



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E TÉRMICAS DAS
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO CONTENDO ADIÇÕES
MINERAIS E VERMICULITA**

Por

Kássia dos Santos Sinhorelli

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

agosto de 2019



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E TÉRMICAS DAS
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO CONTENDO ADIÇÕES
MINERAIS E VERMICULITA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Kássia dos Santos Sinhorelli

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Aline Figueirêdo Nobrega de Azerêdo

João Pessoa – Paraíba

agosto de 2019

Catologação na publicação
Seção de Catologação e Classificação

S617e Sinharelli, Kassia Dos Santos.

ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E TÉRMICAS DAS
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO CONTENDO ADIÇÕES MINERAIS E
VERMICULITA / Kassia Dos Santos Sinharelli. - João
Pessoa, 2019.
100 f.

Orientação: Aline Figueirêdo Nobrega de Azerêdo.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

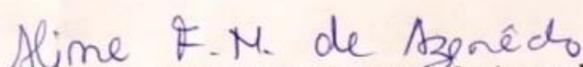
1. reologia. 2. argamassa térmica. 3. vermiculita. 4.
squeeze flow. I. Azerêdo, Aline Figueirêdo Nobrega de.
II. Título.

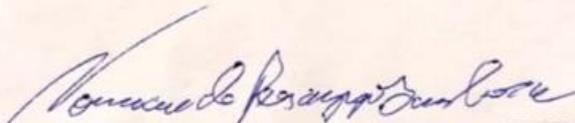
UFPB/BC

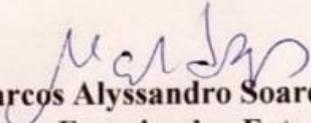
**“ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E TÉRMICAS DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO CONTENDO ADIÇÕES MINERIAIS
E VERMICULITA”**

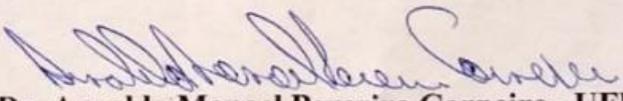
KÁSSIA DOS SANTOS SINHORELLI
Dissertação aprovada em 30 de agosto de 2019

Período Letivo: 2019.2


Prof.^{ma} Dr.^a Aline Figueiredo Nobrega de Azeredo–UFCG
Orientadora


Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa–UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – IFPB
Examinador Externo


Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pererira Carneiro– UFPE
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2019

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Durante a realização deste trabalho, muitas pessoas contribuíram direta e indiretamente, a todos gostaria de expressar meus agradecimentos.

Primeiramente, aos meus pais que sempre mostraram o valor e importância do estudo, pelo incentivo, confiança, carinho e apoio.

À minha orientadora, Aline Azeredo, que desde a primeira conversa me ajudou a direcionar a pesquisa, além da constante disponibilidade e conhecimentos transmitidos, essenciais ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Marcos Alyssandro, pelo auxílio, colaboração e sugestões durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do LABEME, Sebastião pelo auxílio na elaboração de diversos aparatos que possibilitaram a realização de ensaios necessários nesta pesquisa, e Delby pelo apoio nos ensaios. Ao pessoal do Laboratório de Solidificação Rápida -LSR, Breno e André, pelo apoio e acompanhamento durante a realização dos ensaios nesse laboratório.

Aos colegas que fiz durante o mestrado, que fizeram companhia nos momentos de estudo, pelo apoio, troca de experiência e conhecimento. Em especial à Lisarb Brasil, Leovegildo Douglas, Natália Pires, Gabriel Figueiredo e Robson Arruda.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

A indústria da construção civil tem buscado cada vez mais se modernizar, bem como atender as exigências no que diz respeito ao impacto ambiental. E nos últimos 5 anos, também vem se adaptando para atender aos requisitos mínimos da norma de desempenho de edificações (NBR 15.575, 2013). Dentre os diversos requisitos desta norma destaca-se aquele referente ao comportamento térmico da edificação. Diferentes materiais e soluções construtivas têm sido utilizados para melhorar o esse desempenho térmico. Dentre as soluções existentes no mercado pode-se destacar o uso de argamassas com propriedade de isolamento térmico, podendo promover um ganho tanto ambiental quanto econômico através da diminuição da utilização de equipamento para arrefecimento do ambiente. E um dos materiais mais utilizados para essas argamassas é a vermiculita. Vários estudos envolvendo a utilização da vermiculita em argamassas de revestimento vêm sendo desenvolvidos, no entanto, seu uso nas argamassas de revestimento convencionais tem resultado em um material com trabalhabilidade insatisfatória na cidade de João Pessoa. Com base nisso, este estudo tem como principal foco avaliar o comportamento da reologia de argamassas com vermiculita no seu estado fresco, endurecido, além da sua condutividade térmica. Então para a realização deste trabalho os materiais foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas (massa unitária, massa específica e granulometria), químicas (fluorescência de raios x) e mineralógicas (difração de raios x). Misturas de argamassa contendo cimento Portland, cal hidratada do tipo CH I, vermiculita, areia de rio e adições de metacaulim (MC) ou resíduo de tijolo cerâmico (RTM), na proporção de 1:1:6, em volume, foram avaliadas. A areia foi substituída parcialmente por vermiculita nas proporções de 40%, 60% e 80%, já as adições de pozolana foram adicionadas na proporção de 10% e 20% em relação a massa de cimento, e o teor de água foi determinado em função do espalhamento obtido na mesa de consistência. Para o estado fresco se avaliou a densidade de massa e trabalhabilidade pelo método do Squeeze flow. No estado endurecido, foram avaliadas a resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, densidade de massa, aderência e desempenho térmico. Os resultados mostraram que apesar das argamassas de apresentarem o mesmo índice de consistência, demonstraram um comportamento distinto entre si na análise do Squeeze flow, pois a estrutura lamelar da vermiculita e o elevado teor de água nas argamassas que a continha produziu uma mistura com menor viscosidade. A utilização da vermiculita diminuiu o desempenho mecânico da argamassa, mas não ao ponto que impossibilitasse seu uso como

revestimento externo, e resultou em argamassas com diminuição de até 77,6% da condutibilidade térmica em relação à argamassa de referência.

PALAVRAS-CHAVE: reologia, argamassa térmica, vermiculita, squeeze-flow.

ABSTRACT

The construction industry has increasingly sought to modernize as well as meet the requirements with regard to environmental impact. In the last 5 years, it has also been adapting to meet the minimum requirements of the building performance standard (NBR 15.575, 2013). Among the various requirements of this standard, we highlight that referring to the thermal behavior of the building. Different materials and construction solutions have been used to improve this thermal performance. Among the existing solutions in the market can be highlighted the use of mortars with thermal insulation property, which can promote both environmental and economic gain by reducing the use of equipment for cooling the environment. And one of the most commonly used materials for these mortars is vermiculite. Several studies involving the use of vermiculite in coating mortars have been developed, however, its use in conventional coating mortars has resulted in a material with unsatisfactory workability in João Pessoa. Based on this, this study has as its main focus to evaluate the behavior of rheology of mortar with vermiculite in its fresh, hardened state, as well as its thermal conductivity. So for this work the materials were characterized as their physical properties (unit mass, specific mass and particle size), chemical (x-ray fluorescence) and mineralogical (x-ray diffraction) properties. Mortar mixtures containing Portland cement, hydrated lime type CH I, vermiculite, river sand and additions of metakaolin (MC) or ceramic brick residue (RTM), in the ratio of 1: 1: 6, by volume, were evaluated. The sand was partially replaced by vermiculite in the proportions of 40%, 60% and 80%, while the pozzolan additions were added in the proportion of 10% and 20% in relation to the cement mass, and the water content was determined as a function. of the scattering obtained on the table flow. For the fresh state mass density and workability were evaluated by the Squeeze flow method. In the hardened state, mechanical strength, capillary water absorption, mass density, adhesion and thermal performance were evaluated. The results showed that although the mortars had the same consistency index, they showed a distinct behavior in the Squeeze flow analysis, because the vermiculite lamellar structure and the high water content in the mortars that contained it produced a mixture with lower viscosity. The use of vermiculite decreased the mechanical performance of the mortar, but not to the extent that it could not be used as an external coating, and resulted in mortars with up to 77.6% decrease in thermal conductivity compared to the reference mortar.

KEYWORDS: rheology, termal mortar, vermiculite, Squeeze flow.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	02
1.1.1	OBJETIVO GERAL	02
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	02
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	02
2	REFERENCIAL TEÓRICO	03
2.1	ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	03
2.2	VERMICULITA	05
2.2.1	UTILIZAÇÃO DE VERMICULITA EM ARGAMASSAS	07
2.3	ADIÇÕES MINERAIS	08
2.3.1	METACAULIM	09
2.3.2	RESÍDUO DOS TIJOLOS CERÂMICAS	12
2.4	PROPRIEDADE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	14
2.4.1	TRABALHABILIDADE	14
2.4.1.1	TÉCNICAS DE ANÁLISE REOLÓGICA DAS ARGAMASSAS	20
2.4.2	DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR ANCORADO	23
2.5	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	24
2.5.1	CAPILARIDADE	25
2.5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	27
2.5.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	28
2.5.4	RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA DE TRAÇÃO	29
2.6	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ARGAMASSAS	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.2	MÉTODOS	35
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	36
3.2.2	MISTURAS DAS ARGAMASSAS	42
3.2.3	ANÁLISE NO ESTADO FRESCO	43
3.2.3.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	44

3.2.3.2	DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO	44
3.2.3.3	SQUEEZE FLOW	45
3.2.4	ANÁLISE NO ESTADO ENDURECIDO	46
3.2.4.1	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	46
3.2.4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	47
3.3	ANÁLISE TÉRMICA	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	ANÁLISE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	52
4.1.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	52
4.1.2	DENSIDADE E TEOR DE AR INCORPORADO	54
4.1.3	TRABALHABILIDADE PELO MÉTODO DO SQUEEZE FLOW	57
4.2	ANÁLISE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	64
4.2.1	DENSIDADE DE MASSA APARENTE	65
4.2.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	66
4.2.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO NA FLEXÃO	68
4.2.4	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	71
4.3	ANÁLISE TÉRMICA DAS ARGAMASSAS	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6	RECOMENDAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostra de vermiculita (UGARTE <i>et al.</i> , 2004).....	05
Figura 2 – Demanda industrial de vermiculita por setor (TANNER, 2018).	06
Figura 3 – Partícula do metacaulim (BINDIGANAVILE e BANTHIA, 2001).....	11
Figura 4 – Movimento das partículas no tipo de escoamento (TEIXEIRA, 2013)	16
Figura 5 – Relação tensão de cisalhamento – taxa de cisalhamento	17
Figura 6 – Representação esquemática do teste de Squeeze flow (CARDOSO, 2009)	21
Figura 7 – Curva teoria do ensaio de Squeeze flow (MIN, ERWIN e JENNINGS, 1994)	22
Figura 8 – Determinação da tensão de escoamento através do Squeeze flow (KUDLANVEC, 2017).....	23
Figura 9 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração (NBR 13528, 2010).....	31
Figura 10 – Zoneamento bioclimático brasileiro (NBR 15520, 2005).....	32
Figura 11 – Tratamento dos resíduos de tijolos cerâmicos	35
Figura 12 – Determinação da massa específica da vermiculita expandida	37
Figura 13 – Granulometria do agregado miúdo e da vermiculita expandida	38
Figura 14 – Granulometria dos materiais finos: MC, RTM, Cal e CPV – ARI MAX	39
Figura 15 – Volume das partículas dos materiais finos MC, RTM, Cal e CPV	39
Figura 16 – Difração de raio-x do MC e RTM	41
Figura 17 – Difração de raio-x da cal hidratada.	41
Figura 18 – Ensaio da mesa de consistência	44
Figura 19 – Aparatos para o ensaio de Squeeze flow	45
Figura 20 – Ensaio de Squeeze flow.	46
Figura 21 – Amostras pós ensaio de absorção de água por capilaridade	46
Figura 22 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	48
Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão.....	48
Figura 24 – Painel confeccionado para o ensaio de arrancamento	49
Figura 25 – Execução do ensaio de arrancamento.	50
Figura 26 – Amostra em placa para análise térmica	50
Figura 27 – Esquema de funcionamento do condutivímetro K 30 (adaptado do Manual do Condutivímetro K 30, 2001)	51
Figura 28 – Massa de água para cada mistura para um espalhamento de 260 mm.	52
Figura 29 – Densidade de massa das argamassas	55
Figura 30 – Teor de ar incorporado das argamassas	57
Figura 31 – Squeeze flow para as argamassas com 40% de vermiculita após 15 min	58
Figura 32 – Squeeze flow para as argamassas com 60% de vermiculita após 15 min	58
Figura 33 – Squeeze flow para as argamassas com 80% de vermiculita após 15 min.....	59
Figura 34 – Squeeze flow para argamassa com 40% de vermiculita após 65 min.....	61
Figura 35 – Squeeze flow para argamassa com 60% de vermiculita após 65 min	62
Figura 36 – Squeeze flow para argamassas com 80% de vermiculita após 65 min.	62
Figura 37 – Amostra V80 após ensaio de Squeeze flow tempo = 65 minutos.....	64
Figura 38 – Densidade de massa aparente.....	65
Figura 39 – Coeficiente de capilaridade das argamassas ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$).....	67
Figura 40 – Resistência à compressão das argamassas	69
Figura 41 – Resistência à tração na flexão das argamassas	69
Figura 42 – Rupturas após ensaio de arrancamento	71
Figura 43 – Resistência de aderência à tração das argamassas (MPa).	72
Figura 44 – Condutividade térmica das argamassas – K (W/mK).....	74

Figura 45 – Resistividade térmica das argamassas –R (mK/W)74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das argamassas segundo NBR 13281 (ABNT, 2005).	04
Tabela 2 – Classificação da argamassa quanto à densidade no estado fresco (Carasek,2010).....	04
Tabela 3 – Classificação granulométrica da vermiculita (REIS, 2002).	06
Tabela 4 – Requisitos químicos das normas de materiais pozolânicos (MEDINA, 2011) .	10
Tabela 5 – Propriedades dos elementos constituintes das argamassas (KAZMIERCZAK, 2010).....	13
Tabela 6 – Propriedades das grandezas reológicas	18
Tabela 7 – Classificação das argamassas pelo coeficiente de capilaridade (NBR 13281, 2005)	26
Tabela 8 – Limites de resistência de aderência à tração para revestimento (NBR 13749, 2013).....	30
Tabela 9 – Densidade de massa e condutividade térmica (adaptada da NBR 15220,2005)	33
Tabela 10 – Materiais constituintes da argamassa.	34
Tabela 11 – Análises para caracterização dos materiais	36
Tabela 12 – Características físicas dos materiais	37
Tabela 13 – Composição química dos materiais (Fluorescência de Raio X)	40
Tabela 14 – Identificação das misturas analisadas.	42
Tabela 15 – Consumo de material por m ³	43
Tabela 16 – Teor de água na argamassa.	54
Tabela 17 – Densidade de massa no estado fresco.....	56

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE, 2017), o consumo de energia elétrica é alterado eventualmente por influência de fatores que interferem na condição de conforto ambiental nos lares. O consumo de eletricidade residencial cresce 1,6% por causa do clima, confirmando a vulnerabilidade do ambiente interno residencial por fatores externos. Dessa forma, é necessária a implementação de materiais e soluções construtivas com o intuito de aumentar a eficiência energética das edificações.

Políticas públicas voltadas para essa problemática vêm ganhando espaço. Em 2001, foi promulgada a Lei nº 10.295 que determina a exigência de níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos, assim como das edificações através da etiquetagem das mesmas. Já em 2013, a norma de desempenho NBR 15.575 entrou em vigor, avaliando as edificações com base em parâmetros mínimos de desempenho, dentre eles destaca-se o térmico.

Segundo Azevedo *et al.* (2016), é possível obter a redução da carga térmica no interior das edificações através da utilização de isolantes térmicos, como revestimentos opacos de superfície envoltória com baixa condutividade térmica. Utilizar uma argamassa que apresente propriedades de conforto térmico pode promover um ganho tanto ambiental quanto econômico, pois diminuiria a necessidade de utilização de equipamentos para arrefecimento do ambiente.

Na indústria da construção um dos materiais que tem sido utilizado para esse fim é a vermiculita, por ser um material eficaz para o isolamento térmico. De acordo com Koksai, Gencel e Kaya (2015), a vermiculita apresenta baixa condutividade térmica, alta resistência ao fogo e forte absorção sonora. Além da sua utilização resultar em produtos incombustíveis, bioestáveis, neutros à ação dos ácidos e que possuem resistência estável ao longo do tempo e resistência à deformação. Com base nisso, diversos trabalhos como de Shoukry *et al.* (2006), Silva *et al.* (2010) e Palamar *et al.* (2015) investigaram a utilização da vermiculita em argamassas de revestimento com o intuito de contribuir com o conforto térmico em ambiente de edificações. A vermiculita já vem sendo usada em argamassas nas construções atuais com esta finalidade, porém a dificuldade na trabalhabilidade sempre tem sido um problema relatado por aqueles que a usam em argamassas dosadas em obra na cidade de João Pessoa.

Então, tendo em vista que as argamassas térmicas para revestimento disponíveis no mercado, atualmente, apresentam um alto valor econômico e o uso da vermiculita em argamassas de revestimento convencionais resulta em um material com trabalhabilidade insatisfatória, este trabalho se propõe a estudar argamassas contendo vermiculita e adições com um enfoque na sua reologia no estado fresco e nas suas propriedades endurecidas e térmicas.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente as propriedades frescas e endurecidas de argamassas para revestimento contendo adições minerais e vermiculita.

1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Identificar as misturas de argamassas contendo vermiculita e adições com melhor desempenho no estado fresco;
- ✓ Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dessas argamassas;
- ✓ Verificar a condutividade térmica das argamassas.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos, nos quais são apresentadas as informações necessárias para o seu entendimento. No primeiro capítulo, é realizada uma introdução, apresentando o tema abordado no trabalho assim como a sua relevância, além de seus objetivos. O segundo capítulo traz uma fundamentação teórica que apresenta os principais estudos desenvolvidos na área e os conceitos importantes para a compreensão do estudo. Já no terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados. No quarto capítulo, são abordados os resultados obtidos aliados à sua discussão e implicações científicas, que resultam nas conclusões presentes no quinto capítulo. Por fim, o sexto capítulo traz as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

A argamassa apresenta a função de proteger a edificação contra a ação de agentes agressivos, aumentando assim a durabilidade e reduzindo custos de manutenção, servir como isolante termo-acústico, propiciar estanqueidade à água, promover segurança ao fogo, além da função estética ou servindo como base para novos revestimentos.

Apesar dos principais requisitos de desempenho dos revestimentos estarem relacionados às propriedades no estado endurecido, como a permeabilidade, o módulo de elasticidade e a resistência de aderência, que são parâmetros importantes que interferem na durabilidade das edificações, é a adequação das características reológicas das argamassas às diversas solicitações envolvidas na aplicação que permite a obtenção das melhores propriedades finais do revestimento. (CARDOSO, JOHN e PILEGGI, 2010).

A NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece exigências mecânicas e reológicas para as argamassas dosadas em obra ou industrializadas, analisando sete requisitos:

- a) Resistência à compressão (P);
- b) Densidade de massa aparente no estado endurecido (M);
- c) Resistência à tração na flexão (R);
- d) Coeficiente de capilaridade (C);
- e) Densidade de massa no estado fresco (D);
- f) Retenção de água (U);
- g) Resistência potencial de aderência à tração (A).

Sendo dessa forma, classificadas de acordo com as propriedades apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das argamassas segundo a NBR 13281

Classes	P MPa	M kg/m ³	R MPa	C g/dm ² /min ^{1/2}	D kg/m ³	U %	A MPa
1	≤ 2,0	≤ 1200	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1400	≤ 78	≤ 0,20
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	> 0,20
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	≥ 0,30
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	-
6	> 8,0	> 1800	> 3,5	> 10,0	> 2000		-

Fonte: adaptado da NBR 13281 (2005)

Apesar da NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelecer essas classificações, ela não especifica qual classe que deve ser exigida para cada utilização da argamassa. Além dessa classificação, Caraseck (2010) aborda uma classificação da argamassa com base na densidade no estado fresco podendo se enquadrar em leve, normal ou pesada, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das argamassas quanto à densidade no estado fresco

Argamassa	Densidade – D (g/cm ³)
Leve	< 1,40
Normal	1,40 ≤ D ≤ 2,30
Pesada	> 2,30

Fonte: CARASECK (2010)

Caraseck (2010) ainda afirma que a massa específica da argamassa varia através do teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes, principalmente do agregado por ser o maior componente da argamassa. Dessa forma, com a introdução de agregados com densidades menores que 1,40 g/cm³ na argamassa é possível obter argamassas leves.

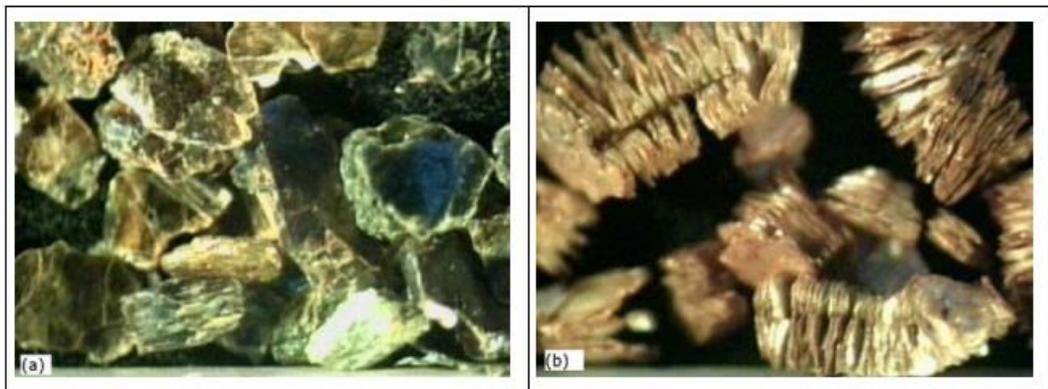
Os agregados leves são minerais de baixa densidade aparente, eles podem ser encontrados na natureza ou obtidos sinteticamente através de subprodutos industriais. A argila expandida, a vermiculita e a perlita são exemplos desse tipo de agregado, sua principal característica é a elevada porosidade, resultando numa baixa massa específica.

É utilizado quando se deseja prioritariamente leveza, isolamento térmico ou acústico, no entanto, resulta em materiais com baixa resistência mecânica final (NEVILLE, 1997).

2.2. Vermiculita

A vermiculita (Figura 1a) é um mineral da família da mica composto por silicatos de alumínio, ferro e magnésio. Através de um tratamento térmico a temperaturas da ordem dos 700°C ela se expande sendo esfoliada, aumentando o seu volume inicial de 20 a 30 vezes, dando origem a vermiculita expandida (Figura 1b), apresentando propriedades como baixos valores de massa específica aparente e de condutividade térmica. Essas características, associadas à granulometria tornam o produto de vermiculita bastante atrativo para sua utilização em diversas áreas, dentre as quais, na construção civil, na indústria química, de tintas (CETEM-MCT, 2005). O processo de esfoliação também pode ser realizado por meio do uso de ultrassom, micro-ondas ou por intercalação química com sais quartenários de amônia e peróxido de hidrogênio (MARCOS; RODRÍGUES, 2013).

Figura 1: Amostra de vermiculita: (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida



Fonte: UGARTE *et al.* (2004)

A vermiculita pode ser classificada de acordo com o tamanho das partículas. Na Tabela 3 é apresentada a classificação granulométrica dos padrões internacional, americano e brasileiro.

Tabela 3: Classificação granulométrica da vermiculita

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

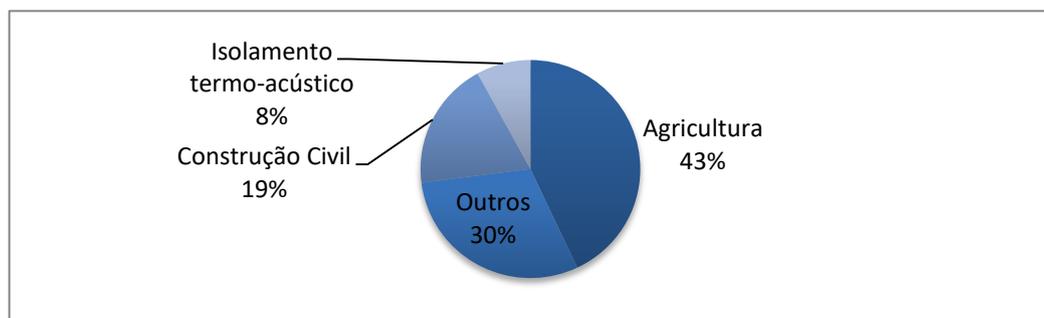
Fonte: REIS (2002)

De acordo com United States Geological Survey - USGS (2018), a produção mundial de vermiculita, em 2017, foi de 440 mil toneladas. O Brasil ocupa, atualmente, a terceira posição mundial na produção com, aproximadamente, 11%. As reservas brasileiras de vermiculita somam um total de 6.300 mil toneladas de minério, detendo dessa forma 10% da reserva mundial.

Os depósitos e jazidas de vermiculita no Brasil se concentram em cinco estados. Goiás apresenta a maior reserva com 66,7%, seguido pela Paraíba (19,1%), Bahia (13,3%), Piauí (0,9%) e Pernambuco (0,05%) (DNPM 2015). Os minérios brasileiros não contêm asbestos, fazendo com quem os concentrados de vermiculita apresentem um maior valor agregado, além de favorecer o melhor aproveitamento econômico do bem mineral (CETEM-MCT, 2005). Uma vez que a exposição a esse elemento está relacionada à ocorrência de diversas doenças, dentre elas asbestose, câncer de pulmão e distúrbios respiratórios (INCA, 2018).

Devido às peculiaridades da sua estrutura química e mineralógicas, a vermiculita apresenta uma grande aplicação industrial. Com base em relatório da USGS, os setores industriais de maior demanda estão representados na Figura 2.

