



;

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

LAÍS BENTO DE ANDRADE

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO UTILIZANDO RESÍDUO DE CAULIM**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

LAÍS BENTO DE ANDRADE

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO UTILIZANDO RESÍDUO DE CAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG como requisito para encerramento da componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo.

CAMPINA GRANDE – PB

2019

LAÍS BENTO DE ANDRADE

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO UTILIZANDO RESÍDUO DE CAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG como  
requisito para encerramento da componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Apresentado e aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo - UFCG  
Orientadora

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carina Silvani - UFCG  
Examinador interno

---

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azerêdo - UFPB  
Examinador externo

---

Eng. Francisco de Assis da Costa Neto  
Examinador externo

CAMPINA GRANDE – PB  
2019

Dedico este trabalho à minha querida  
mãe, Aldanete Canuto.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar meu caminho e me dar forças para superar as dificuldades.

À minha mãe, Aldanete Canuto, a mulher mais forte que conheço e meu espelho, por sempre acreditar no meu potencial e pelo apoio imensurável. Agradeço por ter proporcionado todas as condições possíveis para que eu chegasse até aqui e conquistasse o *nosso* sonho da graduação.

À minha irmã e melhor amiga, Lílian Bento, por segurar minha mão nos momentos difíceis, sempre falando palavras de conforto e incentivo, fazendo tudo isto com um senso de humor único.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Aline Azerêdo, pela orientação e paciência, fornecendo todas as ferramentas necessárias para esta pesquisa e para o Laboratório de Estruturas II.

À equipe e infraestrutura dos Laboratório de Estruturas II e Laboratório de Engenharia de Pavimentos, pela disponibilidade para realização dos ensaios, em especial ao Engenheiro Francisco de Assis e a Ana Carolinne pela parceria.

À empresa de caulim do município de Juazeirinho-PB que forneceu os resíduos de caulim utilizados neste trabalho.

Aos professores da graduação por todo conhecimento passado, em especial Dayse Luna, Andréa Rodrigues e Marília Marcy, que me inspiram como profissionais.

A Emmanuel Farias, meu grande amigo, pela paciência e incentivo e por acreditar em mim quando eu não acreditei.

Aos amigos do curso de Engenharia Civil, Thércyo, Emanuel Pedro, Alisson, Breno, Indrigny, Jessiane, João Vitor e tantos outros, pelos projetos concluídos, pelas dúvidas sanadas e por compartilhar das dificuldades dos fins de período.

Aos meus amigos que tive a sorte de conhecer no curso de Engenharia de Minas, em especial Ana Clara, minha grande amiga, José Igor, Natália, Jaine, Taynara, Duda e a todos do grupo TurmaLinda.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho e conclusão da graduação.

## RESUMO

A busca por produtos sustentáveis tem se tornado um fator importante para o futuro da construção civil em razão da quantidade de recursos naturais limitados. Por este motivo, muito é estudado sobre o aproveitamento de resíduos em materiais de construção. Dentre os vários resíduos que vem sendo estudados com esta finalidade, tem-se aquele oriundo da produção de caulim. O caulim é uma rocha composta pelo argilomineral caulinita, utilizado em vários setores industriais do país. A extração e o processamento deste mineral são geradores de resíduos, sendo estes muitas vezes descartados de forma não planejada. Existem estudos sobre potencial do resíduo de caulim e sua aplicabilidade em materiais alternativos na produção de concretos, blocos e argamassas. Com o intuito de contribuir para estas pesquisas, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do resíduo de caulim nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido de argamassas. Para isto, foram estudados dois tipos de resíduos de caulim, em separado: o fino (RF), avaliado como substituição da cal hidratada, e o grosso (RG), como agregado miúdo. Os traços escolhidos para este estudo foram 1:1:6 e 1:6 em volume, variando a proporção de resíduo em 50% e 100% com os materiais convencionais. Também foram utilizados nas misturas de argamassa aditivo plastificante e metacaulim (MC). A metodologia consistiu em caracterizar os materiais de partida, nas propriedades físicas (massa unitária, massa específica e granulometria), obter dados sobre a composição química (fluorescência de raios-x) e mineralógicas (difração de raios-x). Além disso, avaliou-se as propriedades das argamassas no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade). Os resultados mostraram bom desempenho mecânico e um maior consumo de água de amassamento das argamassas constituídas por resíduo. O uso de aditivo plastificante contribuiu para a redução do fator água/aglomerante e para o aumento da resistência à compressão, comparado às argamassas de referência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo de caulim. Argamassa. Aditivo plastificante. Metacaulim.

## ABSTRACT

The search for sustainable products has become an important factor to the future of construction due to the limited amount of natural resources. For this reason, there are many studies about the use of waste in building materials. Among the several studies about wastes, there are those from kaolin production. Kaolin is a rock composed by kaolinite, which is used in various industrial sectors of the country. The extraction and processing of this mineral are waste generators, that are often unplanned discarded. There are studies on the potential of kaolin residue and its applicability in alternative materials in the production of concretes, blocks and mortars. In order to contribute to this research, this paper aims to evaluate the influence of kaolin residue on properties in the fresh and hardened state of mortars. For this, two types of kaolin residues were studied separately: the fine (RF), evaluated as hydrated lime substitution, and the coarse (RG), as fine aggregate. The traces chosen for this study were 1:1:6 and 1:6 in volume, modifying the residue ratio by 50% and 100% with conventional materials. There were also used in the mortars plasticizer additive and metakaolin (MC). The methodology consisted of characterizing the starting materials, physical properties (unit mass, specific mass and particle size), obtaining data on chemical (x-ray fluorescence) and mineralogical (x-ray diffraction) composition. In addition, the properties of fresh mortars (consistency index, fresh mass density and incorporated air content) and hardened properties (bulk density, compressive strength and capillary water absorption) were evaluated. The results showed good mechanical performance and a higher kneading water consumption of the mortars constituted by residue. The use of plasticizer additive contributed to the reduction of the water/cement factor and to the increase of compressive strength compared to the reference mortars.

**KEYWORDS:** Kaolin residue. Mortar. Plasticizer additive. Metakaolin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indústria de extração e beneficiamento de caulim.....	17
Figura 2 – Fluxograma do Beneficiamento de Caulim.....	19
Figura 3a – Etapas de Separação do Beneficiamento.....	19
Figura 3b – Segunda <i>Borra</i> . ....	19
Figura 4 – Tanques de Decantação.....	20
Figura 5a – Prensagem do caulim.....	20
Figura 5b – Secagem do caulim. ....	20
Figura 6 – Granulometria do CP V.....	31
Figura 7 – Granulometria do MC. ....	31
Figura 8 – Resíduo fino de caulim ( <i>borra</i> ). ....	32
Figura 9 – Recipiente utilizado na determinação da massa unitária dos materiais finos. ....	33
Figura 10 – Curva granulométrica da areia. ....	34
Figura 11 – Curva granulométrica do resíduo de caulim grosso (RG).....	34
Figura 12 – Granulometria do resíduo fino de caulim.....	35
Figura 13 – Granulometria da cal CH-I.....	36
Figura 14 – DRX do resíduo de caulim fino. ....	36
Figura 15 – Misturador elétrico e equipamentos auxiliares no preparo das argamassas.....	39
Figura 16 – Mesa de Consistência.....	39
Figura 17 – Espalhamento da argamassa de resíduo grosso de caulim. ....	40
Figura 18 – Cura úmida dos corpos-de-prova. ....	41
Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão nos corpos-de-prova.....	42
Figura 20 – Ensaio de Absorção de água por capilaridade.....	43
Figura 21 – Argamassa de cimento e resíduo grosso de caulim (1:6). ....	46
Figura 22 – Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas com RF e de referência.....	46
Figura 23 – Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas com RG e de referência. ....	47
Figura 24 – Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas com RF. ...	48
Figura 25 - Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas de referência. ....	48
Figura 26 – Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas com RG.....	49

Figura 27 – Resistência à compressão das argamassas com RF.....	50
Figura 28 - Resistência à compressão das argamassas de referência. ....	50
Figura 29 – Resistência a compressão das argamassas com RG. ....	51
Figura 30 – Gráfico de absorção por capilaridade ( $g/cm^2$ ) versus o tempo ( $min^{1/2}$ ) para argamassas com RF e de referência.....	52
Figura 31 – Gráfico de absorção por capilaridade ( $g/cm^2$ ) versus o tempo (min) para argamassas com RG e de referência. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais Utilizados.....	29
Tabela 2 – Composição química (%) da cal.....	29
Tabela 3 – Ensaio e normatização da caracterização física dos materiais.....	30
Tabela 4 – Resultados da caracterização física dos materiais constituintes.....	33
Tabela 5 – Dosagem das argamassas com RF.....	37
Tabela 6 – Dosagem das argamassas com RG.....	37
Tabela 7 – Dosagem das argamassas de referência.....	37
Tabela 8 – Métodos de ensaios nas argamassas e normas regulamentadoras.....	38
Tabela 9 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas moldadas com RF.....	44
Tabela 10 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas de referência.....	44
Tabela 11 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas moldadas com RG.....	45
Tabela 12 – Classes para densidade de massa aparente no estado endurecido.....	49
Tabela 13 – Coeficiente de Capilaridade (C) para as argamassas estudadas.....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - Óxido de alumínio ou alumina

$\text{CaO}$  - Óxido de cálcio

$\text{H}_2\text{O}$  - Água

cm - Centímetros

$\text{cm}^2$  - Centímetros quadrados

mm - Milímetro

g - gramas

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  - Óxido de ferro III ou hematita

$\text{kg/m}^3$  - Quilograma por metro cúbico

$\text{K}_2\text{O}$  - Óxido de potássio

$\text{MgO}$  - Óxido de magnésio

MPa - Megapascal

$\text{SiO}_2$  - Dióxido de silício ou sílica

$\text{SO}_3$  - Trióxido de enxofre

$\text{TiO}_2$  - Dióxido de titânio

$\mu\text{m}$  - Micrômetro

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
2.1	Caulim .....	16
2.2	Resíduo de caulim .....	17
2.3	Utilização do resíduo de caulim em argamassas .....	21
2.4	Materiais constituintes das argamassas .....	22
2.4.1	Cimento.....	22
2.4.2	Agregados .....	23
2.4.3	Cal.....	24
2.4.4	Aditivos.....	24
2.4.5	Adições minerais.....	25
2.4.5.1	Incorporação de metacaulim nas argamassas .....	26
2.5	Propriedades das argamassas.....	26
2.5.1	Trabalhabilidade .....	26
2.5.2	Consistência .....	27
2.5.3	Retenção de água .....	27
2.5.4	Densidade de massa no estado endurecido .....	27
2.5.5	Resistência mecânica .....	27
2.5.6	Aderência .....	28
2.5.7	Permeabilidade por capilaridade.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
3.1	Materiais .....	29
3.2	Métodos .....	30
3.2.1	Caracterização dos materiais constituintes .....	30
3.2.1.1	Caracterização física .....	30
3.2.1.2	Caracterização mineralógica .....	36
3.2.2	Dosagem das argamassas.....	37

3.2.3	Ensaio nas argamassas.....	38
3.2.3.1	Índice de consistência.....	39
3.2.3.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado .....	40
3.2.3.3	Densidade de massa no estado endurecido .....	40
3.2.3.4	Resistência mecânica.....	41
3.2.3.5	Absorção de água por capilaridade .....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4.1	Estado fresco.....	44
4.1.1	Consistência .....	44
4.1.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado .....	46
4.2	Estado Endurecido .....	48
4.2.1	Densidade de Massa Aparente .....	48
4.2.2	Resistência Mecânica.....	50
4.2.3	Absorção de água por capilaridade .....	52
	CONCLUSÕES .....	55
	SUGESTÕES DE PESQUISA .....	56
	REFERÊNCIAS .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o início da civilização, o ser humano procura maneiras para facilitar a obtenção de recursos necessários à sua sobrevivência, criando utensílios e descobrindo métodos. Ao longo da História, foram datados períodos marcados pelo uso e o desenvolvimento de elementos, tal como a Idade da Pedra e dos Metais, além do avanço de técnicas que proporcionaram o surgimento de novos materiais.

Um dos desafios de diversas pesquisas no meio científico atualmente é a descoberta de tecnologias para a produção de materiais visando sustentabilidade, qualidade e economia. A busca por produtos sustentáveis será um fator importante para o futuro da construção civil, pois as matérias-primas provenientes dos recursos naturais são limitadas e a quantidade de resíduos aumenta juntamente com o crescimento do setor, devido à negligência no controle e manejo destes resíduos.

Muito é estudado sobre o aproveitamento de resíduos industriais em materiais de construção, como exemplo em argamassas e concretos (NASCIMENTO, 2014; DINIZ, 2010). Diversos tipos de resíduos são estudados tais como de construção e demolição, de escórias, cerâmicos, de mineração, entre outros. Concomitantemente, surgem perguntas sobre maneiras de otimizar o uso destes materiais e como melhorar suas propriedades, cominando para pesquisas neste ramo.

Nas indústrias de beneficiamento de minérios, por muitas vezes, há o descarte não planejado de resíduos, principalmente em empresas de pequeno porte. São liberados na natureza, resíduos que podem ter potencial quanto à aplicação, sejam como adições minerais, ativadores químicos ou agregados na produção de concretos e argamassas (NÓBREGA, 2007).

Uma das indústrias de minérios que geram muitos resíduos são aquelas que produzem caulim. A extração e o processamento do caulim são grandes geradores de resíduos, contribuindo para a degradação do meio ambiente. O caulim é uma rocha que contém o argilomineral caulinita, utilizado em vários setores industriais do país, desde a produção de papel à fabricação de cerâmicos. Em 2015, a produção mundial de caulim foi de aproximadamente 36 milhões de toneladas, sendo o Brasil o sétimo produtor no ranking com 5%, como aponta o Sumário Mineral de 2016 (DNPM<sup>1</sup>, 2018).

O resíduo de caulim apresenta elementos com propriedades eficientes em outras áreas de produção, proporcionando o surgimento de novos materiais sustentáveis. Dependendo das

---

<sup>1</sup> Departamento Nacional de Produção Mineral.

características do resíduo, é possível a utilização de parte do volume a ser descartado, economizando matérias-primas não renováveis e energia. Na construção civil, este resíduo vem sendo utilizado na produção de materiais alternativos de custo reduzido em relação aos convencionais (REZENDE et al, 2008; NÓBREGA, 2007; ANJOS e NEVES, 2011; AZERÊDO, 2012).

