norma Mercosul
UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
UFPB - Universidade Federal da Paraíba

LISTA DE SIMBOLOS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio ou alumina
 C_3A - Aluminato de cálcio
 C_4AF - Ferro-aluminato de cálcio
 CaO - Óxido de cálcio
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de cálcio
 $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$ - Brownmillerita
 CaCO_3 – Calcita
 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – Dalomita
 $\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$ - Silicato de cálcio
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
cm - Centímetros
 cm^2 - Centímetros quadrados
 Fe_2O_3 - Óxido de ferro III ou hematita
 g/cm^3 - Grama por centímetro cúbico
g – Grama
 kg/m^3 - Quilograma por metro cúbico
 K_2O - Óxido de potássio
 MgO - Óxido de magnésio
 $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 4\text{H}_2\text{O}$ - Vermiculita
mm – Milímetro
MPa - Megapascal
 SiO_2 - Dióxido de silício ou sílica
 SO_3 - Trióxido de enxofre
 SrO - Óxido de estrôncio
 TiO_2 - Dióxido de titânio
 γ – Massa específica
 ρ – Densidade de massa no estado endurecido
 μm – Micrometro
 $^\circ\text{C}$ – Graus Celsius
mA – Miliampères

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO	15
1.1.1. Objetivo geral	15
1.1.2. Objetivos específicos	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....	17
2.1.1. Requisitos das argamassas de revestimento	18
2.1.2. Propriedades das argamassas de revestimento	19
2.1.2.1. <i>Propriedades no estado fresco</i>	19
2.1.2.2. <i>Propriedades no estado endurecido</i>	21
2.2. VERMICULITA EXPANDIDA	23
2.2.1. Definição, mineralogia e geologia	23
2.2.2. Propriedades físicas e aplicações	23
2.2.3. Influência da vermiculita nas propriedades tecnológicas das argamassas	25
2.3. ADITIVOS	27
2.3.1. Aditivos redutores de água.....	28
2.4. ADIÇÕES MINERAIS	29
2.4.1. Metacaulim.....	30
2.4.1.1. <i>Definição e propriedades</i>	30
2.4.1.2. <i>Influência do metacaulim nas propriedades tecnológicas das argamassas</i>	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. MATERIAIS.....	33
3.2. MÉTODOS	34
3.2.1. Caracterização dos materiais	34
3.2.2. Mistura das argamassas	44
3.2.3. Ensaio da argamassa no estado fresco	46
3.2.4. Ensaio da argamassa no estado endurecido	48
3.2.5. Análise térmica	52
4. RESULTADOS	53
4.1. ANÁLISES NO ESTADO FRESCO	53

4.1.1.	Índice de consistência	53
4.1.2.	Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado	56
4.2.	ANÁLISES NO ESTADO ENDURECIDO	58
4.2.1.	Densidade de massa aparente	58
4.2.2.	Resistência à compressão	59
4.2.3.	Absorção de água por capilaridade	63
4.2.4.	Análise térmica.....	66
5.	CONCLUSÕES.....	68
6.	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICES	74

1. INTRODUÇÃO

Os materiais de construção são extremamente relevantes dentro da Indústria da Construção Civil, pois eles têm influência na qualidade final de uma obra. Dentro da imensa gama de materiais utilizados na construção, as argamassas são bastantes utilizadas. Elas vêm sendo empregadas desde a pré-história e passaram por diversas transformações, devido a progressos tecnológicos, até chegarem nas configurações que conhecemos atualmente (ALVAREZ J; SEQUEIRA C; COSTA M, 2005). Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) e (CARASEK, 2010), as argamassas podem ser definidas como misturas homogêneas de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo ainda conter adições minerais e aditivos químicos, dosadas em obra ou em instalação própria, que conferem propriedades de aderência e endurecimento.

Existem diversos tipos de argamassas, cada tipo para aplicações específicas, como por exemplo para assentamento de alvenarias e para revestimento de paredes, pisos e tetos. As de revestimento, foco deste trabalho, segundo CARASEK (2010) têm como principais funções proteger a alvenaria de intemperismos, regularizar a superfície e integrar o sistema de vedação contribuindo com diversas outras funções, como estanqueidade a água, proteção contra fogo, isolamento termoacústico, sendo essa últimas função mais requisitada atualmente, desde que a NBR 15.575 (ABNT, 2013), que trata de requisitos mínimos para o desempenho de edificações, entrou em vigor. De acordo com esta norma é exigido condições de habitabilidade por meios de critérios expressos por diversos fatores, entre eles o desempenho térmico dos ambientes.

Dessa forma, o mercado vem disponibilizando, nos últimos anos, argamassas industrializadas de revestimento que fornecem propriedades de isolamento térmico. Bem como também, alguns materiais vêm sendo incorporados as argamassas tradicionais de revestimento dosadas em obra para conferir-lhes tais características. Dentre esses materiais pode-se destacar o uso de agregados leves, os quais possuem uma massa específica inferior a 2000 kg/m^3 (SOUSA, 2010).

Os agregados leves quando incorporados às argamassas diminuem a densidade aparente do revestimento. Sendo a densidade uma grandeza que é inversamente relacionada às características de isolamento térmico de um material, portanto, quanto menor for a massa específica de um material maior é a capacidade desse de isolamento térmico (CARDOSO; CALLEJAS; DURANTE, 2016).

Dos agregados leves disponíveis no mercado, um dos mais empregados em argamassas que se apresenta eficaz quanto as características de isolamento térmico, é a

vermiculita expandida. A incorporação da vermiculita expandida às argamassas vem sendo alvo de estudo quanto as suas propriedades tecnológicas. A partir desses estudos, como os de Barros (2018), Sinharelli (2019), Aguiar (2017) e Cintra (2013), verificou-se que essas argamassas precisam de um fator água/aglomerante mais elevado em comparação às misturas comuns para que apresente uma melhor trabalhabilidade e consequentemente apresentam redução na resistência mecânica.

Uma das soluções que vem sendo adotada nos canteiros de obras buscando otimizar a quantidade de água incorporada às misturas à base de cimento Portland e o aumento na resistência mecânica desses produtos são os aditivos químicos, em especial os aditivos redutores de água, sendo eles os plastificantes e superplastificantes. Outra alternativa para aumentar a resistência dos compósitos cimentícios são as adições minerais, estudos como o de Sinharelli (2019) mostram que o metacaulim melhora a resistência mecânica das argamassas com vermiculita sem prejudicar sua capacidade de isolamento térmico.

Com base nisso, esse estudo tem como objetivo avaliar a influência do aditivo do tipo plastificante e do metacaulim nas propriedades de argamassas de revestimento contendo vermiculita substituindo parcialmente o agregado miúdo.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo geral

Estudar a influência de aditivo plastificante e metacaulim para traços de argamassa com vermiculita expandida quanto suas propriedades frescas, endurecidas (físico-mecânico e térmica).

1.1.2. Objetivos específicos

- Estudar diferentes misturas (dosagens) de argamassa contendo vermiculita expandida e metacaulim com diferentes teores de aditivo plastificante;
- Analisar as propriedades dessas argamassas a partir de ensaios no estado fresco e endurecido;
- Avaliar as propriedades térmicas das misturas com melhor desempenho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A preocupação com eficiência energética no mundo ganhou destaque na década de 70, com a percepção da escassez de recursos energéticos, como o petróleo, mas também outros fatores foram preponderantes: a preocupação com o Meio Ambiente e as mudanças climáticas. No Brasil, foi criado e instituído o PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica em 30 de dezembro de 1985, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MNE), que visa promover o uso eficiente da energia elétrica e combater seu desperdício. O PROCEL atua em diferentes áreas da economia, incluindo as edificações, promovendo a realização da promoção do uso eficiente de energia no setor de construção civil, em edificações residenciais, comerciais e públicas. O PROCEL Edifica visa desenvolver atividades que incluem pesquisas e apoio à produção de novas tecnologias, materiais e sistemas construtivos, além de estimular o desenvolvimento de equipamentos eficientes utilizados nas edificações. No mesmo âmbito, foi criada a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, a chamada Lei de Eficiência Energética, que estabeleceu uma política nacional de conservação e uso racional de energia, regulamentada pelo o Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001. E por meio da Portaria nº 594, de 2011, o MME aprovou o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF).

Coligado a Lei de Eficiência Energética, em 2005 foi aprovada a NBR – 15220 (ABNT, 2005), relativo ao desempenho térmico das edificações, suas partes normatizam o zoneamento bioclimático brasileiro associado às diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social por meio de estratégias de condicionamento térmico. Outra norma correlata em vigência é a Norma de Desempenho – NBR – 15.575 (ABNT, 2013), que estabelece atender requisitos dos usuários referente a sistemas que compõem edificações habitacionais, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo, dentro desses requisitos estão o desempenho das edificações.

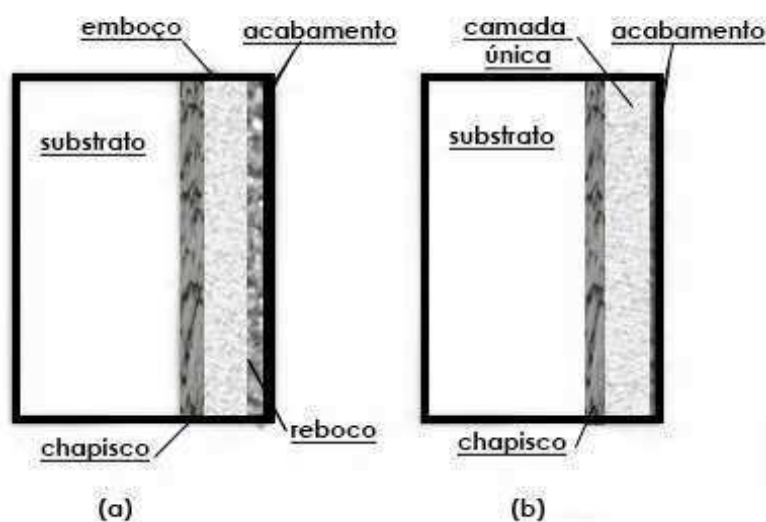
Com base em todos estes aspectos, visando a redução da energia consumida destinada a prover os usuários condições de conforto necessárias a habitabilidade, a eficiência energética em edificações consiste no uso eficiente de recursos naturais como água, luz e ventilação, reduzindo desperdícios e impactos sobre o meio ambiente. De acordo com Nascimento (2015), o consumo de energia elétrica, em edificações corresponde a aproximadamente 50% da eletricidade consumida no país, assim pode-se

concluir que a utilização de artifícios capazes de diminuir a utilização equipamentos elétricos que promovem o conforto térmico vêm sendo bastante estimulados e utilizados nas edificações. Um desses artifícios é a utilização de argamassas com capacidade de isolamento térmico.

2.1. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Umas das aplicações para as argamassas é o revestimento de tetos, pisos e paredes. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) e Carasek (2010), o revestimento de argamassa pode ser definido como uma proteção a um substrato podendo ser constituído de uma ou mais camadas superpostas, resultando em superfície apta a receber um acabamento final como pintura, revestimentos cerâmicos e laminados. O revestimento de argamassa, no geral, pode se dar em duas camadas ou em uma camada. Essas camadas são classificadas conforme suas características e suas funções específicas. Como exemplos têm-se o chapisco, emboço, reboco e massa única, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 – Diferentes camadas de revestimento: (a) chapisco + emboço + reboco + acabamento (b) chapisco + camada única + acabamento



Fonte: adaptado Carasek (2010)

O chapisco não é considerado uma camada de revestimento, mas sim como uma camada de preparação de base. Pode ser definida como uma mistura bem fluida constituída de água, cimento e agregado miúdo que tem função de uniformizar a base de

aplicação e melhorar a aderência entre o substrato e a camada de revestimento. (ABCP, 2002; CARASEK, 2010)

O emboço, também conhecido como massa grossa, é uma camada de revestimento utilizada para cobrir e uniformizar o substrato com ou sem chapisco, de forma que propicie a aplicação de outra camada como o reboco ou revestimento decorativo como a cerâmica. Deve ter espessura média entre 15mm e 20mm. (ABCP, 2002; CARASEK, 2010; SILVA, 2006)

O reboco é uma camada de revestimento que possui textura suave e regular utilizada para dar acabamento ao emboço e permitir a aplicação de revestimento decorativo como a pintura (ABCP, 2002; CARASEK, 2010). O reboco em casos de camada dupla não deve ultrapassar a espessura de 5mm (LEGGERINI; AURICH, 2011). A massa única, ou reboco paulista, é um revestimento que possui um único tipo argamassa aplicado ao substrato, cumprindo a função de emboço e reboco, sobre o qual recebe acabamento final decorativo. É a alternativa mais utilizada no Brasil, devido sua praticidade. (ABCP, 2002; CARASEK, 2010)

2.1.1. Requisitos das argamassas de revestimento

A argamassa de revestimento devem cumprir algumas funções, segundo a ABCP (2002), Carasek (2010) e Leggerini e Aurich (2011), são:

- Proteger a edificação de ação direta de agentes agressivos, como a ação do intemperismo;
- Auxiliar na vedação, contribuindo com 30% no isolamento térmico, 50% de isolamento acústico, até 100% na estanqueidade à água e gases, e a proteção ao fogo;
- Promover uma superfície regular dos elementos de vedação, de modo que esteja apta a receber outros revestimentos de decoração de acordo com o projeto arquitetônico, contribuindo com a função estética.

Importante destacar que não é função das argamassas cobrir imperfeições grosseiras do substrato, como o desaprumo e desalinho causados por descuido na execução.

2.1.2. Propriedades das argamassas de revestimento

Para que todas as funções da argamassa possam ser atendidas, algumas propriedades argamassas devem apresentar bom desempenho tanto no estado fresco como no endurecido, que são: trabalhabilidade, consistência, adesão inicial, plasticidade, retenção de água, densidade de massa, aderência, absorção de água (estanqueidade), resistência mecânica, e capacidade de absorver deformações. Dessas propriedades citadas, nesse estudo foram avaliadas a densidade de massa fresca e trabalhabilidade (com foco na plasticidade através da mesa de consistência), resistência à compressão, absorção por capilaridade e a densidade de massa aparente.

2.1.2.1. *Propriedades no estado fresco*

O estudo das propriedades das argamassas, no estado fresco, é importante, pois esses materiais são manuseados e aplicados na sua configuração plástica. Essas propriedades se tornam complexas ao entendimento se levarmos em consideração a gama de materiais (cimento, agregados, cal, teor de água, aditivo, adições minerais), as técnicas de aplicação e os tipos de substratos. Para revestimento, as argamassas são avaliadas conforme a trabalhabilidade (consistência, plasticidade), retenção de água, adesão inicial, densidade de massa e teor de ar incorporado. A adequação dessas propriedades no estado fresco fará que o revestimento desempenhe bem suas funções no estado endurecido.

- **Trabalhabilidade**

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais complexas da argamassa pois tem influência de diversas outras propriedades, como a consistência, adesão inicial, plasticidade, retenção de água, densidade de massa que juntas definem a qualidade e produtividade da aplicação, como também, são determinantes para desempenho do revestimento em serviço (CARASEK, 2010; CINTRA, 2013). É através da trabalhabilidade que se pode avaliar qualitativamente o manuseio da argamassa, alguns testes podem ser realizados para avalia-la, como: a colher de pedreiro penetrar facilmente a argamassa sem ser fluída; se manter coesa no transporte, não aderir a colher quando lançada; se fixar imediatamente e se distribuir facilmente no substrato; permanecer plástica por tempo suficiente para que a operação seja completa (LEGGERINI; AURICH, 2011; SILVA, 2006).

- **Consistência**

A consistência pode ser definida como a capacidade da argamassa resistir a deformação no seu estado fresco. Essa propriedade está diretamente ligada a quantidade de água adicionada a mistura. As argamassas segundo essa propriedade podem ser classificadas como secas (a pasta preenche todos os espaços entre os agregados, ainda deixando-os em contato), plásticas (camada de pasta “molha” os agregados, atuando como lubrificante entre os grãos) ou fluidas (os agregados ficam imersos na pasta) (CARASEK, 2010; SILVA, 2006).

- **Plasticidade**

A plasticidade é a propriedade que permite a argamassa conservar sua forma após a aplicação de uma tensão de deformação (CINTRA, 2013; SILVA, 2006). De acordo com Carasek (2010) e Silva (2006), assim como a consistência, a plasticidade é uma propriedade influenciada pela natureza e quantidade de aglomerante e agregados, processo da mistura, teor de ar aprisionado. A consistência e a plasticidade são as principais propriedades que caracterizam a trabalhabilidade.

- **Adesão Inicial**

Propriedade que se caracteriza pela capacidade da argamassa no estado fresco se unir a uma base. Está relacionada diretamente a tensão superficial da pasta que é função inversa do teor de cimento. Quanto menor for a tensão superficial maior contato da pasta com os grãos do agregado e também com o substrato.

- **Retenção de água e teor de ar incorporado**

A retenção de água é uma propriedade que pode ser descrita como a capacidade da argamassa no estado fresco de manter a sua trabalhabilidade quando submetida a solicitações sem perder água para o substrato ou por evaporação (CARASEK, 2010; CINTRA, 2013). É uma propriedade que influencia o desempenho da argamassa tanto no estado fresco (no processo de retração plástica) quando no endurecido. No estado endurecido a argamassa precisa do teor de água ideal para que as reações de hidratação do cimento se efetuem de maneira adequada a fim de que a argamassa não sofra perda na resistência mecânica e adesão (CARASEK, 2010).

- Densidade de massa fresca

A densidade de massa da argamassa no seu estado fresco é um parâmetro bastante importante para determinação da trabalhabilidade. Argamassas com menor densidade são mais trabalháveis por mais tempo. A densidade das argamassas varia com teor de ar incorporado e com os agregados que as constituem. Conforme a densidade massa no estado fresco, elas podem ser classificadas em leves ($<1,4 \text{ kg/m}^3$), normais (a partir de $1,4 \text{ kg/m}^3$ até $2,3 \text{ kg/m}^3$) e pesadas ($>2,3 \text{ kg/m}^3$) (CARASEK, 2010).

2.1.2.2. *Propriedades no estado endurecido*

As propriedades no estado endurecido, influenciadas pelas propriedades no estado fresco, irão definir o desempenho do revestimento em resistir aos esforços mecânicos. As argamassas de revestimento podem ser avaliadas quanto a aderência, absorção de água por capilaridade e resistência mecânica (que inclui resistência à compressão, à tração e cisalhamento).

- Aderência

A aderência é a propriedade que permite que a argamassa resista a tensões normais e tangenciais, se caracterizando como a extensão do contato entre a argamassa e uma base. (ABCP, 2002; CARASEK, 2010)

Ainda com base nos mesmos autores, a aderência se dá principalmente pela ancoragem da pasta aglomerante nos poros do substrato (parte da água contendo aglomerante da pasta é seccionada pelos poros onde acontece seu endurecimento), e pelo efeito de ancoragem mecânica das saliências e depressões macroscópicas da base a ser revestida.

- Absorção de água

Propriedade que está relacionada com a capacidade de absorção de água por capilaridade e a presença de fissuras na argamassa no seu estado endurecido, que influenciará na estanqueidade do sistema. Diversos fatores podem influenciar na estanqueidade, sendo eles: natureza e proporção de materiais constituintes da argamassa; espessura da cama; natureza da base; técnica de execução e quantidade e tipos de fissuras existente (ABCP, 2002; CINTRA, 2013).

- Densidade de massa aparente

Essa propriedade pode ser definida como a relação entre a massa e o volume da argamassa no seu estado endurecido e pode indicar a compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto, além de poder determinar indiretamente o volume de vazios incorporados por aditivos e a quantidade água que foi perdida durante o processo de evaporação (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004).