Figura 2 – Demanda industrial de vermiculita por setor



Fonte: TANNER (2018)

Na construção civil, as suas propriedades mais exploradas são a sua baixa massa específica aparente, para a produção de argamassas e concretos leves utilizados como contra piso ou enchimento de laje diminuindo a carga nas estruturas, a sua baixa condutividade térmica e propagação sonora, na utilização em argamassas como isolante térmico e acústico, a sua incombustibilidade, sendo utilizada na produção de argamassa projetáveis para revestimento antifogo (REFRÁTIL, 2016; CINTRA, 2013; MME, 2009; UGARTE, 2008; CETEM-MCT, 2005). Reis (2002) afirma que há moldes fabricados com vermiculita na proteção de estruturas metálicas que retardam o fogo em até 240 minutos.

2.2.1. Utilização da vermiculita em argamassas

Na busca por materiais com um desempenho térmico melhorado foram desenvolvidos estudos sobre a incorporação de vermiculita como agregado leve (SILVA *et al.*, 2010; PALAMAR *et al.*, 2015) em bases cimentícias.

Gonçalves (2014) constatou que a adição de vermiculita na proporção de 5% em relação à argamassa apresenta um bom desempenho em relação à umidade relativa do ar em ambientes internos. O uso desses materiais reduz a densidade da argamassa, e conseqüentemente, a sua resistência.

Borges *et al.* (2012) ainda observou que a microestrutura dos agregados leves, por apresentarem mais poros e suas partículas quebradas durante a mistura, alteram a proporção de água necessária para se atingir uma consistência adequada. Para Ribeiro *et al.* (2005), a adição do agregado leve condiciona significativamente as propriedades do produto em pasta, é necessário aumentar a quantidade de água quando se aumenta a quantidade de vermiculita para não comprometer a trabalhabilidade da argamassa. A razão de água/cimento que em sua amostra de referência era de 1,90, passou para 3,50 com a introdução de 10% de vermiculita. Isso também foi relatado por Köksal, Gencil e Kaya (2015), que analisando argamassas com relação vermiculita/cimento, em volume, 4, 6 e 8 foi necessário o consumo de água de 540kg/m³, 557kg/m³ e 569kg/m³ respectivamente. Nessa mesma linha, Nascimento (2008) aponta como um fator limitante para a proporção de vermiculita na argamassa a sua capacidade de reter água, fixando assim, ao limite que se obtém uma resistência mecânica adequada ao seu uso.

Por ser um agregado leve, a vermiculita exerce influência direta na redução da densidade da argamassa. No estudo de Silva *et al.* (2010), com a substituição de 10% do agregado por vermiculita, a argamassa sofreu uma redução de 33,8% na sua densidade

aos 28 dias. A argamassa analisada por Barros (2018) também evidencia essa redução na densidade, mostrando que a substituição de 50% e 100% do agregado diminuiu 25,40% e 63,88% a densidade da argamassa respectivamente. Um dos fatores que pode ter influenciado nessa diferenciação é a massa unitária da vermiculita utilizada em cada um dos trabalhos, uma vez que a vermiculita utilizada por Silva *et al* (2010) possui um valor de 100 kg/m³, já a utilizada por Barros (2018) apresenta a massa unitária de 120 kg/m³.

Por se tratar de um material que apresenta alta resistência ao fogo, Köksal *et al.* (2015) estudou a utilização da vermiculita em misturas de argamassa constatando que seu uso aumenta a resistência residual da argamassa sob altas temperaturas. Afirmado assim, o seu potencial de utilização em argamassas tanto com o intuito de conforto térmico quanto em segurança ao incêndio. Esses parâmetros vêm ganhando uma maior exigência através da norma de desempenho NBR 15575-4 (ABNT, 2013) que trouxe uma abordagem sobre segurança contra incêndio, avaliando a reação ao fogo, objetivando dificultar a inflamação generalizada, a propagação do incêndio e preservar a estabilidade estrutural da edificação, além do desempenho térmico, que trata da adequação das paredes externas por meio dos critérios de transmitância e capacidade térmica.

Silva *et al* (2010) ainda observou que a alteração do tipo de agregado afeta a porosidade da argamassa, sendo dessa forma refletida a diferença nas propriedades da argamassa do estado fresco e endurecido, como por exemplo a redução na resistência mecânica. E para tentar melhorar essa resistência pode se usar adições minerais.

2.3. ADIÇÕES MINERAIS

Com o intuito de melhorar o desempenho das argamassas, pesquisas vêm sendo desenvolvidas abordando adições minerais. Essas adições se apresentam como uma alternativa para compensar as limitações impostas pela utilização de agregados leves, como a elevada absorção de água em relação aos agregados convencionais e a diminuição da resistência devido à diminuição da densidade das argamassas.

As adições minerais se subdividem em três grupos:

- I. Materiais cimentícios que formam materiais cimentantes sem a necessidade do hidróxido de cálcio;
- II. Fíler, um material sem atividade química, que por ser finamente dividido apresenta um efeito físico através do empacotamento granulométrico;

- III. Materiais pozolânicos que na presença de água reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes.

O trabalho de Senhadji *et al.* (2014) mostra o refinamento dos poros das argamassas através das adições minerais, sendo possível constatar a redução dos poros de maior volume em argamassas com essas adições, essa redução se torna mais significativa quando a adição apresenta pozolanicidade. O refinamento dos poros ocorre desde a interface devido ao efeito parede até a superfície (NEVILLE, A. M., 1997). A reação pozolânica também melhora a qualidade da zona de transição agregado-matriz, resultando num ganho no desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade.

Adições como cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim e resíduos cerâmicos vêm ganhando espaço como pozolanas nas argamassas e concretos, agindo fisicamente na diminuição dos vazios e/ou quimicamente por meio de reação pozolânica, resultando numa melhora de resistência mecânica e durabilidade. De maneira mais detalhada, serão discutidos os principais aspectos relacionados à influência do metacaulim e resíduo de tijolo cerâmico na argamassa.

2.3.1. Metacaulim

Caulim é o nome comercial de uma argila branca constituída principalmente do mineral caulinita, são aluminossilicatos hidratados que apresenta uma composição química que corresponde a cerca de 46,54% de SiO₂, 39,50% de Al₂O₃ e 13,96% de H₂O (CETEM, 2005).

Recursos e reservas de caulim são abundantes em todo o mundo, apresentando um total estimado em 15 bilhões de toneladas. No entanto, cerca de 95% delas se concentram entre quatro países: Estados Unidos (53%), Brasil (28%), Ucrânia (7%) e Índia (7%). As reservas brasileiras concentram-se nos estados do Pará (56%), Amazonas (41%) e Amapá (2%), esses depósitos apresentam propriedades para diversas aplicações industriais (USGS/IBRAM, 2012).

Com aproximadamente 2,05 milhões de toneladas, em 2011, o Brasil é o quinto maior produtor de caulim, sendo responsável por, cerca de, 6,2% da produção mundial (USGS/IBRAM, 2012).

A argila caulínica desenvolve a atividade pozolânica através do processo de calcinação, em temperaturas entre 500°C e 800°C, quando se obtêm o metcaulim. Ele pode ser classificado como pozolana de baixa, média e alta reatividade. Dentre os parâmetros que determinam a qualidade do metcaulim temos: nível de pureza, área específica, perda ao fogo, composição mineralógica, composição química, além da composição física. Na Tabela 4 são apresentados os principais requisitos químicos estabelecidos por diversas normas para materiais pozolânicos.

Tabela 4: Requisitos químicos das normas de materiais pozolânicos

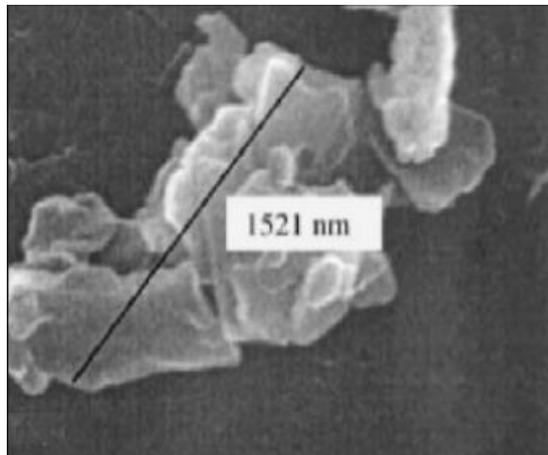
Propriedades	ABNT NBR 12653	ASTM C 618	IS 1344	DMS 4635	NF 18- 513
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 85	-
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	-	-	-	-	≥ 90
SiO ₂	-	-	≥ 40	-	-
CaO	-	-	≤ 10	-	-
CaO livre	-	-	-	-	≤ 1,0
MgO	-	-	3	-	≤ 4,0
SO ₃	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 3,0	-	≤ 1,0
Cloreto	-	-	-	-	≤ 0,1
Na ₂ O+K ₂ O	-	-	≤ 3,0	-	-
Teor de umidade	≤ 3,0	≤ 3,0	-	-	-
Perda ao fogo	≤ 10,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 3,0	≤ 4,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	-	≤ 1,0	-
Álcalis solúveis em água	-	-	≤ 0,1	-	-

Fonte: MEDINA (2011)

Apesar de diversas normas abordarem esses requisitos, a composição química não é um bom parâmetro para avaliar a pozolanicidade do material, visto que ele impossibilita a diferenciação entre a sílica cristalina e não cristalina. Santos (1992) e Zampieri (1989) defendem que é possível utilizar esses parâmetros como uma forma de controle de produção com relação à sua origem ou procedência. No entanto, para se ter um controle eficiente da atividade pozolânica é necessário ter exigências de valores mínimos dos compostos avaliados, em especial aos valores de SiO₂ e Al₂O₃ (SOUZA, 2003).

O tamanho das partículas do metacaulim varia entre 0,2 e 15 μ m (DOMONE, 2001), já a sua área específica é maior que 12 m²/g (KHATIB e WILD, 1996). O aspecto morfológico de uma partícula de metacaulim é mostrado na Figura 3, o qual apresenta-se em lacas lamelares não uniformes estruturadas em camadas.

Figura 3 – Partícula do metacaulim



Fonte: BINDIGANAVILE e BANTHIA (2002)

A incorporação do metacaulim em bases cimentícias tem sido amplamente discutida e estudada pela comunidade científica nos últimos anos, devido aos benefícios que o metacaulim traz à matriz cimentícia. Por apresentar uma elevada superfície específica, propicia o preenchimento de pequenos espaços, conseqüentemente, melhora as propriedades mecânicas da argamassa, além de reduzir a porosidade, promovendo uma maior capacidade de resistir a agentes agressivos, como a carbonatação, lixiviação, eflorescência, salinidade (ROCHA, 2005).

Vu, Stroeven e Bui (2001) avaliaram a substituição, em teores de 10% a 30%, de cimento por metacaulim em argamassas com teores entre 20% e 25%. Os resultados apresentaram um melhor desempenho mecânico nas argamassas com metacaulim. Outro fator observado é que para maiores relações água/aglomerantes, são necessários maiores teores de metacaulim em substituição ao cimento para se obter uma melhora na resistência.

Cordeiro (2001) analisou argamassas com adição de 10%, 15% e 20% de metacaulim nas idades 3, 7 e 28 dias, a adição de 15% apresentou maior resistência à compressão em todas as idades. Nas argamassas com adição, as resistências entre 3 e 7 dias houve um aumento de cerca de 40% nas resistências, já de 7 dias a 28 dias o

aumento foi de aproximadamente 11%. Para a argamassa de referência os aumentos observados nos mesmos períodos foram, respectivamente, de 23% e 11%.

Shoukry *et al.* (2016) incorporou nano metacaulim em argamassa de cimento Portland branco e vermiculita com o intuito de melhorar o seu desempenho mecânico. Com a substituição de 70% em volume do cimento pelo nano metacaulim foi possível além de obter um melhor desempenho mecânico, minimizar a absorção capilar do compósito.

Dessa forma, é possível concluir que o metacaulim traz benefícios consideráveis em argamassas, pois contribui com uma melhora no desempenho mecânico e durabilidade de materiais cimentícios.

2.3.2. Resíduo do Tijolo Cerâmico

Outro material que se tornou foco de várias pesquisas é o resíduo do tijolo da cerâmica vermelha, como uma alternativa para a problemática da gestão de resíduos.

A cerâmica vermelha compreende materiais que são utilizados tanto na construção civil tais como blocos, telhas, tijolos maciços, tubos para saneamento, green wall, elementos vazados e argila expandida, quanto itens de uso doméstico, como filtros e painéis de barro. Recebe a nomenclatura de “vermelha” por sua coloração devido à presença de compostos ferrosos (BOLETIM DE INTELIGÊNCIA, SEBRAE, 2015).

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Cerâmica (ANICER), a produção estimada no Brasil foi de 63,6 bilhões de peças de cerâmica vermelha em 2017, o setor é o principal fornecedor de materiais para alvenarias e cobertas tanto para uso residencial quanto para uso comercial. A sua estrutura empresarial é bastante diversificada, se destacando os pequenos empreendimentos familiares, cerâmicas de pequeno e médio porte que apresentam deficiência de mecanização e gestão (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018). Com base no Sindicato das Indústrias de Cerâmica da Paraíba (SINDICER/PB), estima-se que a movimentação anual na Paraíba é de mais de 600 milhões de peças, sendo um milhão e meio de toneladas de argila vendidas.

No entanto, essa grande produção também resulta em uma elevada geração de resíduo, composto por fragmentos de blocos, tijolos, telhas, gerados pela quebra durante a etapa de sinterização da peça ou transporte, ou peças inteiras que ao final da produção não atendem as especificações necessárias para a comercialização.

O insumo fundamental da cerâmica é a argila, que é formada, por sua vez, por partículas cristalinas pequenas, conhecidas como argilominerais (SANTOS, 1989). Devido a eles, a argila desenvolve algumas propriedades na presença de água, como: plasticidade, compactação, tixotropia, viscosidade de suspensões aquosas, retração linear de secagem (ABCERAM, 2018). A caulinita, a illita e a montmorilonita formam os principais grupos de argilominerais, dentre eles, a illita e montmorilonita são mais apropriadas para a produção das cerâmicas vermelhas (KAZMIERCZAK, 2010).

Os principais elementos que formam os argilominerais, assim como, as principais propriedades que eles conferem às argilas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades dos elementos constituintes das argilas

Elemento	Propriedade
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em elevadas temperaturas
Carbonato e Sulfato	Agem como fundentes, resultam em expansão volumétrica de cálcio e magnésio
Matéria Orgânica	Resulta em retração, fissuração e sinterização e diferença de coloração em um mesmo componente cerâmico
Sílica livre	Diminui a retração e sinterização, reduz a plasticidade da argila
Silicatos e fosfatos	São fundentes, alguns aumentam a resistência da cerâmica
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescência nas cerâmicas

Fonte: KAZMIERCZAK (2002)

Devido às características apresentadas da cerâmica vermelha aliadas à grande oferta de resíduo desse produto, pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de incorporar esse material na produção das argamassas tanto como substituição do cimento quanto como adição na busca por um melhor desempenho.

Rabehi, Boumchedda e Ghemouti (2012) realizou a pesquisa voltada para a substituição de até 20% de cimento por resíduo cerâmico em argamassas, constatou que apenas as misturas com substituição inferior a 20% obtiveram resistência à compressão aos 60 dias superior ao de referência. Já Carneiro, Moura e Leite (2009) limitou a substituição em 10% e 20% na argamassa, onde aquelas com 10% de substituição

apresentou um ganho de resistência da ordem de 19%, enquanto que para uma teor de 20% resultou num decréscimo de 5% na resistência mecânica aos 28 dias.

Carvalho (2016) afirma que para argamassa, a adição superior a 30% seria inviável devido à necessidade de uma quantidade elevada de aditivo superplastificante, inviabilizando o custo do produto. E que foi possível obter uma argamassa de alta fluidez e resistência à compressão superior a 20 MPa aos 14 dias com um teor de 20 % de substituição do cimento Portland por resíduo cerâmico. Um ponto importante analisado por Vieira (2002) foi a influência do teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico no ensaio de consistência nos traços de argamassas, onde sendo constante a relação água/cimento, constatou que quanto maior o teor de substituição menor a consistência da argamassa em uma tendência linear, pelo fato da superfície específica do resíduo utilizado ser 50% maior do que a do cimento, proporcionando uma maior demanda de água para envolver os seus grãos quando comparada com a argamassa de referência.

Segundo Silva e Camiteli (2006), o teor de finos que se deve ter para otimizar as propriedades da argamassa depende, principalmente, da granulometria e da morfologia das partículas. Essas características terão grande influência nas propriedades no estado fresco das argamassas, bem como no estado endurecido.

2.4. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

As propriedades das argamassas são influenciadas por diversos fatores relacionados às características e proporções dos materiais constituintes, processo de mistura, além da execução da sua aplicação. No que tange as propriedades no estado fresco, destacam-se a trabalhabilidade, densidade de massa, teor de ar incorporado, capacidade de retenção de água.

A adequação das propriedades da argamassa no estado fresco possibilitará que o revestimento cumpra um bom desempenho no seu estado endurecido. A seguir serão abordadas e inter-relacionadas as propriedades que foram analisadas no presente trabalho.

2.4.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade destaca-se como uma das mais importantes propriedades da argamassa no estado fresco, pois segundo Yoshida, Barros e Bottura (1995) ela interfere diretamente no trabalho do operário, representando a facilidade de manuseio durante a

sua aplicação, na aderência inicial da argamassa ao substrato, na facilidade de acabamento superficial, além das propriedades no estado endurecido.

O estudo do comportamento das argamassas no estado fresco, assim como da sua trabalhabilidade pode ser mais bem compreendido através da reologia. Glatthor e Schweizer (1994) trazem o conceito de reologia como sendo a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada, e a deformação em determinado período de tempo. Com base em Barnes *et al.* (1989), a reologia é fundamentada, principalmente, na análise da deformação e fluxo da matéria, os quais englobam os fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade.

A tensão mínima necessária para que ocorra o escoamento de uma suspensão é denominada tensão de escoamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Caso seja submetida a uma tensão inferior à de escoamento, as suspensões se comportam como sólidos rígidos (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2000; PILEGGI, 2001).

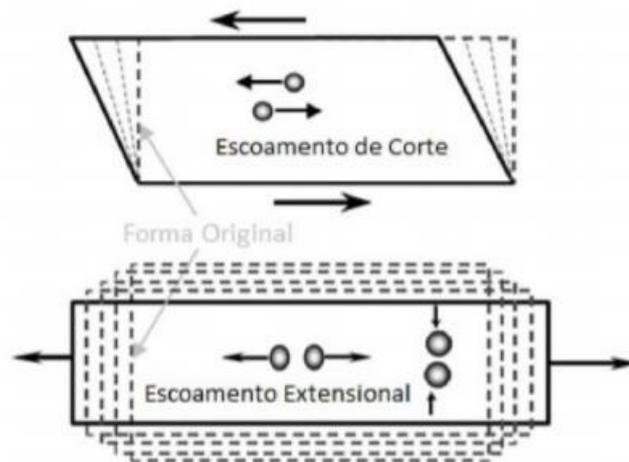
Analisar o comportamento reológico da argamassa envolve a complexidade da sua composição que incorpora vários materiais com propriedades físicas e mecânicas diferentes interagindo entre si. Pereira, Barros e Camões (2004) afirmam que não é possível prever o comportamento reológico a partir do conhecimento das propriedades dos seus constituintes, pois a variedade e a quantidade de ensaios que seriam necessários para avaliar o efeito de todas as interações entre os constituintes da mistura seria imenso e, conseqüentemente, impraticável.

Ao aplicar um sistema de forças anisotrópico e heterogêneo em um fluido resulta em escoamento, no entanto, a retirada (alívio) do sistema de forças não resultará no retorno do corpo ao seu estado inicial, indeformado. Em se tratando de um sólido, ao aplicar um sistema de forças heterogêneo, isotrópico ou anisotrópico ocorrerá uma deformação, mas não um escoamento, e ao retirar o sistema de força aplicado, o material retornará ao seu estado inicial. Por outro lado, quando a força é aplicada em um corpo plástico ele se deforma como um corpo elástico até que a força exceda um valor crítico, passando a escoar como um fluido.

Paiva (2005) aborda que o escoamento está relacionado com os movimentos de camadas adjacentes dos elementos de um fluido. Dessa forma, quando uma força de cisalhamento é induzida a um fluido, conseqüentemente, um gradiente de velocidade também é induzido a ele. A proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é definido como viscosidade e o gradiente de velocidade é igual a taxa de deformação.

Com base no movimento de partículas adjacentes a um líquido, o escoamento pode ser cisalhante (tangencial) ou extensional (normal). As camadas deslizam entre si no caso de escoamento cisalhante, quando as partículas adjacentes apresentam movimentos de contração e retração, temos um escoamento extensional, como apresentado na Figura 4 (TEIXEIRA, 2013).

Figura 4 – Movimento das partículas nos tipos de escoamento



Fonte: TEIXEIRA (2013)

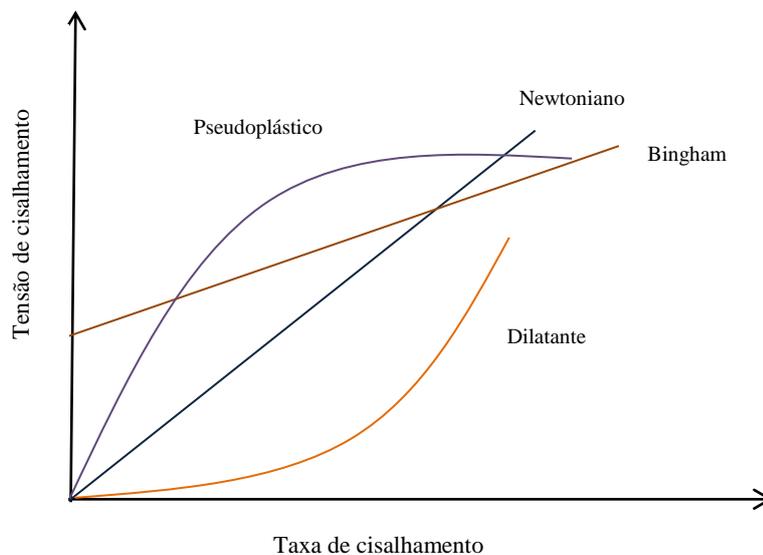
A interface aglomerante/água possui grande influência sobre a área superficial de contato entre camadas, esse fator se torna menos expressivo com o aumento do teor de agregados (GALASZEWSKI, 2008). A dimensão do agregado também influencia no escoamento, pois quanto maior a dimensão do agregado, maior será a viscosidade plástica (BANFILL, 2003).

Os modelos reológicos mais utilizados para interpretar o comportamento de argamassas no estado fresco são o Newtoniano e o Não Newtoniano. Os fluidos newtonianos têm uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento, dessa forma, a viscosidade é constante, seu comportamento é representado pela Equação 1, onde F representa a força [N], A a área [m^2], τ a tensão de cisalhamento [Pa], η a viscosidade [Pa.s] e γ a taxa de cisalhamento [s^{-1}].

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta\gamma \quad (1)$$

Nos fluidos não newtonianos, por sua vez, a viscosidade não é constante e depende da taxa de cisalhamento exercida a uma certa temperatura e pressão, são exemplos desse tipo de fluido os pseudoplásticos, dilatantes e viscoplásticos ou fluidos de Bingham (BAUER, 2005). Na Figura 5 são apresentados os comportamentos de alguns modelos reológicos quando a tensão de cisalhamento é analisada em função da taxa de cisalhamento.

Figura 5 – Relação tensão de cisalhamento-taxa de cisalhamento.



Fonte: Adaptada de PAIVA (2005)

O comportamento reológico das argamassas é, normalmente, descrito pelo modelo de Bingham, visto que os parâmetros usados são fatores que podem ser medidos independentes e atende uma ampla faixa de consistência para composições usuais. Esse modelo apresenta uma relação linear entre tensão e deformação a partir de uma determinada tensão de cisalhamento. De acordo com Wésterholm (2006), esses fluidos comportam-se como sólidos para valores abaixo da tensão de escoamento, mas apresentam um comportamento de fluido viscoso para tensões superiores a ela. Dessa forma, o fluido de Bingham incorpora um segundo fator em sua equação além da viscosidade, a tensão de escoamento, que representa a tensão necessária a ser aplicada para que o escoamento inicie (BAUER, 2005), como é possível analisar na Equação 2.

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma \quad (2)$$

onde:

τ_0 = tensão de escoamento [Pa];

η = viscosidade [Pa.s];

γ = taxa de cisalhamento [s^{-1}].

Quando se fala em reologia das argamassas, a principal propriedade é a trabalhabilidade. Cardoso *et al.* (2014) considera que um material é “trabalhável” quando ele apresentar um comportamento reológico adequado para as tensões e pressões envolvidas nos processos que está sujeito, mantendo a sua homogeneidade até a fase de consolidação. Como as argamassas são caracterizadas como fluidos não newtonianos, a sua trabalhabilidade precisa ser convertida em grandezas reológicas mensuráveis (PILEGGI *et al.* 2006), dessa forma, por ela ser resultado das características de plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade (YOSHIDA, BARROS e BOTURA, 1995), é possível analisá-la com base nesses conceitos. Na Tabela 6 está presente o conceito dessas propriedades.

Tabela 6: Propriedades das grandezas reológicas

Propriedade	Conceito
Plasticidade	É a propriedade que permite a argamassa deformar-se sem ruptura, sob a ação de forças superiores às que promovem a sua estabilidade, mantendo a deformação depois de retirado o esforço (RILEM, 1982).
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante (CINCOTTO <i>et al.</i> , 1995)
Consistência	É a propriedade que a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas, inverso da fluidez (RILEM,1982).
Viscosidade	É a resistência do fluido ao escoamento devido à fricção interna que resulta quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente (BARNES <i>et al.</i> , 1989).

Densidade	É definida como sendo a razão entre a massa de argamassa que ocupa um recipiente e o volume do mesmo.
-----------	---

A argamassa tem um comportamento reológico complexo por apresentar uma natureza reativa e multifásica, além de ser submetida a diversas solicitações nas etapas de preparo e aplicação (PILEGGI, 2001). Dessa forma, Cascudo *et al.* (2005) enfatiza que avaliar, quantificar e prescrever valores referentes à trabalhabilidade das argamassas através de ensaio é uma tarefa difícil. A complexidade do comportamento reológico necessita do uso de ferramentas suficientemente sensíveis para quantificar pequenas variações nos parâmetros que interferem nas propriedades das argamassas frescas.