Neste âmbito, a construção civil está cada vez mais buscando medidas que otimizem processos construtivos e reduza custos, mantendo a qualidade dos empreendimentos. O trivial nos estudos desta área, além da cooperação com o meio ambiente, é quantificar e qualificar a influência destes resíduos nas propriedades dos materiais. As argamassas são utilizadas em várias fases de uma construção e, por este motivo, estuda-se maneiras de melhorar a trabalhabilidade, o que influencia na produtividade de um modo geral, bem como o desempenho após endurecidas. Considerando estes fatores, com o objetivo de contribuir para pesquisas relacionadas ao uso deste resíduo no ramo, pretende-se estudar seu comportamento e sua influência nas principais propriedades das argamassas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a influência do resíduo de caulim nas propriedades no estado fresco e no estado endurecido das argamassas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar o uso de resíduo de caulim fino em substituição parcial da cal hidratada;
- Avaliar a influência do uso do resíduo grosso de caulim como agregado miúdo em argamassas;
- Estudar as propriedades frescas e endurecidas das argamassas com a incorporação de resíduo de caulim de adição mineral de metacaulim e aditivo, comparando-as com as convencionais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Caulim

O caulim é uma rocha composta pelo mineral caulinita, um silicato de alumínio. O termo caulim é utilizado para denominar a rocha e também o produto resultante de seu beneficiamento. A caulinita é um argilomineral com composição química teórica de 39,50% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 46,54% de  $\text{SiO}_2$  e 13,96% de  $\text{H}_2\text{O}$ , podendo apresentar variações. As propriedades do caulim permitem usos diversos, principalmente como mineral industrial, desde a produção de papel à fabricação de materiais cerâmicos, facilitada pela sua plasticidade, alvura e a presença de elementos com baixo teor de ferro. O arranjo de partículas do caulim permite a sua utilização com uma granulometria fina, obtida através de etapas de tratamento de minérios. O diâmetro das partículas e a forma de distribuição do caulim são fatores importantes no controle das suas propriedades físicas (LUZ et al., 2008).

O caulim pode ser classificado de acordo com a sua origem. Os ditos primários são aqueles resultantes da alteração de rochas *in situ*, enquanto os caulins secundários são formados pela deposição de sedimentos (LUZ et al., 2008).

O Brasil tem um papel fundamental no mercado de caulim. Em 2015, segundo o Sumário Mineral (DNPM, 2018), o país importou 23,46 mil toneladas de bens primários de caulim e exportou 1,88 milhões de toneladas, das quais 97,4% correspondem ao caulim beneficiado. Dentro do panorama nacional, o caulim tem utilização nas indústrias de cimento, cerâmicas brancas e de papel, advindos principalmente dos estados do Pará e Amapá.

No Nordeste, a produção de caulim na região Borborema-Seridó é compreendida pelos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, onde caulim é de origem primária, essencialmente caulínítico e encontra-se associado aos minerais quartzo, feldspato e muscovita (mica), tendo como principais impurezas são os óxidos de ferro, hematita e magnetita (SILVA et al., 2008).

Ainda nos processos de britagem e moagem de minérios, etapas do beneficiamento de minério de redução de granulometria ou cominuição, são liberados resíduos que não têm utilidade imediata para a atividade industrial em questão, por apenas prejudicarem a obtenção de um produto final adequado para a comercialização.

## 2.2 Resíduo de caulim

O rejeito de mineração é classificado como partes da rocha ou do mineral, após a primeira etapa do tratamento de minérios, que não serão úteis para determinada atividade industrial. A deposição deste rejeito constitui uma tarefa delicada, pois por não possuir valor comercial imediato, precisa ser descartado da forma mais econômica possível (SOUSA; HARIMA; LEITE, 2007).

Dependendo do tipo de uso do caulim, alguns elementos inerentes à rocha podem prejudicar o seu produto final. Por estes motivos, o caulim requer um tratamento físico e químico para a eliminação das impurezas, que devem ser reduzidas de acordo com a finalidade de sua utilização; o beneficiamento pode ocorrer por via úmida ou seca (OLIVEIRA, 2016).

A indústria de extração e beneficiamento do caulim (Figura 1) trata os resíduos como materiais que precisam ser apenas descartados, independentemente do modo de destinação, como é observado em boa parte da indústria mundial (ROCHA et al., 2008). Alguns estudos relatam que durante as etapas de beneficiamento há uma grande perda de minério, nas indústrias instaladas na região minerária que abrange os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Segundo Vidal et al. (2017) cerca 75% do caulim extraído na região do Seridó é perdido, gerando pilhas de rejeitos finos e grosseiros.

Figura 1 - Indústria de extração e beneficiamento de caulim.



Fonte: Própria (2019).

A deposição de rejeitos de minério tem sido abordada com mais frequência e a preocupação com a destinação dos resíduos vem sendo retratada em trabalhos acadêmicos da última década. Os resíduos de caulim são geralmente descartados a céu aberto e em leitos e

várzeas de riachos e rios, causando danos à fauna, à flora e à saúde da população (MENEZES et al., 2007). Estes resíduos necessitam de grandes áreas para seu depósito, seus finos são transportados pela ação do vento, contaminando as populações vizinhas (NÓBREGA, 2007)

No beneficiamento do caulim primário, há dois tipos de resíduos são gerados por essa indústria, um grosso que é constituído basicamente por quartzo e é gerado na primeira etapa após a extração constituindo cerca de 70% do resíduo produzido, e um fino, oriundo da etapa de purificação do caulim através de processos de separação a úmido do caulim (ANJOS e NEVES, 2011; MENEZES et al, 2007; NÓBREGA, 2007).

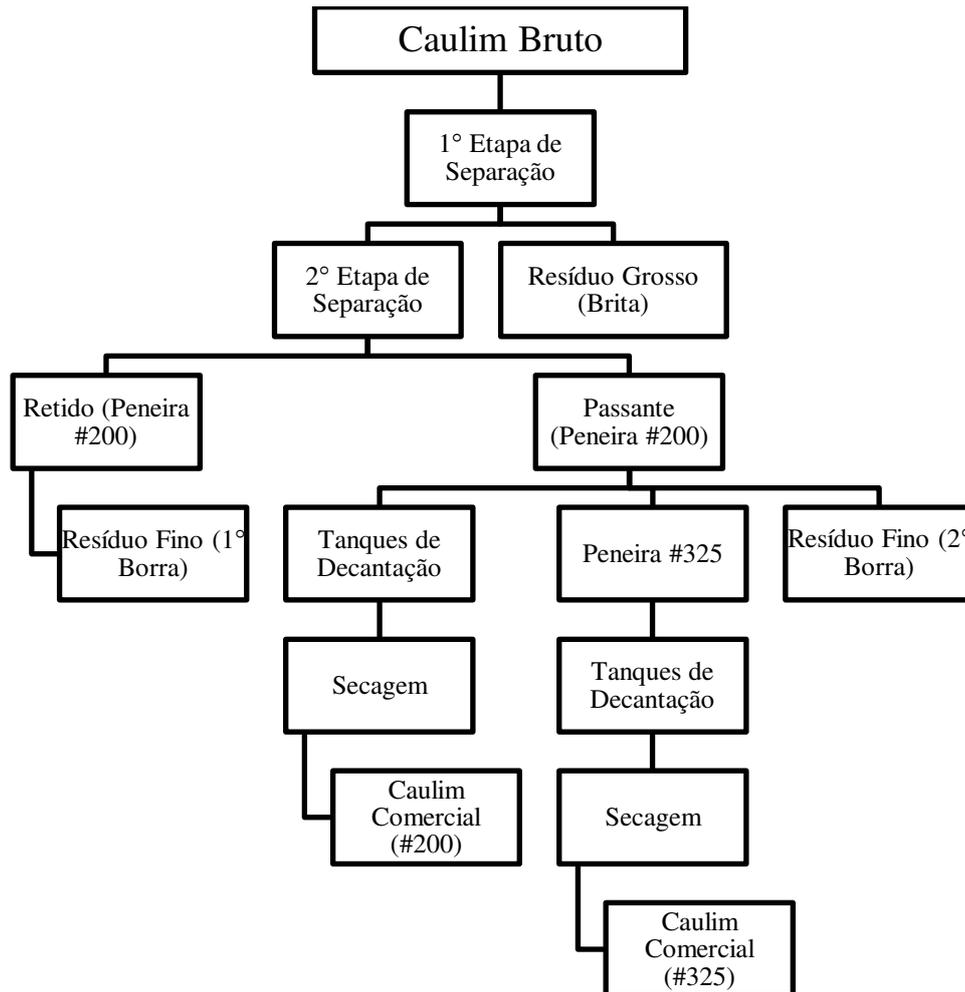
Segundo Nóbrega (2007) quando descreve o caulim proveniente de empresas localizadas no estado da Paraíba, após o processo de beneficiamento do caulim, o teor de caulim presente no resíduo dependerá da tecnologia utilizada nestas etapas. Normalmente, são gerados dois resíduos diferentes, após o processo de desareamento, sendo um de aparência bem arenosa, e o outro bem mais fino, como uma argila.

### **2.2.1 Beneficiamento do caulim**

O processo de beneficiamento do caulim varia de acordo com a região e a formação da jazida, considerando que a composição mineralógica da rocha influencia no nível de pureza do produto final. No Estado da Paraíba, em indústria de beneficiamento no município de Juazeirinho, o material bruto proveniente da mina de caulim é transportado até o local de processamento, onde é feita a separação dos resíduos. O circuito de beneficiamento, realizado por via úmida, funciona como mostrado no fluxograma da Figura 2.

Inicialmente, o caulim bruto passa pela primeira etapa de separação, que consiste em retirar o resíduo grosso, localmente denominado de *brita*, através de um separador em via úmida, no qual o caulim mais fino segue para as próximas etapas de separação e o resíduo é remanejado para ser descartado. Na segunda etapa de separação, o material passa pela peneira de abertura #200, onde o retido é separado como resíduo denominado de *borra* e o caulim segue para os tanques de decantação. Na Figura 3, é possível visualizar as primeiras etapas de separação do beneficiamento.

Figura 2 – Fluxograma do Beneficiamento de Caulim.



Fonte: Própria (2019).

Figura 3 – (a) Etapas de Separação do Beneficiamento e (b) Segunda *Borra*.

(a)

(b)

Fonte: Própria (2019).

Na Figura 3a à esquerda está alocado a primeira borra do resíduo fino, ao centro o compartimento composto pelas peneiras e ao fundo o resíduo grosso. Parte do material passante na peneira #200 é resíduo, chamado de segunda *borra*, com aspecto como mostrado na Figura

3b. Outra parte do caulim passa pela peneira de abertura #325 e segue para os tanques de decantação (Figura 4).

Figura 4 – Tanques de Decantação.



Fonte: Própria (2019).

Após a separação, o caulim é moldado em discos (Figura 5a) e secado em temperatura ambiente no pátio de estocagem por aproximadamente quatro dias, como mostrado na Figura 5b. Posteriormente, o caulim é destorroado e separado em lotes para a comercialização.

Figura 5 – (a) Prensagem e (b) secagem do caulim.



(a)

(b)

Fonte: Própria (2019).

Posterior a secagem, o caulim em forma de discos é destorroado e separado em lotes para a comercialização pelo seu nível de finura, denominados de caulim 200 e caulim 325.

### 2.3 Utilização do resíduo de caulim em argamassas

Diversas pesquisas foram realizadas nesta área a fim de compreender o comportamento do resíduo de caulim, bem como seu aproveitamento industrial e comercial, tais como para a fabricação de porcelanato cerâmico (MORAES, 2007), produção de blocos de vedação (REZENDE et al., 2008), estudo como material fino e agregado em concreto auto adensável (DINIZ, 2010), produção de blocos solo-cal (ANJOS; NEVES, 2011; FIGUEIREDO, 2015), o estudo de argamassas a base de cal (AZERÊDO, 2012) e desenvolvimento de argamassa colante (OLIVEIRA, 2016), entre outros.

Em argamassas, a utilização do resíduo apresentou resultados satisfatórios. Nóbrega (2007) estudou o potencial do uso de resíduos de caulim em argamassas de múltiplo uso, que são utilizadas tanto para a função de assentamento quanto para de revestimento, e concluiu haver evidências para serem usados como pozolanas, plastificantes e agregados em sua forma *in natura*, entretanto, sugere o estudo das variações das composições dos resíduos em função da jazida e processo de beneficiamento, que podem interferir no desenvolvimento das argamassas.

Ainda em Nóbrega (2007) foi relatado que a fração mais grossa, denominada de *birra*, se aproximou do limite superior da zona utilizável da curva referente a agregados miúdos da NBR 7211 (ABNT, 2005), enquanto que a fração mais fina, denominada de *borra*, apresentou atividade pozolânica considerável nas argamassas quando submetidas a processos de calcinação e moagem. Além disso, a autora ainda relata que morfologia das frações grossas da *birra* se aproximou da areia silicosa utilizada de referência.

Quando comparados, surge uma correlação entre os dados apresentados acima com Rezende et al. (2008), que constatou por meio de análises químicas que o resíduo de caulim estudado para produção de blocos de vedação era constituído predominantemente, por quartzo (areia), indicando potencial para utilizá-lo em argamassas em substituição de parte do agregado miúdo.

Rocha et al. (2008) concluiu que o resíduo de beneficiamento de caulim pode ser utilizado para a produção de traços de argamassas para aplicação de chapisco, assentamento, reboco e revestimento, e que a adição do resíduo pode melhorar a resistência mecânica em relação as propriedades das argamassas convencionais e utilizado em substituição parcial à cal hidratada. Assim como no estudo anteriormente abordado, o resíduo apresentou características físicas e químicas semelhantes às dos agregados miúdos utilizados para a produção de argamassas.

Dias (2010) estudou a atividade pozolânica do resíduo de beneficiamento de caulim e observou que, quando calcinado em temperaturas superiores a 700° C, apresenta elevada atividade pozolânica e que as argamassas alternativas quando incorporadas com resíduos de caulim calcinados apresentam desempenho mecânico superior as normas ABNT e ASTM.

Azerêdo (2012) ao estudar o uso do resíduo de caulim em argamassas à base de cal quanto às propriedades no estado fresco, endurecido e microestruturais, concluiu que têm potencial para serem utilizados *in natura*, como também na forma de material pozolânico.

## **2.4 Materiais constituintes das argamassas**

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água. A norma classifica a argamassa em função do seu uso, como: argamassas de assentamento, de revestimento, de uso geral, para reboco e decorativas (em camada fina ou em monocamada).

Os materiais comumente utilizados para confecção de argamassas são o cimento, areia e água, além da cal, quase sempre presente nesta composição. Além disso, podem ser incorporadas por aditivos e adições minerais, abordados nos próximos tópicos.

### **2.4.1 Cimento**

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) distingue o cimento como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. É também um dos principais materiais utilizados em obras de construção civil no Brasil, presente desde a fase estrutural até a aplicação de revestimento.

Os primeiros relatos do uso do cimento natural, com as propriedades semelhantes às conhecidas hoje, foram de gregos e romanos que utilizavam a cal hidráulica juntamente com cinzas vulcânicas. O uso desta mistura perdurou até a descoberta do cimento Portland, que ao apresentar endurecimento muito mais rápido, ganhou destaque no mercado da construção, diminuindo o uso da cal-pozolana como ligante hidráulico (AZERÊDO, 2012).

Em 1756, o engenheiro inglês John Smeaton obteve um produto da calcinação de calcários argilosos, resultando em um material resistente e durável depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções. Com base nestes estudos fornecidos por Smeaton, em 1824, Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland como é conhecido atualmente, referência

à Portlandstone, na Inglaterra, por apresentar algumas propriedades semelhantes às rochas do local (SILVA, 2006).