- Resistência mecânica

A resistência mecânica é a capacidade da argamassa endurecida em resistir a esforços de tração, compressão e cisalhamento. Cargas de impacto, efeito de contração e expansão devido a variação de umidade, abrasão superficial são exemplos das solicitações que os revestimentos podem estar sujeitos (ABCP, 2002; CINTRA, 2013).

- Capacidade de absorver deformações

É a propriedade que a argamassa endurecida tem de absorver as deformações intrínsecas ou extrínsecas (da base) a ele sem que apresente fissuras e sem perder a aderência. A capacidade de absorver deformações está diretamente ligada à resistência a tração e o módulo de deformação do revestimento. Os principais fatores relacionados ao grau de fissuração são: teor e natureza dos aglomerantes e agregados, condições ambientais, capacidade de absorção de água da base, técnica de execução. (ABCP, 2002; CINTRA, 2013).

Todas essas propriedades são afetadas conforme os tipos de materiais utilizados para composição da mistura de revestimento. Os agregados leves, utilizados com intuito de agregar a característica de isolamento térmico, em especial, a vermiculita expandida, contribui para a diminuição da densidade de massa aparente das argamassas, devido à sua baixa massa específica que acaba por impactar negativamente a resistência mecânica. Em contrapartida, outros materiais surgiram com propósito de melhorar o desempenho mecânico de argamassas e concretos, sendo eles: os aditivos, especificamente, os plastificantes/superplastificantes, que visam a diminuição da água de amassamento e consequentemente melhoram a resistência mecânica; e as adições minerais como as pozolanas, destacando o metacaulim, que aumenta o desempenho mecânico e a durabilidade dos materiais compostos por cimento Portland.

2.2. VERMICULITA EXPANDIDA

A vermiculita é um mineral que pode ser empregado em vários usos, sendo mais utilizado na sua forma expandida, apesar de ser comercializado em seu estado natural. Ao passar pelo processo de expansão por meio de aquecimento, a vermiculita é usada para diversas aplicações em diversas áreas, como na construção civil, na agricultura, nas indústrias química, de tintas, dentre outras, isso se dá por se apresentar como um material de baixa densidade com propriedade de isolamento termoacústico.

2.2.1. Definição, mineralogia e geologia

A vermiculita $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 4\text{H}_2\text{O}$ é um mineral do grupo das micas, constituído por cerca de dezenove variedades de silicato hidratado de alumínio, magnésio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal (CARVALHAES, 2015; UGARTE et al., 2005)

Por se tratar de mineral da família dos filossilicatos, suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere a clivagem física, porém sem elasticidade. Apresenta-se em cores que variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado. A dureza do mineral pode variar de 2,1 a 2,8, na escala Mohs. (UGARTE et al., 2005)

Ainda de acordo com os mesmos autores, a vermiculita é o resultado da alteração de micas, a mais comumente a biotita, mas também pode estar associada a hidrobiotita, piroxenita, apatita, anfibólio, sienito, serpentinito, flogopita, diopsídio, clorita, amianto, talco e minerais argilosos. Por se apresentar instável nas temperaturas acima de 350°C, entende-se que a vermiculita em profundidade converte-se em biotita ou outros minerais como flogopita, diopsídio hornblenda ou serpentito. Por esse motivo, o tamanho dos depósitos é restringido já que a existência de depósitos em profundidade é uma exceção, justificando a mínima existência de minas subterrâneas desse material.

2.2.2. Propriedades físicas e aplicações

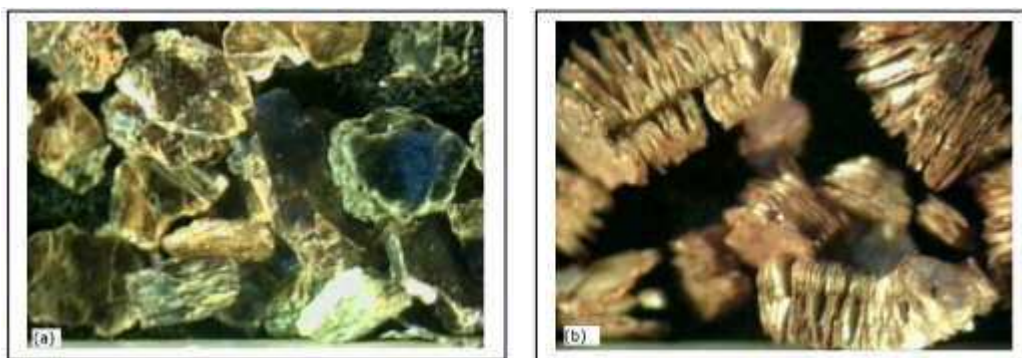
As aplicações e o valor comercial da vermiculita está diretamente ligada às suas propriedades físicas, decorrente da sua estrutura cristalina. Na estrutura mineral da vermiculita existem camadas de moléculas de água que são intercaladas por camadas de alumínio e silício, essas moléculas de água quando aquecidas de forma rápida e em

temperaturas elevadas transformam-se em ar quente que promove a expansão volumétrica do mineral (UGARTE et al., 2005).

A expansão do material é feita através de fornos na temperatura na faixa de 800 a 1100°C, visando remover a água em um menor espaço de tempo possível. O mineral ao ser aquecido até 150°C se retira apenas a água responsável pela umidade, sendo um processo reversível. Na faixa de 150 à 250°C é eliminado a água quimicamente ligada a vermiculita e somente para temperaturas entre 250 e 1100°C a água na estrutura mineral é retirada, processo chamado de desidroxilação, sendo esse irreversível (UGARTE et al., 2005).

A vermiculita após o processo de expansão apresenta-se quimicamente ativa, biologicamente inerte e pode expandir até 30 ou 40 vezes o seu volume original, tendo sua densidade aparente reduzida de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³ quando se obtém um produto expandido com 90% em volume de ar aprisionado. A Figura 2, mostra o fotografias de amostras de vermiculita antes e depois da expansão. Esse processo de desidroxilação confere a vermiculita resistência ao fogo, propriedades isolantes térmicas e acústicas (UGARTE et al., 2005).

Figura 2 – Fotografias de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): a) vermiculita natural; b) vermiculita expandida.



Fonte: Ugarte et al. (2004)

Mais algumas propriedades da vermiculita expandida podem ser listadas e quantificadas, sendo elas: condutividade térmica máxima: 0,070W/m.k; baixa condutividade acústica; ponto de fusão em 1315°C (praticamente incombustível); não tóxico; poroso; temperatura de amolecimento 1300°C; umidade máxima de 7%; massa específica aparente que varia entre 80 a 100 kg/m³; não abrasivo; inodoro; não se decompõe; não cancerígeno. (CARVALHAES, 2015; NASCIMENTO, 2008; UGARTE et al., 2005)

Por todas essas propriedades apresentadas, a vermiculita expandida é amplamente utilizada em diversas áreas. O seu uso vai de acordo com sua granulometria (na Tabela 1 são mostrados os limites de classificação para os padrões internacional, americano e o nacional) e pureza. Para granulometria mais grossa é utilizada para fins de horticultura, cultivo e germinação de sementes, já as granulometrias mais finas são utilizadas como carreadoras na produção de fertilizantes e de alimentos para animais e na construção civil. Na construção civil é utilizada como isolante termoacústico na forma de revestimento de paredes, graças a baixa condutividade térmica e acústica, para essa aplicação são utilizadas granulometrias médias, finas e superfina (UGARTE et al., 2005).

Tabela 1 – Classificação granulométrica de vermiculita.

Padrão Internacional	Tamanho (mm)	Padrão Americano	Tamanho (mm)	Padrão Brasileiro	Tamanho (mm)
Grossa	-0,8 +2,8	Grossa	-7,0 + 3,327	-	-
Média	-4,0 +1,4	Média	-3,5 + 1,75	Média	55 – 95% > 2,4
Fina	-2,0 +0,71	Fina	-2,0 + 0,6	Fina	65 – 95% > 1,2
Superfina	-1,0 +0,355	Superfina	-0,85 + 0,212	Superfina	70 – 95% > 0,6
Micrometro	-0,71 + 0,25	Micrometro	-0,3	Micrometro	80 – 100%>0,3

Fonte: Reis (2002)

2.2.3. Influência da vermiculita nas propriedades tecnológicas das argamassas

A vermiculita expandida quando incorporada às argamassas otimiza algumas de suas propriedades tecnológicas, entretanto algumas limitações em relação ao seu uso devem ser levadas em consideração. Autores trazem em seus estudos o comportamento apresentado por essas argamassas, revelando os benefícios da utilização como também são apresentadas algumas ressalvas quanto ao uso desse material nas misturas.

A adição de vermiculita expandida nas argamassas influencia na densidade no estado fresco e o teor de ar incorporado, como também na densidade no estado endurecido e o índice de vazios. A vermiculita por ser um material com baixa massa específica, promove maior incorporação de ar nas argamassas e consequentemente essas passam a apresentar considerável redução na densidade de massa no estado fresco. Essas características influenciam diretamente a densidade de massa no estado endurecido, também apresentando-se consideravelmente menor em comparação às argamassas tradicionais, devido a porosidade da adição que aumenta expressivamente índice de

vazios pelo o fato de existir vazios entre suas lamelas. (AGUIAR, 2017; CINTRA, 2013; SILVA, 2015; SOARES; MARMORE, 2016).

Essa baixa massa específica evidencia a diminuição de peso nas estruturas em que optasse pelo o uso da argamassa com vermiculita expandida, mas também é responsável pela principal utilização da vermiculita expandida nas argamassas que é a capacidade de isolamento térmico e acústico. Segundo Aguiar (2017), a condutividade térmica apresentada pelas argamassas diminui ao passo que se aumenta o teor de vermiculita expandida, o percentual de diminuição chega a 75,63% para argamassas com substituição completa do agregado leve pela vermiculita. Soares e Marmore (2016) também concluíram através de seus testes que a temperatura nas paredes revestidas com argamassa com vermiculita expandida, independente do substrato ser blocos de concreto ou blocos cerâmicos, é menor que nas paredes revestidas com argamassa convencional. Esse benefício também pode ser observado nas argamassas de gesso com incorporação da adição, Sousa (2012) ao estudar argamassas de gesso com adições não convencionais, afirma que argamassas de gesso com vermiculita apresentam o valor de condutividade térmica praticamente a metade das argamassas de gesso e gesso com EVA – Etileno Acetato de Vinila. Portanto, por ser um bom isolante térmico consequentemente também promove o isolamento acústico, Cintra (2013) em seu estudo confirma esse potencial nas argamassas com vermiculita.

Além disso, segundo Aguiar (2017), Barros (2018) e Cintra (2013) foi possível perceber altos índices de retenção de água nas argamassas com maior teor de vermiculita expandida. Esse é um comportamento favorável que está associada a trabalhabilidade, à medida que não se perde água pelo manuseio ou para o substrato favorece que o aglomerante complete suas reações de hidratação, sendo essa alta capacidade de retenção de água está associada a porosidade da vermiculita.

Apesar do melhoramento nessas propriedades supracitadas, Aguiar (2017), Cintra (2013), Silva (2015), Soares e Marmore (2016) e Sousa (2012) observaram que a quantidade de água de amassamento necessária para se obter uma trabalhabilidade adequada é bem superior à quantidade utilizadas nas argamassas tradicionais, pois foi observado um teor de água/aglomerante bem elevado para atingir o índice de consistência prescrito pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016) e se agrava para o traços com maior teor de vermiculita expandida.

Essa alta quantidade de água necessária para adquirir uma boa trabalhabilidade atrelada a própria estrutura porosa da vermiculita expandida, que em consequência trazem

maior incorporação de ar e maior índice de vazios que podem provocar malefícios à outras propriedades da argamassa que se agravam quanto maior for a quantidade de vermiculita adicionada a mistura. Observa-se o aumento na capilaridade e na retração das argamassas que causam prejuízos em relação a estanqueidade e consequentemente diminuição da durabilidade do revestimento, como também a diminuição na resistência mecânica. (AGUIAR, 2017; BARROS, 2018; CINTRA, 2013).

2.3. ADITIVOS

Os aditivos podem ser definidos como todo produto que não é imprescindível à composição do concreto ou da argamassa, que ao ser adicionado, geralmente em pequenas quantidades e bem homogeneizado, melhora a qualidade de certas propriedades da mistura tanto no estado fresco como no endurecido. (ABCP, 2002; BAUER, 2008)

A NBR 11768 (ABNT, 2011) regulamenta o uso de aditivos e os classifica em função da sua finalidade, da seguinte maneira:

- Plastificante: aditivo que sem modificar a consistência no estado fresco, reduz a quantidade de água no concreto de, no mínimo 6%; ou que sem alterar a quantidade de água, altera a consistência do concreto, ou que produz esses dois efeitos simultaneamente. Não influencia na pega;
- Superplastificante tipo I: aditivo que sem modificar a consistência no estado fresco, reduz em grande quantidade a água no concreto; ou que sem alterar a quantidade de água, altera consideravelmente o abatimento e a fluidez; ou que produz esses dois efeitos simultaneamente. Não influencia na pega;
- Superplastificante tipo II: aditivo que sem modificar a consistência no estado fresco, permite elevadíssima redução da quantidade de água no concreto; ou que sem alterar a quantidade de água, altera consideravelmente o abatimento e a fluidez; ou que produz esses dois efeitos simultaneamente. Não influencia na pega;
- Incorporador de ar: permite incorporar durante o amassamento uma quantidade controlada de bolhas de ar, distribuídas uniformemente e que se mantêm no estado endurecido;
- Acelerador de pega: diminui o tempo de transição do estado plástico para o estado endurecido;

- Acelerador de resistência: aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais, podendo alterar ou não o tempo de pega.
- Retardador de pega: aumentam o tempo de transição entre o estado plástico para o estado endurecido do concreto.

Além dos aditivos que combinam as propriedades de mais de um aditivo citados acima, como: plastificante retardador, superplastificantes retardador tipos I e II, plastificante acelerador, superplastificantes acelerador tipos I e II.

Bauer (2008) ainda cita outros tipos de aditivos como os impermeabilizantes (repelente a absorção capilar, redutores de permeabilidade), expansores (geradores de gás, estabilizadores de volume, geradores de espuma), adesivos, anticorrosivos, corantes, fungicidas, germicidas, inseticidas.

2.3.1. Aditivos redutores de água

Os aditivos plastificantes e superplastificantes também são chamados de aditivos redutores de água ou dispersantes. Esses aditivos agem de forma a promover a dispersão dos grãos de cimento, desmanchando a maioria dos aglomerados de partículas, uma vez que ao entrar em contato com a água o cimento tende a flocular. Ao haver a floculação do cimento, ocorre o aprisionamento das partículas de água que seriam responsáveis pela lubrificação da pasta do cimento, assim o aditivo irá agir liberando a água aprisionada dentro dos aglomerados, aumentando efetivamente o teor de água disponível para promover a movimentação das partículas, gerando aumento de fluidez da pasta sem necessidade da adição de mais água. (MELO; MARTINS; REPETTE, 2009)

Muitas bases químicas podem ser utilizadas como aditivos plastificantes, sendo dois os principais grupos, segundo NEVILLE (1997) são os ácidos lignosulfônicos e seus sais e os ácidos carboxílicos hidroxilados e seus sais. De acordo com mesmo autor, para os superplastificantes existem basicamente 4 categorias principais, sendo elas: sulfonado de melamina-formaldeído; condensados sulfonados de naftaleno-formaldeído; lignossulfonatos modificados; e outros como ésteres de ácido sulfônico e ésteres de carboidratos. Os dois primeiros são mais comuns, e são usualmente chamados de superplastificantes a base de naftaleno e superplastificantes a base de melamina.

No geral, os aditivos redutores de água causam redução no consumo de água para uma mesma plasticidade; o concreto ou argamassa preparados com redutores de água apresentam melhor trabalhabilidade e menor segregação; reduzem a temperatura da

mistura no processo de hidratação (graças à diminuição do consumo de cimento); aumentam a resistência (devido menor fator água/aglomerante) (BAUER, 2008).

2.4. ADIÇÕES MINERAIS

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define adições como materiais inorgânicos naturais ou industriais adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades. Para Bastos (2016) as adições minerais atualmente se configuram como materiais básicos para fabricação de cimentos comercializados. Geralmente são utilizadas em grades quantidades com intuito de diminuir custos, e juntamente, melhorar as propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco e endurecido.

Segundo Molin (2011) as adições minerais podem ser subdivididas em 3 grupos, sendo eles: material cimentantes, como a escória de alto forno; materiais pozolânicos, como a cinza de casca de arroz, a sílica ativa e o metacaulim; e os fillers, como o calcário, pó de quartzo, o pó de pedra.

Os materiais cimentantes não necessitam do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) (MOLIN, 2011). Ainda segundo o autor, a sua autohidratação acontece de maneira lenta, não sendo utilizado para peças estruturais, devido à insuficiência de produtos cimentantes formados. Quando usados como adição ou substituição em cimento Portland a presença de gipsita e hidróxido de cálcio aceleram sua reação.

Os materiais pozolânicos são definidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015) como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia mas, quando finamente divididos e na presença de umidade e hidróxido de cálcio, reagem quimicamente e formam compostos com propriedades cimentantes.

Os fillers são materiais finamente dividido, que tem por finalidade, quando aplicado em conjunto ao cimento, causar o empacotamento granulométrico e atua como agente de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (MOLIN, 2011). Apesar dos fillers serem considerados muitas vezes como materiais inertes, por não atuarem como os materiais pozolânicos na produção de C-H-S (silicato de cálcio hidratado) eles funcionam como agente de nucleação para hidratação do cimento na formação de monocarboaluminatos de cálcio (BASTOS, 2016).

Além dos benefícios trazidos aos materiais cimentícios, as adições minerais, segundo Raisdorfer (2016), na grande maioria dos casos, são resíduos de algum processo

industrial, evitando o descarte irregular dessas substâncias se minimiza as quantidades de extrações minerais para a fabricação do cimento. Dessa forma, a utilização de adições minerais contribui para o crescimento sustentável da indústria da construção civil.

2.4.1. Metacaulim

2.4.1.1. *Definição e propriedades*

O metacaulim é um material pozolânico amorfo (de estrutura cristalina desordenada) obtido através da calcinação do caulim (ativação térmica entre 600°C a 850°C) (MEDINA, 2011). O caulim é uma rocha formada pela decomposição do feldspato através de processos geológicos e se apresenta como silicato hidratado de alumínio (ROCHA, 2005).

Constituído de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa, o metacaulim é capaz de reagir com a água e o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gerado durante a hidratação do cimento Portland produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa interação com o cimento Portland em pastas, argamassas e concretos proporciona melhora nas características de durabilidade e desempenho mecânico no estado endurecido desses compósitos cimentícios. (MEDINA, 2011; MOTA, 2015).

Quanto a reatividade, o metacaulim pode ser classificado como pozolana de baixa, média e alta reatividade. Parâmetros como a composição química, composição mineralógica, área superficial específica, perda ao fogo, nível de pureza determinam a qualidade do material pozolânico (ROCHA, 2005). Por falta de normatização específica, o metacaulim se encaixa nas especificações exigidas pelas normas de materiais pozolânicos. A Tabela 2 apresenta os requisitos para um material ser considerado pozolânico, com base em diversas normatizações.

Tabela 2 – Requisitos químicos das normas de materiais pozolânicos.

Propriedades	ABNT NBR 12653	ASTM C 618	IS 1344	DMS 4635	NF 18- 513
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥85	-
Fe₂O₃ + Al₂O₃	-	-	-	-	≥90
+					
SiO₂	-	-	≥40	-	-
CaO	-	-	≤ 10	-	-
CaO livre	-	-	-	-	≤ 1,0
MgO	-	-	3	-	≤ 4,0
SO₃	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 3,0	-	≤ 1,0
Cloreto	-	-	-	-	≤ 0,1
Na₂O+K₂O	-	-	≤ 3,0	-	-
Teor de umidade	≤ 3,0	≤ 3,0	-	-	-
Perda ao Fogo	≤ 10,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 3,0	≤ 4,0
Álcalis disponíveis em Na₂O	≤ 1,5	≤ 1,5	-	≤ 1,0	-
Álcalis solúveis em água	-	-	≤ 0,1	-	-

Fonte: Medina (2011)

2.4.1.2. *Influência do metacaulim nas propriedades tecnológicas das argamassas*

Estudos realizados utilizando o metacaulim em compósitos de base cimentícia, mostram que, tanto para substituição parcial do cimento, quanto para adição, esse material em proporções adequadas proporciona melhoria no desempenho mecânico e na durabilidade das argamassas.