No Brasil, o comportamento reológico das argamassas é tradicionalmente caracterizado pelo ensaio da mesa de consistência, prescrito pela NBR 13.276 (ABNT, 2016), avaliando dessa forma, a consistência do material por um conceito de trabalhabilidade através de níveis de espalhamento pré-estabelecido. Apesar da sua utilização, diversos pesquisadores (CAVANI; ANTUNES; JOHN, 1997; KOEHLER; FOWLWE, 2003; BANFILL, 1991) argumentam que a mesa não possui sensibilidade para medir a reologia da argamassa, visto que seu resultado é apresentado na forma de índice de consistência e não em termos de parâmetros reológicos (viscosidade e tensão), além de não reproduzir as condições de aplicação prática do material formado por lançamento com alto impacto seguido de espalhamento sob intenso cisalhamento.

Nesse contexto, estudos reológicos utilizando o squeeze-flow vêm ganhando espaço por não apresentar problemas comuns dos demais ensaios reológicos, como a perda de contato entre o material e o elemento cisalhante, entupimento de capilares ou restrição por capacidade de torque. Durante a realização do ensaio, o escoamento do material é induzido pela aplicação de uma carga de compressão na amostra no estado fresco, provocando um deslocamento devido aos esforços de cisalhamento radial. Esse método já vinha sendo utilizado para a análise de cosméticos, alimentos, compósitos e materiais cerâmicos (BANFILL, 2006; ÖSKAN *et al.*, 1999). Para o estudo de pasta de cimento foi utilizado pela primeira vez por Min, Erwin e Jennings (1994). Posteriormente, Toutou, Roussel e Lanos (2005) utilizou o método em argamassa de extrusão e Cardoso, Pileggi e John (2005) em argamassa de revestimento. Póvoas (2005) e Costa (2006) aplicaram em argamassas colantes. A definição de parâmetros

para sua utilização com o intuito de caracterizar as argamassas foi desenvolvido por Cardoso (2009), e posteriormente prescrito pela NBR 15839 (ABNT, 2010).

2.4.1.1. Técnicas de análise reológica das argamassas

A análise reológica das argamassas é realizada tradicionalmente por meio de ensaios que correlacionam um dos parâmetros reológicos, avaliando apenas a consistência do material de acordo com o conceito de trabalhabilidade, através de níveis de consistência pré-estabelecidos como no caso da mesa de consistência, do método do dropping-ball e dos penetrômetros. Pileggi et al.(2006), informa que nos ensaios de espalhamento, a tensão aplicada é proporcional à densidade do material, enquanto que nos ensaios de impacto, a taxa de cisalhamento aplicada é definida pela velocidade do elemento móvel. Dessa forma, os resultados obtidos a partir destes métodos não são capazes de detectar a complexidade dos comportamentos reológicos que as argamassas podem apresentar, podendo resultar em interpretações equivocadas sobre o comportamento das mesmas no estado fluido em diferentes condições de aplicação.

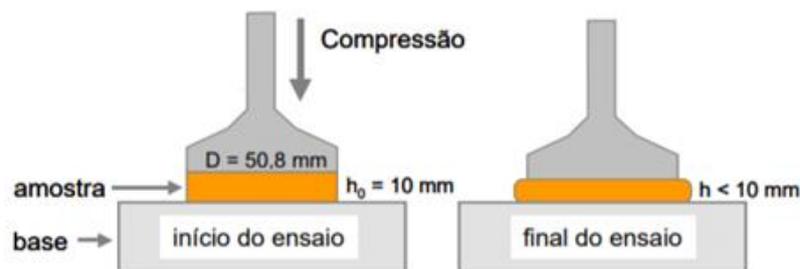
Para Bauer *et al.* (2005) existem métodos mais modernos como a reometria rotacional e o ensaio de squeeze flow que possibilitam uma avaliação mais detalhada do comportamento reológico de argamassas, através de análise de parâmetros fundamentais como viscosidade e tensão de escoamento.

Os reômetros são equipamentos dedicados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e concretos, através de dois princípios básicos de funcionamento formados pela aplicação de um torque à argamassa e a medida do cisalhamento resultante ou pelo controle do cisalhamento aplicado e a medida do torque necessário para tal (PILEGGI, 2001). Dessa forma, é obtida a resistência oferecida pelo material ao seu escoamento, ou seja, a tensão de cisalhamento, que é correlacionada com a viscosidade da argamassa. Apesar de ser utilizada em muitas pesquisas (CARDOSO; PILEGGI, 2013; ROMANO *et al.*, 2014), esse método não apresenta norma brasileira. Outra desvantagem desse ensaio é de não satisfazer requisitos fundamentais dos ensaios reológicos, como o não deslizamento entre o fluido e a superfície dos elementos de cisalhamento (PILEGGI, 2001), no caso de argamassas que apresentem natureza plástica ou alta tendência à segregação, podendo ocorrer problemas tanto de deslizamento quanto de perda de contato entre a massa e a ferramenta que aplica o cisalhamento, induzindo a uma segregação entre pasta e agregados.

O método do squeeze flow é utilizado para medir o esforço necessário para a compressão axial de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, resultando em uma deformação por cisalhamento e alongamento da mesma (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). Quando a razão entre o diâmetro (D) e a espessura (e) da amostra for elevada, ou seja, $D/e \gg 5$, a deformação efetiva do material ocorre por cisalhamento radial. Caso contrário, há o surgimento de tensões de compressão (MEETEN, 2004).

A configuração do ensaio consiste em utilizar a placa superior com diâmetro igual ao diâmetro inicial da amostra para aplicar a compressão e a placa inferior (base) com diâmetro maior. Dessa forma, a área do material que é solicitada permanece constante e o material se espalha para fora da área de atuação das placas (CAMPANELLA; PELEG, 1987; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005; MEETEN, 2000; MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994; ÖZKAN *et al.*, 1999; STEFFE, 1996). Essa configuração é demonstrada na Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática do teste de Squeeze flow

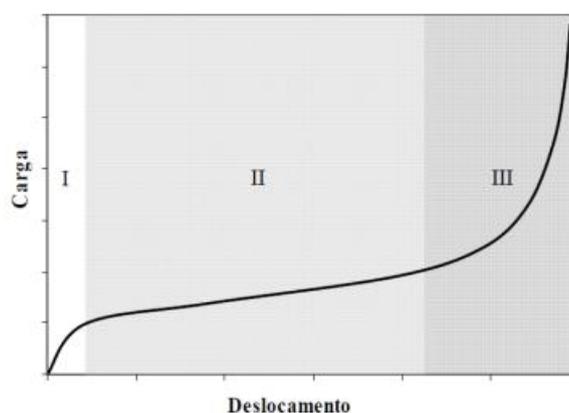


Fonte: Adaptado de Cardoso (2009)

Esse método é interessante para caracterização de argamassas, pois a mudança geométrica inerente ao ensaio simula condições do processamento como nas etapas de espalhamento, nivelamento e acabamento (CARDOSO, 2009). Além de ser um ensaio de fácil execução, que oferece repetitividade (KOLENDA *et al.*, 2003; CARDOSO, PILEGGI e JOHN, 2005), e que fornece resultados de carga em função do tempo e do deslocamento.

O resultado do ensaio de Squeeze flow, com controle por deslocamento, é expresso na forma de um gráfico de carga (N) versus deslocamento (mm). Na Figura 7 é ilustrada a curva teórica do ensaio apresentada por Min, Erwin e Jennings (1994), onde se destacam três regiões bem definidas.

Figura 7 – Curva teoria do ensaio de Squeeze flow



Fonte: MIN, ERWIN e JENNINGS (1994)

No estágio I, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear e está relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material. Esse comportamento reflete a ausência de escoamento do fluido, uma vez que as forças resistivas (atração, coesão e atrito) ultrapassaram a força motriz gerada pelo deslocamento. Materiais cimentícios que apresentem comportamento predominante nesse estágio, possivelmente, apresentariam problemas de fissuração ainda no estado fresco pela recuperação elástica após a retirada do esforço. O estágio seguinte (II) apresenta deslocamento intermediário, a força exercida sobre o material supera as forças que o mantinha sob um comportamento elástico, passando a apresentar um comportamento plástico ou um fluxo viscoso, onde ocorrem deformações relativamente grandes com pequena variação de carga, sendo o período apropriado para aplicação de materiais cimentícios. Já no terceiro estágio (III), *strain hardening*, o grande deslocamento aplicado na amostra gera novas forças resistivas, caracterizando um enrijecimento por deformação, influenciadas pela aproximação dos agregados e o atrito formado pelos mesmos, resultando na necessidade de crescimento exponencial das cargas. Dessa forma, nesse estágio tornam difíceis os procedimentos de aplicação e acabamento de materiais cimentícios devido às altas cargas necessárias para deformá-lo (MIN *et al.*, 1994; CARDOSO, PILEGGI e JOHN, 2005; KUDLANVEC JUNIOR, 2017).

Através do ensaio do Squeeze flow é possível obter parâmetros reológicos fundamentais como a viscosidade plástica e tensão de escoamento. A viscosidade plástica é dada pela Equação 3 (MEETEN, 2000).

$$\eta = \frac{64Ft}{3\pi(h^{-2} - h_0^{-2})D^4} \quad (3)$$

onde:

η = viscosidade plástica [Pa.s];

F = carga de compressão [N];

t = tempo [s];

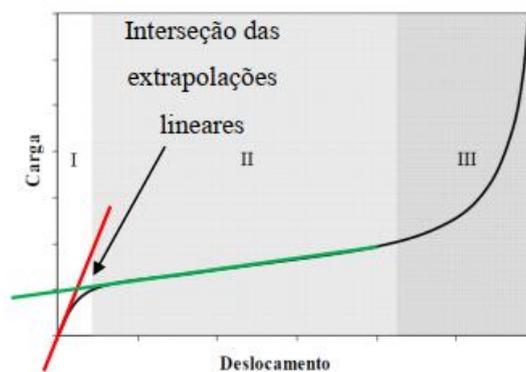
h = altura instantânea da amostra [m];

h_0 = altura inicial da amostra [m];

D = diâmetro da amostra [m].

A tensão de escoamento pode ser determinada indiretamente por extrapolação da curva do Squeeze flow, o ponto de transição entre o estágio I e o estágio II pode ser considerado o valor do escoamento do material. Para obter a tensão é necessário dividir a carga de compressão da interseção das linhas de extrapolação das curvas referentes ao estágio I e II (Figura 8) pela área da placa superior.

Figura 8 – Determinação da tensão de escoamento através do Squeeze flow



Fonte: KUDLANVEC JUNIOR (2017)

2.4.2. Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa é definida como sendo a razão entre a massa de argamassa que ocupa um recipiente e o volume do mesmo. Segundo Cardoso (2009), ela apresenta importância por determinar a massa de material que o trabalhador sente ao aplicá-la, dessa forma, é um fator que pode influenciar na produtividade.

Essa propriedade varia de acordo com a massa específica dos materiais constituintes, principalmente dos agregados, e com o teor de ar. De acordo com

Nakakura (2003), durante a mistura a argamassa incorpora ar e chega a atingir cerca de 3% do volume da mistura, que ainda pode ser elevado com o uso de aditivos incorporadores de ar.

Mattana *et al.* (2012) confirmaram que o aumento do teor de ar incorporado também eleva a trabalhabilidade e plasticidade, mas diminui a resistência mecânica. Alves (2002), Romano, Torres e Pileggi (2015) comprovaram isso em seus trabalhos, através da redução da resistência de aderência à tração com o aumento do teor de ar incorporado, eles conferem isso à redução dos pontos de contato da argamassa com o substrato devido à presença das bolhas. Silva *et al.* (2010) complementa que o ar incorporado reduz sensivelmente a permeabilidade e o módulo de elasticidade das argamassas. Stolz (2011) afirma que o aumento da quantidade de ar reduz a demanda de água para uma mesma consistência.

É possível perceber que a densidade de massa e o teor de ar incorporado exercem grande influência sobre as propriedades da argamassa tanto no estado fresco quanto no endurecido. No entanto, não há um consenso entre pesquisadores sobre o teor de ar incorporado ideal para as argamassas de revestimento. A norma ASTM C270 (1999) recomenda teores de ar incorporado entre 12% e 18%, a BS 4887 (BSI, 1986) assim como Alves (2002) recomendam uma faixa de 14% a 20%, e Beningfield (1988) afirma que o teor de ar nunca pode exceder o limite de 20% e, preferencialmente, não ultrapassar 15%.

2.5. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades das argamassas no estado endurecido definem o desempenho do revestimento, sendo a resistência mecânica a mais importante. Cincotto *et al.* (1995) afirma que a resistência mecânica das argamassas se refere a capacidade das argamassas resistirem às tensões às quais o revestimento pode estar submetido, como tração, compressão ou cisalhamento. Cestari (1997) ainda completa afirmando que a resistência mecânica é dada pela capacidade de resistir a esforços mecânicos sem deformações plásticas visíveis. A NBR 13279 (ABNT, 2005) prescreve o método para realizar a verificação desempenho mecânico das argamassas e a NBR 13528 (ABNT, 2010) descreve os procedimentos para análise da resistência de aderência de tração.

2.5.1. Capilaridade

O comportamento dos materiais de construção em relação à umidade é largamente dependente da absorção de água dos mesmos (KRUS *et al*, 1997). Com base em Baía e Sabbatini (2008), a permeabilidade da argamassa está relacionada não apenas com a quantidade e com o tipo de aglomerante, mas também, com a granulometria do agregado e com as características do substrato. Ela depende tanto da porosidade quanto das dimensões, distribuição e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997).

A porosidade das argamassas está diretamente relacionada com a sua capacidade de deformação, os vazios das argamassas apresentam formas e dimensões variadas que por sua vez, dependem do tipo e da proporção de material utilizado na sua produção. Isaía (2002) afirma que a permeabilidade é determinada não só pela porosidade, mas também pela distribuição dos tamanhos dos poros, onde apenas poros maiores contribuem significativamente para essa propriedade. Mehta (2008) aborda essa diferenciação nas dimensões dos poros, classificando os poros em dois grupos: poros capilares (ou macroporos) com tamanho entre 50 nm e 10µm, poros de gel (ou mesoporos) entre 2 e 50 nm. Dessa forma, os poros capilares dos materiais cimentícios influem na resistência à compressão e permeabilidade, por outro lado, os poros de gel interferem na retração e na fluência.

Deve se levar em conta também, que as argamassas além de não apresentarem deformações plásticas visíveis, não devem ter microfissuras que possam comprometer aderência, estanqueidade e, conseqüentemente, durabilidade.

O revestimento além de estanque à água, impedindo a sua percolação, deve ser permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração (BAÍA e SABBATINI, 2000). Dessa forma, a porosidade é um fator importante para a durabilidade das argamassas (KOLIAS, 1994).

Na argamassa, no estado endurecido, pode ocorrer absorção de água por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água.

A capilaridade é uma das propriedades responsáveis pela água absorvida pelos revestimentos de argamassa, trata-se da movimentação de água pelos capilares sem pressão hidrostática significativa. Através do ensaio de absorção por capilaridade é possível avaliar a facilidade de entrada de água, como o seu transporte dentro da estrutura porosa dos revestimentos, com o coeficiente de capilaridade pode se mesurar a velocidade da sucção capilar das argamassas. Esta propriedade está ligada intimamente

com outras propriedades, como por exemplo, densidade de massa no estado endurecido, teor de vazios e ar incorporado.

Nas argamassas que apresentam a relação agregado/aglomerante constante, à medida que a relação cal/cimento é elevada, o mesmo ocorre para o coeficiente de capilaridade, provavelmente isso ocorre devido à diminuição do raio dos capilares, como consequência do incremento do teor de material fino (SILVA, 2006). O coeficiente de capilaridade da argamassa também sofre influência da adição do teor de finos dos agregados, além da granulometria e morfologia das partículas (SILVA e CAMPITELI, 2006).

Ramachandran (1984), Bortoluzzo (1999), Alves (2002) e Araújo (2004) confirmam que as argamassas que apresentam traços mais pobres em cimento têm maior absorção por capilaridade, eles afirmam que os aditivos fazem com que os capilares da matriz de cimento sejam interrompidos pelas bolhas de ar incorporado, resultando em uma rede de capilaridade mais fechada, o que justifica sua baixa absorção capilar. A NBR 13281 (2005) classifica as argamassas com base no seu coeficiente de capilaridade, essa classificação está presente na Tabela 7.

Tabela 7: Classifica das argamassas pelo coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{min}^{1/2}$)
C1	$\leq 1,5$
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	$>10,0$

Fonte: NBR 13281 (2005)

Ribeiro *et al.* (2005) analisou argamassa de cimento e cal contendo um percentual variando de 2% a 10% de vermiculita em sua composição e constatou que a medida em que a quantidade de vermiculita foi incrementada na argamassa, o coeficiente de absorção foi diminuindo, chegando ao valor de $0,006 \text{ kg}/\text{m}^2.\text{s}^{1/2}$ para argamassa com 10% de vermiculita, enquanto na argamassa sem vermiculita o coeficiente encontrado foi de $0,012 \text{ kg}/\text{m}^2.\text{s}^{1/2}$.

Barros (2018) estudou argamassas com vermiculita, no entanto, introduziu a vermiculita como forma de substituição do agregado nas proporções de 25%, 50%, 75%

e 100%, e percebeu que apenas a argamassa com 25% de vermiculita apresentou uma diminuição no coeficiente de absorção ($12,00 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) em relação à de referência ($13,53 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), já a argamassa com 75% de vermiculita tem um aumento do coeficiente de capilaridade ($29,07 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) maior que o dobro em relação à argamassa sem vermiculita. Palamar *et al.* (2015) também analisou argamassa com substituição do agregado nas proporções de 25% e 50%, no entanto, a argamassa com 25% de vermiculita apresentou um aumento no seu coeficiente ($1,48 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), já o coeficiente da argamassa com 50% de vermiculita se igualou ao da argamassa de referência ($1,3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

Shoukry *et al.* (2016) adicionou nanometacaulim em base cimentícia com vermiculita, o coeficiente de absorção diminuiu com o aumento da quantidade de nanometacaulim. Em misturas modificadas com 10% de nanometacaulim houve uma diminuição considerável de cerca de 74% de absorção de água por capilaridade, isso é atribuído ao aumento de volume sólido e à melhoria da microestrutura que leva à uma estrutura compacta resultando numa redução de mobilidade de água dentro da pasta de cimento endurecida.

2.5.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas de revestimento apresenta uma dependência, principalmente, do tipo e consumo dos aglomerantes, granulometria dos agregados e da relação água/aglomerante.

Apesar de a cal melhorar a trabalhabilidade das argamassas, ela causa a diminuição da resistência à compressão (SILVA, 2006). Por outro lado, o cimento é o principal aglomerante responsável pela resistência mecânica das argamassas, porém, para as argamassas de revestimento não há necessidade de apresentar elevadas resistências mecânicas, visto que isso pode levar à redução da capacidade de deformação, da resistência ao impacto e até mesmo da capacidade de aderência (TRISTÃO, 1995). Fiorito (2005) afirma que argamassas com elevado consumo de cimento apresentam tensões de tração por volta de nove a doze vezes maiores do que as apresentadas pelas argamassas pobres, isso se deve à retração que essas argamassas apresentam, além de um maior módulo de elasticidade.

A continuidade da curva de distribuição granulométrica aumenta a resistência à compressão, através de um melhor empacotamento (TRISTÃO, 1995 e CARNEIRO, 1999). Porém, esse fator não deve ser analisado isoladamente, visto que a forma do

grão, sua mineralogia e a razão das aberturas entre peneiras também afetam o empacotamento.

Outro fator determinante para a resistência das argamassas é a relação água/aglomerante. O aumento da quantidade de água causa um enfraquecimento na matriz da argamassa, pois aumenta a porosidade, diminuindo assim a resistência mecânica (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Esse fator é comprovado pela lei de Abrams, onde mostra que a resistência é inversamente proporcional ao valor da relação água/aglomerante.

Diversos autores, Silva *et al.* (2010), Andrejkovicová *et al.* (2014), Palamar *et al.* (2015), Shoukry *et al.* (2016) e Barros (2018), comprovaram que quanto maior a quantidade de vermiculita nas argamassas menor é a sua resistência à compressão. Palamar *et al.* (2015) mostra que com a substituição de 50% de agregado pela vermiculita a resistência à compressão diminui, aproximadamente, 55,5%, visto que a argamassa de referência apresentou uma resistência de 6,5 MPa e a substituição de vermiculita resultou em uma resistência de 3MPa, comportamento similar foi encontrado por Barros (2018).

Silva *et al.* (2010), por sua vez, realizou a substituição de vermiculita até a proporção de 10% na argamassa, e obteve uma redução na resistência da argamassa em torno de 71%.

O consenso entre todos os autores é que a vermiculita aumenta a porosidade das argamassas, que por sua vez desempenha um papel importante sobre as suas propriedades mecânicas.

2.5.3. Resistência à tração na flexão

Dentre as solicitações mecânicas atuantes na argamassa, a flexão é uma das mais importantes para a análise do desempenho das argamassas de revestimento. Uma vez que durante a sua utilização, ela se encontra susceptível aos movimentos de retração hidráulica e térmica, além de ações extrínsecas ao revestimento que podem causar tensões internas de tração na argamassa. Quando essas tensões internas superam o limite de resistência à tração das argamassas, ocorrem manifestações patológicas nas argamassas em forma de fissuras (FIORITO, 1994). No entanto, a utilização de revestimentos muito rígidos e com alta resistência à tração também podem resultar em fissuras, através da diminuição da capacidade de alívio das tensões (MIRANDA e SELMO, 2003).

Assim como ocorre com a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão também sofre uma redução com a introdução de vermiculita nas argamassas. Ao realizar a substituição de 50% de agregado por vermiculita, Palamar *et al.* (2015) obteve uma redução de 18,7% na resistência em relação à argamassa de referência. Barros (2018) encontrou uma redução mais acentuada, ficando por volta de 23% para a substituição de 25% , sendo a redução de resistência cerca de 3,15%.

Andrejkovicová *et al.* (2014) analisou o comportamento de argamassa de cal e vermiculita com a introdução de 20% metacaulim, constatou que a presença do metacaulim altera a matriz da argamassa e traz um aumento resistência à tração na flexão por volta de 54%.

2.5.4. Resistência de aderência à tração

A aderência é a capacidade do revestimento em se manter fixo ao substrato quando submetido a tensões normais e tangenciais que ocorrem na interface base-revestimento (ANTUNES, 2005), sendo resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa (MACIEL, BARROS e SABBATINI, 1998).

A argamassa de revestimento não apresenta função estrutural, com isso, a parte da resistência mecânica que envolve compressão e tração na flexão podem até servir como parâmetros secundários, mas a resistência de aderência é um fator significativo no seu desempenho.

Não há uma relação única entre um dado parâmetro e a capacidade de aderência da argamassa, visto que ao aumentar o teor relativo de cimento no aglomerante é possível obter tanto um aumento quanto uma diminuição na aderência dependendo da característica do substrato (SILVA, 1984). Diversos autores (CARASEK, 1996; CANDIA, 2000; ANTUNES, 2005; PAVOAS, 2005 e ROMANO *et al.*, 2009) afirmam que a aderência é influenciada pelo tipo de substrato, o tipo de argamassa, a técnica de execução do revestimento, o tipo e o tempo de mistura dos materiais, o tipo e o processo de aplicação, a extensão de aderência, as condições ambientais e a condição de umidade do substrato, havendo entre eles uma dependência. O processo de execução do revestimento, materiais utilizados e ainda as condições climáticas representam uma variabilidade nos resultados do ensaio de aderência de até 33% (GONÇALVES, 2004). Carasek *et al.* (2001) ainda aborda que as argamassas formuladas com cal preenchem

mais facilmente toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão de aderência.

O processo de aderência é um mecanismo complexo que envolve o transporte de massa formada por sólidos e líquidos na argamassa e na sua interface com a base. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a base absorvente, parte da água de amassamento penetra pelos poros e cavidades do substrato resultando na precipitação de produtos de hidratação do cimento no seu interior, exercendo ação de ancoragem da argamassa ao substrato (SCARTEZINI, 2002).

Para a análise da resistência de aderência da argamassa pode-se utilizar a ABNT NBR 13528 (2010) que apresenta o método para a determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassas aplicados em obra ou laboratório sobre substratos inorgânicos ou não metálicos, além da ABNT NBR 15258 (2005) que prescreve determinação da resistência potencial de aderência à tração, esse último não caracteriza o desempenho da argamassa no sistema construtivo. Com base nos resultados dos ensaios é possível verificar através da ABNT NBR 13749 (2013) se as argamassas atendem aos limites mínimos de resistência apresentados na Tabela 8 para o cada tipo de utilização.

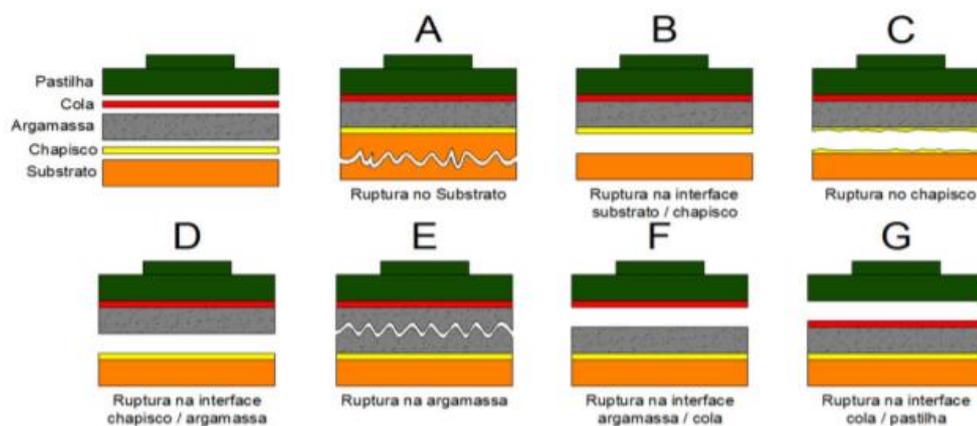
Tabela 8: Limites de resistência de aderência à tração para revestimento

Local	Acabamento	Ra (MPa)	
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
			Cerâmica
Teto		$\geq 0,20$	

Fonte: NBR 13749 (2013)

No caso do ensaio de resistência à aderência da argamassa, para uma interpretação do seu resultado deve-se levar em consideração, além do valor da tensão obtida, o tipo de ruptura da argamassa (Figura 9).