É importante saber a influência da composição do cimento Portland e das suas propriedades como aglomerante. Os principais óxidos presentes na matéria-prima do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). As suas propriedades dependem da proporção de silicatos e aluminatos presentes em sua composição (BAUER, 2008).

Um dos parâmetros mais relevantes na avaliação do cimento é a finura, pois, quanto mais finas as partículas que o compõe, maiores serão as resistências de aderência, tanto a inicial (3 a 14 dias) e quanto a final (idades superiores a seis meses) (CARASEK; CASCUDO; SCARTEZINI, 2001). A aderência será melhor abordada no tópico propriedades das argamassas.

#### **2.4.2 Agregados**

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define agregado como “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”. A NBR 7211 (ABNT, 2005) aborda os agregados miúdos, aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm.

Atualmente, são utilizados diversos tipos de agregados além dos convencionais, que podem ser classificados como natural, artificial, reciclado, especial, entre outras variações. O agregado reciclado, conforme a NBR 9935 (ABNT, 2011), é aquele obtido através de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da atividade industrial, mineração ou construção e demolição da construção civil.

John (2000) já afirmava a possibilidade de produzir grânulos com materiais diferentes através de técnicas simples, permitindo a adequação do tamanho dos grãos e, caso fossem provenientes de materiais diferentes dos agregados convencionais, poderiam ser utilizados em aplicações como concretos leves, por exemplo.

A areia é o principal agregado utilizado nas argamassas e, portanto, é o mais abordado nos estudos referentes às propriedades das argamassas. A distribuição granulométrica da areia influencia diretamente no desempenho da argamassa, pois quando no estado fresco interfere na trabalhabilidade, no consumo de água e aglomerantes e, quando no estado endurecido, exerce

influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência de aderência (ANGELIM et al., 2003 apud SILVA, 2006).

### **2.4.3 Cal**

A cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias e tem como principal finalidade conferir trabalhabilidade à mistura. Na literatura, estima-se que a cal já era utilizada há muitos anos como aglomerante, antes do surgimento do cimento Portland. Guimarães (2002) expõe que “O homem conheceu a cal provavelmente nos primórdios da idade da pedra”, entretanto, a maior parte dos registros sobre seu uso foi marcada pelas pirâmides. O autor ainda relata que uma análise feita no material que vedava as câmaras da pirâmide de Quéops revelou o uso de argamassas e que foi encontrada cal nas juntas dos blocos de calcário e granito.

Os tipos de cales empregados na produção das argamassas são cal virgem, como óxidos de cálcio ou óxidos cálcio e magnésio, e a cal hidratada, na forma de hidróxido de cálcio ou hidróxido de cálcio e magnésio. Quando calcinados à aproximadamente 1000°C, os calcários e os dolomitos produzem a cal virgem, pela perda parcial dos seus constituintes (SILVA, 2006).

O cimento e a cal funcionam como aglomerantes, unindo os elementos e gerando uma pasta uniforme. As argamassas que contêm cal aderem mais facilmente ao substrato, além de proporcionar maior durabilidade, pois evita fissuras ao preencher os vazios na reação de carbonatação (CARASEK; CASCUDO; SCARTEZINI, 2001).

### **2.4.4 Aditivos**

A NBR 11768 (ABNT, 2011) aborda os requisitos para utilização de aditivos na confecção de concreto de cimento Portland, os quais têm a finalidade de modificar propriedades no estado fresco e/ou endurecido. Nas argamassas, de acordo NBR 13529 (ABNT, 2013), os aditivos atuam de forma semelhante, adicionados em pequenas quantidades. As normas abordam os principais tipos de aditivos utilizados no mercado, tais como:

- a) Redutores (retentores) de água: nesta classe estão compreendidos os plastificantes e superplastificantes (tipos I e II) que permitem a redução de água e/ou o aumento da consistência do material e, conseqüentemente, a fluidez. Quanto maior o nível do plastificante, maior a sua capacidade de potencializar estas propriedades. Nas

argamassas, reduzem a evaporação e exsudação da água de amassamento, proporcionando a capacidade de retenção de água.

- b) Incorporadores de ar: como o termo denota, incorporam pequenas bolhas de ar que permanecem no estado endurecido. Em concretos, contribuem para a durabilidade e trabalhabilidade, além de serem mais recomendados para concretos submetidos a variações de temperatura (gelo e degelo, por exemplo). Nas argamassas, conferem trabalhabilidade e redução do consumo de água.
- c) Retardadores de pega: em concretos, têm a propriedade de aumentar o tempo entre seu estado fresco e o endurecido, além de manter o concreto com trabalhabilidade adequada para o lançamento. De forma análoga, nas argamassas retarda a hidratação do cimento, proporcionando um maior tempo de utilização.

#### **2.4.5 Adições minerais**

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define adições como materiais inorgânicos naturais ou industriais de partículas finas adicionadas às argamassas em proporção com seus componentes, capazes de modificar propriedades. Na literatura, as adições minerais, diferentemente dos aditivos, podem ter o papel de adição ou substituição parcial do cimento, devido às propriedades similares quando adicionadas às misturas.

A incorporação de adições minerais na composição do cimento Portland possibilita a redução o impacto ambiental da indústria cimenteira e um destino adequado de resíduos de outros setores industriais, possibilitando vantagens econômicas e ambientais e favorecendo a durabilidade de concretos e argamassas (GOBBI, 2014).

As adições minerais podem ser classificadas como materiais pozolânicos (pozolana natural, sílica ativa, metacaulim, entre outros), cimentantes (escórias de alto forno) e fillers (calcário, pó de pedra). Os materiais pozolânicos são adições siliciosas ou silicoaluminosas que reagem com o hidróxido de cálcio, na presença de água, formando compostos com propriedades aglomerantes, podendo ser naturais ou artificiais.

O material pozolânico natural não necessita de tratamento para apresentar atividade pozolânica, exceto a moagem para aumentar a área de contato para as reações. Em contrapartida, as pozolanas artificiais demandam de tratamentos a elevadas temperaturas que influenciam na cristalização do material, atribuindo reatividade ao material (GOBBI, 2014).

#### 2.4.5.1 Incorporação de metacaulim nas argamassas

O metacaulim (MC) é uma adição mineral do tipo pozolana, aluminossilicosa derivada normalmente da calcinação entre 600°C e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as argilas caulínicas e os caulins (SOUZA et al., 2016). Possui tonalidades diferentes que podem denotar seu nível de pureza. Quanto mais puro, mais claro e reativo será o metacaulim e quanto menor a quantidade de sílica e alumínio, menor a reatividade e menor a brancura do material (DAL MOLIN, 2005).

O efeito pozolânico do metacaulim é maior quanto maior for sua qualidade e finura, entretanto as características dos outros componentes da mistura, em especial do cimento Portland, também têm grande influência na eficácia do Metacaulim (ROCHA, 2005).

Rocha (2005) ao caracterizar microestruturalmente o metacaulim de alta reatividade, abordou a importância para que o Metacaulim seja industrializado em larga escala, viabilizando seu uso como adição nas obras em geral, mantendo o nível de qualidade e homogeneidade sempre altos e dentro dos parâmetros estipulados por norma ou especificação técnica do usuário.

Em argamassas, Mota, Oliveira e Carneiro (2016) avaliaram a durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria com adição pura e substituição de 8% e 15% da massa do cimento e obtiveram resultados que indicam que o metacaulim pode mitigar a ação de agentes deletérios.

Laurentino (2019) estudou a adição de metacaulim em argamassa estabilizada para assentamento para o tempo de estabilização de 36 horas, com teores de 0, 10 e 20% de MC na substituição parcial do cimento e obteve resultados satisfatórios na resistência à compressão a medida que aumentou o teor de MC.

## 2.5 Propriedades das argamassas

### 2.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade das argamassas que influencia no seu manuseio e aplicação. Determina facilidade com que podem ser misturadas, transportadas, consolidadas e ter acabamento adequado, apresentando condições homogêneas (CARASEK, 2010).

### **2.5.2 Consistência**

A consistência é a uma propriedade das argamassas influenciada por fatores como relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante (SILVA, 2006). É uma propriedade que está relacionada com a trabalhabilidade das argamassas. A NBR 13276 (ABNT, 2016) determina os procedimentos necessários para a determinação do índice de consistência para as argamassas.

### **2.5.3 Retenção de água**

Retenção de Água é uma propriedade das argamassas no estado fresco de reter a água de amassamento e manter a consistência necessária ao seu uso. Além de interferir no tempo de aplicação e regularização da argamassa no estado fresco, influencia em propriedades no estado endurecido, considerando que esta última depende da hidratação do cimento e da carbonatação da cal (TRISTÃO, 1995).

### **2.5.4 Densidade de massa no estado endurecido**

Densidade de massa no estado endurecido é a relação entre a massa e o volume total da argamassa, sendo um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado-aglomerante e da distribuição granulométrica. Além disso, determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação. (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004). A NBR 13280 (ABNT, 2005) traz os procedimentos necessários para a obtenção desta propriedade.

### **2.5.5 Resistência mecânica**

A resistência mecânica é uma propriedade que está relacionada à capacidade das argamassas de resistirem a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, devido a cargas atuantes nas edificações ou por condições ambientais, sendo a resistência à compressão a característica mais comumente determinada para argamassa de assentamento e de revestimento (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004).

### **2.5.6 Aderência**

Segundo Sabbatini (1984 apud SILVA, 2006) aderência da argamassa ao substrato pode ser definida como a capacidade que a interface substrato-argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem ocorrer o rompimento.

Para Carasek, Cascudo e Scartezini (2001), as características químicas e físicas e as proporções dos elementos podem afetar a aderência da argamassa aos substratos, bem como suas propriedades. É importante entender como o mecanismo de aderência funciona nos substratos. Entre os revestimentos de argamassa e substratos porosos tem comportamento mecânico, ocorrendo através da penetração dos materiais aglomerantes nos poros e cavidades da base (SCARTEZINI et al., 2002).

### **2.5.7 Permeabilidade por capilaridade**

A permeabilidade é a passagem de água através da camada de argamassa endurecida. É influenciada pelos poros capilares de dimensões maiores que 50 nm e bolhas de ar incorporado. Quanto maior a idade da argamassa, maior será o grau de endurecimento, e mais baixa a sua permeabilidade (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004)

A NBR 15259 (ABNT, 2005) aborda os procedimentos necessários para determinação da absorção de água e do coeficiente de capilaridade, nos quais o ensaio de absorção está relacionado ao volume de vazios e o coeficiente de capilaridade à permeabilidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste estudo consistiu em procedimentos experimentais norteados pelas normas técnicas vigentes. Na primeira etapa, os materiais de partida foram selecionados para a dosagem das argamassas. Posteriormente, elencou-se as etapas de caracterização e os ensaios no estado fresco e endurecido, como será abordado nas próximas seções.

#### 3.1 Materiais

Tabela 1 – Materiais Utilizados.

<b>Cimento Portland</b>	CP V ARI da marca LafargeHolcin.
<b>Agregado miúdo</b>	Areia natural eólica, proveniente da região do município do Pedra de Fogo-PB.
<b>Cal</b>	Cal Hidratada tipo CH-I, da marca Rebocal, obtida no município de João Pessoa-PB.
<b>Resíduo de caulim</b>	Obtido em empresa de beneficiamento de caulim localizada no município de Juazeirinho-PB.
<b>Aditivo</b>	Plastificante multifuncional Muraplast FK 830B
<b>Adição Mineral</b>	Metacaulim da marca BBM Minérios.

Fonte: Própria (2019).

Escolheu-se para o estudo o cimento tipo CP V ARI, considerando que os cimentos normalmente comercializados na região são incorporados com adições de escória de alto forno, pozolanas e *fillers*, visto a necessidade de avaliar apenas a influência do resíduo de caulim e adições, sem a possível interferência de outros elementos.

A cal hidratada escolhida para a dosagem foi o tipo CH-I, devido ao seu grau de pureza em relação aos outros tipos de cales, considerando seu estudo em proporção com o resíduo de caulim fino (*borra*). A composição química obtida por Sinhorelli (2019) resultou nos percentuais em massa da tabela 2.

Tabela 2 – Composição química (%) da cal.

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Outros</b>
4,248	1,429	1,951	84,959	6,537	0,246	0,234	0,090	0,197	0,109

Fonte: SINHORELLI (2019).

Observa-se que a cal utilizada é composta por 85% de CaO, seguida de 6,5% de MgO, somando em 91,5%, sendo classificada como CH-I com base na NBR 7175 (2003).

O resíduo de caulim foi obtido em empresa de caulim localizada no município de Juazeirinho, no estado da Paraíba. Como apontado no item 2.2.1, o beneficiamento de caulim gera um resíduo grosso na fase primária, denominado de *brita*, e um resíduo mais fino na fase secundária, denominado de *borra*. Para este trabalho, foram selecionados os dois resíduos em separado, sendo o resíduo fino proveniente da segunda *borra*, para caracterização e dosagem das argamassas. Os resíduos foram utilizados *in natura*, submetidos apenas à secagem em estufa da água do processo em via úmida.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização dos materiais constituintes

#### 3.2.1.1 Caracterização física

Os ensaios de caracterização física descritos a seguir e a normatização utilizada são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio e normatização da caracterização física dos materiais.

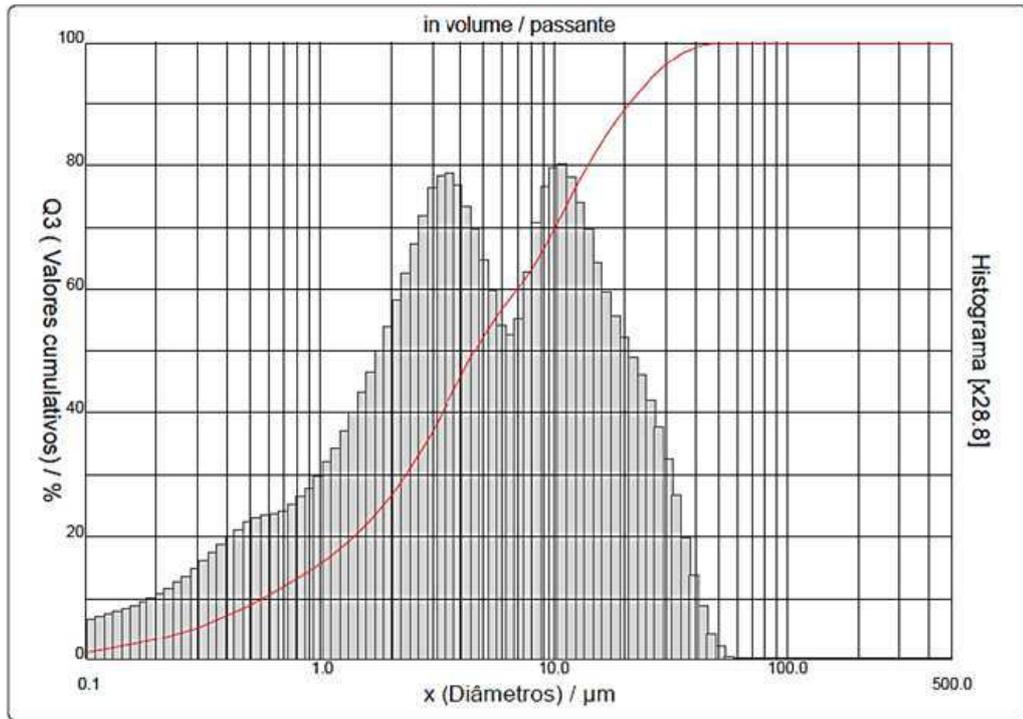
<b>Materiais</b>	<b>Ensaio e normatização</b>
<b>Cimento</b>	Massa unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006)
<b>Areia e resíduo de caulim grosso</b>	Análise granulométrica com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003), ensaio de massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2009) e massa unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006).
<b>Cal e resíduo de caulim fino</b>	Massa específica NBR NM 23 (ABNT, 2001) e Massa Unitária NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: Própria (2019).