Barbosa, Mota e Carneiro (2006) avaliaram a influência da adição de metacaulim no estado endurecido em argamassas para recuperação de monumentos históricos e observaram que as misturas com metacaulim não obtiveram desempenho mecânico correspondente aos das argamassas de referência ao 28 dias, como também não apresentaram diferenças significativas entre os resultados das argamassas com diferentes teores de metacaulim, entretanto, os autores afirmam que há indicativos que os valores de resistência continuariam crescendo, devido ao fato das reações de hidratação do metacaulim se darem mais lentamente.

Mota, (2015) e Mota, Oliveira e Carneiro (2016) avaliaram a durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. Foi constatado que a adição de 8% de metacaulim mostrou resultados satisfatórios e a amostra com adição de 15% apresentou resultados ainda melhores com relação aos ensaios de durabilidade

(absorção, velocidade de propagação da onda ultrassônica, carbonatação e cloretos) e ensaios de resistência a compressão e de módulo de elasticidade.

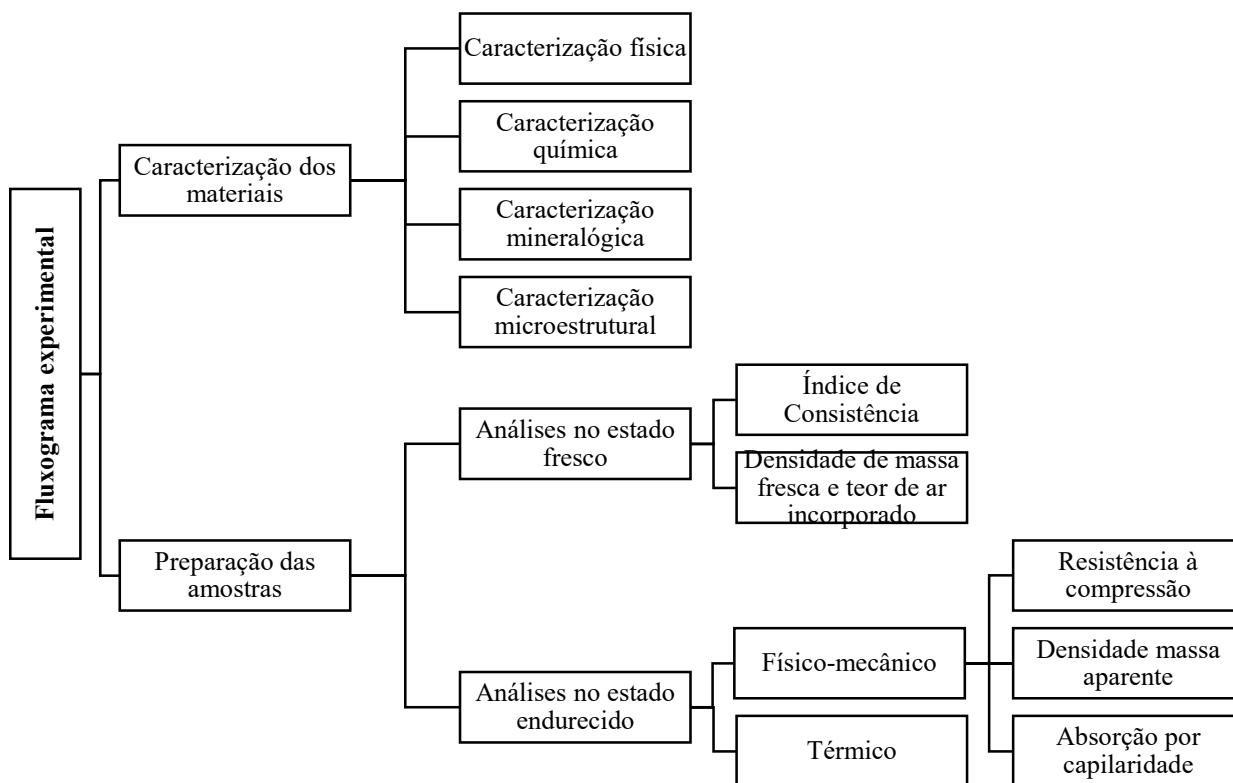
Laurentino (2019) estudou argamassa estabilizada para assentamento com adição de metacaulim. Em seu trabalho foi avaliado a substituição parcial de cimento por 10% e 20% de metacaulim, onde constatou-se que houve um aumento na densidade de massa no estado fresco e endurecido e a diminuição do teor de ar incorporado, mostrando que o metacaulim proporcionou uma melhoria no arranjo das partículas, diminuindo assim a quantidade de vazios. Houve ganho de resistência a compressão, superando em até 55% a de referência, sendo a amostra com 10% que preservou essa propriedade nos tempos de estabilização, ao contrário da de 20%.

Sinhorelli (2019) analisou argamassas de revestimento com vermiculita e adições minerais, incluindo o metacaulim. Em seu estudo foi verificado as propriedades das argamassas com teores de 40%, 60% e 80% de vermiculita em substituição ao agregado miúdo, como também a influência da adição de 10% e 20% de metacaulim e resíduo de tijolo cerâmico nessas mesmas misturas. Constatou-se que com a utilização do metacaulim houve um aumento na resistência para as misturas com 40% e 60% de vermiculita, porém, para a mistura com 80% a quantidade de água de amassamento presente impossibilitou que a adição pudesse refinar os poros e assim aumentar a resistência mecânica. Ao contrário do efeito proporcionado pela vermiculita a argamassa, que a torna mais porosa e conseqüentemente promove uma diminuição na condutividade térmica, o aumento do teor de metacaulim na mistura acaba prejudicando o desempenho térmico devido ao refinamento dos poros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 3 apresenta um resumo das etapas realizadas nessa pesquisa.

Figura 3 - Fluxograma experimental



Fonte: autoria própria (2019).

3.1. MATERIAIS

O Quadro 1 apresenta os materiais utilizados e algumas informações pertinentes aos mesmos.

Quadro 1 - Materiais utilizados.

Materiais	Informações
Areia Natural (AN)	Areia natural eólica da região do município do Pedra de Fogo-PB
Vermiculita Expandida (VE)	Granulometria superfina adquirida no comércio de João Pessoa/PB.
Cal Hidratada (CH-II)	Cal hidratada tipo II da marca Rebocal, adquirida no comércio de materiais de construção da cidade de Campina Grande/PB
Cimento Portland (CP-V)	CP V ARI da marca LafargeHolcim.
Metacaulim (MC)	Adição mineral da marca BBM Minérios.
Aditivo	Aditivo plastificante de pega normal Muraplast FK 830B da marca MC-Bauchemie.
Água	Fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba na cidade de Campina Grande/PB.

Fonte: autoria própria (2019).

3.2. MÉTODOS

A metodologia se desenvolveu em três etapas, sendo elas: caracterização dos materiais, definição das misturas das argamassas, determinação das propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas (físico-mecânica e térmica).

3.2.1. Caracterização dos materiais

Os materiais foram caracterizados quanto aos aspectos físicos, químicos, mineralógicos e microestrutural, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Ensaio de caracterização dos materiais.

Análise	Ensaio
Física	○ Massa unitária – agregado. NBR NM 45 (ABNT, 2006) ○ Massa específica – agregado. NBR NM 52 (ABNT, 2003) ○ Granulometria agregado – NBR NM 248 (ABNT, 2003) ○ Granulometria vermiculita – NBR 11355 (ABNT, 2015) ○ Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. NBR NM 23 – (ABNT, 2000)
Química	○ Fluorescência de raios X (FRX)
Mineralógica	○ Difração de raios X (DRX)
Microestrutural	○ Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Fonte: autoria própria (2019).

a) Análises físicas

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises físicas realizadas nos materiais utilizados.

Tabela 3 – Características físicas dos materiais.

Material	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Área específica (cm ² /g)
CP V	2,92	0,89	24.800,00
MC	2,59	-	18.300,00
AN	2,62	1,67	-
CH-II	2,73	1,00	-
VE	0,48	0,185	-

Fonte: autoria própria (2019).

As massas unitárias da areia natural (AN) e da vermiculita expandida (VE) foram determinadas conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006). As massas unitárias da cal hidratada (CH-II) e do cimento Portland (CP-V) foram determinadas da mesma forma, porém adaptado com a utilização de um recipiente de menor volume do que preconiza a norma (Figura 4).

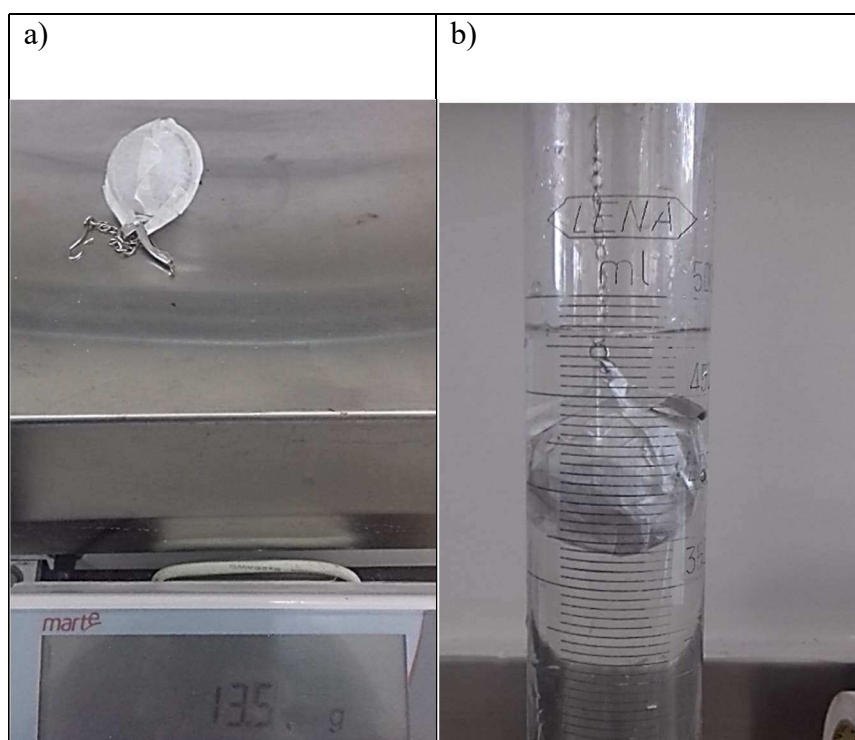
Figura 4 – Recipiente utilizado para determinação da massa unitária da Cal Hidratada e Cimento Portland



Fonte: autoria própria (2019).

Devido características de leveza da vermiculita, a determinação da massa específica foi realizada com base na NBR NM 52 (ABNT, 2003), fazendo uma adaptação: utilizou-se de uma proveta graduada e um infusor (Figura 5) para a realização do ensaio. Esse método para determinação da massa específica da vermiculita expandida foi também utilizado por Barros (2018) e Sinharelli (2019). Inicialmente foi pesado o infusor sem material e verificou o volume deslocado da peça na proveta graduada, em seguida o infusor contendo a vermiculita expandida em seu interior foi pesado e então foi determinado o volume deslocado na proveta graduada. O infusor por ter uma malha com uma abertura maior que o tamanho de alguns grãos da vermiculita, fazia com que estes saíssem do objeto ao ser colocado na água, para solucionar o problema utilizou-se de fita crepe para envolver a peça.

Figura 5 - Determinação da massa específica da vermiculita expandida: a) infusor com fita crepe sendo pesado; b) infusor submerso em água na proveta graduada para determinação do volume deslocado.

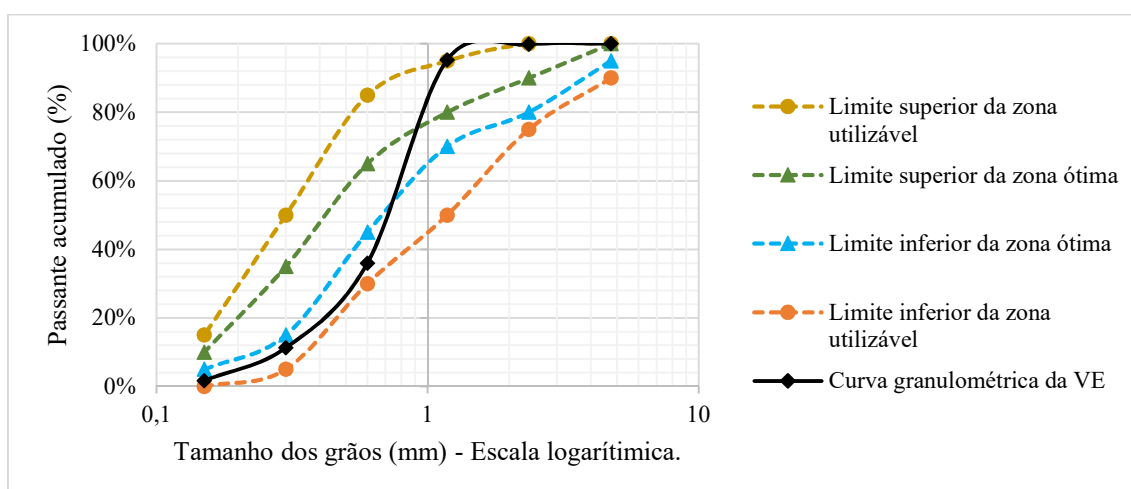


Fonte: autoria própria (2019).

A massa específica da AN foi determinada conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2003). Já os ensaios de massa específica da CH-II, do CP-V e do MC foram realizadas com base na NBR NM 23 (ABNT, 2000), por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual o volume de um corpo é medido através do deslocamento de um líquido.

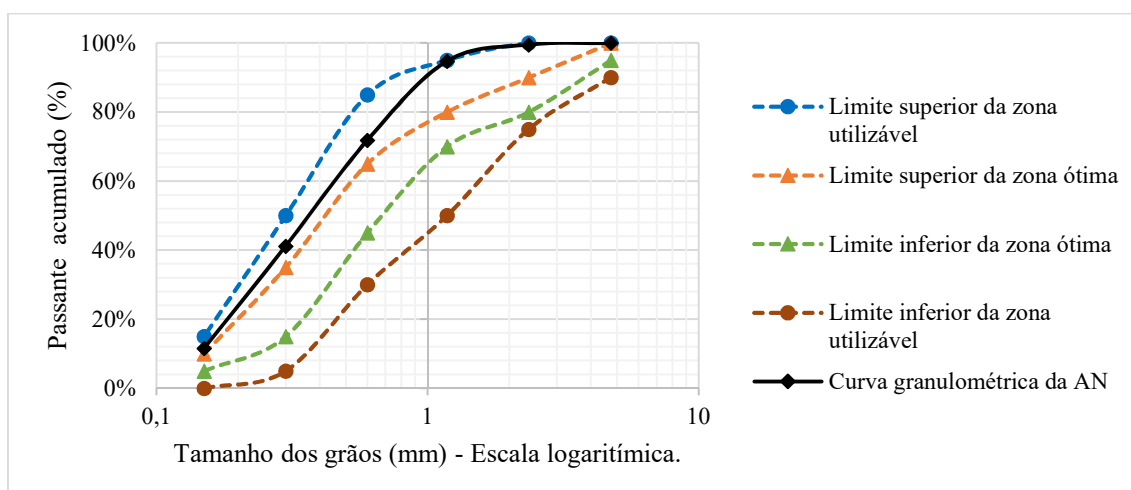
A Figura 6 e 7 apresentam as curvas granulométricas da VE e da AN e os limites da zona utilizável e ótima do agregado miúdo conforme a NBR 7211 (ABNT, 2005). Observa-se que tanto a VE e a AN estão dentro dos limites da zona utilizável.

Figura 6 – Curva granulométrica da Vermiculita Expandida (VE).



Fonte: autoria própria (2019).

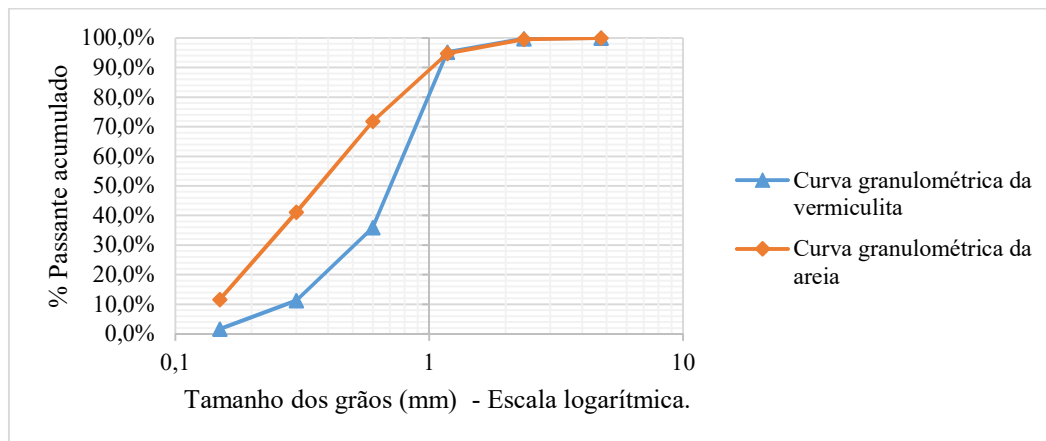
Figura 7 – Curva granulométrica da Areia Natural (AN)



Fonte: autoria própria (2019).

A Figura 8 mostra a curva granulométrica da VE e da AN combinadas. Pode-se observar que a VE possui cerca de 65% dos grãos maiores que 0,6mm, sendo um pouco mais fina do que o apresentado pelo limite brasileiro, conforme a Tabela 1 de REIS (2002) que propõe o limite para granulometria superfina de 70-90% > 0,6mm, entretanto, esse agregado não se encaixa na classificação subsequente de micrometro, portanto podemos considerar a VE com granulometria superfina. Quando se compara a VE com a AN, n que a AN possui maior quantidade de grãos entre 0,15 e 0,3mm, portanto, esse agregado é mais fino que a VE.

Figura 8 – Curva granulométrica da VE e AN.



Fonte: autoria própria (2019).

A Tabela 3 apresenta os valores de módulo de finura e diâmetro máximo da VE e da AN.

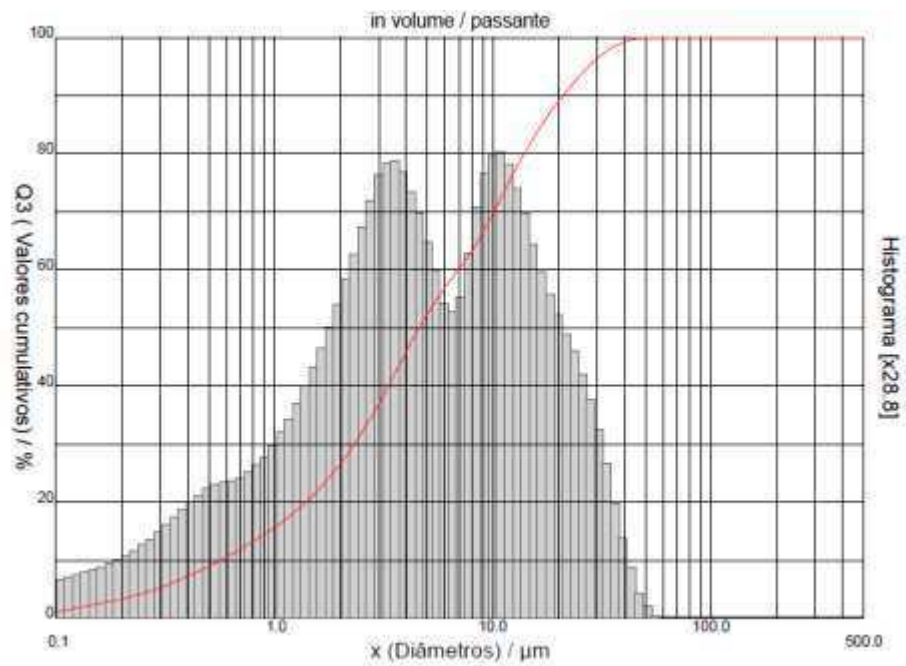
Tabela 4 – Módulo de finura e diâmetro máximo dos agregados.