Figura 9 – Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: NBR 13528 (2010)

Quando a ruptura ocorre na interface substrato/chapisco (tipo B) e chapisco/argamassa (tipo D), o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio. No caso da ruptura ocorrer na interface cola/pastilha (tipo G), o resultado deve ser desprezado por se tratar de imperfeição na colagem da pastilha, já para os casos das demais rupturas, o valor da resistência não foi determinada e será maior que o valor obtido no ensaio. Ainda é possível ocorrer diferentes formas de ruptura em um mesmo corpo de prova, nesse caso, deve-se levar em consideração a porcentagem aproximada da área de cada tipo de ruptura (NBR 13520, 2010).

A ruptura ocorrendo no interior do substrato (tipo A) ou da argamassa (tipo E) é denominada como coesiva, e seu valor é menos preocupante. Quando ela ocorre na interface substrato/chapisco (tipo B) e chapisco/argamassa (tipo D) é do tipo adesiva, seus valores devem ser mais elevados, pois existe um potencial maior para patologias (CARASEK, CASCUDO e SCARTEZINI, 2001).

Ao analisar os tipos de ruptura, podemos observar que a ruptura do tipo F caracteriza que a parte mais fraca é a camada superficial da argamassa, e nessa situação, se os valores são baixos trata-se de uma resistência superficial inadequada, podendo acarretar pulverulência.

Dentre as patologias de revestimento, a falha de aderência é uma das manifestações mais frequentes, causada por defeitos na interface argamassa substrato, que é originada pela incompatibilidade entre o comportamento reológico da argamassa e a energia de lançamento utilizada. Dessa forma, a adequação das características reológicas das argamassas às solicitações as quais ela é submetida na sua aplicação,

fornece condições de processamento mais favoráveis para a obtenção das máximas propriedades finais do revestimento (CARDOSO, 2009).

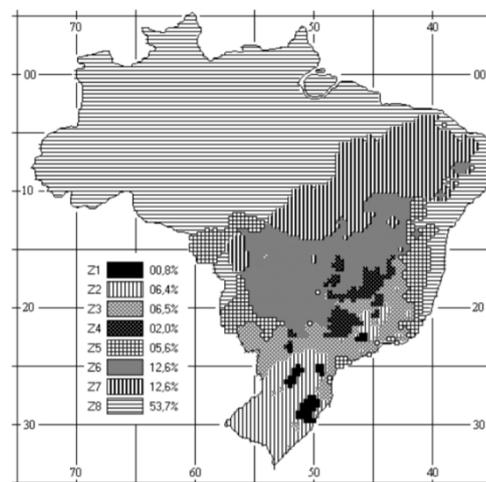
Com base nas solicitações as quais a argamassa de revestimento é submetida, o valor da resistência à aderência merece uma atenção especial. Assim como ocorre nas demais resistências mecânicas da argamassa, a resistência de aderência sofre influência com a introdução de um agregado leve como a vermiculita em sua composição. Ao analisar esse parâmetro, Palamar *et al.* (2015) verificou que a substituição de agregado por vermiculita na proporção de 25% trouxe um decréscimo de resistência de aderência por volta de 71%, quando a substituição passa a ser de 50%, esse decréscimo é mais acentuado, chegando a 85,4% do valor inicial da resistência de aderência.

2.6. CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ARGAMASSAS

Além do desempenho mecânico, é desejável que as argamassas se enquadrem em parâmetros aceitáveis com relação às características térmicas. De acordo com Cincotto *et al.* (1995), as propriedades termofísicas da argamassa são influenciadas por fatores como composição e quantidade de matéria sólida, distribuição, geometria e dimensões dos poros, teor de umidade, além do tipo de gás contido no interior dos poros.

A análise térmica dos materiais constituintes das edificações vem ganhando cada vez mais destaque após a publicação da NBR 15.575 (2013), a qual aborda que as edificações devem atender ao desempenho térmico considerando a região bioclimática presente na norma NBR 15220 (Figura 10) e as peculiaridades de cada uma das suas oito zonas.

Figura 10 – Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: NBR 15520 (2005)

No processo de transmissão de calor, a condutividade térmica é considerada uma propriedade fundamental do material (STANCATO, 2000). Ela expressa a quantidade de calor transmitido através de um material considerado homogêneo, em regime estacionário, por unidade de espessura, unidade de área e unidade de tempo, quando a diferença entre as temperaturas de suas faces é a unidade.

Materiais isolantes apresentam baixa condutividade térmica devido à grande quantidade de ar confinado em seu interior. A NBR 15.220 (2005) apresenta a condutividade térmica e densidade de massa de alguns materiais utilizados na construção civil, na Tabela 9 é possível encontrar parte desses materiais.

Tabela 9: Densidade de massa e condutividade térmica

Material	Densidade de massa (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)
Argamassa comum	1800 - 2100	1,150
Argamassa de gesso	1200	0,700
Argamassa celular	600 - 1000	0,400
Tijolo cerâmico	1300 - 1600	0,900
Concreto com vermiculita	600 - 800	0,230
Lã de rocha	20 - 200	0,045
Poliestireno expandido	15 - 35	0,040

Fonte: Adaptada de NBR 15520 (2005)

Com base na Tabela 9, é possível perceber que a densidade de massa e a condutividade térmica apresentam uma relação direta, quanto menor a densidade de massa do material menor é a sua condutividade térmica. A condutividade térmica também pode ser relacionada a outros fatores, Vittorino, Sato e Akutsu (2003) informam que ela é inversamente proporcional a quantidade de ar presente no material, diretamente proporcional ao teor de umidade contido nos materiais e delimitada pela microestrutura do agregado, onde os agregados que possuem estrutura cristalina com poros abertos conduzem mais calor em relação aos agregados de estrutura vítrea com poros fechados.

Segundo NBR 15.220 (2005), o método da placa quente protegida é utilizado para a medição da condutividade térmica de materiais isolantes que apresentem uma condutância inferior a 2W/mK, obedecendo as normas ASTM C177-76, BSI BS-874 e AFNOR NFXI0-021. Kamiuto e Iwamoto (1987) afirmam que esse método tem sido amplamente utilizado para determinar a condutividade térmica de materiais porosos. Com base na equação de energia, é possível obter a condução e radiação de transferência de calor por radiação. Ele vem sendo empregado para a análise térmica de misturas cimentícias em laboratório, como realizado por Noronha (2014).

Barros (2018) estudou as propriedades térmicas de argamassa com vermiculita, e observou uma redução de até 82% na condutividade térmica de argamassa com total substituição do agregado por vermiculita, esse valor cai para 54% quando a substituição do agregado é de 50%. Koksál, Gencil e Kaya (2015) também obteve uma redução na condutividade térmica com o aumento da relação vermiculita/cimento, analisando a relação de 6 e 8, a redução foi de aproximadamente 28% e 58% respectivamente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram avaliadas diversas misturas de argamassas. As variações nas composições das argamassas foram planejadas levando-se em conta alguns dos principais fatores intervenientes na trabalhabilidade, como: o teor de água, teor de vermiculita e o teor e natureza dos aglomerantes presentes na composição. Cabe salientar, que este estudo é de caráter exploratório, buscando identificar tendências no comportamento e nas propriedades das argamassas, frente às variações impostas.

3.1. MATERIAIS

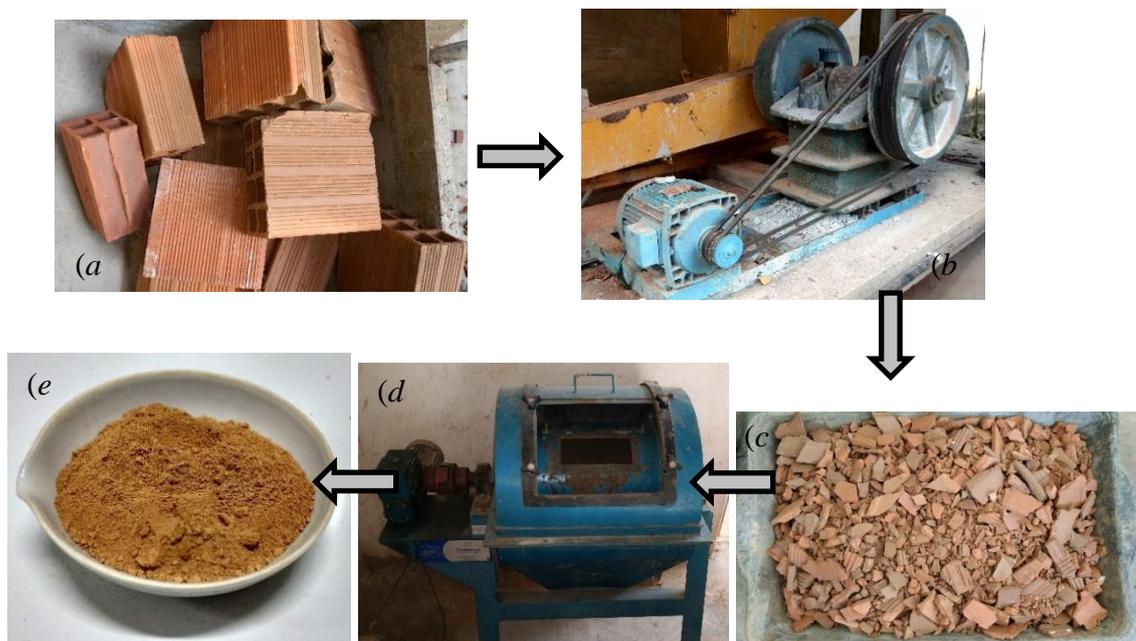
Para a produção das argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

Tabela 10: Materiais constituintes da argamassa

Material	Descrição
Cimento Portland	CP V – ARI MAX
Cal hidratada	CH-I
Agregado miúdo	Areia oriunda de rio
Vermiculita expandida	Granulometria Fina
Resíduo do tijolo cerâmico moído (RTM)	Produzido em laboratório
Metacaulim (MC)	Comercial

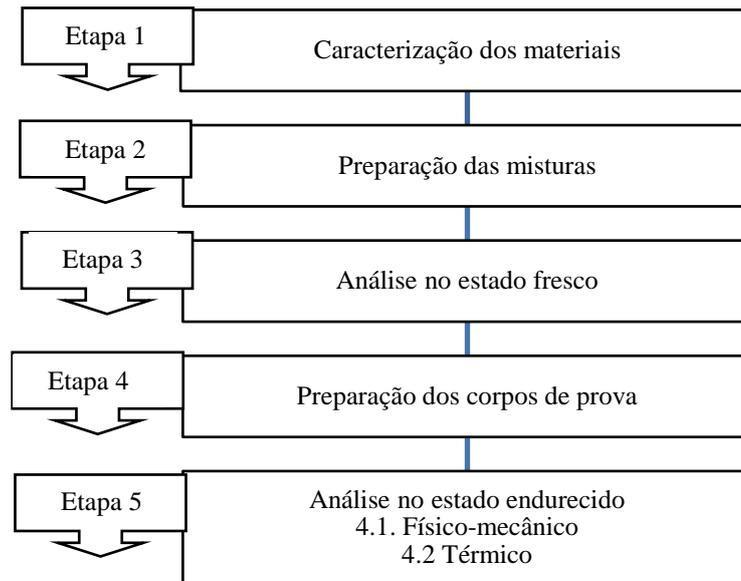
Foi utilizado o cimento Portland CP V – ARI MAX, por possuir um valor mínimo de adição em sua composição, possibilitando uma melhor análise da influência das adições pozolânicas utilizadas neste estudo. Para a obtenção do RTM foi realizado o beneficiamento do resíduo do tijolo cerâmico através de fragmentação e moagem. A fragmentação foi realizada em um britador de mandíbulas (Figura 11b), com intuito de quebrar os blocos em pedaços menores (Figura 11c) para favorecer a moagem. Após a fragmentação, colocou-se o material em um moinho de bolas, (Figura 11d). Na moagem foram usadas 30.000 rotações, pois conforme estudo realizado por Carvalho (2016), o gasto energético realizado para um número maior de rotações não traria ganhos consideráveis para a finura do material (Figura 11e).

Figura 11 – Tratamento dos resíduos de tijolos cerâmicos: (a) blocos de tijolos cerâmicos; (b) britador de mandíbulas; (c) resíduos de tijolos cerâmicos triturados; (d) moinho de bolas e (e) resíduos de tijolos cerâmicos moídos.



3.2. MÉTODOS

A caracterização dos materiais e os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da UFPB – LABEME e no Laboratório de Solidificação Rápida - LSR. A fase experimental foi dividida em 5 (cinco) etapas:



3.2.1. Caracterização dos Materiais

Os materiais foram caracterizados quanto aos aspectos físicos, químicos e mineralógicos de acordo com as análises contidas na Tabela 11.

Tabela 11: Análises para caracterização dos materiais

Análise	Ensaio	Referência
Análise física	Massa unitária – agregado	NBR NM 45 (ABNT, 2006);
	Massa específica - agregado	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Massa específica – finos	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Granulometria vermiculita	NBR 11.355 (ABNT, 2015)
	Granulometria agregado	NBR NM 248(ABNT, 2003)
Análise química	Fluorescência de raios X (FRX)	
Análise mineralógica	Difratometria de raios X (DRX)	

Os resultados das análises das características físicas dos materiais utilizados constam na Tabela 12, a massa unitária foi determinada no estado solto através de um recipiente de massa e volume conhecidos, no qual se fez três leituras para cada material e a média dessas leituras foi o valor considerado. As áreas superficiais do CPV ARI

MAX, RTM e MC foram analisadas em um equipamento modelo BELSORP II-MINI através de adsorção/dessorção de nitrogênio a 77 Kelvin, as amostras passaram por um tratamento térmico inicial a 200°C por duas horas, em fluxo de nitrogênio, para remoção de possíveis gases adsorvidos nas amostras. Para a determinação da massa específica dos materiais foi utilizada a NBR NM 52 (ABNT, 2009). No entanto, devido às suas características, torna-se inviável determinar a massa específica da vermiculita expandida com base nessa norma. Dessa forma, a sua determinação foi realizada através de um aparato (Figura 12) composto por uma proveta de vidro graduada e um infusor, onde inicialmente é determinada a massa do infusor e o volume de água deslocado por ele na proveta, posteriormente, determina-se a massa do infusor preenchido com vermiculita expandida e o volume de água deslocado pelo conjunto. Com base nesses dados, é possível encontrar a relação entre a massa do agregado e do volume deslocado, ou seja, a massa específica. Essa metodologia foi utilizada anteriormente por Barros (2018).

Tabela 12 – Características Físicas dos Materiais

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)	Área Superficial – BET (m ² /g)
CPV ARI MAX	3,060	0,920	2,12
Cal	2,471	0,644	5,19
RTM	2,579	0,730	13,80
MC	2,584	0,491	13,10
Areia	2,650	1,498	
Vermiculita	0,731	0,147	

Figura 12 – Determinação da massa específica da vermiculita expandida



A massa unitária obtida é similar à massa encontrada por Koksai, Gencel e Kaya (2015) e Barros (2018).

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi obtida através da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e para a vermiculita foi utilizada a NBR 11.355 (ABNT, 2015), que prescreve uma metodologia similar à adotada para os agregados miúdos, divergindo apenas na orientação da massa necessária para a realização do ensaio que passa a ser de 0,5 kg de vermiculita. O resultado dessas análises pode ser visualizado na Figura 13, e a distribuição granulométrica do cimento CP V – ARI MAX, Cal, RTM e MC obtida pelo método de difração de raios Laser, através de um granulômetro a laser modelo 1064, para medida da distribuição do material em uma faixa de tamanho entre 0,5 e 500 μm . A amostra foi dispersa no próprio equipamento em uma cuba de 400 ml de água destilada sob ação de um agitador mecânico por 20 minutos, essa cuba dispunha de ultrassom que opera a frequência de 55 Hz e amplitude de 55%. Os resultados estão expressos na Figura 14, assim como o seu histograma representado na Figura 15.

Figura 13 – Granulometria do agregado miúdo e da vermiculita expandida

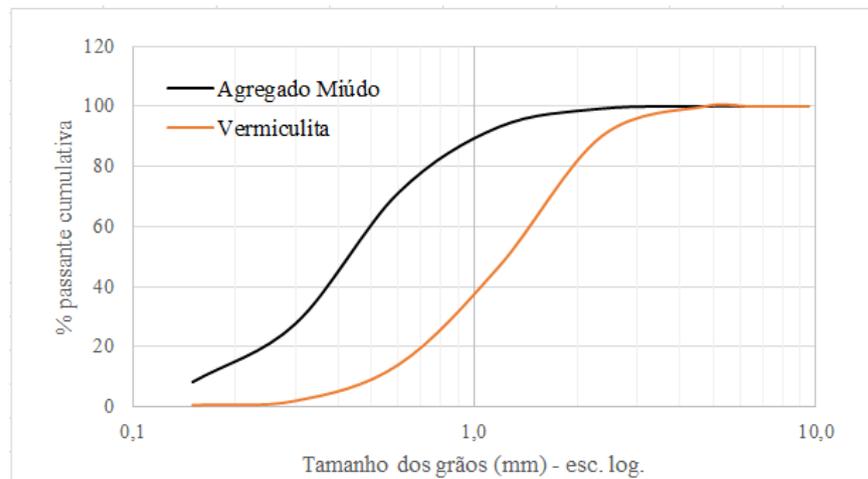


Figura 14 – Granulometria dos materiais finos: MC, RTM, Cal e CPV – ARI MAX.

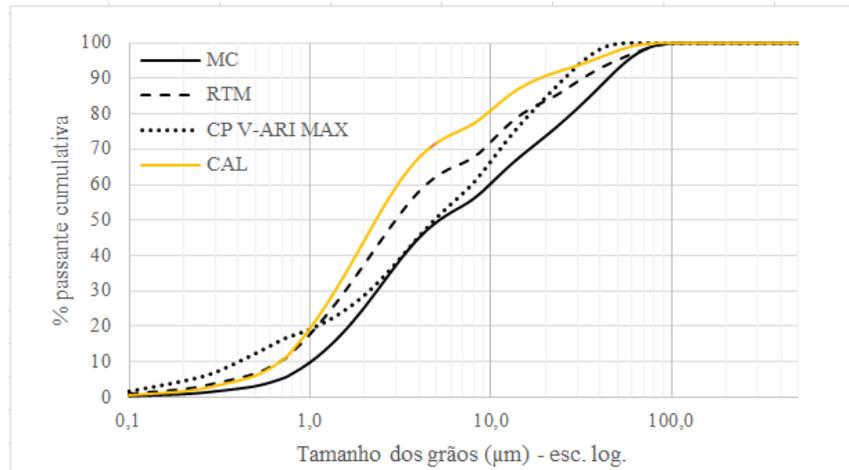
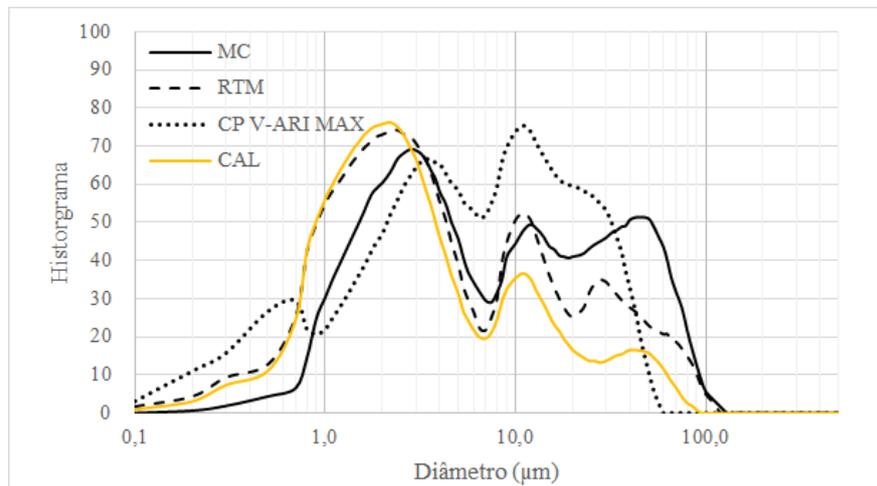


Figura 15 – Volume das partículas dos materiais finos: MC, RTM, Cal e CPV – ARI MAX.



Com base na análise granulométrica, 10% dos sólidos acumulados são menores que 1 μm ; 50% são menores 5 μm e 90% são menores que 45 μm . Para o RTM, 10% dos sólidos acumulados são menores que 0,7 μm ; 50% são menores 3 μm e 90% são menores que 30 μm . Segundo Carvalho (2016), o diâmetro médio do RTM será responsável pelo efeito fíler e pela geração de pontos de nucleação, com base na análise das curvas, o mesmo pode-se dizer do MC. Já para o CP V-ARI MAX, 10% dos sólidos acumulados são menores que 0,4 μm ; 50% são menores 5 μm e 90% são menores que 27 μm . No caso da cal, 10% dos sólidos acumulados são menores que 0,7 μm ; 50% são menores 2,4 μm e 90% são menores que 20 μm . Ainda é possível ver que a maior concentração de partículas dos materiais finos acontece entre 1 e 40 μm .

Em relação ao histograma é possível perceber que no intervalo entre 0,1 e 0,7 μm existe uma maior quantidade de grãos de cimento. Entre 0,7 μm e 3,0 μm ocorre

uma maior concentração de partículas de cal e resíduo do tijolo moído, a maior concentração de metacaulim só ocorre entre 35 µm e 100 µm.

A análise da composição química dos materiais finos (Tabela 13) foi determinada de forma semiquantitativa através do espectrômetro de fluorescência de raios-x em um equipamento SHIMADZU, modelo XRF-1800.

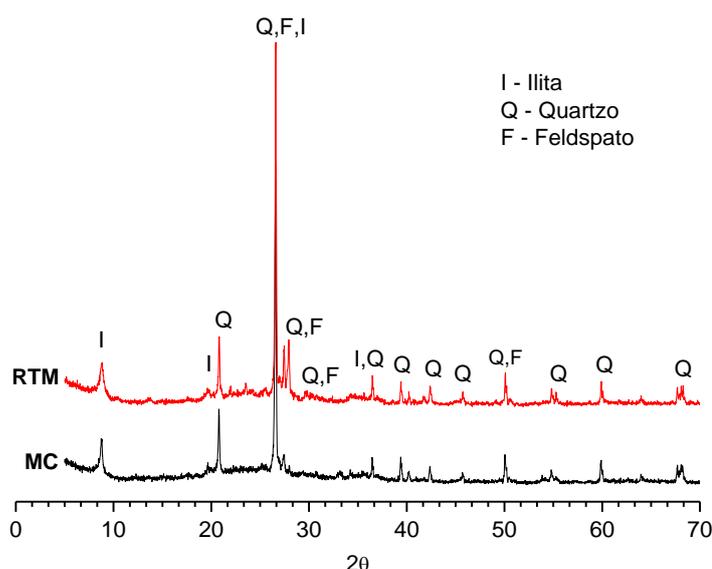
Tabela 13 – Composição Química dos Materiais (Fluorescência de Raio X)

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)
CPV	25,286	3,885	4,346	58,190	3,014	3,384	0,331	0,452	0,414	0,698
Cal	4,248	1,429	1,951	84,959	6,537	0,246	0,234	0,090	0,197	0,109
RTM	56,487	24,176	12,149	0,208	2,398	-	1,351	0,740	2,067	0,424
MC	53,655	31,790	9,895	0,122	1,172	0,083	0,203	0,655	1,844	0,581

O RTM e o MC, de acordo com a NBR 12.653 (2014), através do resultado apresentado na Tabela 13 podem ser classificados como material pozolânico Classe N, pois apresentam teor de SO₃ menor que 4%, e a soma do SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ maior que 70%. É possível perceber que o RTM possui um teor maior de Fe₂O₃ que o MC, o que explica sua coloração mais escura. Em relação à cal, a soma do CaO e MgO equivale à 91,5% podendo ser classificada como CH-I com base na NBR 7175 (2003). O CP V obedece aos critérios da NBR 5.733 (1991), apresentando os valores de MgO abaixo do limite de 6,5% e o valor de SO₃ menor que 3,5%.

A análise mineralógica a difração de raios-x foi realizada num equipamento Siemens Bruker modelo D5000 através da radiação CuK α de comprimento de onda $\lambda = 1.5418$ com raios-x em 30kv e 30mA, velocidade de leitura de 1^o/min num intervalo de 50^o a 70^o 2 θ a um passo angular de 0,02^o 2 θ , para a identificação dos picos foi utilizado o software X'Pert HighScore Plus 2.0. Na Figura 16 são apresentados os difratogramas do RTM e do MC.