Os dados de massa específica e granulometria do cimento e do metacaulim (MC), estudados neste trabalho, foram obtidos da pesquisa de Laurentino (2019), por se tratar do mesmo material. As massas específicas utilizadas para o cimento e MC foram 2,92 g/cm<sup>3</sup> e 2,59 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

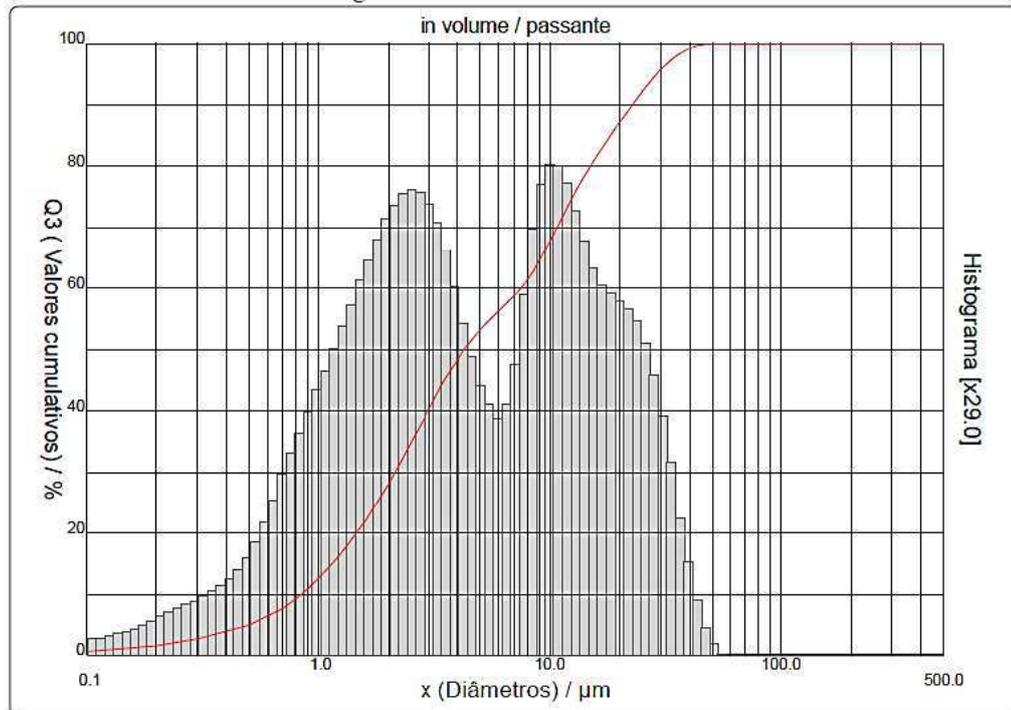
As curvas granulométricas para o cimento e MC resultantes da granulometria a laser são apresentadas nas figuras 6 e 7.

Figura 6 – Granulometria do CP V.



Fonte: LAURENTINO (2019).

Figura 7 – Granulometria do MC.



Fonte: LAURENTINO (2019).

As partículas do CP V estão no intervalo entre 0,57  $\mu\text{m}$  e 21,01  $\mu\text{m}$  e o MC, as partículas estão compreendidas entre 0,84  $\mu\text{m}$  e 22,66  $\mu\text{m}$ , apresentando tamanhos de grãos maiores que

ao do CP V; os dois materiais possuem tamanho máximo de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  (LAURENTINO, 2019).

O resíduo de caulim, como abordado anteriormente, foi estudado na sua forma de resíduo de caulim grosso, denominado de *brita*, e resíduo de caulim fino, a segunda *borra*. Para caracterização do resíduo de caulim grosso, como o tamanho dos grãos e as propriedades se enquadram como agregado miúdo, foram necessários ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, semelhante a areia. O resíduo de caulim fino enquadra-se como material em pó (Figura 8), sendo caracterizado pelos ensaios de massa específica, massa específica unitária e granulometria a laser, que estão descritos a seguir.

Figura 8 – Resíduo fino de caulim (borra).

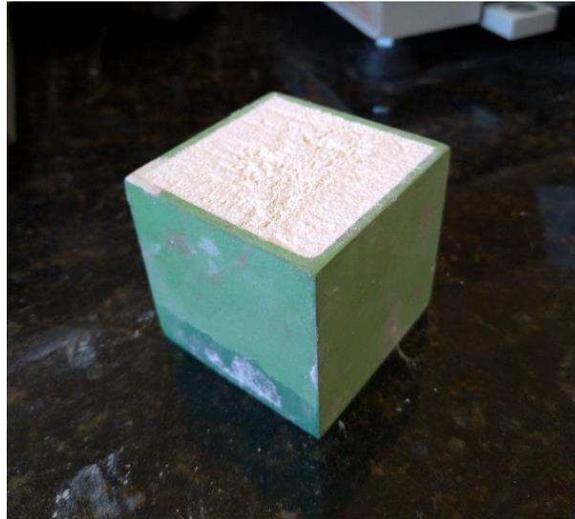


Fonte: Própria (2019).

O ensaio de massa específica na cal hidratada e resíduo de caulim fino, baseou-se no procedimento da NBR NM 23 (ABNT, 2001) que estabelece o método de determinação de massa específica e outros materiais em pó através do frasco de Le Chatelier, realizado no Laboratório de Estruturas II da UFCG.

A determinação da massa unitária dos materiais constituintes, definida como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente (Figura 7) e o volume conhecido, foi realizada como estabelecido na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Colocou-se o material aos poucos em camadas com uma concha, respeitando a altura estabelecida pela norma, até completar a borda do recipiente, como prescrito no método C. O procedimento foi repetido duas vezes para obtenção da média dos valores.

Figura 9 – Recipiente utilizado na determinação da massa unitária dos materiais finos.



Fonte: Própria (2019).

A tabela 4 apresenta os resultados de massa específica e massa unitária dos materiais constituintes.

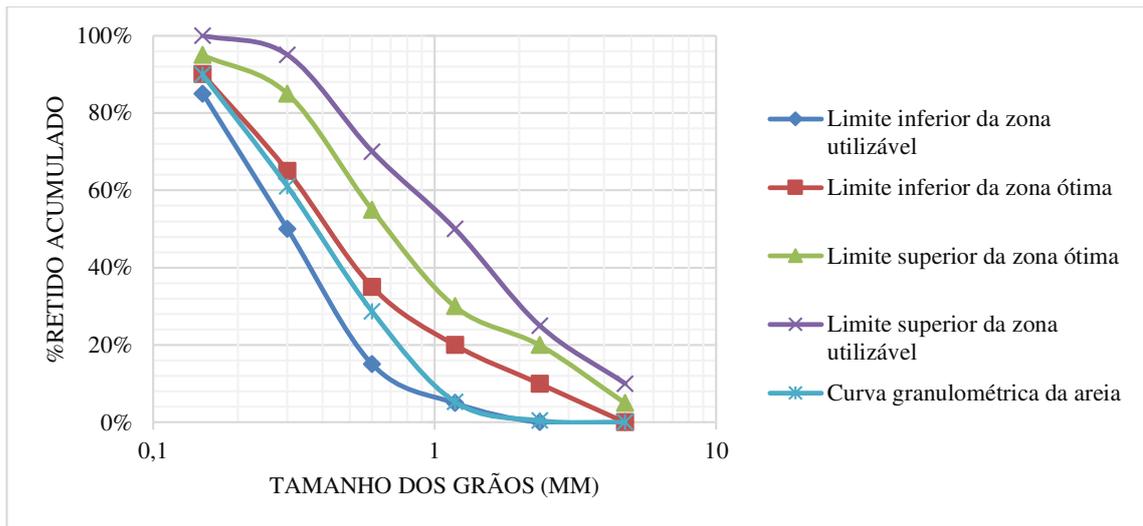
Tabela 4 – Resultados da caracterização física dos materiais constituintes.

<b>Material</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Cimento CP V	2,92*	0,89
Cal Hidratada (CH-I)	2,64	0,77
Areia	2,63	1,66
Resíduo Caulim Fino (RF)	2,58	0,73
Resíduo de Caulim Grosso (RG)	2,37	1,43
Metacaulim (MC)	2,59*	-

Fonte: Própria (2019); (\*) LAURENTINO (2019).

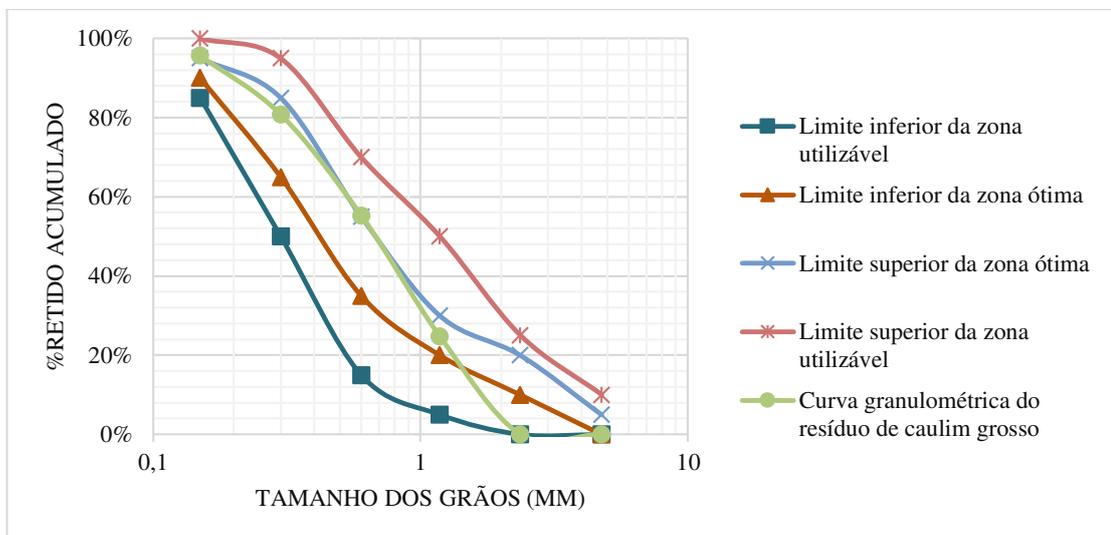
O ensaio de granulometria nos agregados miúdos, areia e resíduo de caulim grosso, foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, pautado na NBR NM 248 (ABNT, 2003), que prescreve o método para a determinação da composição granulométrica. Utilizou-se as séries de peneiras entre 4,75mm e 150 $\mu$ m, analisados em duas amostras para cada material. As figuras 10 e 11 mostram as curvas granulométricas da areia e resíduo, respectivamente.

Figura 10 – Curva granulométrica da areia.



Fonte: Própria (2019).

Figura 11 – Curva granulométrica do resíduo de caulim grosso (RG).



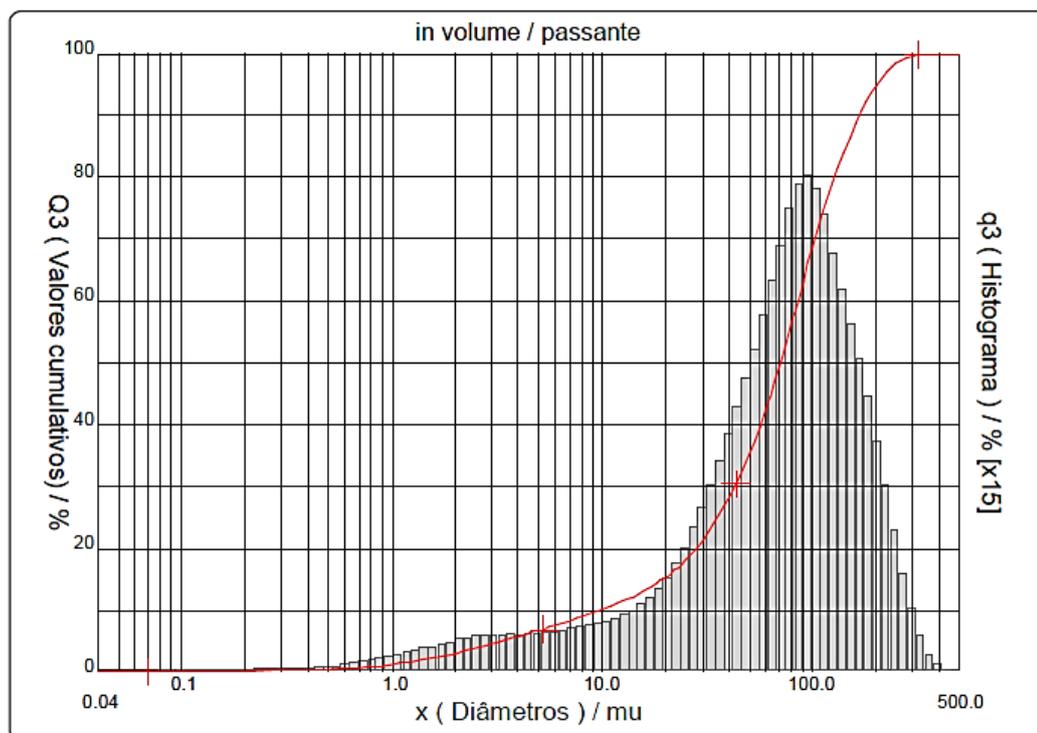
Fonte: Própria (2019).

Definidos os limites de distribuição granulométrica, inferiores e superiores da zona ótima e utilizável, estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2005), observa-se que a areia está entre os limites da zona inferior, com módulo de finura entre 1,55 e 2,20. Com a soma das proporções obteve-se MF igual a 1,85. A granulometria do resíduo de caulim grosso está compreendida nos limites da zona ótima, com módulo de finura entre 2,20 e 2,90. Comparando as curvas granulométricas dos dois agregados, percebe-se que a areia é mais fina que o resíduo.