	Módulo de Finura	Diâmetro máximo (mm)
Vermiculita Expandida (VE)	2,58	2,36
Areia Natural (AN)	1,83	2,36

Fonte: autoria própria (2019).

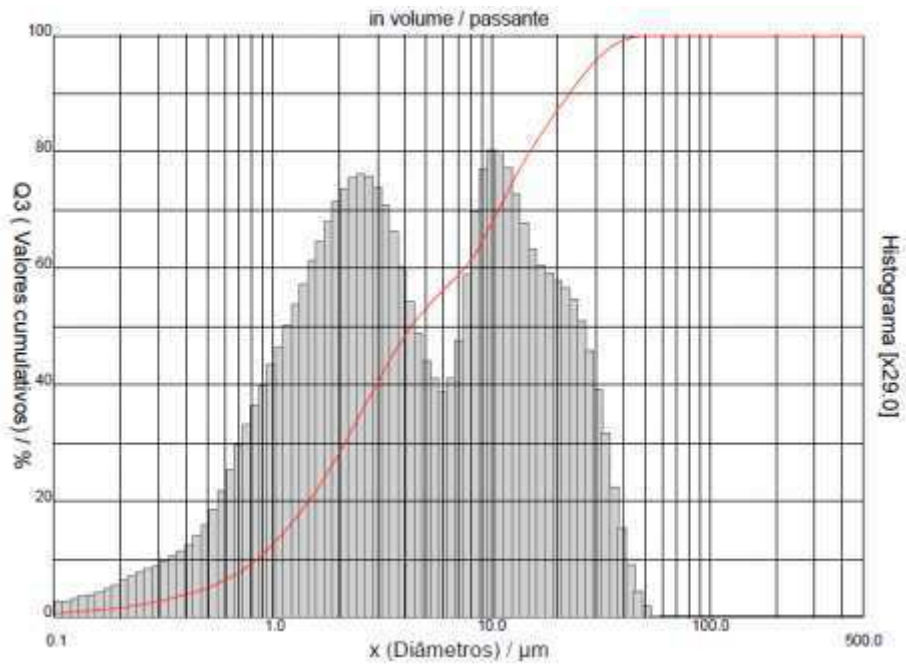
A granulometria a laser foi realizada para a CH-II, e os resultados de granulometria a laser do CP-V e do MC foram retirados do estudo de Laurentino (2019), que utilizou os mesmos materiais desse estudo. O método utilizado foi de dispersão integrada seco com o granulômetro do modelo CILAS 1090. O ensaio foi realizado no Laboratório de materiais – UFPB, *campus* João Pessoa-PB. As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as curvas granulométricas obtidas para o CP-V, MC e a CH-II, respectivamente.

Figura 9 – Curva granulométrica do CP-V.



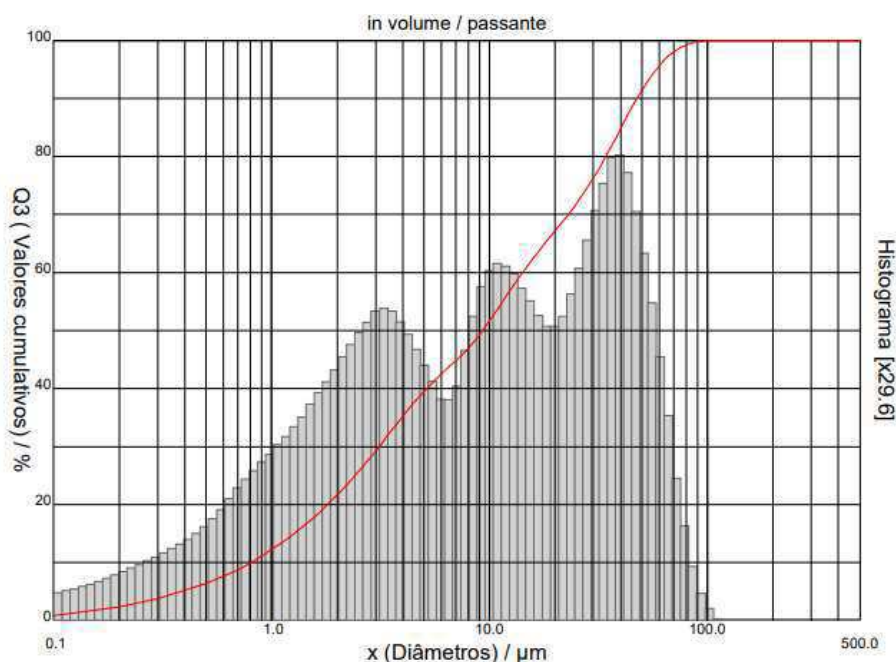
Fonte: Laurentino (2019)

Figura 10 - Curva granulométrica do MC.



Fonte: Laurentino (2019)

Figura 11 – Curva Granulométrica da CH-II.



Fonte: autoria própria (2019).

Através das curvas granulométricas (Figuras 9 e 10) do CP-V e do MC pode-se observar que as maiores partículas dos dois materiais têm dimensão aproximadamente de 50 μm , entretanto, o MC apresenta uma quantidade maior de grãos com diâmetro maior, pois 80% das partículas de MC tem dimensões entre 0,84 μm e 22,66 μm e 80% das partículas do CP-V se encontram na faixa de 0,57 μm e 21,01 μm . Já ao analisar a Figura 11 que mostra a curva granulométrica da CH-II, observa-se que as maiores partículas do material têm dimensão de aproximadamente 90 μm , sendo que 80% das partículas têm dimensões entre 0,80 μm e 34 μm .

Os resultados da área específica do MC e CP-V foram retirados do trabalho de Laurentino (2019). Os ensaios foram realizados pelo método de BET no Laboratório de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais – IFPB, *campus* João Pessoa-PB. O equipamento utilizado foi o modelo BELSOP II-MII da marca BEL JAPAN, por meio da adsorção/dessorção de nitrogênio a 77^o Kelvin. As amostras foram submetidas à um tratamento térmico inicial de 200°C por duas horas, em fluxo de nitrogênio, para a remoção de possíveis gases adsorvidos nas amostras.

O MC utilizado, que é o mesmo do estudo de Laurentino (2019), é considerado material pozzolânico, pois o autor submeteu o material aos ensaios de atividade pozzolânica

com a cal e com o cimento Portland conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014), respectivamente. Laurentino (2019) obteve os resultados de 7,0 Mpa para o ensaio de atividade pozolânica com a cal superando 6,0 MPa requerido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), que define os requisitos para os materiais pozolânicos, e de 123% para o índice de desempenho com cimento, superando os 90% exigido pela mesma norma.

b) Análises químicas

Os resultados das análises químicas para o CP-V e o MC foram retiradas do trabalho de Laurentino (2019). O autor realizou os ensaios no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG *campus* Campina Grande, através da fluorescência de raios-X (FRX) utilizando o equipamento Shimadzu EDX-90.

Tabela 5 – Composição química por fluorescência de raios-x (% em massa) do CP-V e MC.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SO ₃	SrO	outros
CP-V	16,38	5,58	3,38	66,94	1,50	1,68	0,03	0,25	4,08	0,07	0,10
MC	49,74	36,74	7,24	0,57	1,63	1,83	0,04	1,71	0,23	0,02	0,25

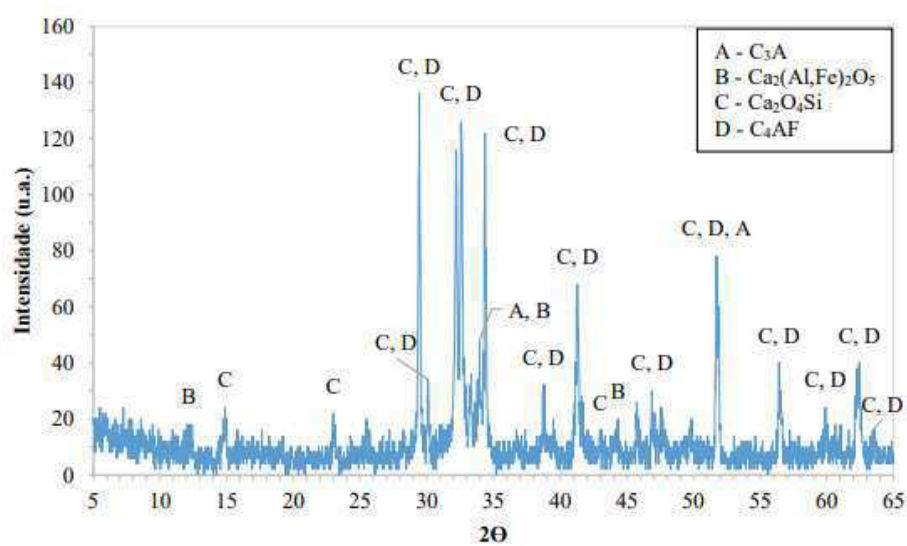
Fonte: Laurentino (2019)

Ao observar os resultados da análise química (Tabela 5), percebe-se que a quantidade de MgO do CP-V está dentro do previsto em norma, visto que o percentual de 1,5% é menor que 6,5% requerido pela NBR 5733 (ABNT, 1991). Já com relação ao MC, observa-se que a quantidade de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ somam 93,72%, maior que 70% e 0,23% de SO₃, menor que 4%, conforme previsto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

c) Análises mineralógicas

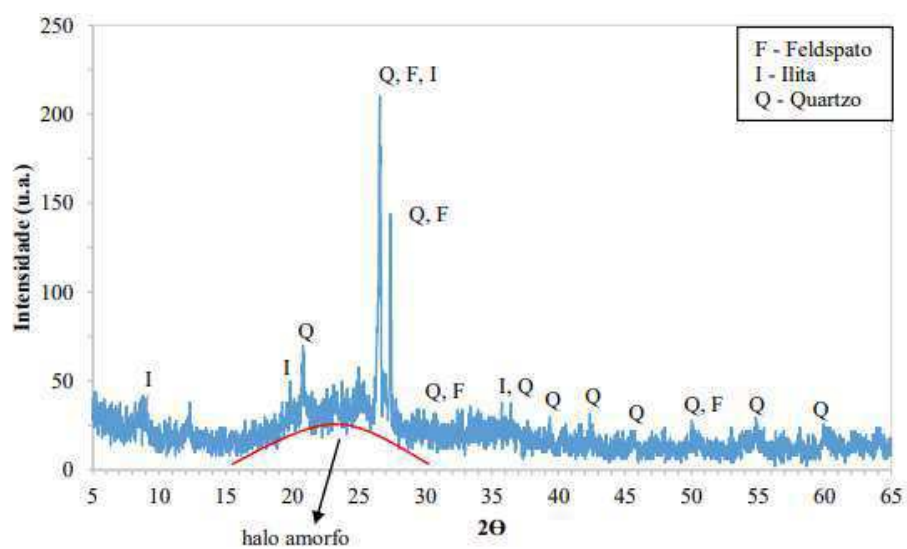
A CH-II foi submetida a análise mineralógica. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG *campus* Campina Grande através da difração de raios-X (DRX). O equipamento utilizado foi o Shimadzu modelo XRD 6000, com aplicação de radiação Cu, com raios-x em 40kV e 30mA, velocidade de leitura de 2°/min num intervalo de 5° a 65° 2 θ a um passo angular de 0,02° 2 θ . A identificação dos picos foi realizada pelo software MDI JADE 5.0. Os resultados do DRX para o CP-V e o MC foram retirados do trabalho de Laurentino (2019), que realizou os mesmos procedimentos e equipamento da CH-II. Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os difratogramas do CP-V e MC obtidos por Laurentino (2019). Na Figura 14 é apresentado o difratograma da cal CH-II.

Figura 12 – Difração de raios-x do CP-V.



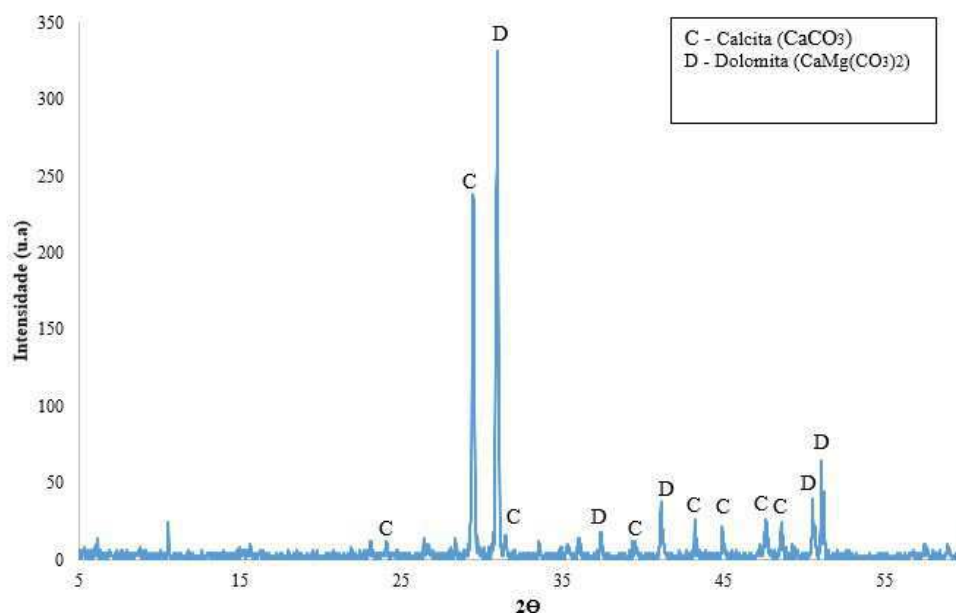
Fonte: Laurentino (2019)

Figura 13 – Difração de raios-x do MC.



Fonte: Laurentino (2019)

Figura 14 – Difração de raios-x da CH-II.



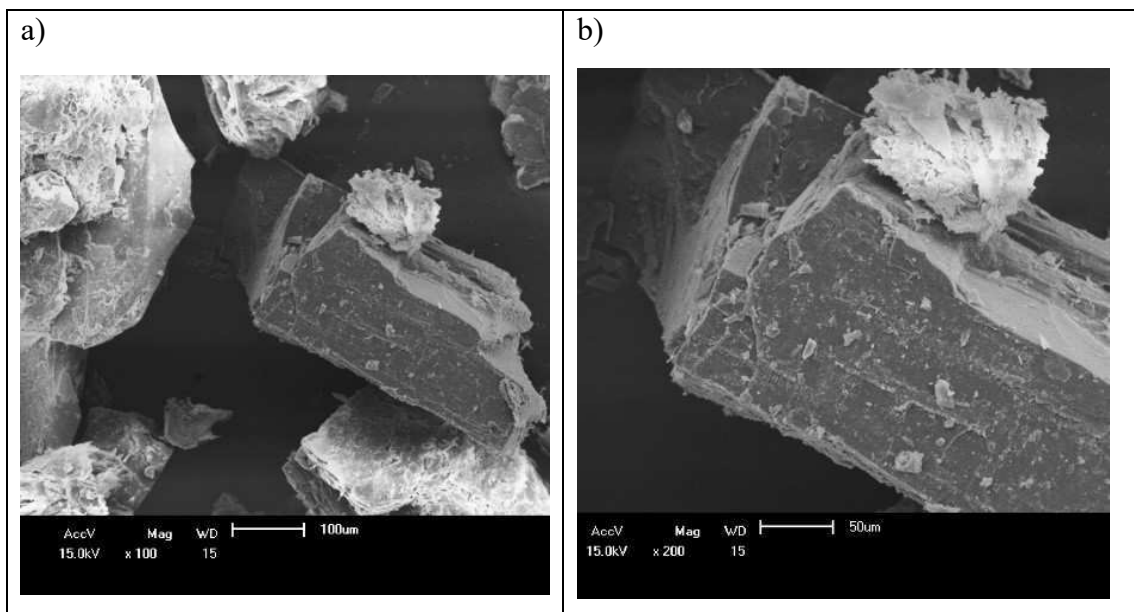
Fonte: autoria própria (2019).

Ao analisar os difratogramas, nota-se que o MC é composto em sua maioria por quartzo, mas ainda apresenta fases de feldspato e ilita, também é observado no seu DRX um halo entre 20 e 30° (2θ) o que indica certa amorficidade do material. Com relação ao CP-V foi detectado pelo DRX que as principais fases que o constitui é a silicato de cálcio (Ca₂O₄Si) e a ferro-aluminato de cálcio (C₄AF) com a presença de aluminato de cálcio (C₃A) e brownmillerita [Ca₂(Al,Fe)₂O₅]. Já a CH-II observa-se que as principais fases que a constitui são de Calcita (CaCO₃) e Dolomita [CaMg(CO₃)₂].

d) Análise microestrutural

Para a VE foi realizado o ensaio de análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Materiais da UFCG campus Campina Grande. O equipamento utilizado foi o Shimadzu de modelo SSX-55. As amostras foram colocadas sobre uma fibra de carbono e posteriormente foram metalizadas num metalizador a ouro no tempo de três minutos sobre uma amperagem de 10mA. Nas imagens (Figura 15) podem ser observadas as micrografias da vermiculita expandida, com aumento de 100x, 200x.

Figura 15 – Micrografias obtidas por MEV com aumento de: a)100x; b) 200x.



Fonte: autoria própria (2019).

3.2.2. Mistura das argamassas

As misturas das argamassas foram divididas em três grupos. O Grupo 1 é composto por misturas de referência, sem vermiculita e com os dois teores de aditivo para o traço de 1:6 (cimento e agregado miúdo) em volume. O Grupo 2 possui 5 (cinco) misturas, sendo 3 contendo 25% de VE em substituição ao agregado miúdo para o traço em volume de 1:6; dessas três misturas, em 1 (uma) não foi adicionado aditivo plastificante e as outras 2 (duas) foram adicionados diferentes teores de aditivo plastificante (0,5% e 1% sobre a massa do cimento – o fabricante sugere a proporção de 0,2% a 1%); as outras 2 (duas) misturas contém 25% de VE em substituição ao agregado miúdo e a utilização de CH-II em duas proporções diferentes em volume (1:1:6 e 1:1,5:6 – cimento, cal, agregado miúdo). Para o Grupo 3 foram repetidas as mesmas misturas do Grupo 2 com a adição de 10% de MC sobre o peso do cimento em cada uma. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as misturas realizadas nessa pesquisa.

Optou-se por substituir 25% de VE de granulometria superfina em substituição à AN com base nos trabalhos de Aguiar (2017) e Barros (2018), pois essa proporção foi a que melhor apresentou resultados em relação ao seu desempenho térmico-mecânico; portanto, nesse estudo visou-se analisar o desempenho dessas argamassas com a incorporação de aditivo, a variação na proporção da cal e a adição do metacaulim. O teor

de água adotado foi baseado no índice de consistência recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2016) de $260 \pm 5\text{mm}$.

Tabela 6 – Misturas do Grupo 1 (Referências).