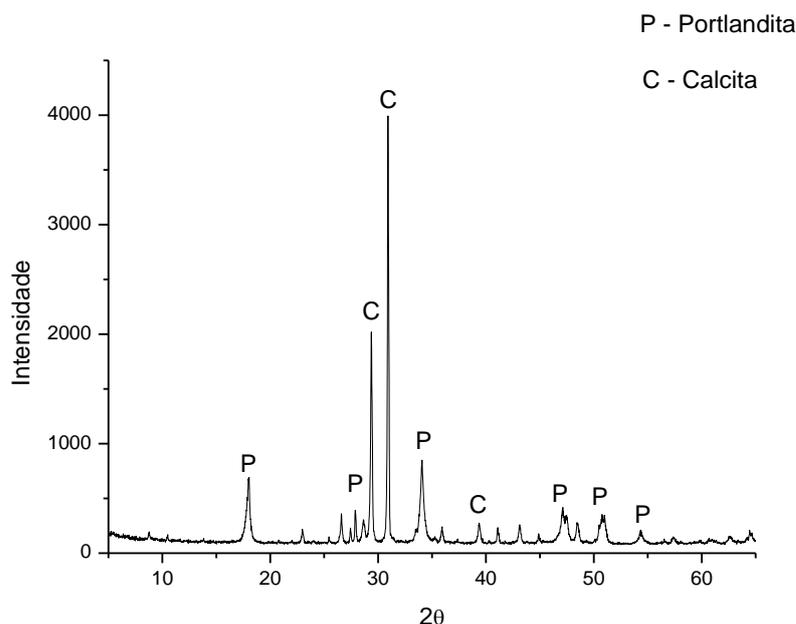
Figura 16 – Difração de raio-x do MC e RTM



Ao analisar a difração percebe-se que o RTM apresenta picos mais intensos que o MC. Ambos os materiais são compostos majoritariamente por quartzo, no entanto, também apresentam fases como ilita e feldspato. Outro fator importante a ser analisado é o halo amorfo, sua presença é comum em pozolanas e, geralmente, indica o potencial reativo das pozolanas. No entanto, nos materiais aqui analisados o halo amorfo não ficou bem evidente.

Também foi realizada difração para a cal hidratada, seu resultado é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Difração de raio-x da cal hidratada



O difratograma da cal apresenta picos de maior intensidade de portlandita (CaOH₂), bem como de calcita (CaCO₃).

3.2.2. Misturas das argamassas

Para a determinação do traço de argamassas a ser estudado foi levado em conta a proporção em volume de cimento, cal e agregado miúdo com o traço 1:1:6, o qual foi escolhido com base na literatura e por ser um traço comumente utilizado em argamassas de revestimento na região. Com base nesse traço, foram realizadas substituições do agregado miúdo pela vermiculita nas proporções de 40%, 60%, 80%, e para as adições minerais de metacaulim e resíduo do tijolo cerâmico moído foram adicionados teores de 10% e 20% em função da quantidade do cimento Portland. Dessa forma, se estudou misturas com esses materiais formando 2 grupos: um formado por vermiculita-metacaulim (VM), e outro por vermiculita-resíduos (VR). Para a análise das misturas em laboratório, foi realizada a conversão para o traço em massa resultando nas misturas presentes na Tabela 14.

A quantidade de água, em cada mistura, foi definida através da consistência padrão de 260 ± 5 mm como proposto pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

Tabela 14 – Identificação de misturas analisadas

Argamassa	Cimento (g)	Cal (g)	MC (g)	RTM (g)	Areia (g)	Vermiculita (g)	Água (g)
REF	138	96,6	-	-	1348,4	-	250,79
V40	138	96,6	-	-	809,1	53,1	308,65
V40 – RTM 10	138	96,6	-	13,8	809,1	53,1	300,68
V40 – RTM 20	138	96,6	-	27,6	809,1	53,1	308,43
V40 – MC 10	138	96,6	13,8	-	809,1	53,1	295,72
V40 – MC 20	138	96,6	27,6	-	809,1	53,1	305,06
V60	138	96,6	-	-	539,4	79,7	338,94
V60 – RTM 10	138	96,6	-	13,8	539,4	79,7	332,54
V60 – RTM 20	138	96,6	-	27,6	539,4	79,7	347,36
V60 – MC 10	138	96,6	13,8	-	539,4	79,7	326,78
V60 – MC 20	138	96,6	27,6	-	93,4	79,7	349,70
V80	138	96,6	-	-	269,7	106,2	364,96
V80 – RTM 10	138	96,6	-	13,8	269,7	106,2	383,05
V80 – RTM 20	138	96,6	-	27,6	269,7	106,2	382,08
V80 – MC 10	138	96,6	13,8	-	269,7	106,2	375,82
V80 – MC 20	138	96,6	27,6	-	269,7	106,2	375,95

Na Tabela 15 é possível encontrar o consumo de material por m³ para cada mistura analisada.

Tabela 15 – Consumo de materiais por m³

Argamassa	Cimento (kg/m ³)	Cal (kg/m ³)	MC (kg/m ³)	RTM (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Vermiculita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
REF	174,0	121,8	-	-	1704,9	-	250,5
V40	179,3	125,5	-	-	1050,6	68,1	401,0
V40 – RTM 10	179,9	125,9	-	18,0	1054,2	68,4	392,0
V40 – RTM 20	176,9	123,8	-	35,4	1036,5	67,2	395,3
V40 – MC 10	181,1	126,7	18,1	-	1061,0	68,8	388,0
V40 – MC 20	177,6	124,4	35,5	-	1041,0	67,5	392,7
V60	187,4	131,2	-	-	732,9	108,7	460,4
V60 – RTM 10	188,0	131,6	-	18,8	735,3	109,1	451,3
V60 – RTM 20	182,7	127,9	-	36,5	714,3	106,0	459,9
V60 – MC 10	189,2	132,4	18,9	-	739,7	109,7	448,0
V60 – MC 20	182,1	127,5	36,4	-	712,1	105,6	461,5
V80	198,3	138,8	-	-	386,6	152,7	524,3
V80 – RTM 10	191,8	134,3	-	19,2	374,0	147,7	532,4
V80 – RTM 20	190,6	133,4	-	38,1	371,7	146,8	527,8
V80 – MC 10	193,7	135,6	19,4	-	377,8	149,2	527,6
V80 – MC 20	192,3	134,6	38,4	-	374,9	148,0	523,8

A Tabela 15 mostra que o aumento de vermiculita na argamassa além de ocasionar um aumento na quantidade de água, também elevou a quantidade de aglomerante necessário para a mistura. Esse comportamento é similar ao encontrado por Barros (2018).

Foi adotado o procedimento de mistura utilizado por SILVA (2011), obedecendo a seguinte sequência: com o material seco dentro da cuba da argamassadeira foi realizada a homogeneização por 30 segundos na velocidade baixa, foi adicionada água de modo contínuo até 20 segundos, ainda com a velocidade baixa, e permaneceu o processo de mistura por mais 90 segundos. O processo de adição da água no material seco diverge do que prescreve a norma NBR 13276 (ABNT, 2016), no entanto, estudos realizados por Antunes (2005) demonstra que esse processo resulta em uma argamassa mais homogênea, influenciando na reologia da mistura.

3.2.3. Ensaios no estado fresco

Para a realização dos ensaios no estado fresco das argamassas foram realizados caracterização reológica através da mesa de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e método do squeeze flow. A seguir serão apresentados detalhes sobre cada um desses ensaios.

3.2.3.1. Índice de consistência

Para obtenção do índice de consistência foi utilizada a NBR 13276 (ABNT, 2016), que é tradicionalmente utilizada para a fixação de água na argamassa. Esse ensaio consiste na adição de água por tentativas até se obter um espalhamento pré-fixado de 260 ± 5 mm.

Figura 18 – Ensaio da mesa de consistência



3.2.3.2. Densidade de massa e ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram definidos com base na NBR 13278 (ABNT, 2005). A densidade de massa foi definida a partir da relação entre a massa que a argamassa ocupa dentro de um recipiente de volume conhecido. Para a determinação do teor de ar incorporado a norma apresenta a Equação 4.

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (4)$$

onde:

A = teor de ar incorporado na mistura [%];

d = densidade de massa da argamassa no estado fresco [kg/m^3];

d_t = densidade teórica da argamassa [kg/m^3];

A densidade teórica da argamassa dosada em obra é definida segundo a Equação 5.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (5)$$

onde:

m_i = massa seca de cada componente da argamassa, incluindo a água [g];

γ_i = massa específica de cada componente da argamassa [g/cm³];

Ao analisar a equação 4, percebe-se que quanto maior a densidade, menor será o teor de ar incorporado e, por sua vez, maior será a massa da mistura. O resultado do ensaio mostra o estado de agregação das moléculas da mistura.

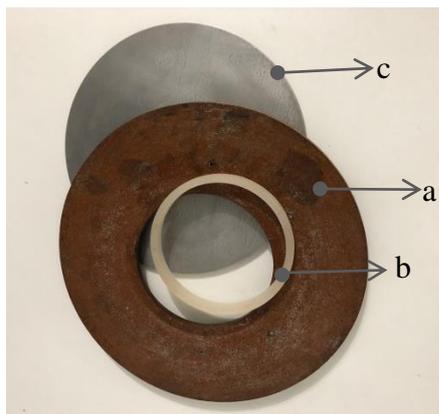
3.2.3.3. Squeeze flow

As argamassas também foram submetidas ao ensaio de Squeeze-flow de acordo com a norma NBR 15839 (ABNT 2010), com o objetivo de comparar os resultados com a mesa de consistência.

Para a realização do ensaio foi confeccionado um molde constituído de um gabarito e anel plástico baseado no trabalho de Cardoso (2009). O gabarito de madeira (Figura 19a) garante que a amostra fique centralizada e que se tenha uma adequada localização da aplicação da carga em todas as amostras. Já o anel plástico (Figura 19b) tem a função de garantir o controle de dimensão tanto de diâmetro quanto de altura e paralelismo da amostra.

Além do molde, o substrato de deslizamento da amostra é um elemento importante. Dessa forma, foi utilizada uma base metálica (Figura 19c) não absorvente com o intuito de eliminar uma possível variável de absorção na análise dos resultados.

Figura 19 – Aparatos para o ensaio de Squeeze flow



Os ensaios de squeeze-flow (Figura 20) foram realizados em uma máquina universal de ensaios utilizando células de carga de 10kN, com uma taxa de cisalhamento constante de 0,1 mm/s, após 15 minutos da mistura, repetindo o procedimento após 65 minutos do preparo da mistura.

Figura 20 – Ensaio de Squeeze flow



3.2.4. Ensaio no estado endurecido

Para os testes no estado endurecido, foram confeccionados corpos de prova prismáticos em moldes de (40 x 40 x 160) mm³, mantidos em laboratório sob monitoramento de temperatura e umidade relativa (23°C ± 2 e 60% ± 5 conforme a NBR 13.279 (2005) de temperatura do ar de, posteriormente todas as amostras foram analisadas em idade de 28 dias.

3.2.4.1. Determinação das Propriedades físicas

A análise das propriedades físicas das argamassas foi realizada através do ensaio de determinação da densidade da massa aparente com base na NBR 13.280 (ABNT, 2005) e da determinação da absorção de água por capilaridade segundo prescrições da NBR 15259 (ABNT, 2005).

Para a determinação da densidade de massa aparente foram utilizadas três amostras de cada mistura e verificada a relação entre a massa de cada corpo de prova e seu volume, e o valor considerado foi a média dos 3.

No caso da absorção de água por capilaridade (Figura 21), também foram ensaiadas três amostras para cada traço estudado.

Figura 21 – Amostras pós ensaio de absorção de água por capilaridade



Essas amostras foram colocadas em contato com uma lâmina d'água de 5 mm e verificadas as massas nos tempos de 10 e 90 minutos pós o contato inicial com a água. Com base nesses dados, é possível obter absorção de água por capilaridade para cada tempo através da diferença entre a massa inicial e a massa obtida no tempo analisado dividida pela área de contato da amostra com a água, além do coeficiente de capilaridade com base na Equação 6 presente na NBR 15.259 (ABNT, 2005). Então o coeficiente de capilaridade é caracterizado como o coeficiente angular da reta, onde no eixo das abscissas tomam-se a raiz quadrada dos tempos de 10 minutos e 90 minutos, e a absorção de água correspondente a cada um desses tempos no eixo das ordenadas.

$$C = \frac{m_{90} - m_{10}}{\sqrt{t_{90}} - \sqrt{t_{10}}} \quad (6)$$

onde:

C = coeficiente de capilaridade [$\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$];

m_{90} = absorção de água no tempo de 90 min [g/dm^2];

m_{10} = absorção de água no tempo de 10 min [g/dm^2];

t_{90} = tempo de 90 minutos;

t_{10} = tempo de 10 minutos.

3.2.4.2. Determinação das Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das argamassas foram avaliadas através da resistência à tração na flexão e à compressão, aos 28 dias de idade, obedecendo às prescrições da NBR 13.279 (ABNT, 2005) e da resistência de aderência à tração das argamassas de revestimento conforme NBR 13.528 (2010).

O ensaio de resistência à tração na flexão (Figura 22) foi realizado em três amostras de cada traço. A velocidade de carregamento aplicada foi de 50 ± 10 N/s através de uma máquina universal de ensaios. Com base nos dados obtidos pelo ensaio e através da Equação 7, é possível obter o valor da resistência à tração na flexão das argamassas.

$$R_f = \frac{1,5F_1L}{40^3} \quad (7)$$

onde:

R_f = resistência à tração na flexão [MPa];

F_1 = carga aplicada verticalmente no centro do prisma [N];

L = distância entre os suportes [mm].

Figura 22 – Ensaio de resistência à tração na flexão e a ruptura causada pelo ensaio



No caso da análise da resistência à compressão (Figura 23) foram utilizados seis corpos de provas de cada traço, assim como na resistência à tração na flexão, a velocidade de carregamento aplicada foi de 50 ± 10 N/s.

Figura 23 – Ensaio de resistência à compressão



Para a determinação da resistência à compressão é utilizada a Equação 8.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (8)$$

onde:

R_c = resistência à compressão [MPa];

F_c = carga máxima aplicada no prisma [N];

A = área da seção comprimida [mm²].

Como já mencionado, a resistência de aderência à tração das argamassas é uma das características mais importante para as argamassas de revestimento, pois reflete o desempenho da argamassa quando submetida a uma das suas principais solicitações. Para mensurar essa característica foi utilizada a NBR 13.528 (2010) para execução e análise dos resultados.

Para realizar o ensaio foram confeccionados cinco painéis de bloco cerâmico apresentando dimensão de 80 cm x 60 cm revestidos com chapisco traço 1:3 (Fig. 24). A escolha do tamanho do painel for para que fosse possível respeitar as distâncias limites entre o corpo de prova e a borda, conforme estabelecidas pela NBR 13.528 (2010). Nessa etapa foram selecionados dez dos dezesseis traços estudados inicialmente, com base nos resultados dos ensaios reológicos. Foram eles a argamassa de referência, V40, V40-20MC, V40-20RTM, V60, V60-20MC, V60-20RTM, V80, V80-20MC e V80-20RTM. Esses foram os traços selecionados para revestir os painéis de parede após a aplicação de chapisco, com um período mínimo de 3 dias de cura do chapisco. A espessura do revestimento referente a camada de argamassas foi de 2 cm.

Com base na NBR 13.528 (2010) foram realizados 12 cortes no painel com a utilização de uma serra copo com 52 mm. Logo em seguida, foi realizada a limpeza do painel para retirar resíduos que pudessem interferir na aderência, e então foi aplicada sobre a amostra uma cola à base de resina epóxi bicomponente para a fixação da pastilha metálica, respeitando o tempo mínimo de 24 horas para o endurecimento. O arrancamento dos corpos de prova (Fig. 25) foi realizado através do aparelho de arranchamento digital microprocessado a uma taxa de velocidade de 124 N/s.

Figura 24 – Painel confeccionado para o ensaio de arrancamento



Figura 25 – Execução do ensaio de arrancamento



3.3. ANÁLISE TÉRMICA

A avaliação térmica foi realizada com base no método da placa quente protegida com a utilização do condutímetro K30 para a determinação do coeficiente de condutividade térmica e da resistividade térmica através do método fluxométrico em regime estacionário com base na NBR 15.220-5 (ABNT, 2005).

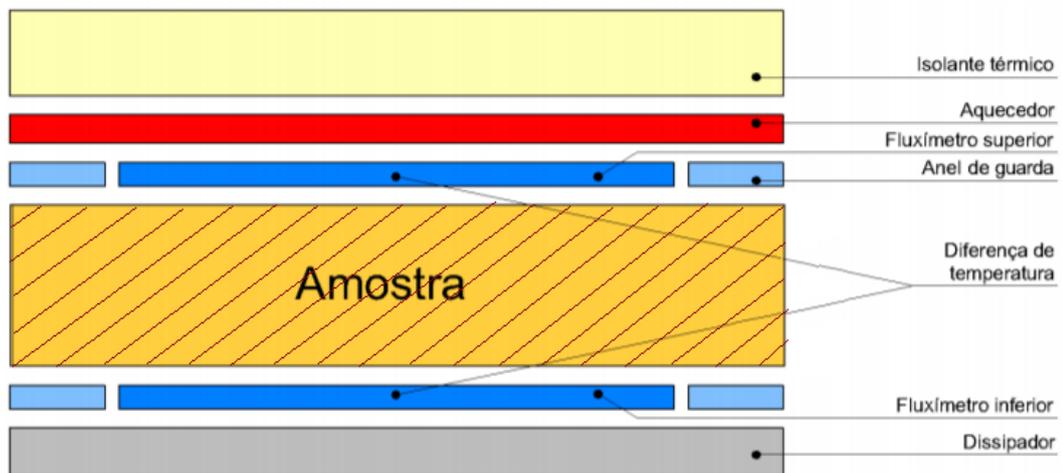
Foram confeccionadas amostras em forma de placa com 30 cm x 30 cm x 3 cm para a análise no condutímetro K30 após 28 dias de idade, como mostra a Figura 26.

Figura 26 – Amostra em placa para análise térmica



O ensaio ocorre através da introdução da amostra no compartimento do condutímetro, logo após, cada face da amostra é pressionada por uma placa de fluxímetro. A placa superior é aquecida e a inferior resfriada devido à dissipação gerando um gradiente térmico, o esquema de funcionamento é apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Esquema de funcionamento do condutivímetro K 30 (adaptado do Manual do Condutivímetro K 30, 2001)



Através da Lei de Fourier (Equação 9) é possível determinar a resistência térmica:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)} \quad (9)$$

onde:

R = resistência térmica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

q_1 = densidade de fluxo de calor medido pelo fluxímetro 1 [W/m^2];

q_2 = densidade de fluxo de calor medido pelo fluxímetro 2 [W/m^2];

T_1 = temperatura superficial da amostra no termopar 1 [$^{\circ}\text{C}$];

T_2 = temperatura superficial da amostra no termopar 2 [$^{\circ}\text{C}$];

E pela equação 10 é possível determinar a condutividade térmica do material pela, considerando que a amostra seja homogênea.

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (10)$$

onde:

R = resistência térmica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$];

λ = condutividade térmica [W/mK];

L = espessura da amostra [m].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

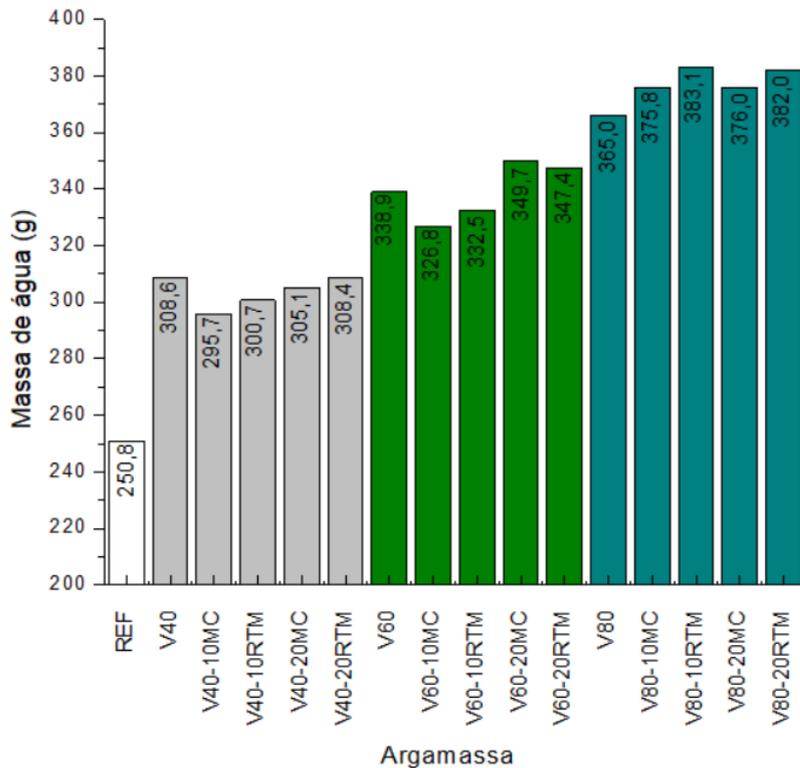
4.1. ANÁLISE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Diversos ensaios foram realizados com o intuito de analisar o comportamento das argamassas individualmente perante cada parâmetro em seu estado fresco. Os resultados obtidos e suas análises são apresentados e discutidos a seguir.

4.1.1. Índice de consistência

A consistência da argamassa é um fator que depende diretamente da quantidade de água presente na sua mistura. Dessa forma, para a análise da consistência das argamassas foi fixado o índice de consistência no valor de 260 mm, e obtida a quantidade de água necessária para o espalhamento pré-definido através de tentativas. Com o intuito de facilitar o entendimento do comportamento das argamassas, foi sintetizado o resultado da mesa de consistência na Figura 28 apresentando a quantidade de água necessária para que cada argamassa analisada apresentasse o espalhamento pré-fixado de 260 mm. As cores diferentes apresentadas no gráfico se referem às diferentes porcentagens de vermiculita estudadas nesse trabalho (40% - cinza; 60% - verde e 80% - azul)

Figura 28 – Massa de água para cada mistura para um espalhamento de 260 mm



A adição da vermiculita à argamassa exigiu uma quantidade maior de água adicionada nas formulações, como já era de se esperar, pelo fato da vermiculita ser um material poroso, dessa forma absorve e retém água com facilidade. A influência da vermiculita no consumo de água é confirmada ao verificar a sua relação direta com a quantidade de água, visto que a mistura contendo 40% de vermiculita teve um acréscimo de aproximadamente 23% de massa de água. Para a argamassa com 60% de vermiculita esse percentual foi elevado para 35,15% e no caso da argamassa com 80% de vermiculita foi necessário um acréscimo de 45,5% em relação à argamassa de referência. Outro fator observado é que a maioria das argamassas confeccionadas com MC demandou uma menor quantidade de água para alcançar a consistência pré-definida comparando com as misturas que contém RTM, o que inicialmente converge para o esperado, visto que pela análise da granulometria (Fig. 15) o RTM apresenta uma maior proporção de partículas finas.

Ao analisarmos separadamente cada subgrupo formado pela incorporação de vermiculita, o subgrupo V40 apresenta um comportamento divergente do V80. Nas misturas do subgrupo V40 a introdução das adições minerais resultou numa demanda menor de água, o oposto ocorre com o subgrupo V80. Esse fato pode ser atribuído a uma melhora no empacotamento das argamassas com 40% de vermiculita, o que não acontece nas misturas com 80% de vermiculita, onde a quantidade de materiais finos introduzida na mistura não foi o bastante para contribuir consideravelmente com esse fator, por apresentar uma elevada quantidade de vazios.

Palamar, Barluenga e Puentes (2015) além de Barros (2018) constataram que a introdução de vermiculita no percentual de 25% como agregado não traz grande influência na consistência das argamassas. No entanto, quando esse percentual se eleva como nos casos analisados neste trabalho e nos apresentados por Cintra (2013), Silva *et al.* (2010) e Xu *et al.* (2015) é necessário o aumento de consumo de água na produção da argamassa conforme aumenta-se a quantidade de vermiculita na composição. Esse fator é confirmado através do teor de água encontrado neste estudo presente na Tabela 16.

Tabela 16 – Teor de água na argamassa

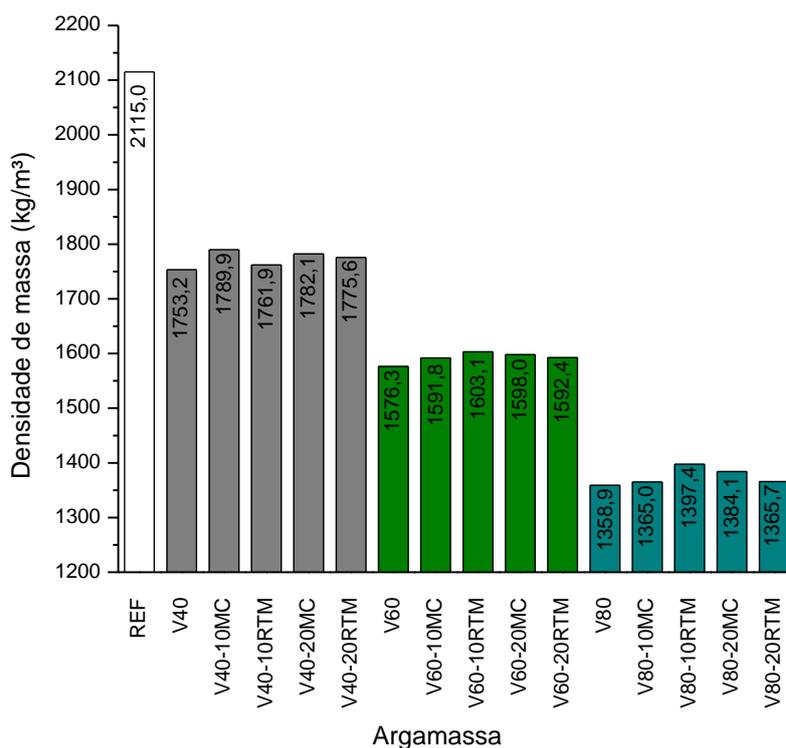
Argamassa	Materiais secos (g)	Água (g)	Teor de água (%)
REF	1583,00	250,79	16%
V40	1096,77	308,65	28%
V40 – RTM 10	1110,57	300,68	27%
V40 – RTM 20	1124,36	308,43	27%
V40 – MC 10	1110,57	295,72	27%
V40 – MC 20	1124,36	305,06	27%
V60	853,63	338,94	40%
V60 – RTM 10	867,43	332,54	38%
V60 – RTM 20	881,23	347,36	39%
V60 – MC 10	867,43	326,78	38%
V60 – MC 20	881,23	349,70	40%
V80	610,50	364,96	60%
V80 – RTM 10	624,30	383,05	61%
V80 – RTM 20	638,09	382,08	60%
V80 – MC 10	624,30	375,82	60%
V80 – MC 20	638,09	375,95	59%

Analisando a Tabela 16, é possível perceber a diferença no teor de água entre os subgrupos de proporção de vermiculita. Com a utilização de 40% de vermiculita, o teor de água foi elevado de 16% para uma média de 27%, e esse teor aumenta até um percentual de 60% para os subgrupos de 80% de vermiculita, comprovando assim que quanto maior o consumo de vermiculita maior será o teor de água necessário para se obter a mesma consistência. No caso das argamassas com 40% de vermiculita, o tipo e proporção de adições minerais não apresentou tanta interferência na demanda de água, uma vez que todas as argamassas desse grupo têm um teor de água de 27%. Para as argamassas com 60% de vermiculita, quanto maior a proporção de adição, maior foi a demanda de água.