A granulometria do resíduo fino de caulim foi realizada pelo método de granulometria a laser pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG. A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptico através de difração de laser. Neste método, é combinada a

relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas. Para realização desta caracterização, a argila esmectítica foi passada em peneira ABNT no 200 dispersa em 250mL de água destilada com 8,9mL de hexametáfosfato de sódio em um agitador Hamilton Beach N5000 a velocidade de 17.000 rpm por 5 min. Ficou em repouso por 24 horas, em seguida a dispersão foi novamente agitada por 5 min e colocada em um equipamento CILAS modelo 1064, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência. O resultado da curva granulométrica do resíduo de caulim fino é apresentado na figura 12.

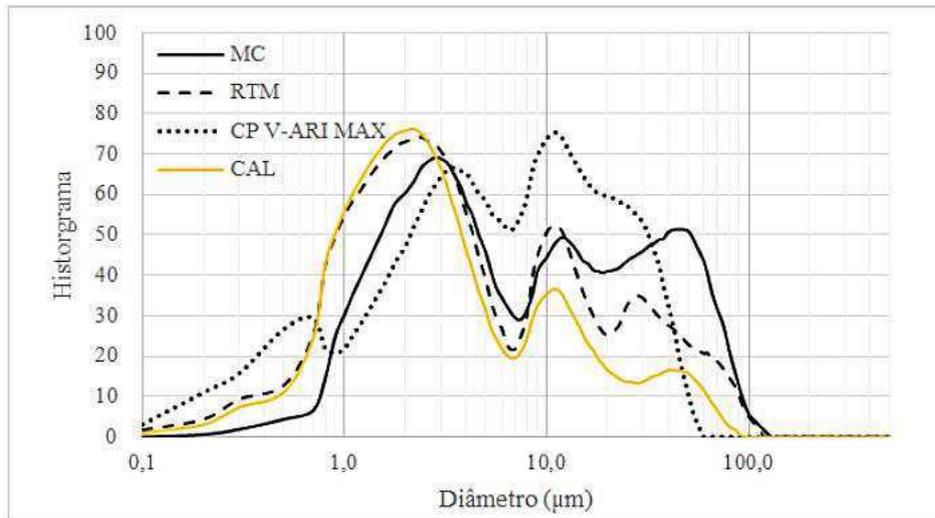
Figura 12 – Granulometria do resíduo fino de caulim.



Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais – UFCG (2019).

O resultado da análise granulométrica do resíduo fino de caulim apontou um percentual de grãos maiores que 200 $\mu$ m, partículas provavelmente resultantes do processo de separação. Comparando com a granulometria da cal CH I (Figura 13), obtida por Sinhorelli (2019), observa-se que o diâmetro máximo para a cal foi 100 $\mu$ m. Muito embora exista uma variação de granulometria, aproximadamente 80% da graduação de grãos do resíduo de caulim está entre 0,8 $\mu$ m e 200  $\mu$ m.

Figura 13 – Granulometria da cal CH-I.

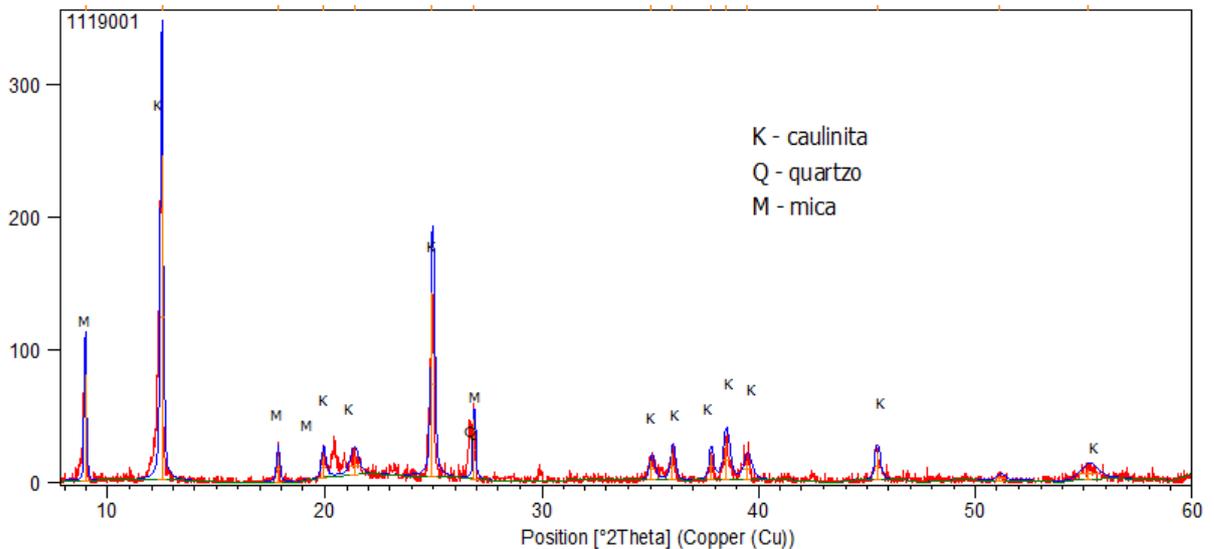


Fonte: SINHORELLI (2019).

### 3.2.1.2 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica do resíduo de caulim fino realizada por difração de raios-X (DRX), equipamento Shimadzu modelo XRD 6000, no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG, apresentou os picos da figura 14. As condições de ensaio foram: radiação Cu, com raios-x em 40kV e 30mA, velocidade de leitura de 2°/min num intervalo de 5° a 65° 2 $\theta$  a um passo angular de 0,02° 2 $\theta$ .

Figura 14 – DRX do resíduo de caulim fino.



Fonte: Laboratório de Caracterização de Materiais – UFCG (2019).

O DRX do resíduo mostra que a maior parte dos picos apontaram a presença de caulinita ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ), seguido por muscovita (mica) e poucos pontos de quartzo.

### 3.2.2 Dosagem das argamassas

Para a dosagem das argamassas, optou-se por diferentes proporções entre os materiais constituintes para analisar sua influência nas propriedades das argamassas. Os traços escolhidos para o estudo foram 1:1:6, 1:0,5:0,5:6, 1:1:3:3 e 1:6, em volume, variado de acordo com as proporções e tipo de resíduo. Através dos dados de massa unitária dos materiais constituintes, dosou-se os traços em massa, para obtenção da quantidade de material de acordo com o consumo necessário de argamassa a ser produzida.

Como é possível observar nas Tabela 5, 6 e 7, as misturas foram identificadas por códigos para melhor entendimento, seguindo os critérios de tipo de resíduo incorporado à argamassa, uso de aditivo plastificante e de adição mineral de metacaulim (MC).

Tabela 5 – Dosagem das argamassas com RF.

<b>Proporção em volume</b>	<b>Materiais constituintes</b>	<b>Código</b>
1:0,5:0,5:6	Cimento : cal : RF : areia	RF50-CHI
1:1:6	Cimento : RF : areia	RF100
1:1:6	Cimento : RF : areia (+ aditivo)	RF100-ADT
1:0,5:0,5:6	Cimento : cal : RF : areia (adição de MC)	RF50-MC
1:1:6	Cimento : RF : areia (adição de MC)	RF100-MC

Fonte: Própria (2019).

Tabela 6 – Dosagem das argamassas com RG.

<b>Proporção em volume</b>	<b>Materiais constituintes</b>	<b>Código</b>
1:1:6	Cimento : cal : RG	RG100-CHI
1:1:3:3	Cimento : cal : areia : RG	RG50-CHI
1:6	Cimento : RG	RG100
1:6	Cimento : RG (+ aditivo)	RG100-ADT

Fonte: Própria (2019).

Tabela 7 – Dosagem das argamassas de referência.

<b>Proporção em volume</b>	<b>Materiais constituintes</b>	<b>Código</b>
1:1:6	Cimento : cal : areia	REF-CHI
1:6	Cimento : areia	REF
1:6	Cimento : areia (+ aditivo)	REF-ADT
1:1:6	Cimento : cal : areia (adição de MC)	REF-MC

Fonte: Própria (2019).

Para simplificação e objetividade, nesta etapa nomeou-se o resíduo de caulim fino, a *borra*, por RF e o resíduo de caulim grosso, a brita, de RG. Optou-se por analisar as proporções de resíduo, grosso e fino, na proporção de 50% com agregado miúdo e cal, respectivamente e a substituição de 100% desses componentes. A adição mineral de MC se deu por substituição parcial (10%) da massa do cimento CP V e o percentual de aditivo plastificante utilizado correspondeu a 1%, também da massa do cimento.

### 3.2.3 Ensaios nas argamassas

As etapas dos ensaios para a avaliação das propriedades das argamassas foram subdivididas em estado fresco e no estado endurecido, regidas pelas normas regulamentadoras, como é possível visualizar na Tabela 6. Os ensaios descritos abaixo foram realizados no Laboratório de Estruturas II da UFCG, exceto o ensaio de resistência mecânica, realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG.

Tabela 8 – Métodos de ensaios nas argamassas e normas regulamentadoras.

	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
<b>No estado fresco</b>	Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
	Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)
<b>No estado endurecido</b>	Resistência Mecânica	NBR 13279 (ABNT, 2005) NBR 7215 (ABNT, 1996)
	Densidade de massa no estado endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)
	Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)

Fonte: Própria (2019).

O procedimento de preparo de mistura para as argamassas foi conforme prescrito na NBR 16541 (ABNT, 2016), com o auxílio de um misturador elétrico da marca Vonder (Figura 15).

Figura 15 – Misturador elétrico e equipamentos auxiliares no preparo das argamassas.



Fonte: Própria (2019).

#### 3.2.3.1 Índice de consistência

Conforme descrito na Tabela 4, o ensaio do índice de consistência das argamassas, conhecido como “*flow table*”, realizou-se de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), para cada traço definido. Após o preparo da mistura como descrito na norma, faz-se três camadas de espessuras semelhantes, adensadas com soquete de 15, 10 e 5 golpes respectivamente, dentro no tronco cônico colocado sobre a mesa de consistência (Figura 16).

Figura 16 – Mesa de Consistência.



Fonte: Própria (2019).

Posteriormente, rasou-se a argamassa, retirou-se o tronco e com a manivela foram golpeadas 30 vezes, uma por segundo. Mediu-se o espalhamento da massa (Figura 17) em três direções, que deveria estar compreendido no intervalo de  $260 \pm 5$  mm, como sugerido na norma.

Figura 17 – Espalhamento da argamassa de resíduo grosso de caulim.



Fonte: Própria (2019).

Para a obtenção da quantidade de água necessária adicionou-se água até o índice de consistência estar compreendido no intervalo estabelecido, através de tentativas. A quantidade de água para cada mistura, em separado, foi obtida pelo fator água/aglomerante resultante.

### 3.2.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O procedimento para determinação de densidade de massa e teor de ar incorporado seguiu os pré-requisitos da NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a densidade de massa no estado fresco, em um recipiente de massa conhecida, colocou-se três camadas de espessuras aproximadamente iguais adensadas com 20 golpes de soquete. Pesou-se o recipiente cheio e obteve-se a massa da mistura.

### 3.2.3.3 Densidade de massa no estado endurecido

A densidade de massa das argamassas no estado endurecido é obtida de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005). Inicialmente, três corpos-de-prova foram identificados e secos em estufa durante 24 horas para que a água da cura final de 28 dias não interferisse no ensaio, como realizado para a resistência mecânica, e a massa inicial configurasse apenas o estado endurecido da argamassa. Após a secagem, os corpos-de-prova foram pesados e as dimensões medidas,

diâmetro e altura. A densidade de massa aparente é obtida através da razão entre a massa e o volume real do corpo de prova calculado através das dimensões aferidas.

#### 3.2.3.4 Resistência mecânica

A resistência mecânica foi avaliada de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) e a NBR 7215 (ABNT, 1996), considerando a disponibilidade de moldes cilíndricos no Laboratório de Estruturas II da UFCG, com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Nesta propriedade, avaliou-se a resistência a compressão em três corpos-de-prova para a idade de 28 dias para cada mistura. Como abordado anteriormente, a cura final das argamassas foi realizada em cura úmida (Figura 18) e, por este motivo, os corpos-de-prova foram secos previamente em estufa, para que a água do tempo de cura não interferisse nos resultados finais de resistência no estado endurecido.

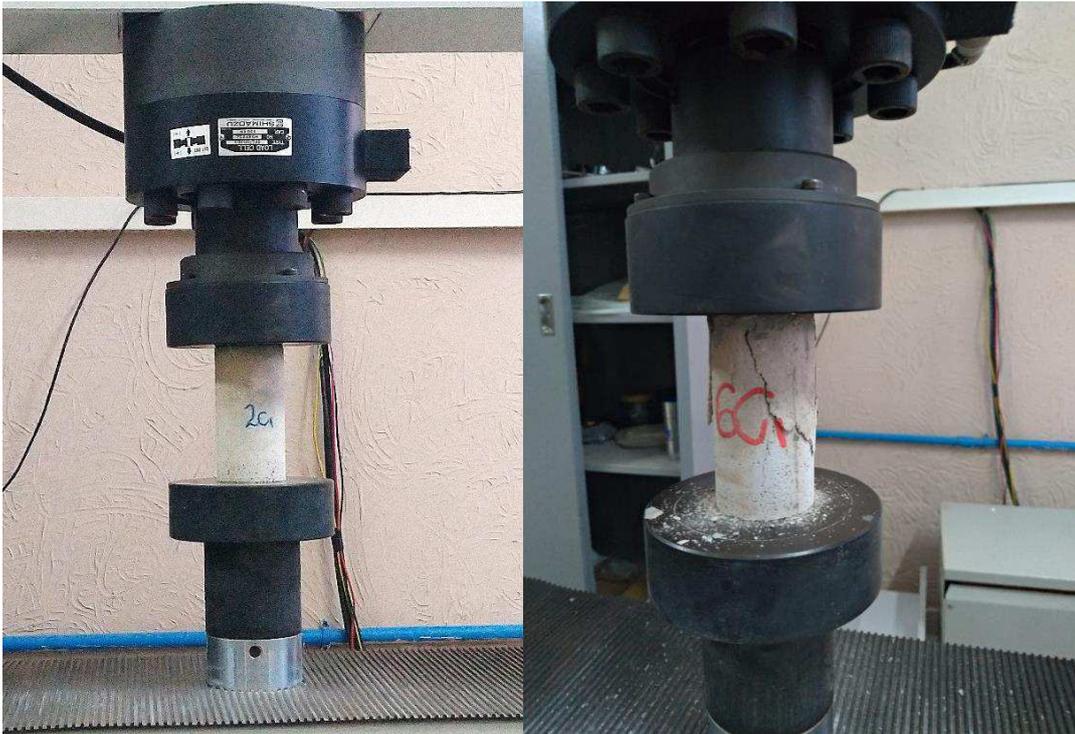
Figura 18 – Cura úmida dos corpos-de-prova.



Fonte: Própria (2019).

Os ensaios foram realizados no equipamento Shimadzu Servopulser, modelo EHF-EM100K1-020-0A, localizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG (Figura 19). A velocidade utilizada no ensaio foi 0,25 MPa/s.

Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão nos corpos-de-prova.



Fonte: Própria (2019).

#### 3.2.3.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade nas argamassas foi realizado de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005). Analogamente aos demais ensaios no estado endurecido, os corpos-de-prova foram secos em estufa após a cura. O ensaio consiste em medir a absorção de água em dois tempos, 10 e 90 minutos, após o início do cronômetro.

Inicialmente, obteve-se a massa inicial dos corpos-de-prova secos. Preencheu-se um recipiente plástico com água até determinada altura e colocou-se uma grade metálica para evitar o contato direto do material com toda a lâmina de água, como é possível observar na figura 20.

Delimitou-se uma altura de  $5 \pm 1$  mm da base dos corpos-de-prova para que a lâmina não ultrapassasse este intervalo. Ao decorrer do ensaio, foram obtidas as massas nos tempos definidos por norma.

Figura 20 – Ensaio de Absorção de água por capilaridade.



Fonte: Própria (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as análises serão subdivididos em propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, por ensaio realizado, como está detalhado a seguir.

### 4.1 Estado fresco

#### 4.1.1 Consistência

Na tabela 9, apresentam-se resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas moldadas com RF e na tabela 10, as argamassas de referência, na qual estão detalhados a água de amassamento e o fator água/aglomerante obtidos para a moldagem dos corpos-de-prova.

Tabela 9 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas moldadas com RF.

<b>Mistura</b>	<b>Código</b>	<b>Quantidade de água (ml)</b>	<b>água/aglomerante (a/c)</b>
Cimento : cal : RF : areia	RF50-CHI	420	2,14
Cimento : RF : areia	RF100	445	2,27
Cimento : RF : areia (+ aditivo)	RF100-ADT	425	2,18
Cimento : cal : RF : areia (adição de MC)	RF50-MC	420	2,38
Cimento : RF : areia (adição de MC)	RF100-MC	445	2,52

Fonte: Própria (2019).

Tabela 10 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas de referência.

<b>Mistura</b>	<b>Código</b>	<b>Quantidade de água (ml)</b>	<b>água/aglomerante (a/c)</b>
Cimento : cal : areia	REF-CHI	400	2,04
Cimento : areia (+ aditivo)	REF-ADT	402	2,01
Cimento : areia	REF	416	2,08
Cimento : cal : areia (adição de MC)	REF-MC	390	2,21

Fonte: Própria (2019).

O traço com substituição da cal hidratada por 100% de RF (RF100) apresentou um aumento de 6% no percentual de água em relação ao traço com 50% de RF (RF50-CHI), bem como este último requisitou 5% a mais quando comparado ao traço de referência (cimento : cal

: areia). Este intervalo representou um padrão no aumento de água e na proporção de resíduo. De modo geral, quanto maior foi o teor de resíduo fino de caulim nas amostras com cal, maior o consumo de água em relação aos traços de referência.

No quesito analisado, a mistura de referência contendo 1% de aditivo plastificante (REF-ADT) mostrou comportamento semelhante à mistura composta por CH-I (REF-CHI). Houve redução de 4,5% na quantidade de água na argamassa RF100-ADT quando comparada ao RF100 e, conseqüentemente, o fator água/aglomerante, como esperado. Comparando as argamassas contendo aditivo, a RF100-ADT aumentou em 8,5% o fator a/c em relação a REF-ADT. Além disso, observou-se uma pequena segregação da massa de RF100, devido à pouca plasticidade; esta propriedade foi melhorada na presença de aditivo.

Nas amostras contendo MC apresentaram a água adicionada permaneceu a mesma quando comparada aos mesmos traços sem MC, exceto para o de referência que mostrou uma pequena redução.

Para o resíduo de caulim grosso (RG), os resultados serão abordados em função do espalhamento e do fator água/aglomerante, como observado na tabela 11, considerando que para este grupo houve uma variação nas quantidades em massa dos componentes das misturas e, conseqüentemente da água, necessárias a moldagem dos corpos-de-prova.

Tabela 11 – Resultados do ensaio do índice de consistência das argamassas moldadas com RG.

<b>Mistura</b>	<b>Código</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>	<b>água/aglom erante</b>
Cimento : cal : areia : RG	RG50-CHI	255	2,48
Cimento : cal : RG	RG100-CHI	258	2,71
Cimento : RG (+ aditivo)	RG100-ADT	255	2,33
Cimento : RG	RG100	255	2,45

Fonte: Própria (2019).

Observa-se que argamassas com RG necessita de uma maior quantidade de água para a consistência definida em relação as argamassas com areia. Houve um aumento considerável no fator água/cimento, principalmente nas misturas contendo cal. Comparando o RG100-ADT (1% de aditivo) e o RG100 (sem aditivo), ocorreu uma diminuição no fator, mostrando uma melhora no desempenho plástico da argamassa na presença de aditivo. A figura 21 mostra o aspecto da argamassa de cimento e resíduo grosso de caulim na proporção 1:6, sem aditivo.

Figura 21 – Argamassa de cimento e resíduo grosso de caulim (1:6).

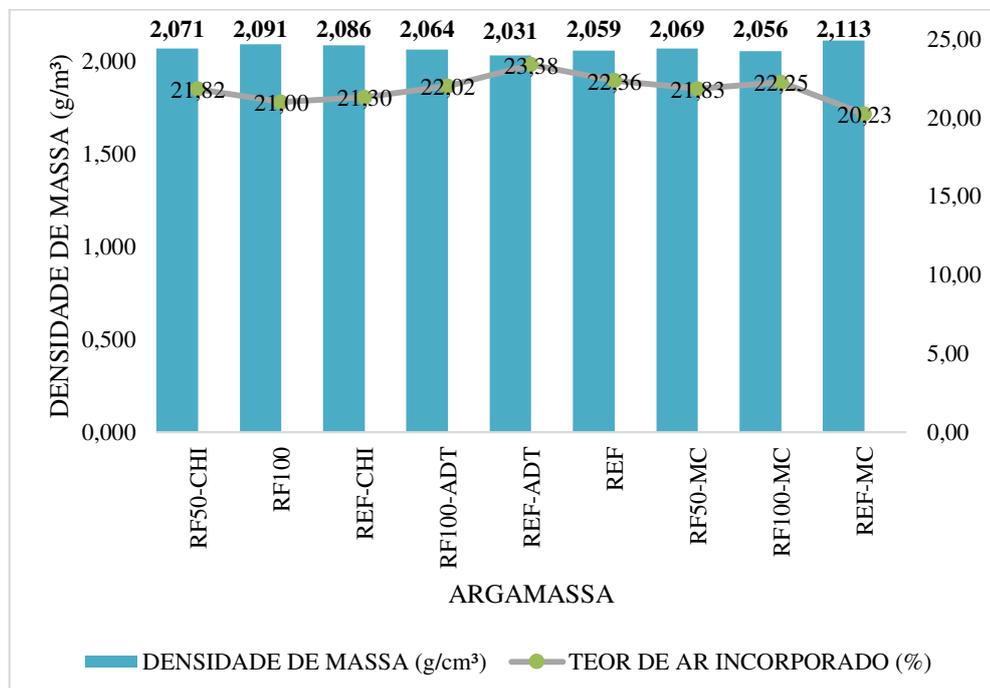


Fonte: Própria (2019).

#### 4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A figura 22 apresenta as densidades de massa e teor de ar incorporado para as misturas contendo resíduo fino em comparação com as argamassas de referência.

Figura 22 – Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas com RF e de referência.

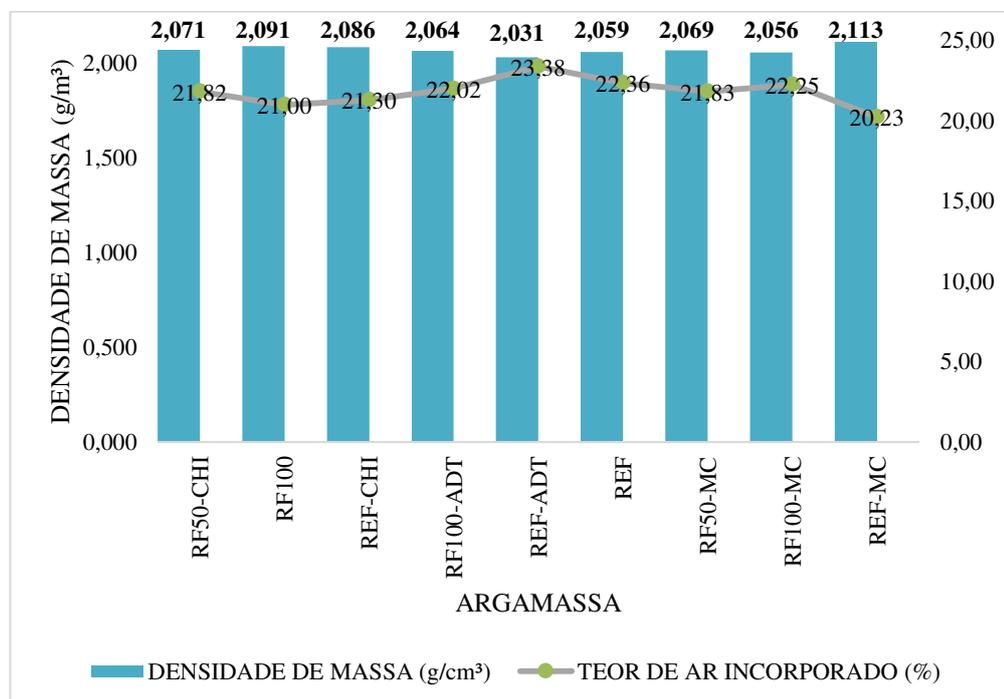


Fonte: Própria (2019).

A densidade de massa da argamassa está diretamente relacionada com as densidades dos materiais sólidos e com o teor de ar incorporado que compõem a argamassa (CINCOTTO et al, 1995 apud NASCIMENTO, 2014). Como é possível observar, a variação nas densidades de massa foi pequena, entre 2,03 g/cm<sup>3</sup> e 2,11 g/cm<sup>3</sup>. As misturas com substituição de 100% por resíduo fino de caulim (RF100) e a referência composta por cal (REF-CHI) apresentaram densidade 2,09 g/cm<sup>3</sup> e teores de ar incorporado aproximados (21%), indicando semelhança nesta propriedade.

Em contrapartida, as argamassas incorporadas com aditivo, RF100-ADT E REF-ADT, apresentaram uma pequena variação na densidade e teores de ar mais elevados. A adição de MC nas argamassas gerou uma diminuição na densidade, o que pode ser explicado pela substituição da massa do cimento (material mais denso) pelo metacaulim (menos denso).

Figura 23 – Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas com RG e de referência.



Fonte: Própria (2019).

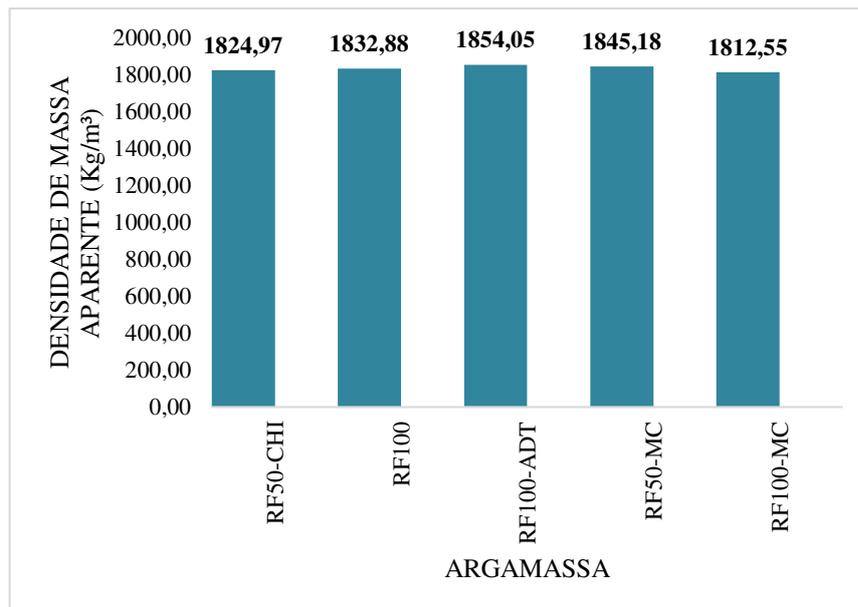
O aumento na proporção de resíduo de caulim grosso (Figura 23) resultou em uma redução na densidade da argamassa. Este resultado foi conforme esperado, considerando que o resíduo possui massa específica menor que a areia, de 2,37 g/cm<sup>3</sup> e 2,63 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Por outro lado, houve uma redução no teor de ar incorporado destas misturas. As argamassas contendo 100% de RG apresentaram densidades semelhantes ( $\approx 2$  g/cm<sup>3</sup>) e teores de ar incorporado aproximados.

## 4.2 Estado Endurecido

### 4.2.1 Densidade de Massa Aparente

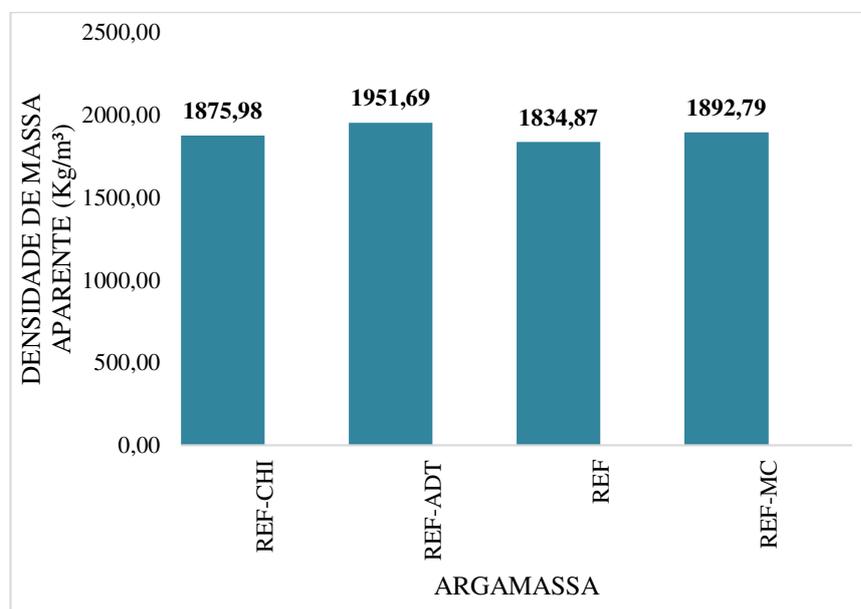
A densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas foi calculada através da média das massas dos corpos-de-prova e do volume, variado com o diâmetro e a altura medidos. A Figura 24 mostra as densidades calculadas para as argamassas contendo resíduo fino de caulim e a Figura 25, as argamassas de referência.

Figura 24 – Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas com RF.



Fonte: Própria (2019).

Figura 25 - Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas de referência.



Fonte: Própria (2019).