Grupo 1 (Referências)						
Argamassa	Traço em volume**	Traço em massa**	Vermiculita (% substituição)	Aditivo (%)	MC (%)	a/c*
A	1:0:6:0	1:0:11,6:0	-	-	-	2,08
0,5A	1:0:6:0	1:0:11,6:0	-	0,5	-	2,05
1A	1:0:6:0	1:0:11,6:0	-	1	-	2,01

**c:c:a:v (cimento:cal:areia:vermiculita); * relação água/cimento

Fonte: autoria própria (2019).

Tabela 7 – Misturas do Grupo 2.

Grupo 2						
Argamassa	Traço em volume*	Traço em massa*	Vermiculita (% substituição)	Aditivo (%)	MC (%)	a/c*
25V	1:0:4,5:1,5	1:0:8,44:0,31	25	-	-	2,19
25V-1C	1:1:4,5:1,5	1:1,12:8,44:0,31	25	-	-	1,96
25V-1,5C	1:1,5:4,5:1,5	1:1,69:8,44:0,31	25	-	-	2,22
25V-0,5A	1:0:4,5:1,5	1:0:8,44:0,31	25	0,5	-	2,11
25V-1A	1:0:4,5:1,5	1:0:8,44:0,31	25	1	-	2,05

**c:c:a:v (cimento:cal:areia:vermiculita) * relação água/cimento

Fonte: autoria própria (2019).

Tabela 8 – Misturas do Grupo 3.

Grupo 3						
Argamassa	Traço em volume**	Traço em massa**	Vermiculita (% substituição)	Aditivo (%)	MC (%)	a/c*
25V-MC	1:0:4,5:1,5	1:0:8,44:0,31	25	-	10	2,19
25V-1C-MC	1:1:4,5:1,5	1:1,12:8,44:0,31	25	-	10	2,16
25V-1,5C-MC	1:1,5:4,5:1,5	1:1,69:8,44:0,31	25	-	10	2,22
25V-0,5A-MC	1:0:6:0	1:0:8,44:0,31	25	0,5	10	2,10
25V-1,0A-MC	1:0:6:0	1:0:8,44:0,31	25	10	10	2,13

**c:c:a:v (cimento:cal:areia:vermiculita); * relação água/cimento

Fonte: autoria própria (2019).

O amassamento da argamassas foi realizado com a utilização de um misturador elétrico para argamassa da marca Vonder (Figura 16), para o procedimento de mistura foi adotado o método utilizado por Silva (2011), realizado da seguinte maneira: com o material seco dentro do recipiente e o aparelho ligado na velocidade baixa foi realizada a homogeneização por 30 segundos, em seguida o processo continuou por mais 90 segundos na velocidade baixa, adicionando água nos primeiros 20 segundos. Esse método de adição de água diverge do prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016), porém segundo Antunes (2005) essa metodologia de mistura produz argamassas mais homogêneas, influenciando no comportamento reológico.

Figura 16 – Processo de amassamento de argamassa com o misturador.



Fonte: autoria própria (2019).

3.2.3. Ensaios da argamassa no estado fresco

Os ensaios para o estado fresco das argamassas foram realizados no Laboratório de Estruturas II da UFCG, entre eles estão: índice de consistência, densidade de massa fresca e teor de ar incorporado.

3.2.1.1. *Índice de consistência*

O índice de consistência (Figura 17) foi determinado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Por tentativas, uma quantidade de água conhecida foi sendo adicionada até que se conseguisse o espalhamento trabalhável de 260 ± 5 mm.

Figura 17 – Ensaio da mesa consistência.



Fonte: autoria própria (2019).

3.2.1.2. Densidade de massa e teor de ar incorporado

A determinação da densidade de massa (Figura 18) e o teor de ar incorporado foram obtidos através da NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a determinação da densidade de massa utilizou-se de um recipiente cilíndrico de volume e massa conhecidos, esse recipiente contendo a argamassa de ensaio foi pesado e a densidade foi calculada pela Equação 1, obtém-se o resultado.

$$A = \frac{M_c - M}{V_r} \quad (1)$$

Onde:

A = densidade da argamassa, em g/cm³;

M_C = massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa de ensaio, em g;

M_V = massa do recipiente cilíndrico vazio, em g;

V_R = volume do recipiente cilíndrico, em cm^3 .

Figura 18 – Ensaio de densidade de massa.



Fonte: autoria própria (2019).

Para a determinação do teor de ar incorporado, utilizou-se a Equação 2.

$$Al = 100 \times \left(1 - \frac{A}{B}\right) \quad (2)$$

Onde:

A = densidade da argamassa, em g/cm^3 ;

B = densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios, obtida através da eq. 3

$$B = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\gamma_i}} \quad (3)$$

Onde:

M_i = massa seca de cada componente da argamassa, inclusive massa da água;

γ_i = massa específica de cada componente da argamassa.

3.2.4. Ensaio da argamassa no estado endurecido

Para a realização dos ensaios no estado endurecido foram confeccionados 6 corpos-de-prova conforme NBR 7215 (ABNT, 1996) para cada mistura. Os moldes

cilíndricos possuem dimensões de 5cm de diâmetro e 10 cm de altura. A moldagem foi realizada imediatamente ao amassamento e a colocação da argamassa na forma foi feita com ajuda de uma espátula com quatro camadas de alturas aproximadamente iguais cada uma recebendo 30 golpes uniformes com o soquete, em seguida foi feito a rasadura do corpo-de-prova. Os corpos-de-prova permaneceram por 24 horas nos moldes e em seguida a cura foi finalizada em imersão de água até a idade de 28 dias (Figura 19). Após os 28 dias as amostras foram secas na estufa a 100°C e submetidas aos ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade e densidade de massa aparente.

Figura 19 – Cura dos corpos-de-prova.

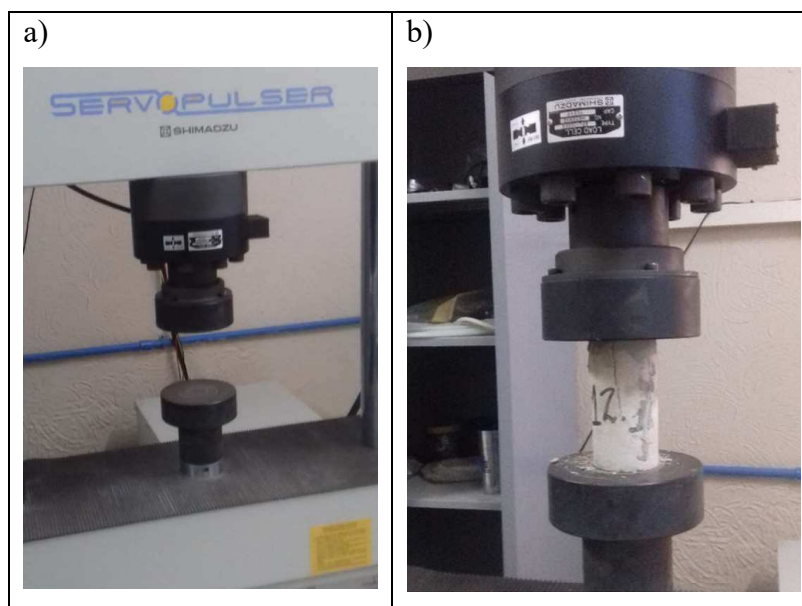


Fonte: autoria própria (2019).

3.2.4.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão axial foi obtida através do ensaio estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1996) para os corpos-de-prova de 28 dias. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP da UFCG (Figura 20), com o equipamento Shimadzu Servopulser, modelo EHF-EM100K1-020-0A de capacidade máxima 100KN e com a carga aplicada à velocidade de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão: a) equipamento Shimadzu Servopulser; b) ruptura de corpo-de-prova.



Fonte: autoria própria (2019).

3.2.4.2. *Absorção de água por capilaridade*

O ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade foi realizado com base na NBR (ABNT, 2005) (Figura 21). Para a realização do ensaio da absorção de água por capilaridade após 28 dias utilizou-se 3 corpos de prova, as amostras foram colocadas em uma lamina de 5mm de água e verificadas a massa dos corpos-de-prova após o tempo de 10min e 90min. A partir da Equação 4 determina-se a absorção nos respectivos tempos.

$$At = \frac{mt - m_o}{16} \quad (4)$$

Onde:

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas por centímetro quadrado.

m_t = é a massa inicial do corpo de prova, em g;

m_o = é a massa inicial do corpo-de-prova, em g;

t = corresponde aos tempos de 10min e 90min, em segundos;

O coeficiente de capilaridade (C) por definição é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10min e 90 min. É calculado conforme a Equação 5.

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (5)$$

Onde:

C é o coeficiente de capilaridade, em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)

m_{10} = massa do corpo de prova aos 10 min, em g.

m_{90} = massa do corpo de prova aos 90 min, em g.

Figura 21 – Ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: autoria própria (2019).

3.2.4.3. *Densidade de massa no estado endurecido*

A densidade de massa aparente é determinada conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005). Utilizou-se três corpos-de-prova de cada mistura e foi verificada a relação entre a massa e seu volume através da Equação 6.

$$\rho = \frac{m}{v} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

ρ = densidade de massa no estado endurecido;

m = massa do corpo de prova, em g;

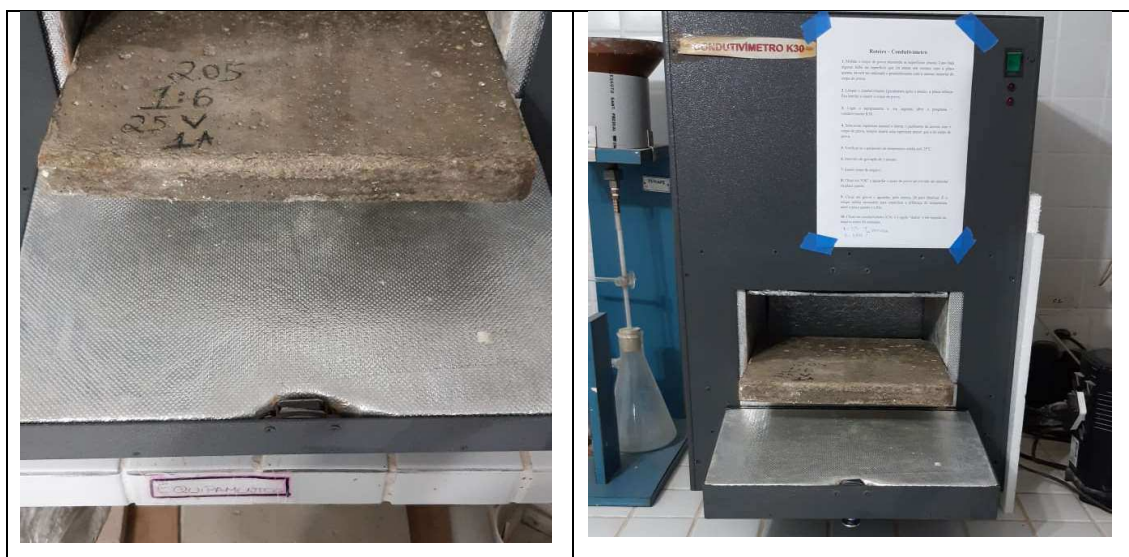
v = volume do corpo-de-prova, dado por $v = l \times h \times c$ (l =largura, h =altura, c =comprimento), em cm^3 .

3.2.5. Análise térmica

Para a avaliação térmica das argamassas foi utilizado o método da placa quente protegida com a utilização do condutímetro K30, para determinação do coeficiente de condutividade térmica e resistividade térmica, disponível no LABEME – Laboratório de ensaio de materiais e estruturas da UFPB.

Foram confeccionadas amostras em forma de placa com 30 cm x 30 cm x 3 cm (Figura 22) para a análise após 14 dias de idade, devido a imprevistos que impossibilitaram a realização para 28 dias. Os ensaios foram realizados para três misturas, sendo elas as argamassas que obtiveram melhor desempenho mecânico de cada grupo.

Figura 22 – Placa sendo posta para análise no condutímetro K30.



Fonte: autoria própria (2019).

O procedimento de ensaio foi realizado conforme Sinhorelli (2019) e acontece com a introdução da amostra no compartimento do condutímetro, em seguida, cada uma das faces do corpo de prova é pressionado por uma placa de fluxímetro. A placa inferior é resfriada e a superior aquecida devido à dissipação gerando um gradiente térmico.

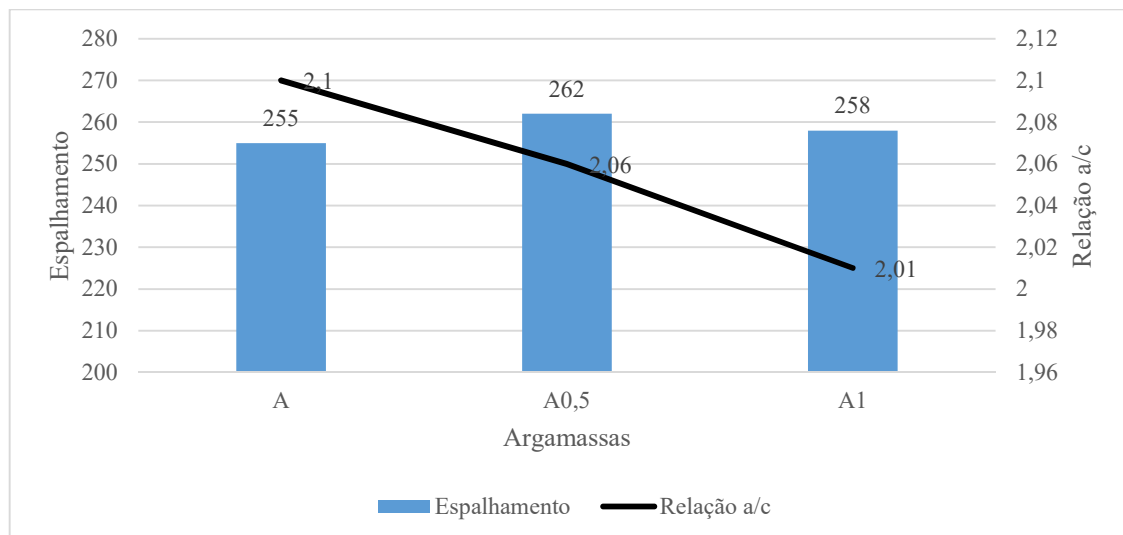
4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISES NO ESTADO FRESCO

4.1.1. Índice de consistência

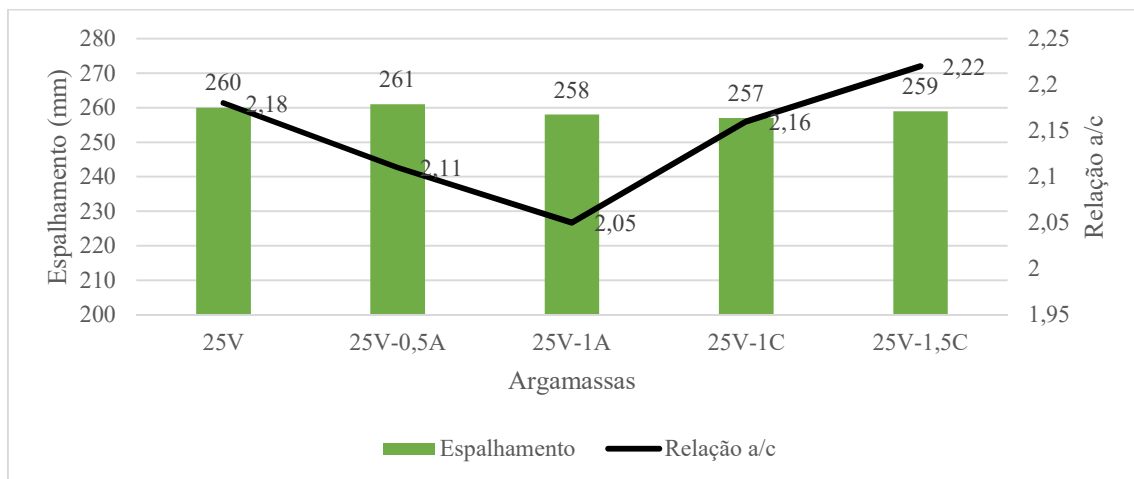
A consistência é uma propriedade diretamente ligada a trabalhabilidade e é influenciada pela quantidade de água adicionada a mistura. Para melhor entendimento, os resultados da mesa de consistência foram agrupados de forma a mostrar a relação água/cimento (a/c) encontrado para cada mistura para o espalhamento pré-fixado de 260 ± 5 mm. Os resultados foram separados para cada grupo de argamassas estudadas nesse trabalho e são mostrados nas Figuras 23, 24 e 25. Os resultados mais detalhados se encontram no Apêndice A.

Figura 23 – Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 1.



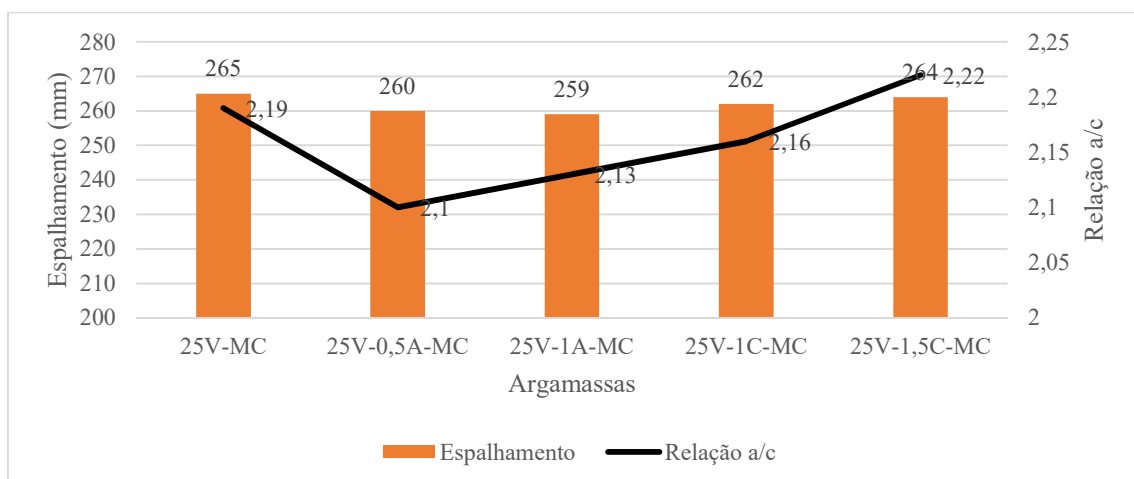
Fonte: autoria própria (2019).

Figura 24 –Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 2.



Fonte: autoria própria (2019).

Figura 25 –Relação água/cimento e espalhamento para misturas do Grupo 3.



Fonte: autoria própria (2019).

Como já era previsto, as argamassas com a incorporação de vermiculita necessitaram de mais água na mistura para atingir o índice de consistência proposto, devido a sua estrutura porosa que absorve bastante água. De acordo com os resultados mostrados nas Figuras 23 e 24, houve um aumento de cerca de 4% da relação a/c do traço de 1:6 sem a vermiculita (Argamassa A) para o traço de 1:6 com a substituição de 25% de vermiculita (Argamassa 25V).

Ao analisar a influência do aditivo plastificante, que tem por finalidade diminuir a água de amassamento devido ao seu poder dispersante, observou-se que, no geral, houve uma diminuição na quantidade de água incorporada conforme o aumento do teor de aditivo, mas não de maneira significativa. Notou-se a diminuição de 4,3% da relação a/c

da argamassa A1 (com 1% de teor de aditivo – valor máximo recomendado pelo fabricante) para argamassa A do Grupo 1 e de 5,9% da argamassa 25V-1A para argamassa 25V do Grupo 2. O efeito do aditivo nas argamassas do Grupo 3 não foi como o esperado, uma vez que o menor teor de aditivo utilizado (0,5%) promoveu maior redução de água, de 4,5% da argamassa 25-0,5A-MC para argamassa 25V-MC, e de 2,7% da argamassa 25-1A-MC (1% aditivo) para argamassa 25V-MC. A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivos plastificantes aqueles que proporcionam no mínimo a diminuição de 6% da quantidade de água na mistura para o mesmo espalhamento, portanto, o aditivo utilizado não atinge os requisitos da norma brasileira e se mostra com desempenho abaixo do esperado.