4.1.2. Densidade e Teor de ar incorporado

Os resultados da densidade fresca das argamassas podem ser vistos na Figura 29.

Figura 29 – Densidade de massa das argamassas



Como era de se esperar, a quantidade de vermiculita na argamassa influenciou inversamente o valor da densidade de massa, por se tratar de um agregado leve que apresentou uma massa específica 72,41% inferior à areia utilizada neste estudo. Ao analisar a argamassa com 40% de vermiculita, ela apresentou um decréscimo na sua densidade em 17% em relação à argamassa de referência. Esse valor aumentou para 25% na argamassa com 60% de vermiculita e para 35,5% quando o comparativo é realizado com a argamassa com 80% de vermiculita.

A introdução de adições minerais nas argamassas com vermiculita reduziu essa diferença, visto que houve um acréscimo de finos nas misturas influenciando assim no empacotamento das partículas. Quando comparado o tipo de material adicionado (RTM e MC) à mistura não foi observado uma alteração significativa em seu valor.

No estudo da densidade de argamassas com vermiculita, Palamar *et al.* (2015) não obteve divergência entre a argamassa de referência e a argamassa com 25% de vermiculita, já em relação a argamassa com 50% de vermiculita houve uma redução de 13,3%, valor esse que já foi ultrapassado nesta pesquisa com argamassa contendo introdução de 40% de vermiculita.

Barros (2018) ao analisar a argamassa de referência com a argamassa que contém 50% de vermiculita na composição do seu agregado encontrou uma redução na

densidade de massa por volta de 24,2%, esse valor encontra-se dentro da faixa de redução encontrada nesta pesquisa para as argamassas com 40% e 60% de vermiculita.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) traz a classificação da argamassa com base em alguns requisitos, dentre eles tem a densidade de massa como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Densidade de massa no estado fresco

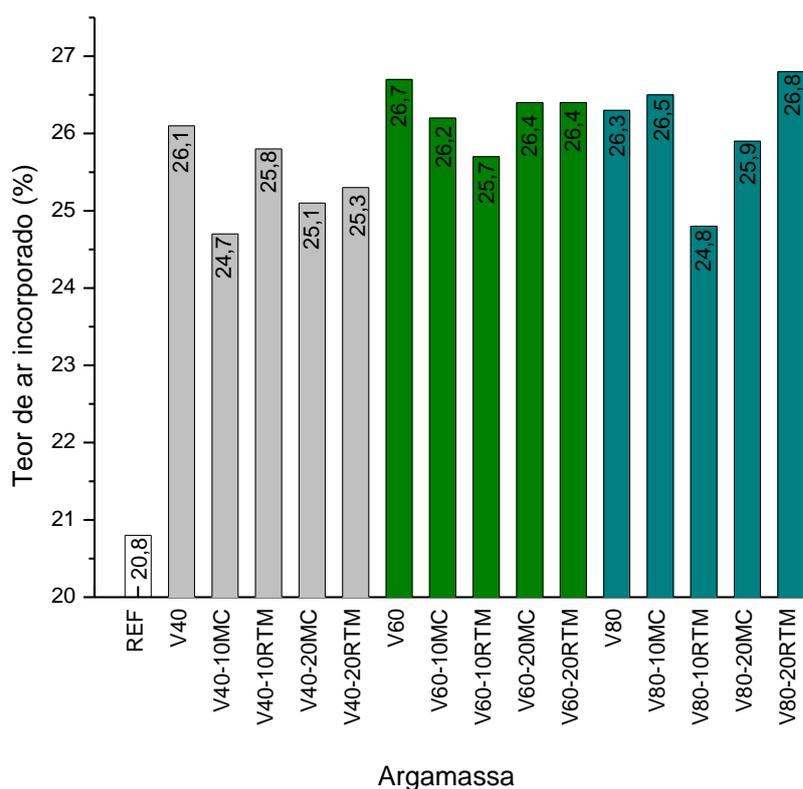
Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)
D1	≤ 1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	>2000

A argamassa de referência, como observado na Figura 29, é classificada como D5. Cada grupo de argamassa com substituição de agregado por vermiculita, devido ao fato da incorporação de vermiculita apresentar grande influência na densidade da argamassa, apresentou uma classificação diferente. Onde o subgrupo das argamassas com 40% de vermiculita foi classificado como D3, já o subgrupo formado pelas argamassas com 60% de vermiculita enquadra-se como D2, e o aumento da proporção de vermiculita para 80% em relação ao agregado fez com que essas argamassas fossem classificadas como D1. A norma recomenda que as argamassas apresentem sua densidade de massa nas faixas mais baixas da classificação para que não haja o comprometimento do seu desempenho e durabilidade, como analisado, as argamassas com vermiculita se enquadram nessa recomendação.

Para Carasek (2010), as argamassas com densidade de massa no estado fresco abaixo de 1400 kg/m³ são classificadas como leves e as argamassas que tenham a sua densidade entre 1400 kg/m³ e 2300 kg/m³ são enquadradas como normais, dessa forma, podem ser usadas em revestimento. Argamassas com 80% de vermiculita podem ser classificadas como argamassa leve, as demais são consideradas argamassas normais mesmo que contenham agregado leve em sua composição.

Na Figura 30 é apresentado o resultado do teor de ar incorporado das argamassas estudadas.

Figura 30 – Teor de ar incorporado das argamassas



O aumento do teor de ar incorporado, geralmente, acontece durante o preparo das argamassas e na moldagem dos corpos-de-prova. Nas argamassas aqui estudadas o processo de mistura foi o mesmo, logo a alteração no teor de ar incorporado das argamassas não se deve a esse fator.

É possível observar um aumento no teor de ar incorporado nas argamassas com vermiculita, isso se deve à natureza do agregado, pois a vermiculita expandida apresenta vazios entre suas lamelas. Como já mencionado, o teor de ar incorporado tem influência na trabalhabilidade da argamassa, quanto mais leve a argamassa menor será o esforço para na sua utilização, por outro lado, menor será a sua resistência mecânica.

Silva *et al.* (2010) em estudo de argamassa contendo 10% de vermiculita em sua composição obteve um aumento no teor de ar incorporado de 24% na argamassa de referência para 36%. Evidenciando que a introdução de um material lamelar eleva o teor de ar incorporado nas argamassas.

4.1.3. Trabalhabilidade pelo método do Squeeze flow

Com a quantidade de água definida para cada mistura através da mesa de consistência, seguiu se para a análise reológica através do ensaio do Squeeze Flow. Nas figuras 32, 33 e 34, constam os resultados dos ensaios após 15 minutos da mistura,

conforme recomendado pela norma NBR 15.839 (ABNT, 2010). Nos gráficos as curvas se diferenciam por cores e tipo de traço em função do tipo e teor de adição (RTM ou MC).

Figura 31 – Squeeze flow para as argamassas com 40% de vermiculita após 15 min da mistura.

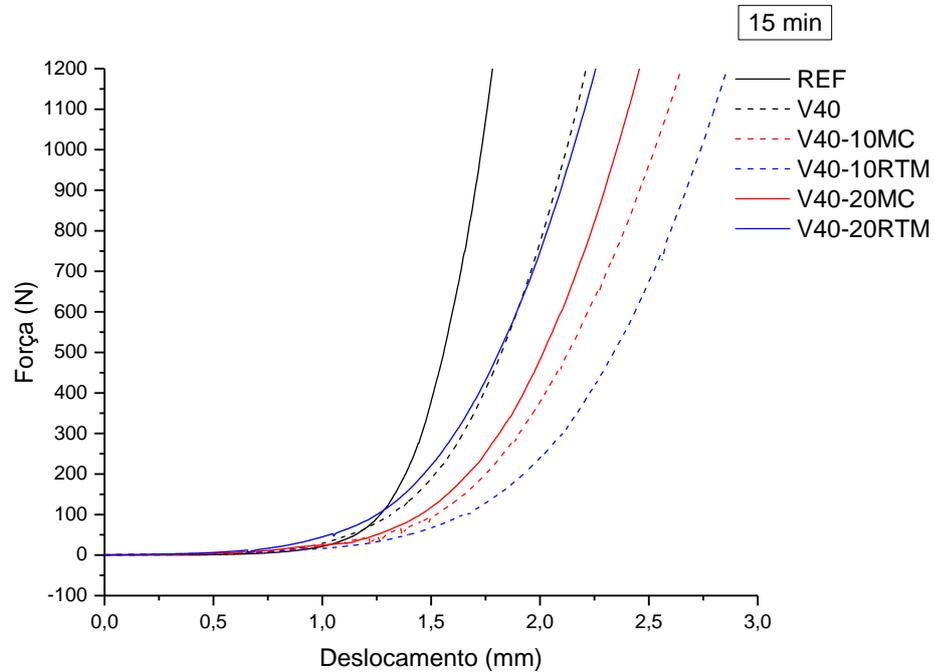


Figura 32 – Squeeze flow para as argamassas com 60% de vermiculita após 15 min da mistura.

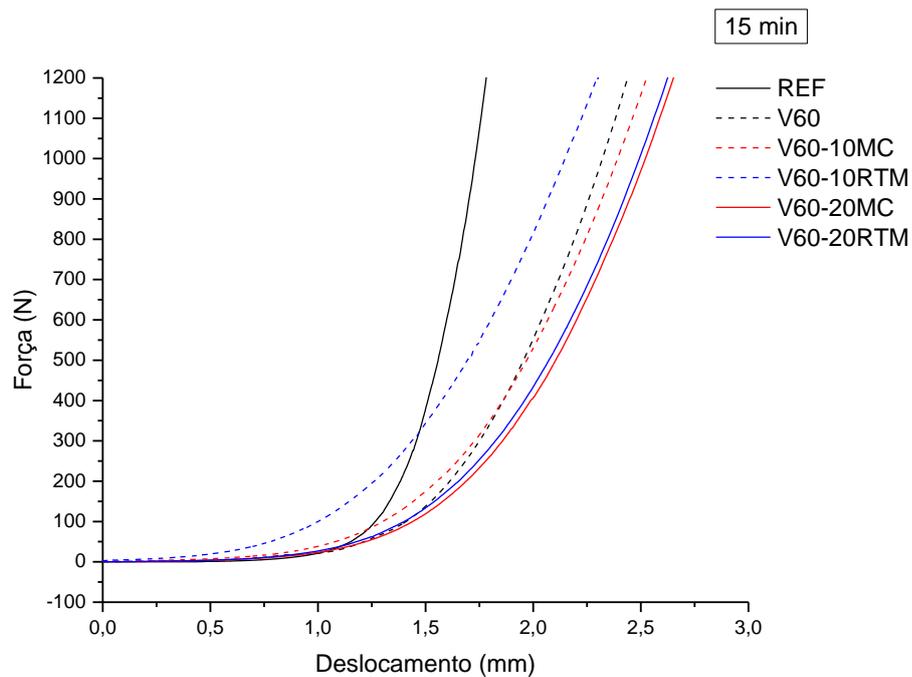
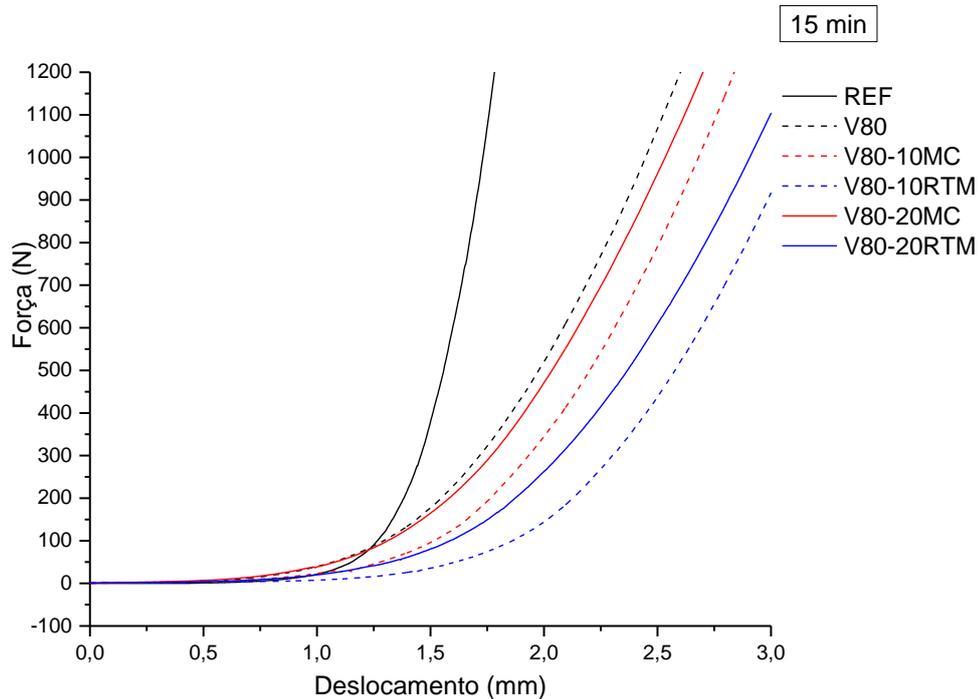


Figura 33 – Squeeze flow para as argamassas com 80% de vermiculita após 15 min da mistura.



Como o valor do índice de consistência foi pré-fixado para todas as argamassas, partimos da premissa que, de acordo com o ensaio de mesa de consistência, todas as misturas apresentaram um comportamento similar quanto à trabalhabilidade. No entanto, ao analisar os resultados do Squeeze-Flow é possível constatar que as argamassas apresentaram comportamentos distintos entre si.

Observando as curvas de cada mistura é possível perceber que, em sua maioria, quando comparadas com a argamassa de referência elas são deslocadas para a direita. Para uma força de 1000N a argamassa de referência apresentou 1,6 mm de deslocamento, enquanto as demais misturas apresentaram valores maiores que 2,0 mm, chegando a atingir até 2,5 mm, esse valor é próximo ao obtido por Heineck (2012) para a argamassa de referência analisada em seu estudo. Uma vez que a argamassa de referência apresenta um desempenho adequado para uso já conhecido, pode se considerar que o mesmo ocorre para as argamassas que apresentem um comportamento similar a ela.

Inicialmente até o deslocamento de 1 mm, onde as partículas ainda estão se ajustando para iniciar o deslocamento, as argamassas apresentam um comportamento similar. As divergências reológicas entre as misturas se acentuam no deslocamento entre

1mm e 2mm, uma vez que fica mais evidente a diferença da força aplicada necessária para que seja realizado o deslocamento. Dessa forma, é possível afirmar que as misturas com vermiculita apresentam uma menor viscosidade e maior facilidade de espalhamento. Uma das influências para esse comportamento é o teor de água presente nessas misturas, visto que foram utilizados valores mais elevados que o utilizado na argamassa de referência. Uma maior quantidade de água gera uma camada de água mais espessa entre os grãos, elevando sua trabalhabilidade. No caso da mistura V60-10RTM, sua curva foi deslocada para a esquerda resultando em uma maior viscosidade, indicando que a quantidade de água presente nessa argamassa não foi adequada. Apesar de, segundo o ensaio da mesa de consistência, ela apresentar consistência adequada para utilização.

Outro fator que influencia no comportamento reológico das argamassas é o empacotamento e a forma dos agregados. Geralmente grãos mais esféricos tendem a se movimentar com maior facilidade, favorecendo o seu rolamento ao serem envolvidos pela pasta, melhorando a trabalhabilidade da argamassa (CINCOTTO *et al.*, 1995). No entanto, as argamassas com incorporação de vermiculita, que possui forma lamelar, apresentaram um escoamento maior. Possivelmente este fato seja em função da maior incorporação de ar devido a sua forma mais lamelar. Visto que as argamassas com vermiculita apresentam um acréscimo de pelo menos 19% no teor de ar incorporado. De acordo com Antunes (2005), a maior incorporação de ar favorece para distanciar mais um grão do outro, reduzindo a viscosidade da argamassa devido à postergação da atuação das forças de atrito, apresentando assim um atrito superficial menor e uma menor viscosidade da argamassa.

O subgrupo V60 apresentou um comportamento divergente das demais, onde as argamassas com maior adição de minerais apresentou um comportamento reológico mais fluido. Provavelmente, nessas misturas o elevado teor de materiais finos resultou em um maior teor de pasta gerando um melhor envolvimento e lubrificação das partículas mais grossas, diminuindo a interação destes por contato.

Freitas (2010) e Azevedo *et. al.* (2017) destacam a possibilidade de fazer uma analogia entre o resultado do ensaio com a aplicação da argamassa na prática. Onde a argamassa que apresente parte significativa no estágio I necessita de cargas elevadas para se deformar, sendo de difícil aplicação além ter um comportamento semelhante a um sólido, apresentando deformação elástica e provável problema de fissuração ainda

no estado fresco, por causa da recuperação elástica após retirada da força. A argamassa com cargas intermediárias (estágio II) flui por deformação plástica e/ou viscosa, tendem a permitir uma maior produtividade, quanto à argamassa com baixas cargas pode ser excessivamente fluida, impossibilitando a aplicação de camadas espessas ou imediatamente após o preparo. Nas argamassas analisadas neste estudo, pode-se notar uma predominância do estágio II e uma leve tendência de transição para o estado III. A ausência de estado I justifica-se pela fluidez apresentada em todas as misturas estudadas, devido ao teor de água e de ar incorporado, fazendo com que as argamassas escoem desde o princípio sem a necessidade de um acréscimo elevado de força aplicada.

Para as amostras ensaiadas após 65 minutos da mistura os resultados são apresentados nas Figuras 34, 35 e 37.

Figura 34 – Squeeze flow para as argamassas com 40% de vermiculita após 65 min da mistura.

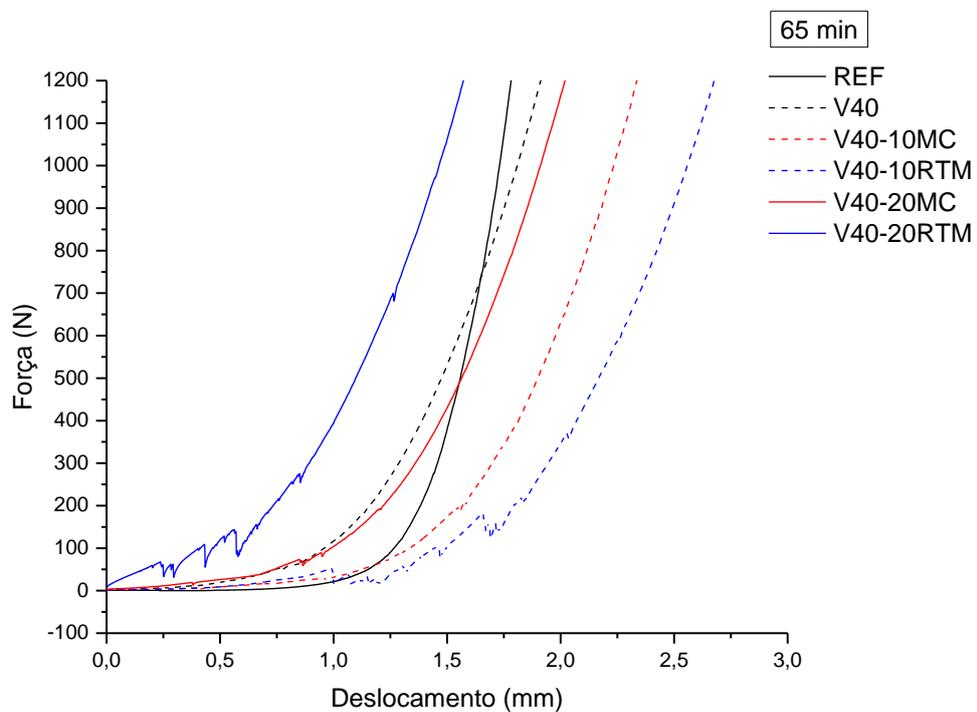


Figura 35 – Squeeze flow para as argamassas com 60% de vermiculita após 65 min da mistura.

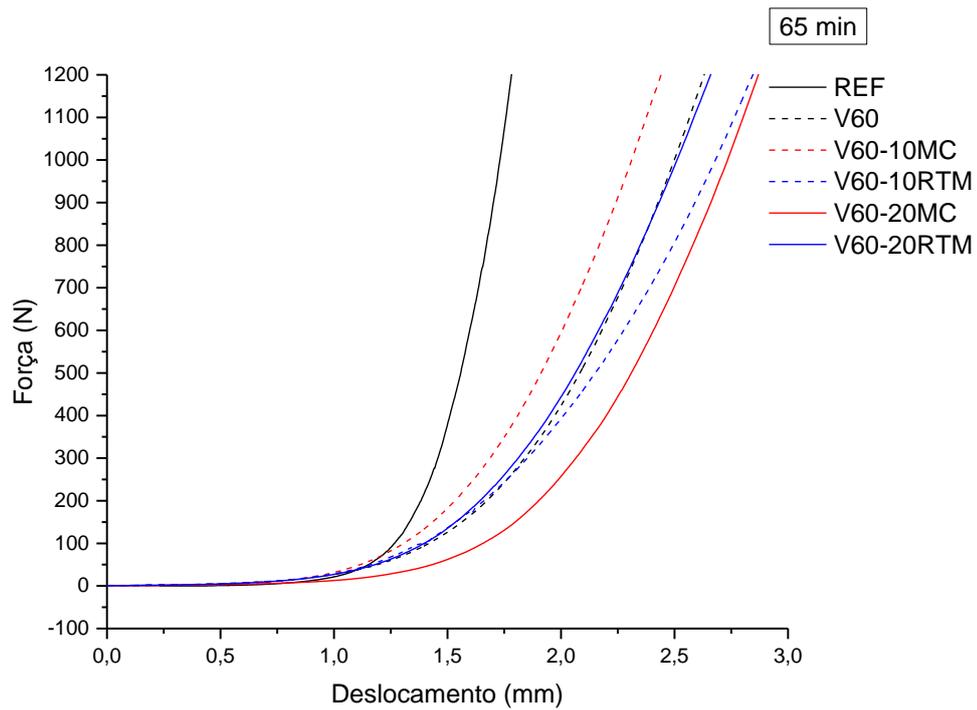
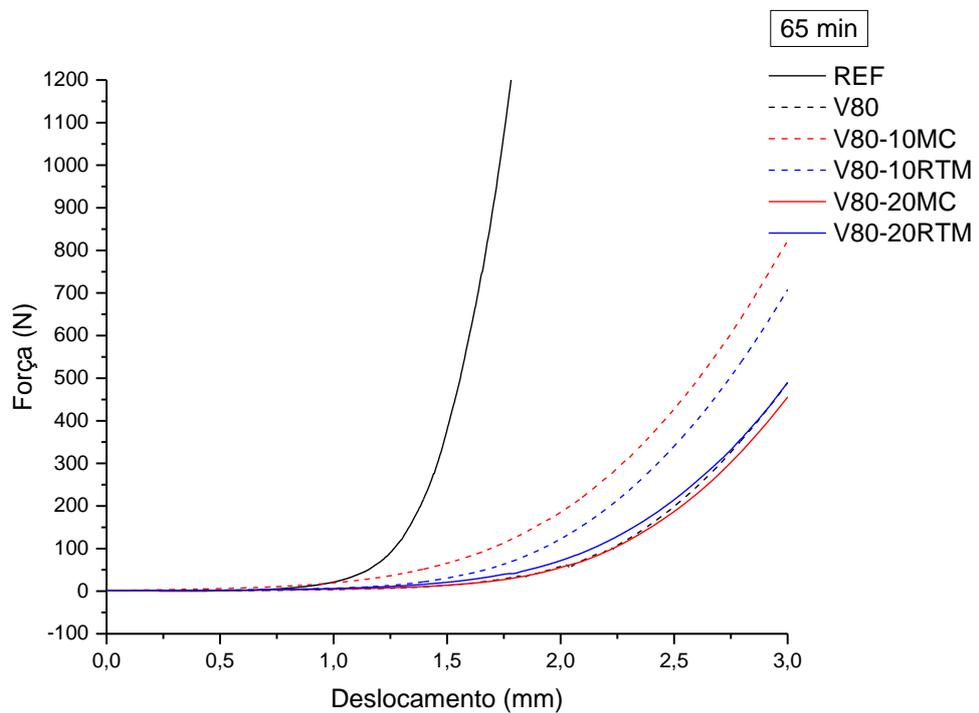


Figura 36 – Squeeze flow para as argamassas com 80% de vermiculita após 65 min da mistura.



Observando as curvas de cada mistura entre o tempo de 15 minutos e 65 minutos, é possível perceber que algumas misturas, como por exemplo V40, V40-20RTM, V40-20MC, no período de 65 minutos, a carga necessária para a deformação

do material é inferior ao período de 15 minutos, isso se deve ao rompimento do material, pois há um aumento da viscosidade da pasta e uma redução da sua capacidade plástica.

As argamassas V40-10RTM e V40-20RTM apresentam um comportamento do traçado da curva que se diferencia das demais, onde se observa uma oscilação da carga aplicada. Cardoso (2009) explica que este fenômeno está relacionado ao atrito entre as placas e a argamassa, além dos mecanismos internos de deformação e fluxo do material, principalmente quando a separação de fases atua aumentando a concentração localizada de agregados e o atrito na região central. Esse comportamento indica que o material apresenta altos níveis de cisalhamento interno.

Com base nas curvas formadas pelo ensaio no tempo de 65 minutos é possível notar um comportamento singular da argamassa V40-20RTM, pois apresentou um deslocamento em torno de 0,75 mm sob o efeito de uma carga de 200N, sendo caracterizado pelo enrijecimento por deformação, predominando o estágio III.