As densidades das argamassas contendo RF foram semelhantes, apresentando pequena variação. Apesar de pouco perceptível, a presença de RF reduziu a densidade aparente nas argamassas quando comparadas às de referência. A tabela 12, extraída da NBR 13281 (ABNT, 2005), contém a classificação das argamassas para assentamento e revestimento, quanto à densidade de massa no estado endurecido.

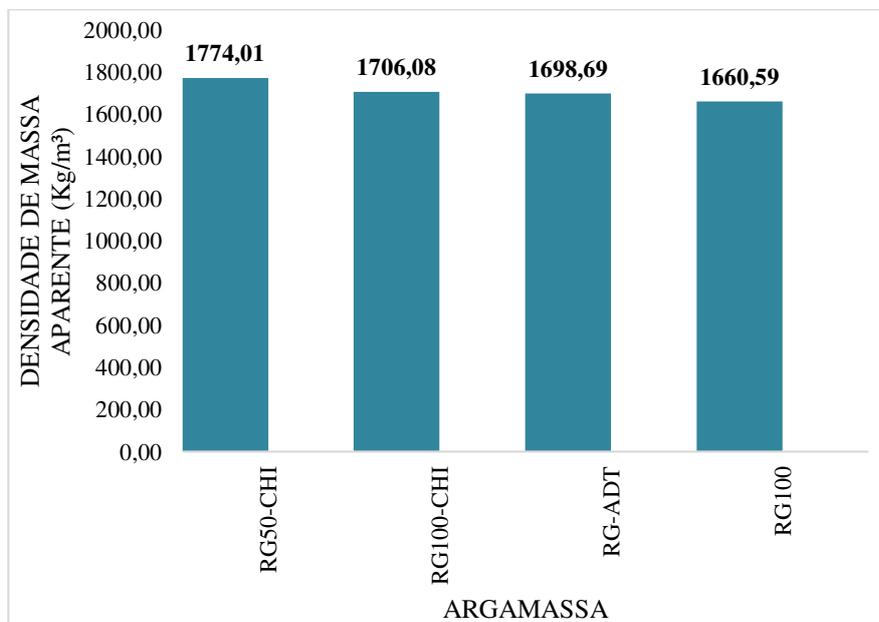
Tabela 12 – Classes para densidade de massa aparente no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	> 1800

Fonte: ABNT NBR 13281 (2005).

Como é possível observar, todas as argamassas analisadas neste grupo se enquadram como M5. Considerando que a norma recomenda que caso a classificação esteja compreendida entre duas faixas, adota-se a maior classe.

Figura 26 – Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas com RG.



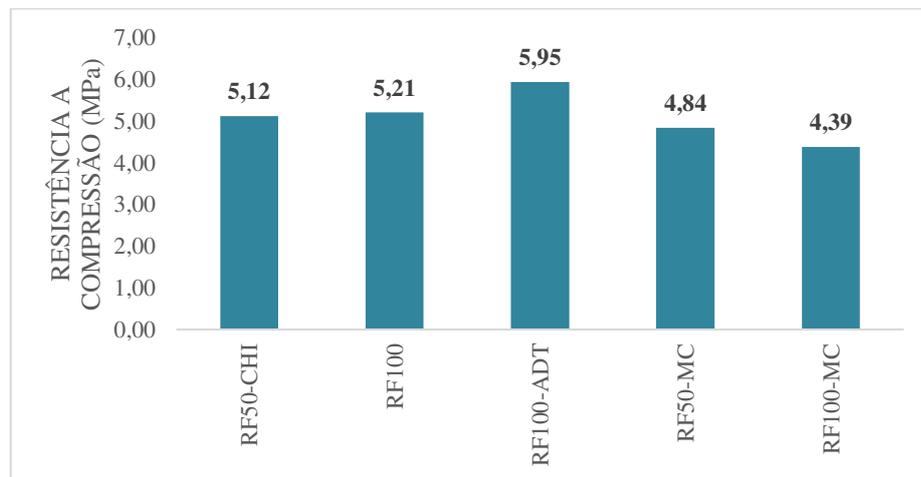
Fonte: Própria (2019).

Diferentemente do grupo anterior, a figura 26 mostra que as argamassas que contém resíduo grosso de caulim (RG) se enquadram como M4. À medida que a proporção de RG aumentou, a densidade de massa aparente diminuiu.

#### 4.2.2 Resistência Mecânica

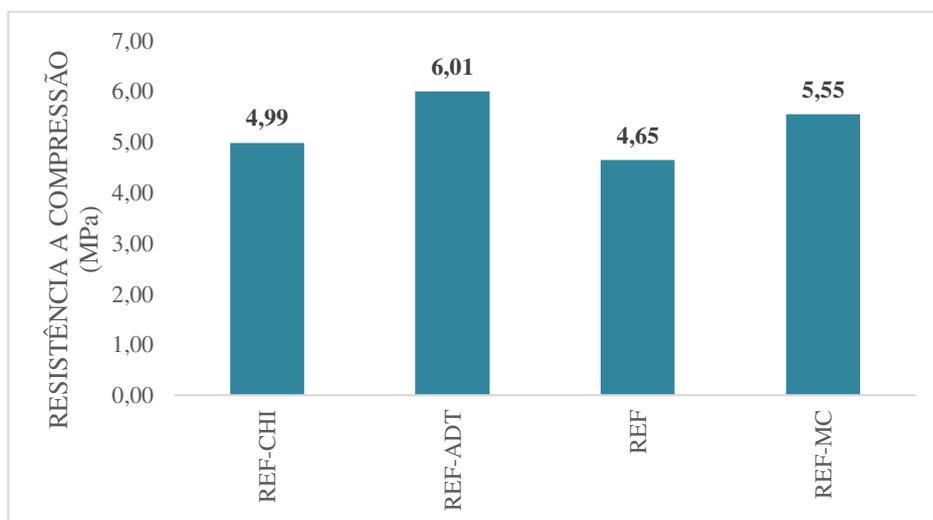
A resistência à compressão axial dos corpos-de-prova (CP) foi o parâmetro analisado para a propriedade de resistência mecânica. Os resultados da tensão média de ruptura das argamassas compostas por RF e das argamassas de referência estão expostos na figura 27 e 28, respectivamente. As tensões por CP e os desvios calculados estão no Apêndice A.

Figura 27 – Resistência à compressão das argamassas com RF.



Fonte: Própria (2019).

Figura 28 - Resistência à compressão das argamassas de referência.



Fonte: Própria (2019).

As tensões das amostras de proporção de cal e resíduo fino de caulim demonstraram pouca variação entre si (REF-CHI/RF100/RF50-CHI). Nota-se que, à medida que o teor de RF

foi aumentado e, conseqüentemente diminuiu-se o percentual da cal, a resistência aumentou. Em relação à argamassa de referência (REF-CHI), a argamassa RF50-CHI aumentou 2,6% e a RF100 resistiu 4,4% a mais que o esperado. A hipótese para este fato seria a diminuição do percentual da cal, pois ela causa a diminuição da resistência à compressão (SILVA, 2006). Por outro lado, o RF pode ter causado o efeito de empacotamento das partículas.

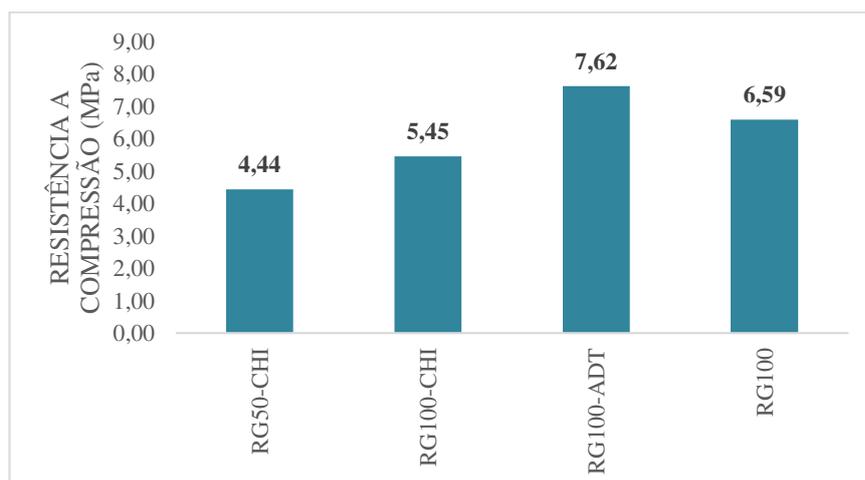
As argamassas compostas por aditivo apresentaram as maiores tensões de ruptura, mostra um desempenho mecânico superior. Em contrapartida, houve uma redução na resistência das argamassas de RF com adição de MC. Comparando os traços de referência REF-CHI e REF-MC, sem e com adição de MC, respectivamente, ocorreu um aumento de 11% na argamassa com MC. É possível concluir que, quanto maior foi a proporção de RF, menor a resistência da argamassa incorporada com MC.

Por consequência, a interação de resíduo fino de caulim e metacaulim, neste caso, não apresentou desempenho satisfatório. Uma das hipóteses é que o MC utilizado apresenta características semelhantes ao resíduo, como a granulometria. Outro fator é que os finos, neste caso, ocupam os vazios entre os grãos de agregado, aumentando assim a compacidade da argamassa (SILVA, 2006).

Azerêdo (2012), ao estudar o uso de resíduo de caulim em argamassas de cal também incorporadas com MC, apontou que a diminuição da resistência em função do aumento do teor de resíduo se dá pela facilidade na formação dos produtos hidratados, tal como o  $\text{CaCO}_3$ , já que a quantidade de poros vazios não teria sido excessiva para ser preenchida durante o processo de hidratação.

As tensões de resistência à compressão das argamassas com RG são comparadas na figura 29.

Figura 29 – Resistência a compressão das argamassas com RG.



Fonte: Própria (2019).

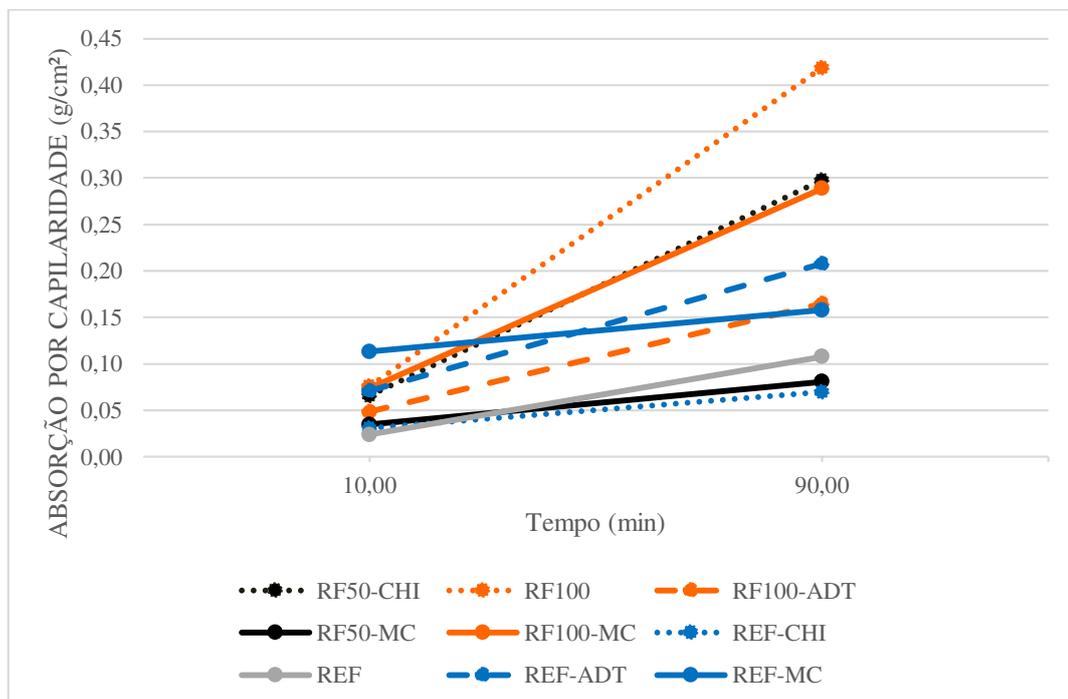
As argamassas com substituição da areia por 100% de RG apresentaram melhor desempenho na resistência a compressão. Diferentemente de Nóbrega (2007, p. 76), as argamassas de RG obtiveram boa resistência, mesmo com uma maior relação água/cimento.

Semelhante ao grupo de RF, a argamassa com aditivo teve maior resistência média, gerando um padrão nas análises. Quando comparado ao traço de mesma proporção, porém sem a aditivo (RG100), o RG100-ADT obteve um aumento de 15,6% na resistência. Em contrapartida, quando comparado ao traço de referência com aditivo (REF-ADT), a resistência do RG100-ADT aumentou em 26,8%. Nos traços 1:6, a resistência a compressão de RG100 configurou 42% a mais que a referência REF, demonstrando um desempenho muito maior que o esperado.

#### 4.2.3 Absorção de água por capilaridade

A Figura 30 mostra o gráfico de absorção por capilaridade versus o tempo para as argamassas com RF e a tabela 13 os coeficientes de capilaridade para as amostras de RF e RG, bem como para as argamassas de referência. As médias calculadas para o coeficiente de capilaridade, de acordo com os desvios estabelecidos por norma, estão detalhadas no Apêndice B.

Figura 30 – Gráfico de absorção por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) versus o tempo ( $\text{min}^{1/2}$ ) para argamassas com RF e de referência.



Fonte: Própria (2019).

Como é possível observar, para as amostras REF-CHI/RF50-CHI/RF100, houve um aumento na absorção ao longo do tempo para as proporções de 50% e 100% de resíduo. Na primeira aferição, passados 10 minutos de ensaio, a variação de absorção nas argamassas foi pequena. Aos 90 minutos, nota-se um intervalo maior, de 0,35 g/cm<sup>2</sup>, principalmente entre o traço de referência (REF-CHI) e de 100% de resíduo (RF100). Este efeito também é visível através do coeficiente de capilaridade (Tabela 13).

Tabela 13 – Coeficiente de Capilaridade (C) para as argamassas estudadas.