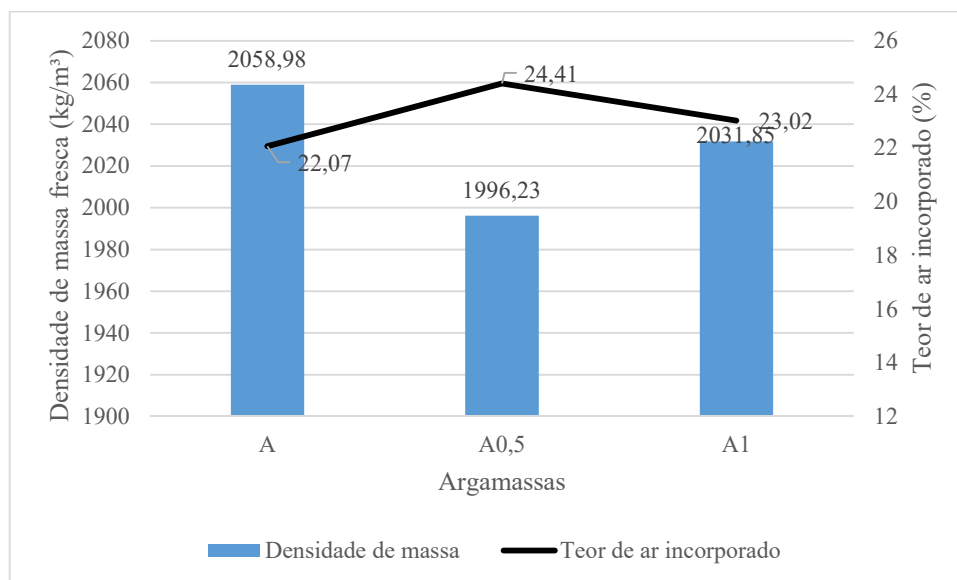
Analisando as misturas com a CH-II, as argamassas A25-1,5C e A25-1,5C-MC necessitaram de mais água que as argamassas de cimento, uma vez que a relação a/c que se eleva para 1,8% comparadas às argamassas A25 e A25-MC. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de finos da cal e a sua capacidade de retenção de água, portanto conforme o aumento da proporção desse material, maior a quantidade de a água necessária na mistura. Esse comportamento demonstra que o traço 1:1:6 tem a proporção próxima ao ideal de cal que promove plasticidade à mistura fazendo com que atinja o mesmo espalhamento com menor quantidade de água, em comparação com as argamassas de cimento A25 e A25-MC de traço de 1:6.

Nota-se também que o metacaulim não teve grande influência na quantidade de água na mistura, porém ainda pode-se observar uma leve melhora na trabalhabilidade, visto que, para as misturas do Grupo 3 quando comparada com as do Grupo 2, apesar das argamassas apresentarem mesmo fator água/cimento, observa-se um espalhamento um pouco maior, ainda dentro do limite de 260 ± 50 mm.

4.1.2. Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado

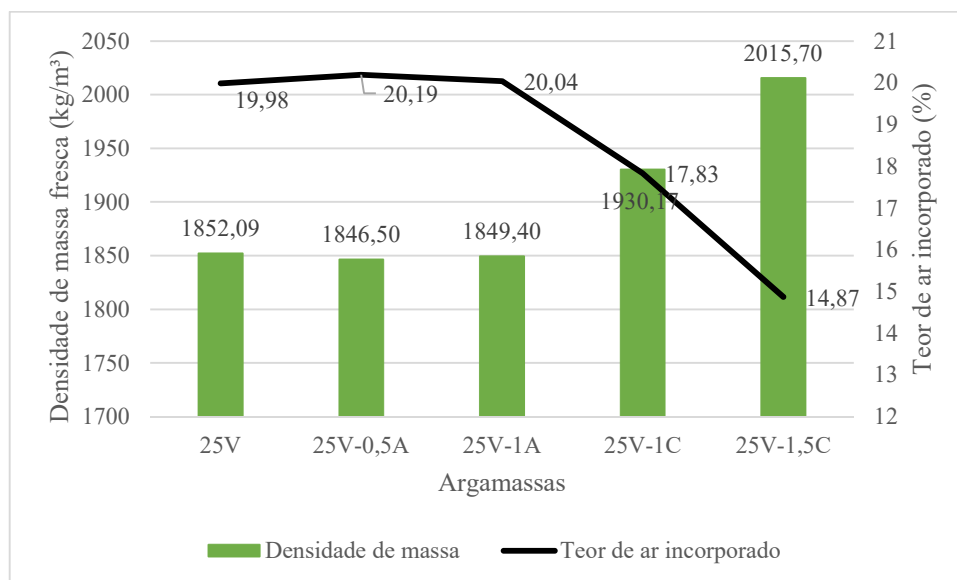
Os resultados de densidade de massa fresca e teor de ar incorporado podem ser visualizados nas Figuras 26, 27 e 28. Os resultados mais detalhados se encontram nos Apêndice B e C.

Figura 26 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo.



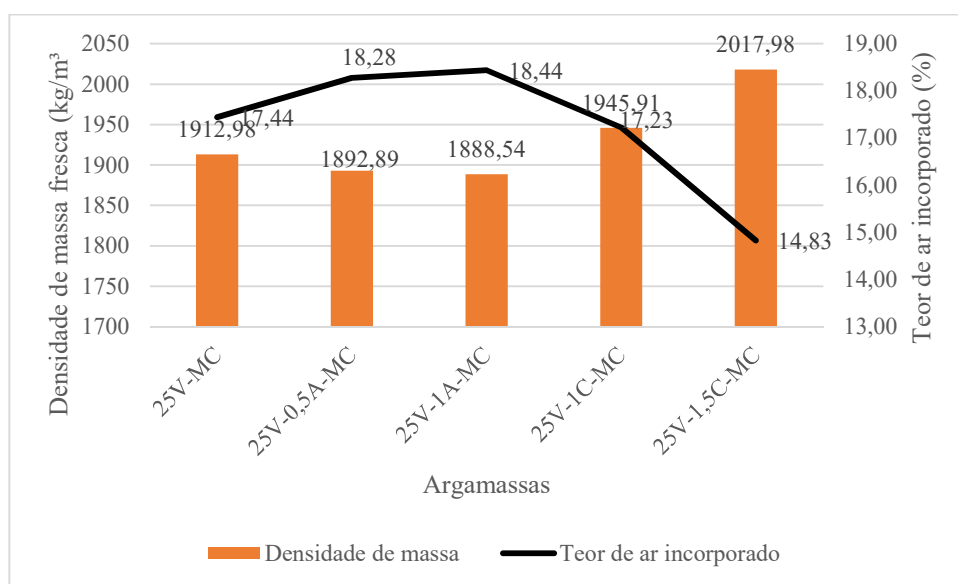
Fonte: autoria própria (2019).

Figura 27 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo 2



Fonte: autoria própria (2019).

Figura 28 – Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado das argamassas do Grupo 3



Fonte: autoria própria (2019).

Através dos resultados obtidos, percebe-se que as argamassas com VE do Grupo 2 e Grupo 3 apresentaram densidade de massa no estado fresco inferior quando comparadas às argamassas de referência do Grupo 1 que não possui substituição da AN pelo agregado leve. Essa diminuição foi de 10% da argamassa 25V e de 7,1% da argamassa 25V-MC em comparação a argamassa A.

As argamassas com a utilização da CH-II apresentaram aumento na densidade quando comparadas as sem o aglomerante. Para o Grupo 2, o aumento da densidade massa fresca foi de 4% e 8,1% para A25-1C e A25-1,5C, respectivamente, em comparação a A25. Já para o Grupo 3, o aumento foi de 1,7% e 5,2% para A25-1C-MC e A25-1,5C-MC, respectivamente, em comparação a A25-MC. Isso pode ser explicado pela maior concentração de finos nessas argamassas promovida pela CH-II, que faz com que se apresentem de forma mais compactas, aumentando o valor dessa propriedade.

Constata-se, também, que a adição de MC nas misturas proporcionou o aumento na densidade de massa fresca nas argamassas com VE, também verificado por Sinharelli (2019) em seu trabalho. Quando se analisa o Grupo 2 em comparação ao Grupo 3 verifica-se aumento de 3,18% na densidade da 25V-MC em relação à 25V. Como semelhante à cal, isso também deve-se ao fato de que houve um acréscimo de finos, influenciando no empacotamento das partículas, e consequentemente aumento desse parâmetro.

É possível perceber a tendência de que quanto maior a densidade das argamassas no estado fresco, menor é o seu teor de ar incorporado, o que é de se esperar, pois o ar

presente nas argamassas faz com que as argamassas se tornem mais leves e mais trabalháveis. Esse comportamento pode conferido com o aumento no teor de ar incorporado nas argamassas com a utilização de aditivo e diminuição nas argamassas com a utilização da cal, que possuem maior densidade.

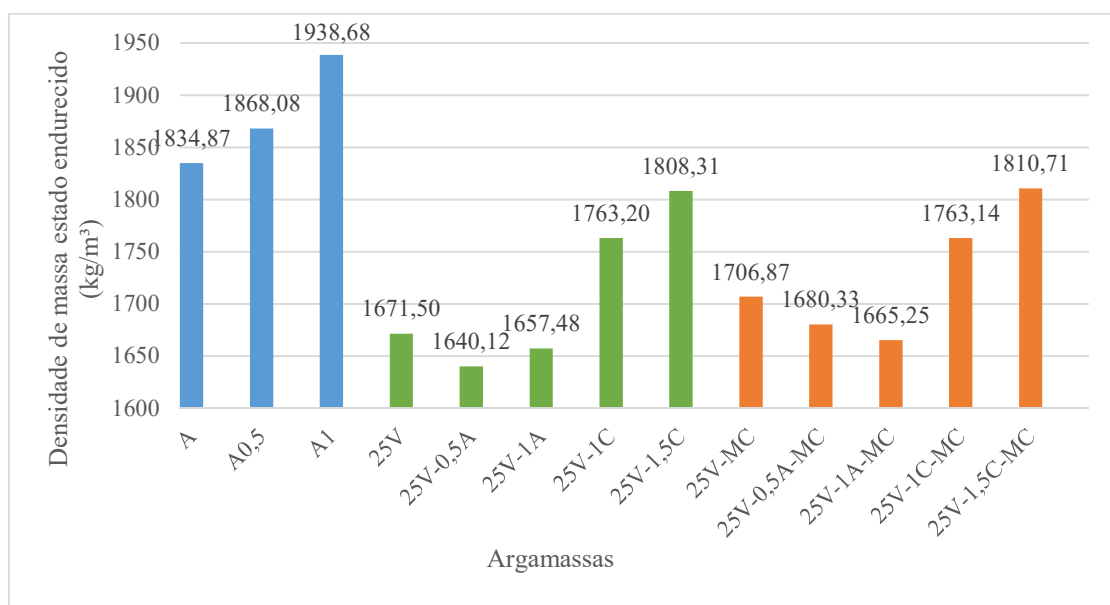
Também é notável que o metacaulim promoveu a diminuição do teor de ar incorporado. Por exemplo, a argamassa 25V-MC do Grupo 3 apresentou uma diminuição de teor de ar incorporado de 14,56% em comparação à 25V do Grupo 2. A diminuição do teor de ar incorporado para as argamassas com a CH-II e o MC pode ser explicada da mesma forma para o aumento da densidade, os finos ocupam os menores espaços que poderiam ser ocupados por ar.

4.2. ANÁLISES NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1. Densidade de massa aparente

Na Figura 27 são apresentados os resultados de densidade de massa para as argamassas no estado endurecido, em azul são representadas as argamassas do Grupo 1, em verde as argamassas do Grupo 2 e em laranja as argamassas do Grupo 3. Os resultados mais detalhados se encontram no Apêndice D.

Figura 29 – Densidade de massa do estado endurecido.



Fonte: autoria própria (2019).

Ao analisar a Figura 29 é possível notar que as argamassas com VE apresentam densidade menor do que as argamassas sem o agregado leve, o que era de se esperar devido à baixa massa específica da VE. O percentual de diminuição foi de 8,9% entre a argamassa 25V em relação à argamassa A, valor bastante coerente encontrado por Aguiar (2017) e Barros (2018) para as argamassas com substituição de 25% do agregado miúdo pela VE. Esse comportamento também é observável ao comparar as misturas com aditivo do Grupo 2 com o Grupo 1.

Pode-se observar que o aditivo promoveu nas argamassas do Grupo 1 aumento na densidade aparente conforme o aumento do teor aplicado, isso pode estar relacionado ao fato de que a menor quantidade de água necessária para amassamento promovida pelo aditivo proporcionou menor porosidade e consequentemente maior densidade, uma vez que existem menos espaços vazios, que se sobressai a influência da incorporação das microbolhas de ar no estado fresco provocadas pelo aditivo. Em contrapartida, observa-se uma diminuição na densidade com o aumento do teor de aditivo nas argamassas do Grupo 2 e do Grupo 3, isto pode estar ligado a maior incorporação de ar no estado fresco em conjunto com a presença da vermiculita que possui estrutura porosa.

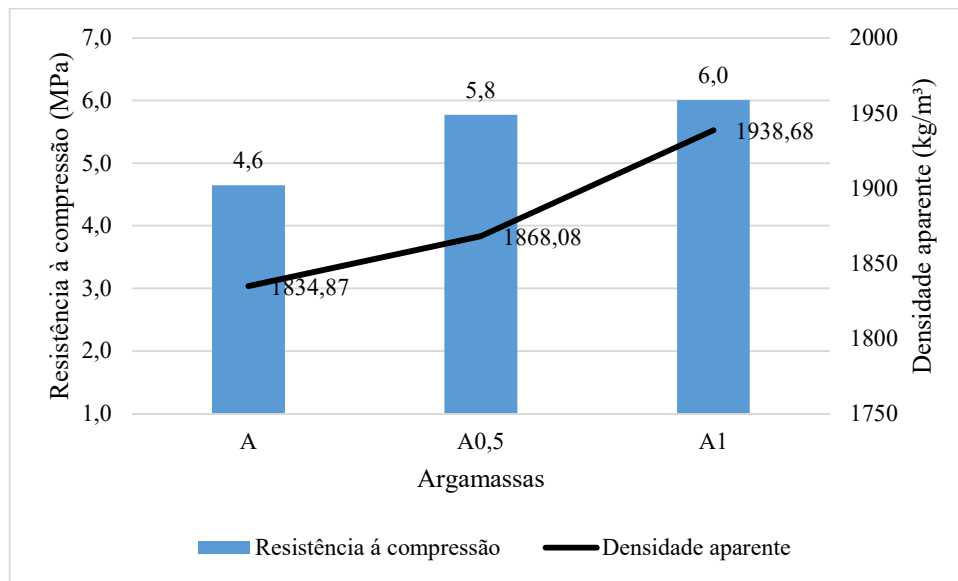
As argamassas com a CH-II apresentaram as maiores densidades, e é maior nas argamassas com a proporção de 1:1,5:6 (25V-1,5C e 25V-1,5C-MC). Isso se deve ao fato que a maior quantidade de finos da cal deixa a argamassa mais compacta, por ocupar os espaços menores e promover maior densidade aparente. Essa característica pode não ser favorável à capacidade de isolamento térmica dessas argamassas, uma vez que a densidade de massa está diretamente relacionada a essa propriedade, como observou Aguiar (2017) e Barros (2018).

Também é perceptível que o MC promoveu um aumento sutil de cerca de 2% na densidade aparente das argamassas quando se compara as argamassas do Grupo 2 com o Grupo 3. Fato que Sinhorelli (2019) também constatou em sua pesquisa, e está relacionada ao empacotamento das partículas promovidas pela adição mineral. Esse fenômeno é mais perceptível nas argamassas sem CH-II, já que a CH-II por si só influencia no aumento da densidade e está em maior quantidade que o MC.

4.2.2. Resistência à compressão

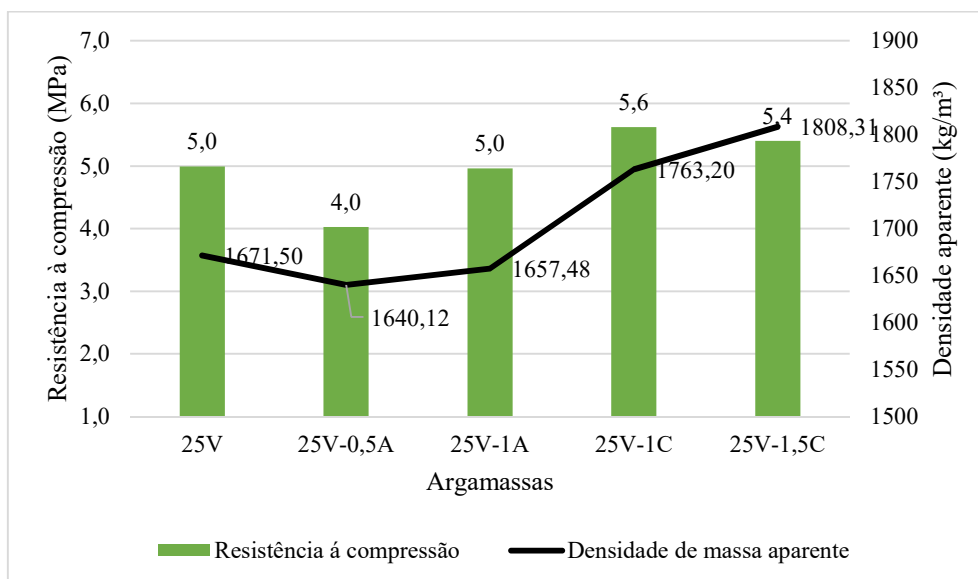
Os resultados de resistência à compressão em relação à densidade de massas aparente se encontram nas Figuras 30, 31 e 32. Os detalhes dos resultados se encontram no apêndice E.

Figura 30 – Resistência à compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 1.



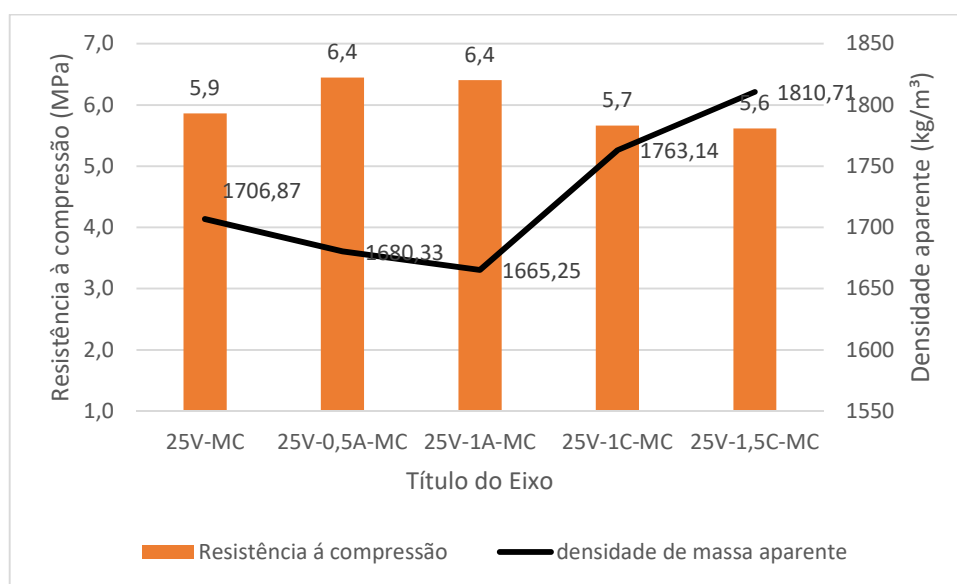
Fonte: autoria própria (2019).