De acordo com Stolz (2011), o resultado do squeeze flow pode apresentar indícios da aplicabilidade das argamassas estudadas, sendo assim, o estágio plástico (II) é o desejável para que se tenha uma boa aplicabilidade, no entanto, é necessário um equilíbrio entre o estágio II e III, para que haja um enrijecimento adequado da argamassa e ela não venha a escorregar durante a aplicação. Na análise das argamassas com 60% de vermiculita, é possível perceber que elas apresentem um deslocamento acentuado para a direita em relação à argamassa de referência, isso mostra que a quantidade de água demandada para a mistura através da mesa de consistência foi superior à necessária, fazendo com que a argamassa permanecesse no estágio plástico (II).

As argamassas com V60-20MC e V60-20RTM, no tempo de 15 minutos (Fig. 33), apresentaram o mesmo comportamento onde se pode observar a sobreposição dos gráficos. Com o decorrer do tempo, as misturas com MC apresentaram uma maior deformação. É possível notar o seu comportamento plástico, que nessa proporção a mistura com MC demandou uma maior quantidade de água em comparação com a mistura com RTM.

As argamassas com 80% de vermiculita, a princípio, apresentam um comportamento bem mais fluido que a argamassa de referência. No entanto, esse comportamento da curva se deve a uma consistência seca, fazendo com que,

inicialmente, houvesse um grande deslocamento sob aplicação de baixa carga para realizar a compactação da argamassa, para só após começar o escoamento de fato. Esse processo pode ser confirmado pelo seu aspecto bastante seco como pode ser percebido na imagem mostrada na Figura 37, confirmando a importância da análise de imagens, além de sinais sonoros que evidenciam atrito entre as partículas durante o ensaio de Squeeze Flow.

Figura 37 – Amostra V80 após ensaio de Squeeze flow tempo = 65 minutos.



Cardoso et al. (2005) afirma que a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem alterar de acordo com a composição dos materiais, teor de água, tamanho das partículas, presença de aditivos, além da configuração de ensaio utilizado. No caso deste trabalho, o comportamento distinto entre as argamassas pode ser justificado pela diferença do agregado utilizado e sua proporção, teor de água, tipo e quantidade de adições minerais que foram adicionados em cada traço da argamassa. Essa diferença comprova a sensibilidade do Squeeze flow para a análise reológica das argamassas, pois aquelas que apresentaram consistências similares através da mesa de consistência resultaram em um comportamento distinto, com variação expressiva no deslocamento quando aplicada uma mesma força. Este fato também foi apontado por Cardoso *et al.* (2005) e Arnold (2011), onde se notou que a capacidade do Squeeze flow detectar pequenas alterações nas características reológicas, além de fornecer um perfil de comportamento de acordo com as solicitações impostas.

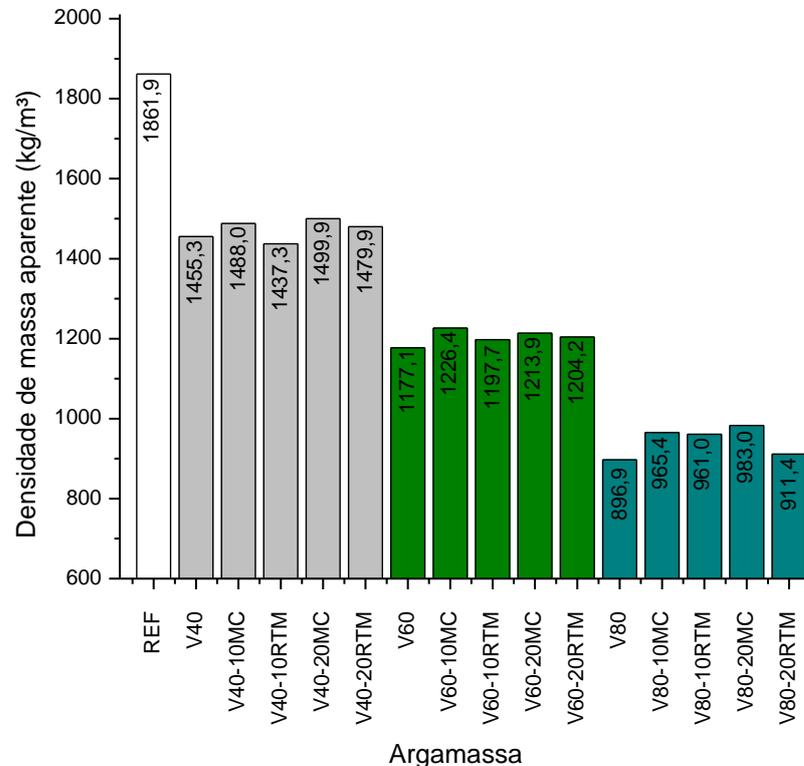
4.2. ANÁLISE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Após o estudo no estado fresco, as argamassas foram submetidas à análise dos seus parâmetros no estado endurecido para verificar a influência da substituição do agregado pela vermiculita, além da adição do MC e RTM. Essas análises e seus resultados estão descritos a seguir.

4.2.1. Densidade da massa aparente

Na Figura 38 é apresentado o resultado do ensaio de densidade de massa aparente.

Figura 38 – Densidade de massa aparente



Como era esperada, a adição de vermiculita trouxe uma diminuição na densidade da argamassa, quanto maior a substituição do agregado pela vermiculita maior foi a redução do seu valor, chegando a 52% quando foi substituído 80% de agregado miúdo por vermiculita. Isso se deve ao fato da baixa massa específica da vermiculita, do mesmo modo que aconteceu na densidade da massa fresca. Na mistura V40, a diminuição na densidade de massa foi em torno de 22%, valor bem próximo ao encontrado por Palamar, Barluenga e Puentes (2015) em argamassa com 50% de vermiculita.

Ao analisar o resultado da densidade de massa no estado fresco e endurecido, é possível notar uma diferença nos resultados devido à evaporação de parte da água de amassamento que se eleva com o aumento de adição de vermiculita. Enquanto na argamassa de referência a redução foi de 12%, nos subgrupos V40, V60 e V80 a redução foi por volta de 17%, 25% e 34%, respectivamente. Dessa forma, ao mesmo tempo em que a quantidade de água necessária para obter a consistência pré-definida é mais significativa nas misturas que apresentam uma maior quantidade de vermiculita

em sua composição, também é mais significativa a evaporação dessa água durante o processo de cura. Esse fator também é observado nos estudos de Cintra (2013), Silva *et al.* (2010) e Xu *et al.* (2015) mesmo sendo analisadas outras proporções de vermiculita.

Outro fator observado é o fato das misturas com adição de MC apresentarem uma densidade mais elevada em relação às misturas com RTM, apesar da diferença não ser acentuada. Silva e Camiteli (2006) apontam que a interferência dos materiais finos nas propriedades da argamassa depende, principalmente, da granulometria e da morfologia das partículas.

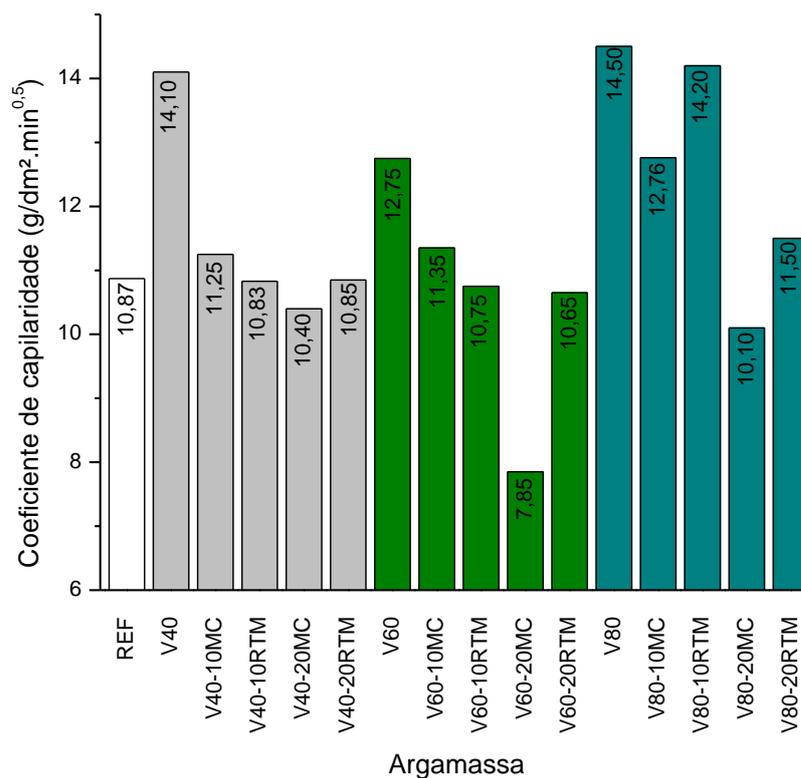
Estudo realizado por Shoukry *et al.* (2016) com argamassa de cimento e vermiculita, através da introdução de até 10% de nanometacaulim não apresentou efeito considerável na da densidade de massa, assim como também nas argamassas estudadas neste trabalho.

Em relação à classificação, segundo a NBR 13.281 (ABNT, 2005), as argamassas devem possuir a sua densidade nas faixas mais baixas da tabela, ou seja, entre 1200 kg/m³ e 1600 kg/m³. Verifica-se que de acordo com a introdução de vermiculita, a classificação da argamassa foi alterada. Dessa forma, a argamassa de referência (REF) é classificada como M5, o grupo da V40 como M4, o grupo V60 como M2 e o grupo V80 por possuir densidade abaixo de 1200 kg/m³ se enquadra como M1.

4.2.2. Absorção de água por capilaridade

Na Figura 39 estão os resultados de absorção de água por capilaridade representados pelo coeficiente de capilaridade.

Figura 39 – Coeficiente de capilaridade das argamassas ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$)



O uso da vermiculita trouxe um aumento na absorção de água por capilaridade, uma vez que a vermiculita aumentou a quantidade de vazios na argamassa, quanto maior a quantidade de vazios, maior a probabilidade de haver comunicação entre eles. Esse comportamento apresenta conformidade com estudo realizado por Cintra (2013), que justifica essa tendência pela alta taxa de absorção do agregado leve.

A mistura V40 apresenta coerência com o resultado obtido por Barros (2018) em misturas com 50% de vermiculita, uma vez que em seu estudo para essa mistura foi obtido um aumento de 30% no valor do coeficiente de capilaridade, enquanto que na mistura V40, aqui analisada, esse valor foi de 29%.

Na análise individual de subgrupos das argamassas com vermiculita, quando houve adições de RTM e MC um menor coeficiente de capilaridade foi obtido, visto que a introdução desses materiais finos acabou refinando os poros da matriz das argamassas, dificultando a ascensão da água por capilaridade. Nakakura (2003) afirma que a existência de poros interligados interfere na capilaridade, uma vez que se os poros forem descontínuos ou ineficazes para o deslocamento do fluido, a permeabilidade por capilaridade será baixa mesmo que a argamassa apresente elevada porosidade. Dessa forma, a adição dos materiais finos na argamassa pode ter causado além de uma

diminuição do diâmetro dos poros, uma descontinuidade entre eles. Diferentemente das argamassas apenas com introdução de vermiculita, em que se acredita haver conectividade entre os poros devido à grande quantidade de vazios, facilitando a ascensão da água pela capilaridade. No entanto, deve se levar em conta que a capilaridade está relacionada com as características dos poros superficiais, e não à porosidade total da argamassa, sendo assim, para o aumento da capilaridade não basta a matriz da argamassa ser porosa, ela deve apresentar comunicação entre os poros e possuir dimensões que favoreçam o efeito da força de capilaridade.

De acordo com Gallegos (1995), poros ativos possuem diâmetros entre 0,1 μm e 5 μm . Poros inferiores a 0,1 μm apesar de possuírem elevada força capilar, eles absorvem quantidades insignificantes de água, já os superiores a 5 μm não possuem força capilar suficiente para vencer os poros existentes na matriz cimentícia.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a relação a/c, pois ela interfere diretamente na porosidade e conseqüentemente na absorção capilar. Como a relação a/c foi definida com base na obtenção de uma consistência fixa (260 mm), esse parâmetro foi variado nas composições. Dessa forma, percebe-se que diversos fatores interferem na absorção de água por capilaridade, e pelo fato das argamassas apresentarem uma estrutura complexa, a sua superfície interna resulta em diferentes formas de transporte de umidade por capilaridade. Sendo assim, estudos macroscópicos tradicionais não são suficientes para entender o comportamento detalhado das argamassas em contato com a água, pois a análise da capilaridade depende da microestrutura do material. No entanto, no caso desse trabalho, não foi explorada a análise da microestrutura dessas argamassas.

4.2.3. Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

Para a análise do desempenho mecânico das argamassas foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão com 28 dias, seus resultados podem ser verificados nas Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Resistência à compressão das argamassas

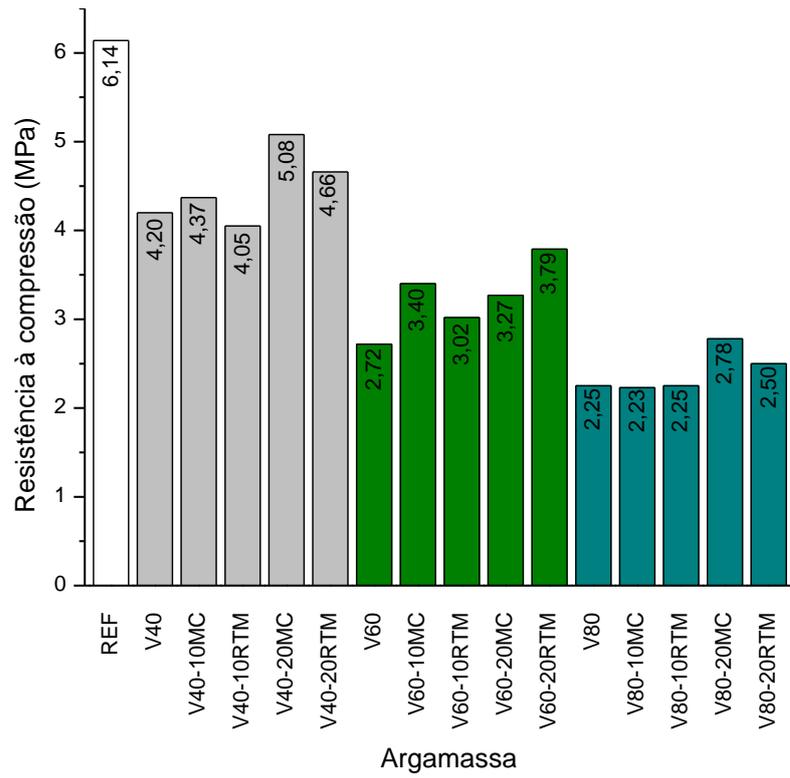
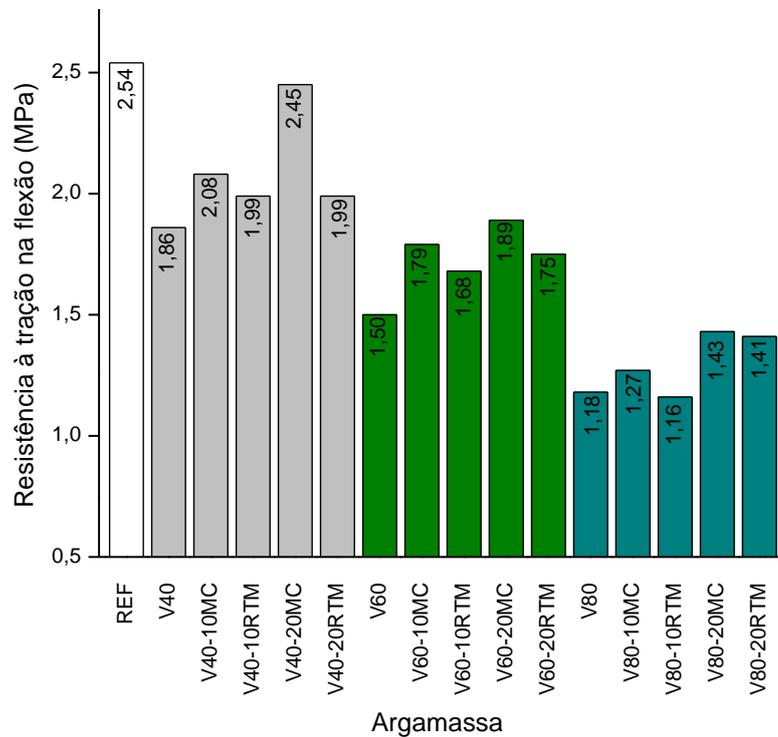


Figura 41 – Resistência à tração na flexão das argamassas



A introdução de vermiculita nas argamassas resultou numa diminuição da resistência à compressão e também na resistência à tração na flexão. Esse resultado é influenciado tanto pelo fato da vermiculita expandida apresentar vazios entre as lamelas

quanto pela demanda elevada de água que não necessariamente é utilizada em sua totalidade pelas reações de endurecimento da argamassa, mas perdida por meio de evaporação ou sucção da base formando poros na argamassa, tornando-a menos resistente. Esse fato pode ser comprovado pela elevada redução entre a densidade no estado fresco e endurecido das argamassas com vermiculita.

Argamassas com 40%, 60% e 80% apresentaram uma redução na resistência à compressão por volta de 32%, 56% e 63%, respectivamente em relação àquela de referência. Então, como esperado, quanto maior a quantidade de vermiculita na argamassa maior a sua perda de resistência mecânica. Isso foi confirmado também por Silva *et al* (2010), Cintra (2013), Palamar, Barluenga e Puentes (2015).

De um modo geral, o uso de RTM e MC resultou em um aumento no valor da resistência à compressão nos subgrupos V40 e V60. Observa-se que as adições causaram o efeito microfíller, uma vez que refinou os poros da argamassa. As misturas com adições de 10% de RTM não apresentaram um ganho significativo de resistência. No entanto, quando esse valor foi elevado para 20% foi possível observar um ganho de resistência de 23,45% no traço com 40% de vermiculita sem adição. Para a mistura com adição de 20% de MC, houve um ganho de 45% de resistência compressão em relação àquela sem adição (V40).

No caso das argamassas que formam o subgrupo V80, a introdução de RTM e MC em sua composição não trouxe um aumento significativo de resistência, esse fator pode ter sido influenciado pela alta demanda de água na composição dessas misturas, além de uma elevada quantidade de vazios, onde nem o percentual de 20% de adição mineral foi suficiente para refinar os poros e conseqüentemente aumentar a resistência da argamassa.

Apesar das argamassas com vermiculita apresentarem uma redução na resistência à compressão, deve-se levar em conta que argamassas para fins de revestimento não necessitam de elevados valores para esse parâmetro. Na realidade, com uma diminuição na resistência à compressão, também há uma diminuição na rigidez, favorecendo a redução de fissuras ao longo da superfície, pois argamassas mais rígidas apresentam menor capacidade de deformar-se sem ruptura, gerando um maior risco de fissuração (BAUER, 2005).

Assim como na compressão, a resistência à tração na flexão também reduziu com o aumento do teor de vermiculita, sendo essa redução de aproximadamente 27%,

41% e 54%, para os grupos de argamassa V40, V60 e V80 respectivamente. No entanto, essa interferência na resistência à tração na flexão foi em proporção menor em relação à resistência de compressão, esse fato também foi comprovado por Silva *et al.* (2010), que encontrou uma diferença média de 10% na redução da resistência entre compressão e flexão, assim como nas misturas analisadas neste trabalho.

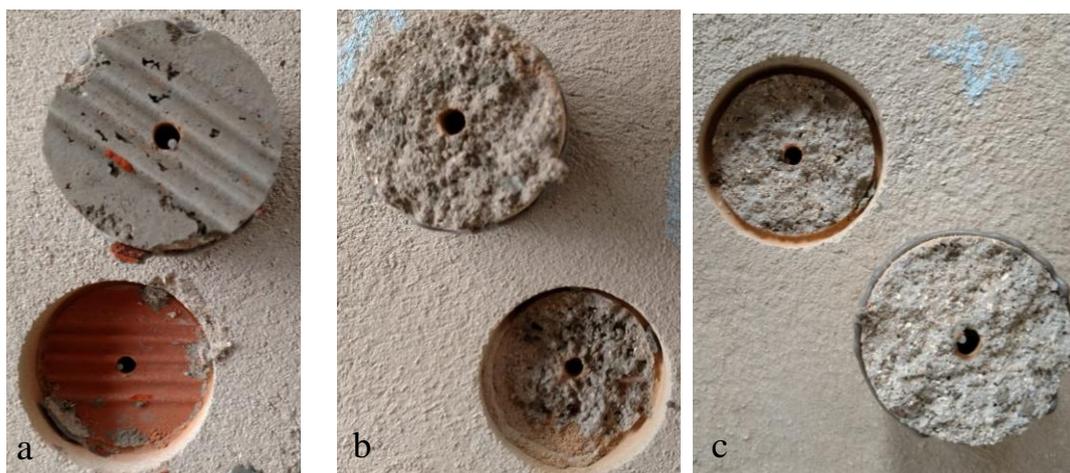
Dessa forma, pode-se concluir que a introdução de vermiculita expandida interfere na resistência à tração a flexão em proporções bem menores que na resistência à compressão. Esse resultado é interessante para as argamassas de revestimento, uma vez que durante sua utilização são impostas solicitações relacionadas à tração.

As adições de MC apresentaram uma maior influência na resistência das argamassas, levando a um aumento na resistência à tração na flexão de 26% para a mistura V60-20MC em relação à V40, enquanto que a V60-20RTM apresentou um aumento de 17%. Assim como aconteceu na compressão, nas misturas com 80% de vermiculita a interferência das adições minerais foi bem menor em relação às demais argamassas.

4.2.4. Resistência de aderência à tração

Em relação às características mecânicas de uma argamassa de revestimento, a resistência de aderência é uma das mais relevantes como objeto de análise, visto que ela representa uma das principais solicitações desse tipo de argamassa. Para essa análise foram selecionados os traços de referência, traços base da introdução de vermiculita (V40, V60 e V80) e para as argamassas com adições foi levado em conta o resultado do ensaio do Squeeze flow que mais se aproximaram da curva da argamassa de referência, dessa forma foram selecionadas as adições de 20% tanto de RTM quanto de MC. Na Figura 42 são apresentadas as imagens obtidas da ruptura no painel após a realização do ensaio.

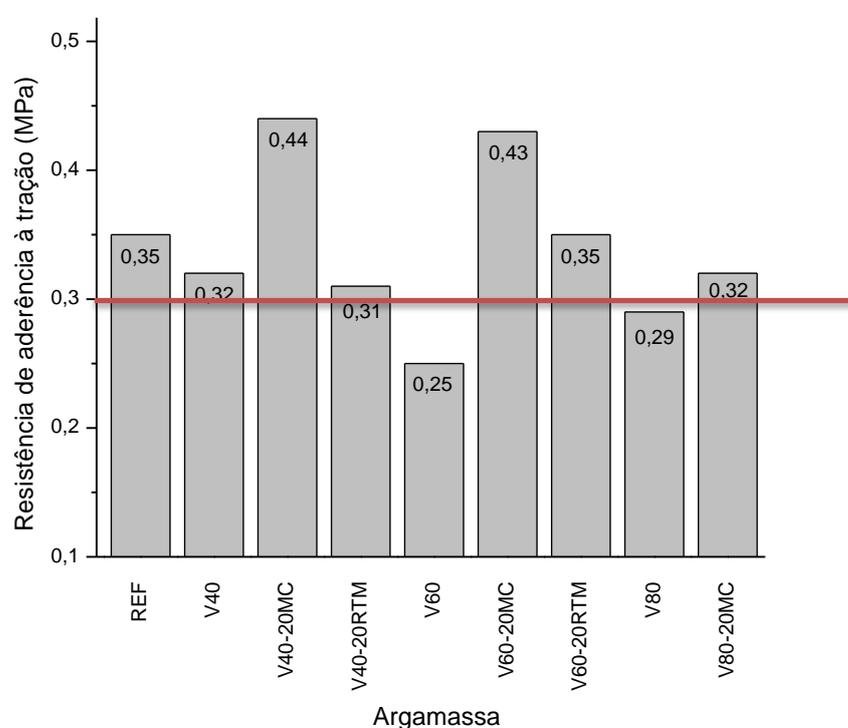
Figura 42 – Rupturas após ensaio de arrancamento



Através da Figura 42 é possível observar o tipo de ruptura que ocorreu durante o ensaio, visto que esse é um fator importante para a adequada interpretação. Dessa forma, é possível observar que houve ruptura substrato/chapisco (a), chapisco/argamassa (b) e na argamassa (c), não ocorrendo ruptura entre cola/pastilha, portanto com base na ruptura nenhum resultado foi desprezado.

Na tentativa de se obter uma maior confiabilidade na interpretação dos dados foi optado por desconsiderar valores que apresentam um desvio absoluto maior que 0,3 MPa, mesmo parâmetro adotado pela NBR 13.279 (2005) para resistência à tração na flexão. Dessa forma, o resultado do ensaio é encontrado na Figura 43.

Figura 43 – Resistência de aderência à tração das argamassas (MPa)



Após a análise dos resultados foi possível observar, em alguns casos, uma grande variabilidade, que é característica desse ensaio. De acordo com Gonçalves (2004), é comum esse ensaio apresentar um coeficiente de variação em torno de 50%, fato que pode mascarar a real resistência do revestimento. Mesmo com essa característica, ele ainda é um dos ensaios mais utilizados para caracterização do revestimento quanto à aderência, e é o único ensaio normalizado pela ABNT para este fim.

Observando as resistências das argamassas apenas os traços V60 e V80 não foram aprovados para o uso em revestimento externo com base na NBR 13.749 (ABNT,

2013). Essas argamassas apresentaram resistência abaixo de 0,3 MPa. Como as argamassas com introdução de vermiculita apresentaram uma quantidade maior de vazios, como já comprovado em análises anteriores neste trabalho, esse fato pode ocasionar uma diminuição de superfície de contato entre argamassa e substrato favorecendo essa redução na aderência. No caso da argamassa V40 houve uma redução de 7% na resistência, ficando ainda dentro do parâmetro aceitável para utilização em paredes externas.