<b>Argamassa</b>	<b>Coeficiente de capilaridade – C (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)</b>	<b>Argamassa</b>	<b>Coeficiente de capilaridade – C (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)</b>
RF50-CHI	4,56	RG50-CHI	12,62
RF100	6,73	RG100-CHI	13,59
RF100-ADT	2,28	REF-CHI	0,77
REF-ADT	2,69	RG100-ADT	6,51
RF50-MC	0,90	RG100	11,53
RF100-MC	4,22	REF	1,65
REF-MC	0,88	-	-

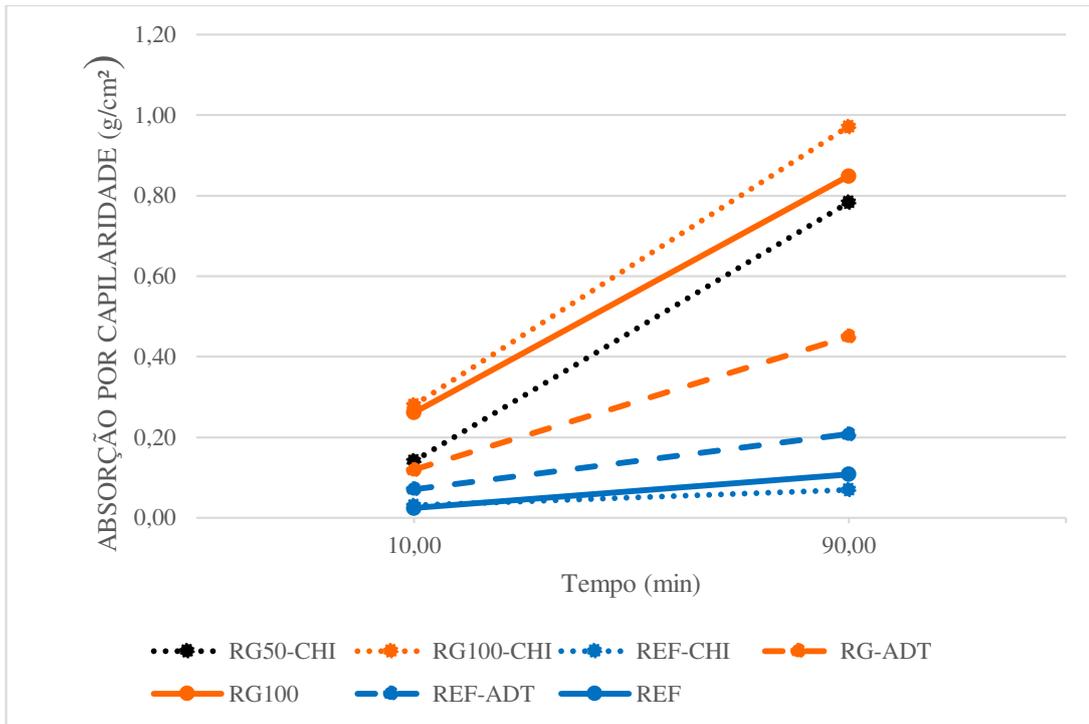
Fonte: Própria (2019).

Comparando RF100 e RF100-ADT, percebe-se que o aditivo plastificante influenciou positivamente nas condições de permeabilidade, reduzindo em 34% o coeficiente de capilaridade. A redução na capilaridade é consequência da diminuição do volume de água e fator água/cimento, como o próprio fabricante indica.

As argamassas compostas por RF e MC apresentaram bom desempenho nesta propriedade frente às misturas sem MC. Na tabela 13, observou-se uma redução considerável entre os coeficientes de capilaridade das argamassas RF50-CHI e RF50-MC. Como citado anteriormente, isto pode ser consequência da quantidade de finos na argamassa, aumentando a compactidade. Esta melhoria das condições de permeabilidade ocorre devido ao ganho no empacotamento, por causa do efeito filler (BARBOSA; MOTA; CARNEIRO, 2006).

O gráfico da absorção por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>) versus o tempo (min) para as argamassas de RG (Figura 31) mostra tendência semelhante à incorporação de resíduo fino de caulim nas argamassas.

Figura 31 – Gráfico de absorção por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) versus o tempo (min) para argamassas com RG e de referência.



Fonte: Própria (2019).

Quanto maior foi a proporção de RG nas argamassas, maior a absorção de água por capilaridade e, conseqüentemente, o coeficiente de capilaridade. Isto se deve ao fato de que a granulometria do RG é maior que areia (fina), visto que o resíduo é classificado como agregado médio, aumentando assim os espaços vazios entre os grãos e, portanto, a permeabilidade.

As argamassas compostas por cal hidratada na proporção de 50% e 100%, RG50-CHI e RG100-CHI apresentaram retas paralelas no gráfico, mostrando variação semelhante e coeficientes de capilaridade (Tabela 13) próximos (entre  $12,6$  e  $13,6 \text{ g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ).

Na argamassa incorporada com aditivo plastificante, RG100-ADT, observa-se uma redução de 43,5% no coeficiente de capilaridade, comparado à mesma argamassa sem aditivo. As argamassas de referência REF-ADT e REF não apresentaram o mesmo padrão de redução de absorção com adição de aditivo, sendo necessário verificar esta variação.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas nas argamassas, no estado fresco e endurecido, foi possível concluir alguns pontos sobre a influência do resíduo de caulim para os traços estudados.

- As argamassas com substituição da cal hidratada (CH-I) pelo resíduo fino de caulim (RF) nas proporções de 50% e 100% à medida que o RF aumentou: necessitou de um maior consumo de água de amassamento, apresentando assim um maior fator água/aglomerante; teve maior densidade de massa no estado fresco e endurecido; resistiram melhor aos esforços de compressão, provavelmente pelo efeito de empacotamento das partículas; mostraram maior capilaridade.
- As argamassas com substituição da areia pelo resíduo grosso de caulim (RG) nas proporções de 50% e 100%, à medida que a quantidade de RG aumentou: da mesma forma que o RF, aumentou o consumo de água e fator a/c; mostraram menor densidade de massa no estado fresco e endurecido, por ser menos denso que a areia; resistiram melhor aos esforços de compressão quando comparados às argamassas de referência; apresentaram um alto coeficiente de capilaridade. De um modo geral, as argamassas com resíduo de caulim consomem mais água, mas podem obter aumento na resistência;
- As argamassas com 1% de aditivo plastificante apresentaram os resultados mais satisfatórios, para os dois grupos de resíduo, em diminuição do fator a/c, na densidade de massa no estado fresco e endurecido; aumento da resistência e diminuição da absorção de água por capilaridade.
- As argamassas de RF com substituição de 10% da massa do cimento por adição mineral de metacaulim MC apresentaram resultados pouco conclusivos. Não houve redução na quantidade de água, mas observou-se uma pequena melhora no aspecto da mistura. Apresentam diminuição na densidade de massa no estado fresco e endurecido, à medida que a proporção de resíduo aumentou, o que pode ser justificado pela diminuição na massa do cimento (mais denso); a resistência à compressão diminuiu com o aumento de RF, devido a provável interação do resíduo com MC, por apresentarem propriedades semelhantes. O coeficiente de capilaridade reduziu em relação às argamassas sem adição.

## SUGESTÕES DE PESQUISA

- Estudar o uso de resíduo de caulim fino e grosso em proporções mais variadas para os traços de 1:1:6 e 1:6;
- Avaliar o desempenho do aditivo em percentuais menores, de 0,25% e 0,5% por exemplo, bem como testar outras marcas de aditivo plastificante em argamassas incorporadas com resíduo de caulim;
- Estudar a incorporação da metacaulim por adição pura em argamassas com resíduo de caulim, em diferentes percentuais, a fim de comparar com a adição por substituição e criar um padrão nas propriedades, principalmente de absorção por capilaridade e resistência.

## REFERÊNCIAS

- ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 2, p. 91–96, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento**. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento/>> Acesso em 20 jun. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 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 axial. 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 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 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento portland. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009
- \_\_\_\_\_. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- AZERÊDO, A. F. N. de. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 229f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- BARBOSA, F.; MOTA, J.; CARNEIRO, A. A influência do teor de adição metacaulim nas propriedades no estado endurecido: capilaridade e resistência mecânica de argamassas inorgânicas para recuperação de monumentos históricos. **XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Florianópolis, SC: 2006.

- BAUER, F (org). **Materiais de Construção**. Vol 1. 5a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. IBRACON, 2010. v. 1 e 2p. 863–891.
- CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos Materiais na Aderência dos Revestimentos de Argamassa. IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais...**Brasília, DF: 2001
- DAL MOLIN, D. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. IBRACON, 2005.
- DIAS, S. L. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil - avaliação da atividade pozolânica**. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- DINIZ, M.A. **Concreto auto-adensável utilizando resíduos de caulim**. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, 2010.
- FIGUEIREDO, S. S. **Influência da adição de resíduos industriais na durabilidade de blocos solo-cal**. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, 2014.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.
- JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113f. Tese (Livre Docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- LAURENTINO, R. N. **Estudo da argamassa estabilizada para assentamento com adição mineral de metacaulim**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- LUZ, A. et al. Argila - Caulim. In: LUZ, A.; LINS, F. (Eds.). **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. 2ª edição ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 255–294.
- MENEZES, R. R. et al. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 12, n. 1, p. 226–236, 2007.
- MORAES, M. L. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.
- MOTA, J.; OLIVEIRA, R.; CARNEIRO, A. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. **Revista Matéria**, v. 21, n. 4, p. 1105-1116, 2016.
- NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. EPUSP, São Paulo, 2004.
- NASCIMENTO, J. E. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de

Pernambuco, 2014.

NÓBREGA, A. F. DE. **Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba, 2007.

OLIVEIRA, G. **Desenvolvimento de argamassa colante utilizando resíduo de caulim**. 69f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

REZENDE, M. L. et al. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 3, p. 285–290, 2008.

ROCHA, A. K. et al. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 4, p. 505–512, 2008.

SCARTEZINI, L. M. et al. Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, p. 85–92, 2002.

SILVA, F. et al. Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó (RN). In: **Série rochas e minerais industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

SILVA, N. G. da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2006.

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

SOUSA, L. D. A. DE; HARIMA, E.; LEITE, J. Y. P. Rejeito de caulim de apl de pegmatito do RN/PB – uma fonte promissora para cerâmica branca. **Holos**, v. 3, p. 212–222, 2007.

SOUZA, P. S. L. et al. Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial. **Revista Matéria**, v. 20, n.4., p. 982–991, 2016.

TRISTÃO, F. A. **Influencia da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

**APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS**

ARGAMASSA	RESULTADOS (MPa)			MÉDIA	DESVIOS		
	C1	C2	C3		C1	C2	C3
RF50-CHI	5,36	4,86	5,15	5,12	4,62	5,14	0,52
RF100	4,47*	5,34	5,08	5,21	14,20*	2,50	2,50
RG50-CHI	4,61	4,34	4,37	4,44	3,83	2,25	1,58
RG100-CHI	5,47	5,32	5,56	5,45	0,37	2,39	2,02
RF100-ADT	5,75	6,63*	6,14	5,95	3,28	11,52*	3,28
RF100-MC	4,38	4,39	5,15	4,39	0,11	0,11	17,45*
*REF-CHI	3,27	5,34	4,63	4,99	34,40*	7,12	7,12
RG100-ADT	7,63	7,49	7,75	7,62	0,09	1,75	1,66
RG100	6,92	6,36	6,5	6,59	4,95	3,54	1,42
REF-MC	5,63	5,38	5,63	5,55	1,50	3,00	1,50
RF50-MC	4,88	4,8	3,88*	4,84	0,83	0,83	19,83*
REF	4,87	4,42	3,27*	4,65	4,84	4,84	29,60*
REF-ADT	7,12*	6,11	5,9	6,01	18,57*	1,75	1,75

\*Corpos-de-prova desconsiderados no cálculo da média, desvio maior 6%.

**APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE**

GRUPO	CP	Mi (g)	M10 (g)	M90 (g)	Absorção (10min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção (90min) (g/cm <sup>2</sup> )	C (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Absorção média (10min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção média (90min) (g/cm <sup>2</sup> )	C médio (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
RF50-CHI	L1	352,43	354,03	360,00	0,081	0,385	5,97	0,066	0,298	4,56
	L2	368,43	369,77	373,57	0,068	0,261	3,80			
	L3	352,77	353,70	357,60	0,048	0,246	3,90			
RF100	L1*	368,93	369,53	371,77	0,031	0,144	2,23	0,076	0,418	6,73
	L2	356,97	358,53	365,53	0,080	0,436	7,00			
	L3	355,67	357,07	363,53	0,071	0,401	6,47			
RG50-CHI	L1	345,93	348,57	360,73	0,134	0,754	12,17	0,141	0,784	12,62
	L2	346,40	348,97	361,03	0,131	0,745	12,07			
	L3	358,17	361,27	374,90	0,158	0,852	13,63			
RG100-CHI	L1	330,30	337,83	352,47	0,384	1,129	14,63	0,280	0,972	13,59
	L2	333,10	338,50	352,20	0,275	0,973	13,70			
	L3	344,47	348,00	360,43	0,180	0,813	12,43			
RF100-ADT	L1	374,73	375,90	378,43	0,059	0,188	2,53	0,048	0,165	2,28
	L2*	361,00	361,40	362,50	0,020	0,076	1,10			
	L3	362,97	363,70	365,73	0,037	0,141	2,03			
RF100-MC	L1	353,00	354,07	356,43	0,054	0,175	2,37	0,074	0,289	4,22
	L2	366,10	367,50	371,77	0,071	0,289	4,27			
	L3	351,57	353,07	357,23	0,076	0,289	4,17			
REF-CHI	L1	364,57	365,17	365,83	0,031	0,065	0,67	0,031	0,070	0,77
	L2	366,77	367,37	368,23	0,031	0,075	0,87			
	L3*	376,83	377,53	378,87	0,036	0,104	1,33			

\*Corpos-de-prova desconsiderados no cálculo do coeficiente C, conforme desvio estabelecido pela NBR 15259 (ABNT, 2005).

**APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE**

GRUPO	CP	Mi (g)	M10 (g)	M90 (g)	Absorção (10min)	Absorção (90min) (g/cm <sup>2</sup> )	C (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Absorção média (10min) (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção média (90min) (g/cm <sup>2</sup> )	C médio (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
RG-ADT	L1	327,83	329,53	334,50	0,087	0,340	4,97	0,119	0,450	6,51
	L2	328,87	330,93	337,70	0,105	0,450	6,77			
	L3	344,33	347,57	355,37	0,165	0,562	7,80			
RG100	L1	325,10	331,07	343,57	0,304	0,940	12,50	0,261	0,849	11,53
	L2	335,27	338,90	348,63	0,185	0,681	9,73			
	L3	322,17	327,97	340,33	0,295	0,925	12,37			
REF-MC	L1	367,77	370,00	370,73	0,114	0,151	0,73	0,113	0,158	0,88
	L2	367,13	369,40	370,43	0,115	0,168	1,03			
	L3	369,20	371,37	372,23	0,110	0,154	0,87			
RF50-MC	L1*	361,47	362,33	364,10	0,044	0,134	1,77	0,035	0,081	0,90
	L2	358,97	359,67	360,70	0,036	0,088	1,03			
	L3	357,77	358,43	359,20	0,034	0,073	0,77			
REF	L1	348,87	349,10	349,70	0,012	0,042	0,60	0,024	0,108	1,65
	L2	345,23	345,83	347,80	0,031	0,131	1,97			
	L3	353,53	353,87	355,20	0,017	0,085	1,33			
REF-ADT	L1	365,97	367,9	370,87	0,098	0,250	2,97	0,071	0,208	2,69
	L2	366,87	368,13	370,27	0,065	0,173	2,13			
	L3	360,20	361,17	364,13	0,049	0,200	2,97			

\*Corpos-de-prova desconsiderados no cálculo do coeficiente C, conforme desvio estabelecido pela NBR 15259 (ABNT, 2005).