Figura 31 – Resistência à compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 2.



Fonte: autoria própria (2019).

Figura 32 – Resistência à compressão das argamassas e densidade aparente do Grupo 3.



Fonte: autoria própria (2019).

É possível constatar ao analisar as argamassas do Grupo 1 (Figura 30) que o aditivo plastificante influenciou positivamente na resistência mecânica de forma que a argamassa A0,5 apresentou aumento de 20,7% na resistência e a A1 de 24,1% em relação à argamassa A; isso indica que mesmo a redução na quantidade de água promovida pelo aditivo não tenha sido tão considerável, ele ainda proporcionou maior retenção de água e menor exsudação, promovendo melhor hidratação do cimento e consequentemente melhores valores de resistência.

Ao compararmos a argamassa A do Grupo 1 com a A25 do Grupo 2, constatamos que a argamassa A sem VE apresentou valor 8% menor de resistência em comparação a A25, apesar das argamassas com vermiculita apresentarem, no geral, resistência mecânica inferior as sem o agregado leve, fato constatado pelos trabalhos de Aguiar (2017) e Barros (2018), por deixar a estrutura da argamassa mais porosa. Entretanto deve-se levar em consideração que a argamassa A possui maior exsudação devido a menor retenção de água das argamassas de cimento como Carasek (2010) e Silva (2006) afirmam, prejudicando as reações de hidratação do cimento e consequentemente a resistência mecânica. Também foi observado nos trabalhos acima citados que argamassas com vermiculita apresentam maior retenção de água de que argamassas sem esse agregado, característica que proporcionou assim menor exsudação e contribuiu para que as reações de hidratação do cimento acontecessem de maneira mais efetiva do que a argamassa de cimento sem o agregado leve. Ou seja, a exsudação da argamassa A prejudicou mais a

resistência mecânica do que a estrutura mais porosa da argamassa com VE com teor de 25% de substituição do agregado miúdo.

Esse comportamento ainda pode ser confirmando ao analisar argamassas com vermiculita A25-0,5A e A25-1A do Grupo 2 com a argamassa A25, nota-se que o aditivo embora tenha diminuindo a relação a/c, ele não promoveu ganhos em resistência como a utilização do aditivo nas argamassas A0,5 e A1 do Grupo 1 que tiveram ganhos na resistência de 20,7% e 23,3%, respectivamente, em comparação a argamassa A. Ou seja, a menor exsudação e maior retenção de água promovida pelo aditivo nas argamassas sem o agregado leve, proporcionou melhores resistências, enquanto que o efeito do aditivo não foi verificado nas argamassa com VE, o que pode indicar que as menores resistências nas argamassas com maiores teores de VE, mostrado em trabalhos como o de Aguiar (2017) e Barros (2018), é mais influenciada pela sua estrutura porosa do que pela maior quantidade de água que essas misturas requerem, uma vez que a redução da quantidade de água não proporcionou ganhos na resistência para as argamassas com 25% de VE. Porém, seriam necessários estudos mais aprofundados das argamassas com maiores proporções do agregado leve com a utilização de plastificantes.

Quando se observa o efeito da CH-II nas argamassas no Grupo 2, é possível notar aumento da resistência de cerca de 13% a 16% se comparadas a 25V. A cal por possuir maior quantidade de finos, promove maior empacotamento dos grãos e por isso ocupa os espaços da estrutura lamelar da VE, o que também explica a maior densidade aparente dessas argamassas. Segundo Silva (2006), a densidade de massa no estado endurecido pode explicar o desempenho de argamassas quanto às propriedades mecânicas influenciada, principalmente, pelo empacotamento das partículas do conjunto agregado-aglomerantes. Apesar da cal proporcionar aumento na resistência ligado à densidade aparente mais elevada, ela pode influenciar negativamente na propriedade de isolamento térmico que a VE proporciona, uma vez que a baixa densidade das argamassas com VE está diretamente ligada capacidade do isolamento térmico do revestimento (AGUIAR, 2017; BARROS, 2018; CINTRA, 2013; SINHORELLI, 2019).

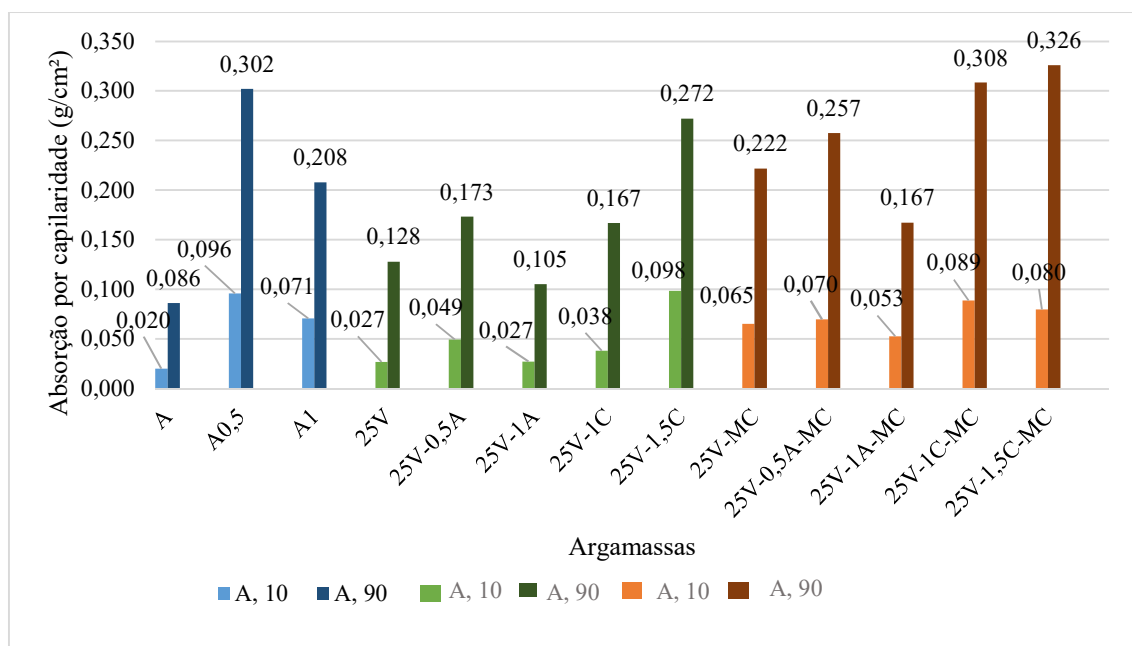
Já o metacaulim proporcionou um aumento expressivo na resistência à compressão que se mostra mais evidente nas argamassas sem cal. A argamassa 25V-MC teve 15,3% de aumento em relação a 25V, a 25V-0,5A-MC 37,5% em relação a 25V-0,5A e a 25V-1A 21,9% em relação a 25V-1A-MC. Fenômeno que pode ser explicado pelo empacotamento das partículas promovidas pelo MC, verificado também por Sinhorelli (2019) que estudou essa adição incorporada às argamassas com vermiculita.

A relação de quanto maior a densidade aparente, maior é resistência a compressão da argamassa pode ser observada ao se comparar as misturas entre si do Grupo 1 e do Grupo 2. A ressalva se dá para o Grupo 3, pois esse fato não foi constatado nas argamassas com a CH-II que apresentaram menor resistência mesmo com maior densidade. Essa maior densidade da argamassa com cal é atribuída a maior quantidade de finos na mistura, o que promove maior empacotamento dos grãos, como já explicado, mas não proporciona o aumento na resistência semelhante à pozolana. Nota-se que as maiores resistências da argamassas com o MC foram as argamassas sem a cal e com aditivo, a argamassa A25-0,5A-MC e a A25-1A-MC apresentaram 7,8% de aumento na resistência em relação a A25-MC. As argamassas com a CH-II ainda apresentaram menor resistência do que a argamassa A25-MC, que apresentou valor 5% maior em relação a A25-1C e de 3,4% em comparação à A25-1,5C. A redução da resistência das argamassas com CH-II pode ser explicado pela redução do módulo de elasticidade do revestimento promovida pela cal, como afirma Miranda (2009).

4.2.3. Absorção de água por capilaridade

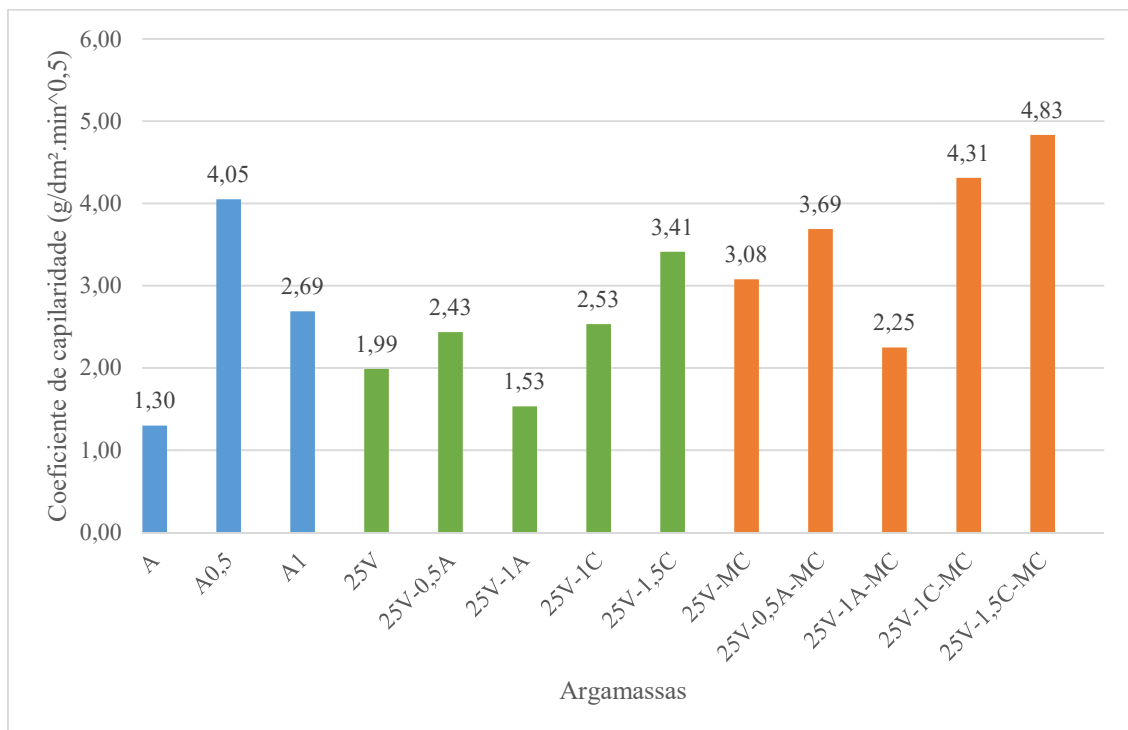
Os resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas são encontrados nas Figuras 33 e 34. Os detalhes dos resultados se encontram no apêndice F. A Figura 28 mostra as argamassas do Grupo 1 na cor azul, as argamassas do Grupo 2 na cor verde e as argamassas do Grupo 3 na cor laranja.

Figura 33 – Absorção por capilaridade das argamassas aos 10 (A,10) e 90 minutos (A,90).



Fonte: autoria própria (2019)

Figura 34 – Coeficiente de capilaridade das argamassas.



Fonte: autoria própria (2019).

Estudos como Sinhorelli (2019) e Cintra (2013) mostram que o aumento da proporção de VE gera aumento no coeficiente de capilaridade. Porém, Barros (2018) encontrou um resultado menor para capilaridade com substituição de 25% VE em comparação a de referência sem o agregado leve e atribuiu esse resultado à possibilidade de uma porcentagem ideal de VE que minimize o surgimento de poros capilares. Entretanto, nesse estudo esse fato não foi verificado, pois a argamassa 25V apresenta coeficiente de capilaridade 3,6% maior que a argamassa A, confirmando a tendência observada por Cintra (2013) e Sinhorelli (2019).

É possível notar que as argamassas com a CH-II e MC apresentaram maior coeficiente de capilaridade que a argamassa sem esses dois aglomerantes, e quando esses materiais são combinados esse valor é potencializado. Lauretino (2019) observou em seu estudo que quanto maior o teor de metacaulim incorporado, maior foi a absorção de água nas argamassas estabilizadas. Entretanto, Sinhorelli (2019) verificou uma diminuição nesse parâmetro com aumento do teor de metacaulim nas argamassas com vermiculita,

atribuindo o fato ao refinamento dos poros. Nakakura e Cincotto (2004, p.14-15) afirmam:

A existência de poros interligados ou não, bem como de diferentes diâmetros, faz que alguns contribuam para a permeabilidade e outros, não. Se a porosidade for elevada e os poros estiverem interligados, eles contribuem para o deslocamento de fluidos, de modo que a permeabilidade também pode ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou, de outro modo, ineficazes para o deslocamento de fluidos, a permeabilidade será baixa, mesmo com porosidade alta.

Silva (2006) também explica que a altura da penetração da água nos capilares da argamassa é inversamente relacionada ao tamanho dos raios dos capilares, ou seja, quanto menor os raios capilares, maior a ascensão da água nos corpos de prova. Isso pode explicar o aumento do coeficiente de capilaridade nas argamassas com MC e CH-II. Devido ao refinamento dos poros, os capilares se apresentam com menores raios e promovem maior ascensão de água e quando interligados entre si podem ter proporcionado o aumento da absorção.

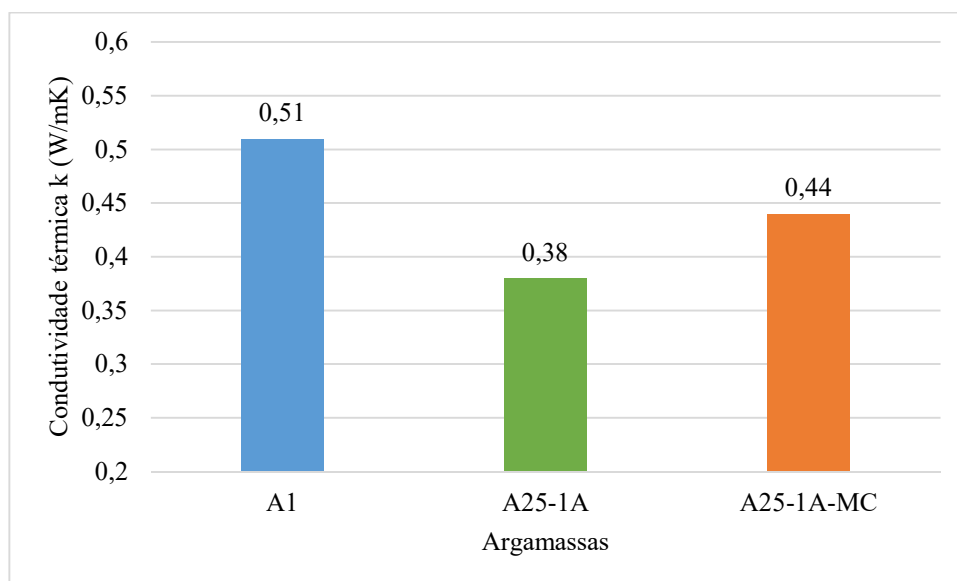
Como observado por Khudhair, Youbi e Elharfi (2017), os aditivos plastificantes tem o poder de reduzir a absorção por capilaridade, pois com a redução da água de amassamento, resulta posteriormente em menos poros na estrutura. Nesse estudo é possível observar esse efeito nas argamassas com 1% de aditivo plastificante do Grupo 2 e Grupo 3, nota-se a diminuição de 23,1% e 26,9% em relação as argamassas sem o aditivo de cada grupo, respectivamente. Entretanto isso não foi observado no Grupo 1, quando a A1 apresentou aumento de 51,7% em comparação a argamassa A. Outro fato curioso, é que se observa que os maiores valores de absorção entre as argamassas contendo aditivo de todos os 3 grupos é para teor de 0,5%, que também apresentaram maior teor de ar incorporado no estado fresco.

Diversos fatores podem influenciar a absorção por capilaridade, portanto apenas com os ensaios macroscópicos tradicionais não é possível ter o completo entendimento desse comportamento das argamassas, pois dependem de estudos da microestrutura do material, uma vez que a vasta estrutura interna da argamassa proporciona diferentes formas de transporte de umidade por capilaridade, como afirmam Santana e Aleixo (2017).

4.2.4. Análise térmica

A análise térmica foi realizada para a mistura de melhor desempenho contendo VE e aditivo plastificante. Através do ensaio da placa quente foi possível obter a condutividade térmica das argamassas, o seu valor está exposto na Figura 45.

Figura 35 - Condutividade térmicas das argamassas.

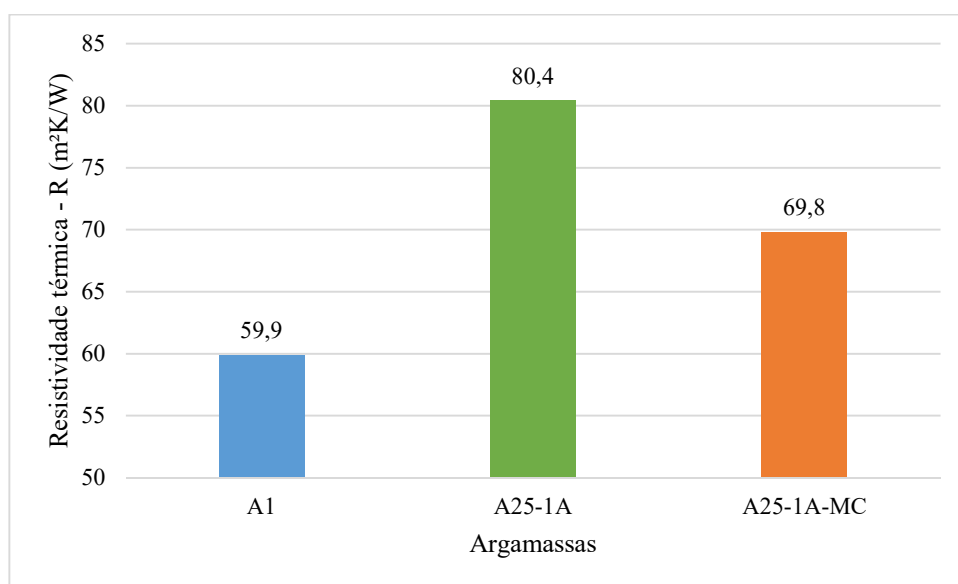


Fonte: autoria própria.

Ao analisar a figura 35 é possível perceber que a argamassa de A1 de referência tem maior valor de condutividade térmica que as duas outras contendo VE. Resultado esperado, já que essa argamassa tem maior densidade de massa no estado endurecido que as outras duas contendo o agregado leve. A VE por possuir uma estrutura porosa incorpora ar, fazendo com que a condutividade térmica seja diminuída. Se observa também que a argamassa A25-1A-MC possui um valor um pouco mais elevado de condutividade térmica que a A25-1A, isso se deve ao fato o MC proporciona o empacotamento dos grão fazendo com que a densidade no estado endurecido aumente e consequentemente aumentando a condutividade térmica, comportamento também observado por Sinhorelli (2019).

A resistividade térmica é uma grandeza que mede a capacidade de um material resistir a passagem de calor. Os valores encontrados para argamassas estudadas se encontra na Figura 36.

Figura 36 – Resistividade térmica das argamassas.



Fonte: autoria própria.

Nota-se que a argamassa A25-1A tem a mais capacidade de resistir ao calor, uma vez que sua condutividade térmica é a mais baixa, apresentando um valor de 34% menor que a argamassa A1. A argamassa A25-1A-MC teve redução de 13,2% na resistividade térmica em relação a argamassa A25-1A.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs a investigar a utilização de aditivos plastificantes e metacaulim nas argamassas contendo vermiculita expandida. Para isso foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido (físico-mecânico e térmico) das argamassas com 25% de vermiculita em substituição do agregado leve com a variação de teores de aditivo plastificante e incorporação de metacaulim.