Como esperado, a adição mineral elevou a resistência das argamassas assim como aconteceu na análise das demais resistências mecânicas, bem como o aumento também da densidade de massa. Pois como já comprovado por Koksal, Gencil e Kaya (2015), há uma relação entre a densidade de massa e a resistência mecânica das argamassas, onde a diminuição na densidade causada pela vermiculita reflete na resistência mecânica das argamassas. No entanto, as misturas V40-20MC e V60-20MC, ou seja, contendo vermiculita e metacaulim, mesmo tendo apresentado valores de densidade endurecida menores que aquele da argamassa de referência, na resistência a aderência seu desempenho foi superior àquela de referência. Isso pode ter ocorrido devido à extensão de aderência, ou seja, a razão entre a área de contato efetiva e a área total possível de ser unida, uma vez que a adição de 20% de MC pode ter alterado a área de contato efetiva da argamassa.

4.3. ANÁLISE TÉRMICA DAS ARGAMASSAS

A análise térmica foi realizada nos mesmos traços que foram selecionados para o ensaio de resistência de aderência, através do ensaio da placa quente foi possível obter a condutividade térmica das argamassas, o seu valor está exposto na Figura 44, além da resistividade térmica presente na Figura 45.

Figura 44 – Condutividade térmica das argamassas – K (W/mK)

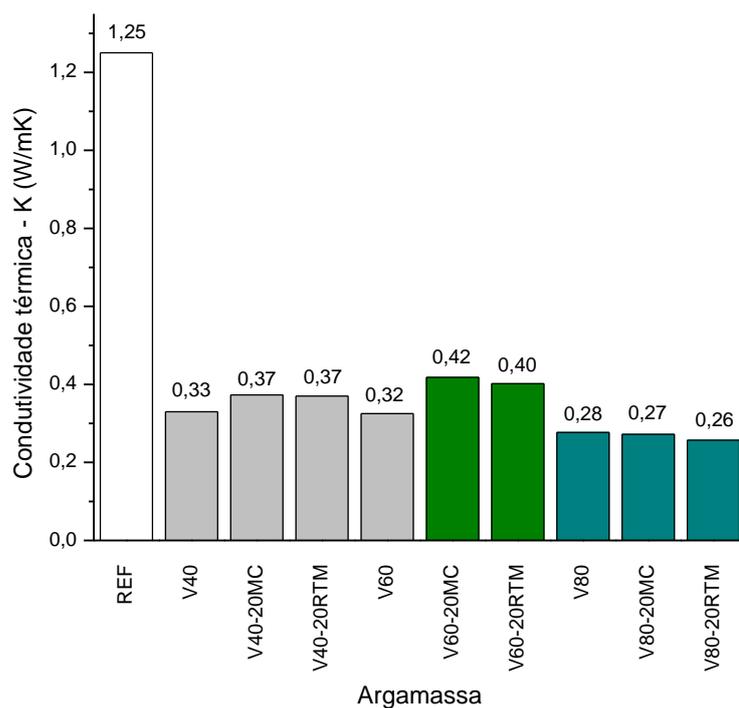
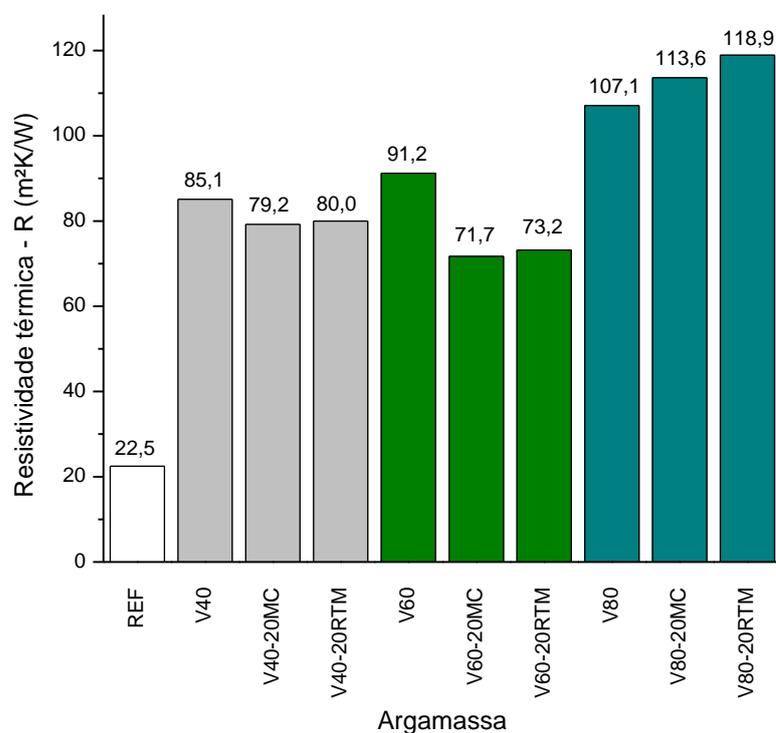


Figura 45 – Resistividade térmica das argamassas



Ao analisar os resultados, é perceptível a diminuição da condutividade térmica gradativa com o aumento de vermiculita na composição, sendo a redução em torno de

73,6%, 74,4% e 77,6% para V40, V60 e V80 respectivamente. Esse comportamento apresenta conformidade com os resultados no estado endurecido discutidos neste trabalho, como no exemplo a densidade de massa, que apresenta uma relação direta com o comportamento térmico da argamassa, quanto menor essa densidade menor também é a condutividade térmica. A vermiculita por ser expandida além de ter uma estrutura lamelar, ainda incorpora ar em seu interior, como a condutividade média do ar é de aproximadamente 0,02 W/m.k, a condutividade térmica efetiva da argamassa diminui.

As adições minerais apresentaram uma influência oposta ao da vermiculita, pois devido a sua finura preencherem parte dos vazios formados no compósito elevando o valor da condutividade térmica. Porém esse aumento do valor da condutividade térmica nessas amostras pode talvez ser insignificante, vistos que esse resultado foi obtido fazendo ensaio apenas em uma amostra para cada mistura. E daí poderia estar dentro na margem de erro numa análise com mais amostras. Observa-se de toda forma que a condutividade dessas argamassas contendo MC e RTM foram bem abaixo da de referência, assim como as outras, indicando o papel preponderante da vermiculita, já que a mesma também está presente em maior volume na mistura. As argamassas com MC resultaram em uma condutividade mais elevada que as argamassas com RTM, por exemplo, a argamassa V60-20MC teve um aumento de 28,6% enquanto a V60-20RTM apresentou 23,7% em relação à V60. Esse comportamento se deve ao empacotamento da mistura, pois a adição foi referente à 20% da massa do cimento, no entanto, a massa unitária do MC é aproximadamente 33% menor que a do RTM, resultando em um volume maior de finos nas argamassas com MC.

O valor obtido para a argamassa de referência apresenta próximo ao valor da NBR 15.220 (2005) que aborda para uma argamassa comum uma condutividade térmica de 1,15 W/m.k. Os valores obtidos por Cintra (2013) para argamassa com vermiculita foi por volta de 0,35 W/m.k, resultado próximo das argamassas aqui estudadas.

Com o aumento de vermiculita, a dificuldade da argamassa em conduzir calor também aumenta. Dessa forma, o desempenho térmico das argamassas estudadas tem um incremento de até cinco vezes no caso da argamassa V80-20RTM. Esse comportamento também foi obtido por Nascimento (2008) e Koksai et al. (2013). A incorporação de minerais nos traços estudados ocasiona a diminuição de vazios final das argamassas endurecidas, diminuindo assim o desempenho térmico gerado pela vermiculita, esse comportamento é mais expressivo no subgrupo V60, onde a adição de

minerais fez com que a argamassa apresentasse um comportamento térmico similar ao grupo V40 mesmo apresentando 20% a mais de vermiculita em sua composição.

No aspecto geral, através da análise da condutividade térmica para as argamassas com vermiculita foi possível constatar sua baixa condutividade com valores entre 0,4 W/mK e 0,26 W/mK, em contrapartida com a argamassa de referência que apresentou 1,25 W/mK e apresentando valores abaixo da argamassa celular (0,4 W/mK) e similar ao gesso com agregado leve (0,3 W/mK) com base na NBR 15.220 (2005).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados apresentados aqui é possível destacar os seguintes pontos:

- Através da análise dos materiais é possível constatar a similaridade entre as características físicas do metacaulim (MC) e do resíduo tijolo moído (RTM) utilizado, apresentando uma massa específica em torno de 2,58 g/cm³.
- De acordo com o ensaio da mesa de consistência, as misturas com adição RTM necessitaram de uma quantidade maior de água para obter a consistência pré-fixada de 260 mm em relação às com MC, o que pode ser explicado com base na análise granulométrica desses materiais. Uma vez que o RTM apresenta uma maior proporção de partículas finas.
- Como era de se esperar, as misturas com vermiculita demandaram um teor de água superior à de referência. A argamassa de referência apresentou esse parâmetro por volta de 16%, enquanto as argamassas V40, V60 e V80 apresentaram um teor de água no valor de 28%, 40% e 80%, respectivamente.
- A introdução de vermiculita nas argamassas exerceu grande influência nas propriedades das misturas, uma vez que sua estrutura lamelar e sua absorção de água interferiram na densidade, teor de ar e água dos traços, fator esses que exercem influência direta nas demais propriedades da argamassa. A redução na densidade do estado fresco para o endurecido chega a 34% devido à evaporação de parte da água no processo de cura.
- Com base no ensaio da mesa de consistência, todas as misturas deveriam apresentar um comportamento reológico similar, pois foi adicionado o teor de água necessário para que todas obtivessem o mesmo espalhamento. No entanto, esse comportamento não foi validado através do ensaio do squeeze flow. Essa diferença entre os resultados dos ensaios se deve ao fato de que a mesa de

consistência não considera a natureza multifásica e reativa da argamassa, esbarrando em limitações conceituais e acaba por não representar comportamento do material. Por outro lado, o ensaio de squeeze flow é mais sensível e fornece resultados de acordo com as solicitações as quais as argamassas são impostas. Através do Squeeze flow, é perceptível que a adição de vermiculita influencia na viscosidade da argamassa, diminuindo-a. O elevado teor de água nessas argamassas favorece esse comportamento.

- O princípio de adicionar MC e RTM nas argamassas com intuito de melhorar seu desempenho mecânico foi positivo para as misturas com 40% e 60% de vermiculita, pois resultou em um aumento na resistência. Nas argamassas com 80% de vermiculita, a quantidade dessas adições minerais não foi o bastante para compensar a grande demanda de água nem para refinar os poros, visto que as adições minerais não exerceram grande influência na resistência mecânica dessas argamassas.
- Apesar da redução da resistência mecânica (compressão e flexão), a resistência de aderência de tração, apenas as argamassas V60 e V80 não apresentaram desempenho satisfatório para uso em revestimento externo.
- O uso de vermiculita, por tornar a argamassa mais porosa, favorece o desempenho térmico, chegando a atingir um valor de condutividade e resistividade na ordem de 0,28 W/m.k e 107,1 m²/kW, ou seja, diminuição de condutividade de até 81% para a mistura V80.
- Uma vez que a adição de minerais refina os poros, no geral, ela acaba interferindo no desempenho térmico. Mas no subgrupo V80, essa adição não foi o bastante para prejudicar a resistividade térmica, além de favorecer o desempenho de aderência, possibilitando o uso das argamassas com 80% de vermiculita como revestimento externo.

Ao realizar uma análise global dos resultados, é possível notar que a substituição de apenas 40% de vermiculita na argamassa já resulta em uma melhora significativa em relação aos parâmetros térmicos, além de atender à resistência de aderência à tração recomendada para uso como revestimento externo, além de apresentar características de trabalhabilidades próximas à argamassa de referência.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do que foi estudado neste trabalho, pode-se expandir a pesquisa com relação aos seguintes pontos:

- Analisar a incorporação de aditivos na argamassa com o intuito de diminuir o aumento no teor de água com a introdução de vermiculita;
- Realização de estudos microscópicos da matriz da argamassa;
- Realizar a associação dos resultados do ensaio de Squeeze flow com o resultado prático do serviço de revestimento através de um profissional qualificado para tal;
- Realizar ensaios em campo, com a influência do ambiente e da estrutura em funcionamento, para avaliação do desempenho térmico da argamassa;
- Trabalhar com binário de vermiculita com diferentes granulometrias (fina e superfina) tentativa de definição de um traço adequado com estes dois materiais;
- Analisar a influência da vermiculita expandida na durabilidade das argamassas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM–Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em<<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=2&submenu=18>> Acesso em: Janeiro de 2018

AFNOR NFX10-021 - **Determination de conductivite thermique avec Ia plaque chaude gardee pour des echantillons symetriques,**

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento -b.** 2002. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília.

ANDREJKOVICOVÁ, S., VELOSA, A. L., FERRAZ, E., ROCHA, F. **Influence of clay minerals addition on mechanical properties of air lime–metakaolin mortars** Construction and Building Materials 65 (2014) 132–139

ANICER–Associação Nacional da Indústria de Cerâmica. Disponível em<http://anicer.com.br/index.asp?pg=institucional_direita.asp&secao=6&ex=2>. Acesso em: Janeiro de 2018.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** 2005. 187p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARAÚJO, J. M. **Contribuição ao Estudo das Propriedades Físico Mecânicas das Argamassas de Revestimento.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2004, 175p.

ARNOLD, D. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13280,** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, (1995).

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios, 8p. 2006

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 6p. 2009

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 6p. 2003

NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro:ABNT, 1991

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas — Requisitos. Rio de Janeiro, (2003)

____. **NBR 11355**: Vermiculita expandida — Análise granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, (2015)

____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, (2014)

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

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

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

____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

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

____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010

____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

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

____. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15259**: Argamassa 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 15575**: Edificações habitacionais - desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

____. **NBR 16605**: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 4p. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-270-92a. **Standard specification for mortar for unit masonry**. Philadelphia, 1999

ASTM C177-76 - Standard test method for means steady-state thermal transmission properties by of the guarded hot plate, 1976.

- BAÍA, L. L. M., SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa**. 2.ed. São Paulo: O Nome da Rosa Ed., 2001. 82 p
- BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H.. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4ª edição. Editora O Nome da Rosa. Setembro de 2008
- BARNES et al. (1989) - **An Introduction to Rheology**, Holanda, Elsevier, cap.2, pp.16.
- BANFILL, P. F. G. The reology of fresh cement and concrete – a review. In: International Cement Chemistry Congress, 11., 2003, Duban. **Anais...** Duban, 2003.
- BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar**. Magazine of Concrete Research, 43 (154), p 13 – 21, 1991
- BANFILL P. F. G. **Rheology of fresh cement and concrete**. Rheology Reviews, 2006, 61-130
- BARROS, I. M. da S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. Natal, 2018. 86p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
- BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005. 92 p.
- BAUER, E. et al. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC,2005. p. 95-105.
- BORTOLUZZO, C.W. Correlações entre as propriedades mecânicas em argamassas mista e aditivadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1999, Vitória. **Anais...** , Vitória, 1999. v.1, p.203 –217.
- BSI BS-874 - Guarded hot plate, Section 2.1, 1986.
- CAMPANELLA, O. H.; PELEG, M. **Squeezing flow viscosimetry of peanut butter**. Journal of Food Science 52 (1), p. 180-184, 1987.
- CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. Avaliação do tipo de preparo da base nas características superficiais do substrato e dos revestimentos de argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Salvador, 2000. **Anais do ENTAC 2000 - modernidade e sustentabilidade**.
- CARASEK, H. **Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. 285p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
- CARASEK, H. **Argamassas**. Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed.

IBRACON, 2010. V.1 & v.2.p. 863-891 ISBN 978-85-98576-14-5 e 978-85-98576-15-2

CARASEK, Helena. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, Ibracon, 2007.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M., **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, 2001, Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, p. 43-67. 2001.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. 170p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CARNEIRO, V. L.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B. **Influência do Uso de Resíduo de Cerâmica Vermelha e Finos de RCD como Substituição Parcial de Cimento, para Produção de Argamassas**. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, Feira de Santana, 2009. Anais... Feira de Santana: UEFS, 2009

CAVANI, G. R.; ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M. **Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. Anais... Salvador, 1997. p. 110-119.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. Tese para doutorado na EPUSP. São Paulo, São Paulo 2009

CARDOSO, F.A. et al. (2014) - **Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry**, Cement and Concrete Research, vol. 57, pp. 79–87.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento - Manual de utilização. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v. 1, p. 1-29, 2010, ISSN 0103-9830.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6. International Symposium on Mortars Technology, 1. 2005. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005, p. 121-143.

CARVALHO, C. M., (2016) **Caracterização de resíduos da indústria cerâmica e seu emprego em argamassas de cimento Portland** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2016.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6.; 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CESTARI, D. J. - Adição do copolímero acetato versatato em argamassa de revestimento, Trabalho de graduação da Faculdade de Engenharia e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Bauru, 1997.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus.** 2013. 182f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2013

CINTRA, C. L. D., PAIVA, A. E. M., BALDO, J. B. **Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregado de borracha reciclada de pneus – Propriedades relevantes.** Cerâmica 2014:60:69-76.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CASCUDO, H. C., - Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro.** Brasília: DNPM, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Disponível em: http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Resenha%20Mensal%20-%20Outubro%202017_vf.pdf Acesso em: Novembro de 2017

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. **Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review.** Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics 132, p. 1-27, 2005.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. **Rheological Lab Testing of Building Formulations.** ConChem Conference, Düsseldorf, 1994

GONG, J., DUAN, Z., SUN, K., XIAO, M. (2016) **Waterproof properties of thermal insulation mortar containing vitrified microsphere.** Construction and Building Materials 123:274-280

ISAIA, Geraldo S. **Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das estruturas de concreto.** Santa Maria/RS, 2002.

INCA, 2018

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudo e procedimentos de execução.** São Paulo: Pini, 1994.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudo e procedimentos de execução.** 2 ed. São Paulo: Pini, 2005.

FREITAS, C., **Argamassa de revestimento com agregados miúdos de britagem de região metropolitana de Curitiba: Propriedades no estado fresco e endurecido.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 2010.

GALLEGOS, H. **Adhesión entre el mortero y las unidades de albañilería.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia, 1995. p. 117-133

GALASZEWSKI, J. (2008) - **Influence of Cement Properties on Rheology of Fresh Cement Mortars without and with Superplasticizer**, Architecture Civil Engineering Environment, The Silesian University of Technology, Poland.

GONÇALVES, S.R.C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos de argamassa – estudo de caso.** 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

KAZMIERCZAK, C. de S. Capítulo 18 – Produtos de cerâmica vermelha. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** Vol 1. 2ª Edição atualizada e ampliada. IBRACON. São Paulo, 2010

KHATIB, J.M.; WILD, S. (1996) **Pore Size Distribution of Metakaolin Paste.** Cement and Concrete Research, 26, 1545-1553

KOEHLER, E. P.; FOWLER D. W. **Summary of concrete workability test methods.** ICAR Report 105.1 International Center of Aggregates Research, Austin, 2003.

KOKSAL F, del COZ DIAZ JJ, GENCEL O, ALVAREZ Rabanal FP. **Experimental and numerical analysis of new bricks made up of polymer modified-cement using expanded vermiculite.** Comput Concr 2013;12(3):19–36.

KOKSAL, F., GENCEL, O., KAYA, M., (2015). "**Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures.**" Construction and Building Materials 88: 175-187.

KOKSAL, F., SERRANO-LÓPEZ, M. A., SAHIN, M., GENCEL, O., LÓPEZ-COLINA, C. (2015) **Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures.** Materials and Structures 48: 2083-2092

KOLENDA F.; RETANA, P.; RACINEUX, G.; POITOU, A. **Identification of rheological parameters by the squeezing test.** Powder Technology, v. 130, 2003, p. 56– 62

KRUS, M., HANSEN, K. K., KÜNZEL, H. M.; (1997) **Porosity and liquid absorption of cement paste,** Materials and structures 30: 394-398.

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

- MEETEN, G.H. **Yield stress of structured fluids measured by squeeze flow.** *Rheologica Acta* 39 (2000)399-408.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008
- MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. **Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze flow.** *Journal of Materials Science* 29, p. 1374-1381, 1994.
- MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S.; Influência das propriedades mecânicas das argamassas na fissuração de revestimentos com RCD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., São Paulo, 2003. **Anais.** São Paulo, ANTAC, 2003.
- NAKAKURA, E. H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a Meruc.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), USP, São Paulo, 2003
- NASCIMENTO, M. C. B. DO; (2008). **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2008.
- NEVILLE, A. M.; **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.
- NORONHA, L. L., (2014) **Elementos construtivos e de proteção térmica à base de gesso e resíduos agroindustriais.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2014.
- ÖSKAN, N.; OYSU, C.; BRISCOE, B. J.; AYDIN, I. Rheological Analysis of Ceramic Pastes. **Journal of the European Ceramic Society**, [S.I.], v. 19, p. 2883-2891, 1991.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico.** Fazenda Arte Editorial, 2000. 195 p
- PALAMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J., (2015) Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. *Construction and Building Materials* 2015:75: 306-314
- PÓVOAS, Y. V. **Avaliação da formação de “película” na argamassa colante e sua influência na adesão.** São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.
- PEREIRA, E., BARROS, J., CAMÕES, A., **Betão Autocompactável Reforçado com Fibras de Aço. Método de concepção e propriedades mecânicas.** Técnica. Maio, 2004
- RIO 164/87 - NPC, LNEC, 1987;

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos, 2001. 187p Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

RABEHI, B.; BOUMCHEDDA K.; GHERNOUTI, Y. Study of calcined halloysite clay as pozzolanic material and its potential use in mortars. **International journal of the Physical Sciences**, v.7, n. 31, p.5179-5192, Aug. 2012

RAMACHANDRAN, V. S, e FELDMAN, R. F. **Cement Science**. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, Science and technology**. 1. Ed. Park Ridges, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. P. 211-68.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação Atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE): 2002. p.1-19

RIBEIRO, R.A., SILVA L.M., FERREIRA, V.M., LABRINCHA, J.A. **Estudo da Influência de Cargas Leves nas Propriedades de uma Argamassa Bastarda**. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2005;

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

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, M. V. **Sensibilidade de argamassas de revestimento ao procedimento de mistura**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8, 2009, Curitiba. Anais... Curitiba: SBTA, 2009.

ROMANO, R.C.O.; TORRES, D.R.; PILEGGI, R.G. **Impact of aggregate grading and airentrainment on the properties of fresh and hardened mortars**. *Construction and Building Materials*, v. 82, n. 1, p. 219-226, mai. 2015, ISSN 0950-0618.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**, 2. ed. revisada e ampliada, São Paulo: Edgard Blücher, 1992

SCARTEZINI, L.M.B. **Influência do tipo de preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2002.

SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; MOULI, M.; KHELAFI, H. BENOSMAN. **Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar**. *Powder Technology*. 314–323, 2014.

SHOUKRY, H., KOTKATA, M. F., ABO-EL-ENEIN, S.A., MORSY, M.S., SHEBL, S.S. (2016) **Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin**. *Construction and Building Materials* 2016:112: 276–283

- SILVA, L. M., RIBEIRO, R. A., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. (2010). **"Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar."** *Cement and Concrete Composites* 32(1): 19-24.
- SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XI. 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, 2006. p. 4343-4358
- SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006
- SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- SOUZA, P. S. L. **Verificação da Influência do Uso de Metacaulim de Alta Reatividade nas Propriedades Mecânicas do Concreto de Alta Resistência.** 203 f. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering.** Freeman Press, USA, 1996.
- STOLZ, C. M. **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N.; LANOS, C. **The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability.** *Cement and Concrete Research*, 35, 2005. p. 1891– 1899
- UGARTE, J. F. de O., et al (2004) – **"Comparação Estatística do Fator de Expansão de Concentrado de Vermiculita"**, CETEM/MCT, 8p.
- VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concreto.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2002.
- VU, D. D.; STROEVEN, P. BUI, V. B. **Strength and Durability Aspects of Calcined Kaolin Blended Portland Cement Mortar and Concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, p. 471-478, 2001.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, *Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos.* 2018.
- MACIEL, L. L. BARROS, M. M. S.B. SABBATINI, F.H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externas e tetos.** , EPUSP, São Paulo ,1998.

MATTANA, A. J.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. M. M.; **Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimentos.** Revista Ambiente Construído, v. 12, n.4, 2012. ISSN 1678-8621

MEETEN, G. H., **Yield stress of structured fluids measured by squeeze flow.** Rheol. Acta 39, 399–408 (2000).

KAZMIERCZAK, C. S. ; BREZEZINSKI, D. E. ; COLLATTO, D. **Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa,** Estudos Tecnológicos, V. 3, n° 1 47- 58. 2007.

PAIVA, H. (2005) - **Caracterização reológica de argamassas,** Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro, Aveiro.

PILEGGI, R.G. et al., **Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas.** e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 3, n. 2, p. 62-76, Novembro 2006.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras.** 2. ed. rev. São Paulo: Edgar Blücher/Ed. Universidade de São Paulo, 1989, 3v. v.1.

TEIXEIRA, M. (2013) - **Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação da edificação,** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Florianópolis, 1995. 197p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

VITTORINO, F.; SATO, N. M. N.; AKUTSU, M. **Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas.** Curitiba: ENCAC – COTEDI. nov. 2003.

XU J, CHU H, XU Y, et al. **Prediction of compressive strength and elastic modulus of expanded polystyrene lightweight concrete.** Mag Concr Res. 2015;67(17):1–9

YOSHIDA, A. T., BARROS, M. M. B. de. **Caracterização de argamassas no estado fresco – peculiaridades na análise de argamassas industrializadas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995. Goiânia. Anais... Goiânia, 1995. p. 53- 62.

WÉSTERHOLM, M. (2006) - **Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate,** Dissertação de Licenciatura em Engenharia Química, Universidade Técnica de Luleå, Luleå

Zampieri, V. A. **Mineralogia e Mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas,** Instituto de Geociências-USP, São Paulo 1989. 191p. Dissertação Mestrado.