Diante dos resultados obtidos, é possível destacar as seguintes conclusões para o estado fresco:

- Com o ensaio da Mesa de Consistência foi possível constatar que a argamassa com 25% de VE (vermiculita expandida) em substituição a AN (areia natural), como era de se esperar, apresentou maior relação água/cimento que a sem a substituição do agregado leve, para o mesmo espalhamento. O aditivo aplicado não reduziu consideravelmente a quantidade de água, não mostrando o desempenho esperado, já que a maior diminuição de água máxima provocada foi de 5,9% na mistura 25V-1A, abaixo de 6% do que preconiza a NBR 11768 (ABNT, 2011). A cal adicionada na proporção 1:1:6 das argamassas A25-1C e A25-1C-MC promoveu menor relação água/cimento, se comparada as argamassas sem cal de traço 1:6 (A25 e A25-MC), porém apresentam maior relação água/cimento que as argamassas com aditivo do Grupo 2 (A25-0,5A e A25-1A) e do Grupo 3 (A25-0,5A-MC e A25-1A-MC); o teor de 10% de MC adicionado não gerou quase nenhuma influência no índice de consistência.
- A densidade de massa fresca diminuiu 10% com a substituição da VE em 10% na argamassa 25V e 7,1% na argamassa 25V-MC em relação a argamassa sem o agregado leve (A), resultado atribuído a baixa densidade da VE. Já a cal proporcionou aumento de densidade nas argamassas do Grupos 2 e 3 em relação às argamassas dos grupos sem o aglomerante. O MC proporcionou um leve aumento de densidade nas argamassas do Grupo 3, cerca de 3% em relação as argamassas do Grupo 2.

Para os resultados do estado endurecido, pode-se destacar as seguintes conclusões:

- Todas as argamassas com VE apresentaram cerca de 10% de redução na densidade do estado fresco para o endurecido, isso se deve à evaporação da água retida no estado fresco no processo de cura. Observou-se que o aditivo proporcionou diminuição da densidade aparente das argamassas tanto do Grupo 2 quanto do Grupo 3, fato que pode ser atribuído à incorporação das microbolhas no estado fresco. A CH-II (cal hidratada tipo II) causou aumento da densidade aparente conforme o aumento da sua proporção nos Grupo 2 e 3. O MC também promoveu leve aumento da densidade, de cerca de 1% em

todas as argamassas do Grupo 3 em relação ao Grupo 2. A elevação desse parâmetro provocada pela CH-II e o MC pode ser atribuído ao empacotamento das partículas que os dois materiais proporcionam.

- O aditivo provocou aumento considerável na resistência de compressão nas argamassas do Grupo 1 de referência, mas não exerceu o mesmo efeito nas argamassas com vermiculita do Grupo 2. As argamassas com MC do Grupo 3 apresentaram as melhores resistências em conjunto com o aditivo, embora em combinação com a CH-II não houve grandes ganhos, uma vez que as resistências dessas argamassas ficaram próximos a argamassa com cal e sem a pozolana do Grupo 2.
- A argamassa com 25% de vermiculita (25V) apresenta o valor de absorção 3,6% maior que a argamassa sem o agregado leve (A). As argamassas com a presença do MC do Grupo 3 apresentaram maior absorção se comparadas com as sem a adição mineral do Grupo 2. A cal também promoveu maior absorção nas argamassas do Grupos 2 e 3. Portanto, encontrou-se os maiores valores de absorção no Grupo 3 nas argamassas com CH-II e MC combinadas (25V-1C-MC e 25V-1,5C-MC). A interligação entre os capilares com menores raios pode explicar a maior absorção nos revestimentos com esses materiais. Entretanto, se faz necessário estudos de microestrutura da matriz das argamassas para melhor entender esse comportamento.
- A substituição de 25% de VE proporciona melhor isolamento térmico que as argamassas comuns. E a incorporação de 10% de MC nessas argamassas influencia negativamente nesse isolamento, mas ainda assim, apresenta melhor desempenho térmico do que as argamassas comuns.

6. REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. L. D. DE. **Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida**. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

ALVAREZ J; SEQUEIRA C; COSTA M. Ensinaamentos a retirar do Passado Histórico das Argamassas. **1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção**. Lisboa, 2005.

ANTUNES, R. P. DO N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da compilação graumétrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 15259**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. 2005e.

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

vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 15575-2**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 11355**: Granulometria vermiculita. Rio de Janeiro, 2015.

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

BARBOSA, F. R.; MOTA, J. M. F.; CARNEIRO, A. M. P. A influência do teor de adição de metacaulim nas propriedades no estado endurecido: capilaridade e resistência mecânica de argamassas inorgânicas para a reuperação de monumentos históricos. **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. Florianópolis/SC, 2006.

BARROS, I. M. DA S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

BASTOS, A. P. O. **Análise da influência de aditivos superplastificantes no comportamento de pastas de cimento Portland com e sem adição de filer calcário**. Porto Alegre: Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

BAUER, F. **Materiais de Construção. Vol 1**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. IBRACON, 2010. p. 863–891.

CARDOSO, A. A.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Argamassas produzidas a partir de materiais não convencionais: uma revisão sistemática. **4º Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental**. Cuiabá/MT, 2016.

CARVALHAES, C. Vermiculita. In: **Sumário Mineral**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015. v. 35p. 116–117.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, 2013.

KHUDHAIR, M. H.; YOUNI, M. EL; ELHARFI, A. Study of the influence of a high water-reducing super plasticizer and accelerator of setting time on the physical

properties and mechanical performance of mortars and concretes. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences**, v. 8, n. 3, p. 1698–1712, 2017.

LAURENTINO, R. N. DE A. **Estudo da argamassa estabilizada para assentamento com adição mineral de metacaulim**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

LEGGERINI, M. R. C.; AURICH, M. Capítulo IV - Argamassa de revestimento. In: **Notas de aula: Materiais Técnicos e Estruturas I**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Faculdade de Arquitetura, 2011.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MELO, K. A. DE; MARTINS, V. DA C.; REPETTE, W. L. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. **Ambiente Construído**, v. 9., p. 45–56, 2009.

MIRANDA, L. M. C. DA C. **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, 2009.

MOLIN, D. C. C. D. **Adições Minerais**. 1ª Edição. ed. São Paulo/SP: IBRACON, 2011.

MOTA, J. M. DE F. **Reforço de alvenaria resistente com argamassa armada com adição de metacaulim**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A. DE; CARNEIRO, A. M. P. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. **Revista Matéria**, p. 1105–1116, 2016.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

NASCIMENTO, M. C. B. DO. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

NASCIMENTO, R. L. **Política de Eficiência Energética no Brasil**. Brasília - DF: Consultoria Legislativa - Câmara dos Deputados, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e sistividade de concretos**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2016.

REIS, E. Vermiculita no Brasil - Situação atual. **Ministério de Ciência e Tecnologia**

(MCT)/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). 2002.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SANTANA, B. V. DE; ALEIXO, I. V. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica. Centro Universitário de Brasília - UNICEUB, 2017.

SILVA, J. C. DA. **A influência da adição de fibras de polipropileno e vermiculita expandida em argamassas com nanotitânia**. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e fissuração em revestimento de argamassa a fase plástica**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

_____. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2006.

SINHORELLI, K. DOS S. **Estudo das propriedades reológicas e térmicas de argamassas de revestimento contendo adições minerais e vermiculita**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, 2019.

SOARES, A. P. DE S.; MARMORE, I. A. P. **Estudo comparativo do desempenho térmico da argamassa convencional e com adição de Vermiculita**. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade Católica de Brasília, 2016.

SOUSA, A. J. C. DE. **Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias**. Dissertação (mestrado). Universidade do Porto, 2010.

SOUSA, V. **Estudo do comportamento de materiais não convencionais utilizados como revestimento de paredes visando a redução da carga térmica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, 2012.

UGARTE, J. F. DE O.; SAMPAIO, J. A.; ALVES, S. C. Vermiculita. In: CETEM/MCT. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Parte II ed. Rio de Janeiro. p. 677–698.

APÊNDICES

Apêndice A – Espalhamento das misturas para determinação do índice de consistência na mesa de consistência e relação água/cimento.

	ARGAMASSA	ESPALHAMENTO (mm)				Relação a/c
		E1	E2	E3	E _{médio}	
GRUPO 1	A	26,0	25,5	25,0	25,5	2,10
	A0,5	27,0	25,5	26,0	26,2	2,06
	A1	25,5	26,0	26,0	25,8	2,01
GRUPO 2	25V	26,5	26,0	25,5	26,0	2,18
	25V-0,5A	26,5	25,2	26,5	26,1	2,11
	25V-1A	26,5	26,0	25,0	25,8	2,05
	25V-1C	26,0	25,5	26,5	26,0	2,16
	25V-1,5C	25,5	26,2	26,0	25,9	2,22
GRUPO 3	25V-MC	27,0	26,0	26,5	26,5	2,19
	25V-0,5A-MC	25,4	27,5	26,0	26,3	2,10
	25V-1A-MC	26,0	26,0	25,7	25,9	2,13
	25V-1C-MC	26,5	25,0	27,0	26,2	2,16
	25V-1,5C-MC	26,0	26,3	27,0	26,4	2,22

a/c = água/cimento

APÊNDICE B – Determinação da densidade de massa fresca.

	ARGAMASSA	m_r (g)	V_r (cm ³)	m_{r+a} (g)	d (kg/m ³)
GRUPO 1	A			1053,90	2058,98
	A0,5			1023,60	1996,23
	A1			1040,80	2031,85
GRUPO 2	25V			954,00	1852,09
	25V-0,5A			951,30	1846,50
	25V-1A			951,20	1846,50
	25V-1C	59,6	482,86	991,70	1930,17
	25V-1,5C			1033,00	2015,70
GRUPO 3	25V-MC			983,40	1912,98
	25V-0,5A-MC			973,70	1892,89
	25V-1A-MC			971,60	1888,54
	25V-1C-MC			999,30	1945,91
	25V-1,5C-MC			1034,10	2017,98

m_r = massa do recipiente; V_r = volume do recipiente; m_{r+a} = massa do recipiente e argamassa; d = densidade.

APÊNDICE C – Determinação do teor de ar incorporado.

ARGAMASSA		d_t	d	A
		(kg/m³)	(kg/m³)	(%)
GRUPO 1	A	2642,14	2058,98	22,07
	A0,5	2640,81	1996,23	24,41
	A1	2639,48	2031,85	23,02
GRUPO 2	25V	2314,57	1852,09	19,98
	25V-0,5A	2313,74	1846,50	20,19
	25V-1A	2312,91	1849,40	20,04
	25V-1C	2348,86	1930,17	17,83
	25V-1,5C	2367,65	2015,70	14,87
GRUPO 3	25V-MC	2317,08	1912,98	17,44
	25V-0,5A-MC	2316,25	1892,89	18,28
	25V-1A-MC	2315,42	1888,54	18,44
	25V-1C-MC	2350,89	1945,91	17,23
	25V-1,5C-MC	2369,37	2017,98	14,83

d_t = densidade teórica; d = densidade real; A = teor de ar incorporado.

APÊNDICE D – Determinação da resistência à compressão individual e média aos 28 dias.

ARGAMASSAS		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				DESVIOS (%)		
		CP1	CP2	CP3	MÉDIA	CP1	CP2	CP3
GRUPO 1	A	4,9	4,4	3,3	4,6	16,3	5,6	21,9*
	A0,5	6,7	6,1	5,4	5,8	9,7	1,3	10,9*
	A1	7,1	6,1	5,9	6,0	11,7*	4,2	7,5
GRUPO 2	25V	4,2	4,9	5,1	5,0	10,6*	2,5	8,2
	25V-0,5A	4,5	3,9	4,1	4,0	7,0*	6,2	0,7
	25V-1A	4,9	5,0	5,0	5,0	1,6	1,0	0,6
	25V-1C	5,5	5,7	5,7	5,6	2,5	0,5	2,1
	25V-1,5C	6,4	5,2	5,6	5,4	11,3*	8,8	2,5
GRUPO 3	25V-MC	5,6	6,1	5,9	5,9	3,8	3,4	0,3
	25V-0,5A-MC	6,5	5,1	6,4	6,4	8,4	15*	6,6
	25V-1A-MC	6,4	4,0	6,4	6,4	14,3	28,1*	13,8
	25V-1C-MC	5,6	5,6	5,8	5,7	1,6	1,5	3,1
	25V-1,5C-MC	6,1	5,1	7,4	5,6	1,7	17,3	19,1*

CP1 = corpo-de prova 1*; CP1 = corpo-de prova 2*; CP1 = corpo-de prova 3.

*** Desvios acima de 6%**

APÊNDICE E – Determinação da densidade de massa aparente individual e média aos 28 dias.

ARGAMASSAS		CP	D1 (cm)	D2 (cm)	H (cm)	Volume (cm³)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)	D _m (kg/m³)
GRUPO 1	A	1	5	5	9,7	190,36	348,87	1832,64	1834,87
		2	5	5	9,6	188,40	345,23	1832,45	
		3	5,1	5	9,6	192,19	353,53	1839,53	
	A0,5	1	5	5	9,7	190,36	358,27	1882,02	1868,08
		2	5	5	9,6	188,40	354,60	1882,17	
		3	5,1	5	9,6	192,19	353,63	1840,05	
	A1	1	4,95	4,95	9,7	190,36	365,97	1922,47	1938,68
		2	5	5	9,4	185,13	366,87	1981,68	
		3	5	5	9,6	188,40	360,20	1911,89	
GRUPO 2	25V	1	5	4,95	9,7	188,46	316,60	1679,90	1671,50
		2	4,95	4,95	9,8	188,50	315,73	1675,00	
		3	5	5,1	9,5	190,18	315,63	1659,61	
	25V-0,5A	1	5	5	9,7	190,36	320,83	1685,38	1640,12
		2	5	4,9	9,9	190,42	310,20	1629,02	
		3	5	5	9,8	192,33	308,87	1605,96	
	25V-1A	1	5	5	9,6	188,40	311,73	1654,64	1657,48
		2	5	5	9,6	188,40	318,87	1692,50	
		3	5	5	9,7	190,36	309,40	1625,32	
	25V-1C	1	5	5	9,9	194,29	337,60	1737,63	1763,20
		2	5	5	9,7	190,36	338,50	1778,19	
		3	4,9	5	9,9	190,42	337,77	1773,79	
	25V-1,5C	1	5	4,9	9,7	186,57	338,90	1816,43	1808,31
		2	4,9	4,9	9,9	186,59	334,47	1792,49	
		3	4,9	4,9	9,8	184,71	335,43	1816,01	
GRUPO 3	25V-MC	1	5	5	9,6	188,40	326,17	1731,25	1706,87
		2	5	5	9,65	189,38	322,67	1703,79	
		3	5	5	9,7	190,36	320,87	1685,56	
	25V-0,5A-MC	1	5	5	9,73	190,85	317,23	1662,19	1680,33
		2	5	5	9,7	190,36	320,20	1682,05	
		3	5	5	9,7	190,36	323,00	1696,76	
	25V-1A-MC	1	5	5	9,7	190,36	315,90	1659,47	1665,25
		2	5	5	9,6	188,40	312,80	1660,30	
		3	4,95	5	9,65	187,49	314,23	1675,98	
	25V-1C-MC	1	5	5	9,9	194,29	338,93	1744,49	1763,14
		2	5	4,9	9,9	190,42	338,37	1776,94	
		3	5	5,05	9,7	192,27	339,93	1767,99	
	25V-1,5C-MC	1	4,9	5	9,8	188,50	341,27	1810,46	1810,71
		2	5	5	9,7	190,36	347,67	1826,34	
		3	5	4,95	9,9	192,35	345,33	1795,34	

CP = corpo de prova D1= diâmetro 1; D2= diâmetro 2; H = altura; D_m = densidade média

APÊNDICE E – Determinação da absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade individuais e médias aos 28 dias.

	ARGAMASSAS	CP	Mi (g)	M10 (g)	A10 (g/cm²)	A10 _m (g/cm²)	M90 (g)	A90 (g/cm²)	A90 _m (g/cm²)	C (g/dm².min ^{0,5})	C _m (g/dm².min ^{0,5})
GRUPO 1	A	1	348,87	349,10	0,01		349,70	0,04		0,60	1,30
		2	345,23	345,83	0,03	0,02	347,80	0,13	0,086	1,97	
		3	353,53	353,87	0,02		355,20	0,08		1,33	
	A0,5	1	358,27	361,23	0,15		367,60	0,48		6,37	4,05
		2	354,60	355,40	0,04	0,096	357,13	0,13	0,302	1,73	
		3	353,63	373,73	1,02		377,90	1,24		4,17	
	A1	1	365,97	367,90	0,10		370,87	0,25		2,97	2,69
		2	366,87	368,13	0,06	0,071	370,27	0,17	0,208	2,13	
		3	360,20	361,17	0,05		364,13	0,20		2,97	
GRUPO 2	25V	1	316,60	317,17	0,03		318,93	0,12		1,77	1,99
		2	315,73	316,03	0,02	0,027	318,20	0,13	0,128	2,17	
		3	315,63	316,33	0,04		318,37	0,14		2,03	
	25V-0,5A	1	320,83	322,03	0,06		324,37	0,18		2,33	2,43
		2	310,20	310,37	0,01	0,049	310,73	0,03	0,173	0,37	
		3	308,87	310,40	0,08		315,00	0,31		4,60	
	25V-1A	1	311,73	311,90	0,01		312,30	0,03		0,40	1,53
		2	318,87	319,50	0,03	0,027	321,13	0,12	0,105	1,63	
		3	309,40	310,20	0,04		312,77	0,17		2,57	
	25V-1C	1	337,60	338,47	0,04		342,07	0,23		3,60	2,53
		2	338,50	339,23	0,04	0,038	340,77	0,12	0,167	1,53	
		3	337,77	338,40	0,03		340,87	0,16		2,47	

Continua...

...continuação

GRUPO 3	25V-1,5C	1	338,90	339,17	0,01	0,098	339,90	0,05	0,272	0,73	3,41
		2	334,47	337,83	0,17		342,83	0,43		5,00	
		3	335,43	337,60	0,11		342,10	0,34		4,50	
	25V-MC	1	326,17	327,07	0,05	0,065	329,27	0,16	0,222	2,20	3,08
		2	322,67	324,20	0,08		328,60	0,30		4,40	
		3	320,87	322,27	0,07		324,90	0,21		2,63	
	25V-0,5A-MC	1	317,23	318,77	0,08	0,070	322,37	0,26	0,257	3,60	3,69
		2	320,20	321,53	0,07		325,73	0,28		4,20	
		3	323,00	324,23	0,06		327,50	0,23		3,27	
	25V-1A-MC	1	315,90	317,03	0,06	0,053	319,63	0,19	0,167	2,60	2,25
		2	312,80	313,73	0,05		315,63	0,14		1,90	
		3	314,23	315,67	0,07		327,47	0,67		11,80	
	25V-1C-MC	1	338,93	340,63	0,09	0,089	344,70	0,29	0,308	4,07	4,31
		2	338,37	340,63	0,12		346,63	0,42		6,00	
		3	339,93	341,20	0,06		344,07	0,21		2,87	
	25V-1,5C-MC	1	341,27	342,53	0,06	0,0826	345,90	0,24	0,33	3,37	4,83
		2	347,67	349,37	0,09		355,70	0,41		6,33	
		3	345,33	347,07	0,09		351,87	0,33		4,80	

CP = corpo-de-prova; M_i = massa inicial; M₁₀ = massa aos 10 min; M₉₀ = massa ao 90 min; A₁₀ = absorção aos 10 min; A₉₀ = absorção aos 90 min; C = capilaridade; C_m = capilaridade média.