



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOÃO SÉRGIO DE AQUINO FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NO**  
**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS UTILIZANDO O**  
**MINI CONE**

**JOÃO PESSOA**  
**2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOÃO SÉRGIO DE AQUINO FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NO**  
**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS UTILIZANDO O**  
**MINI CONE**

Monografia apresentada a Universidade Federal da Paraíba, como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): GIVANILDO ALVES DE AZEREDO

**JOÃO PESSOA**  
**2021**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A657a Aquino Filho, João Sérgio de.

Avaliação da influência de adições minerais no comportamento reológico de pasta cimentícias utilizando o mini cone / João Sérgio de Aquino Filho. - João Pessoa, 2021.

31 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves de Azeredo.  
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Pastas. 2. Pozolana. 3. Reologia. 4. Resíduo de Tijolo Cerâmico Moído. 5. Metacaulim. I. Azeredo, Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 624 (043.2)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**JOÃO SÉRGIO DE AQUINO FILHO**

### **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS UTILIZANDO O MINI CONE**

Trabalho de Conclusão de Curso em 03/12/2021 perante a seguinte Comissão Julgadora:

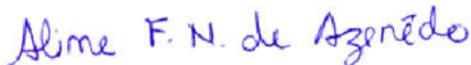


---

Profº Drº Givanildo Alves de Azeredo  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

---

APROVADO



---

Profª Drª Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo  
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

---

APROVADO



---

Profº. Drº Clóvis Dias  
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

---

APROVADO



---

Profª. Andrea Brasiliano Silva  
Matrícula Siape: 1549557  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder o dom da vida, a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e estar presente em todos os momentos da minha vida;

À minha mãe, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. A senhora não mediu esforços para lutar por minha educação. Essa vitória é nossa!

Ao meu pai que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e que para mim foi muito importante.

Ao professor e orientador Givanildo Alves de Azeredo por sua paciência, amizade e dedicação durante esta orientação;

À professora e orientadora do PIBIC Aline Figueiredo Nobrega de Azeredo, pelos ensinamentos, correções, incentivos e constante disponibilidade durante todo o projeto de pesquisa.

Ao professor Clóvis Dias, pelos ensinamentos, confiança e incentivo durante o curso.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

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

Aos colegas que fiz durante o PIBIC, que fizeram companhia nos momentos de estudo, pelo apoio, troca de experiência e conhecimento. Em especial à Kássia Sinhorelli, Anselmo Neto e Priscilla Sales.

Aos colegas da Turma 2015.2 do curso de Engenharia Civil, pelos momentos de descontração e ensinamentos durante essa jornada acadêmica. Em especial à Alisson Andrade, Rodrigo Leite, Byanca Evely, Thales Machado e Igor Vieira.

À minha namorada Letícia Rodrigues, que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Sempre foi uma grande companheira e parceira de todas as horas.

Agradeço a todos, minha família, parentes e amigos que com seu incentivo me fizeram chegar à conclusão do meu curso e começo de uma nova carreira.

Por fim, a todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para que a concretização deste trabalho fosse possível.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Tipos comuns de comportamento de fluxo.....	13
<b>Figura 2</b> – Beneficiamento do resíduo de tijolo cerâmico: (a) blocos de tijolos cerâmicos; (b) britador de mandíbulas; (c) resíduo de tijolo cerâmico triturado; (d) moinho de bolas e (e) resíduo de tijolo cerâmico moído.....	16
<b>Figura 3</b> – Curva granulométrica do MC, RTM e CPV – ARI.....	18
<b>Figura 4</b> – Histograma do MC, RTM e CPV – ARI.....	18
<b>Figura 5</b> – Difração de raios-x do cimento Portland CP V-ARI.....	19
<b>Figura 6</b> – Difração de raios-x do resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM) e do Metacaulim (MC).....	20
<b>Figura 7</b> – Modelo esquemático do mini cone utilizado.....	21
<b>Figura 8</b> – Preparação das pastas: (a) mistura dos finos; (b) processo de mistura manual; (c) processo de mistura mecanizado.....	22
<b>Figura 9</b> – Base de madeira utilizada para ensaio do mini cone.....	22
<b>Figura 10</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.....	23
<b>Figura 11</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.....	23
<b>Figura 12</b> – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de MC adicionado ao cimento Portland; c) pasta com 20% de MC adicionado ao cimento Portland.....	24
<b>Figura 13</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.....	24
<b>Figura 14</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.....	24
<b>Figura 15</b> – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual e pasta composta por 100% de cimento Portland.....	25
<b>Figura 16</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.....	25
<b>Figura 17</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.....	25

<b>Figura 18</b> – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de cimento Portland substituído por MC; c) pasta com 20% de cimento Portland substituído por MC.....	26
<b>Figura 19</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.....	27
<b>Figura 20</b> – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.....	27
<b>Figura 21</b> – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de cimento Portland substituído por RTM c) pasta com 20% de cimento Portland substituído por RTM.....	28
<b>Figura 22</b> – Espalhamento de pasta contendo somente cimento Portland e relação a/agl. de 0,6, misturada de forma mecânica.....	28

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Ensaio de caracterização dos materiais.....	17
<b>Tabela 2</b> – Características físicas dos materiais.....	17
<b>Tabela 3</b> – Composição química dos materiais (Fluorescência de Raio-X).....	19
<b>Tabela 4</b> – Combinação dos materiais constituintes para as misturas estudadas.....	20
<b>Tabela 5</b> – Misturas de referência estudadas apenas com cimento Portland.....	20
<b>Tabela 5.1</b> – Combinação dos materiais constituintes para as misturas estudadas com cimento Portland.....	21

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CTR - Controle de Transporte de Resíduo

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MC - Metacaulim

RTM - Resíduo de Tijolo Cerâmico Moído

## RESUMO

A indústria da construção tem procurado o uso de soluções sustentáveis, uma delas é a incorporação de resíduos como materiais de construção. Para isso, estudos vêm sendo desenvolvidos para analisar a viabilidade da incorporação desses resíduos em pastas e concretos, visto que essas inserções alteram as propriedades dos materiais tanto no estado endurecido quanto fresco. A análise de materiais como pastas ou concretos em seu estado fresco está diretamente ligada ao estudo de uma simulação das solicitações que essas podem sofrer durante sua mistura, transporte e aplicação. Os materiais constituintes e a relação água/aglomerante têm um papel fundamental nas propriedades das pastas. Características como a finura do aglomerante, a forma da partícula e a origem mineralógica podem afetar diretamente a sua trabalhabilidade. Para o entendimento do comportamento reológico de pastas cimentícias no estado fresco, várias técnicas podem ser utilizadas como a reometria de fluxo e oscilação, o método do espalhamento pelo mini cone, escoamento pelo Funil de Marsh, método do Squeeze flow e o Vane test. Nesta pesquisa estudou-se o comportamento reológico de diferentes pastas cimentícias preparadas com o cimento Portland CP V-ARI e adição de metacaulim (MC) e adição de resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM). As pastas foram analisadas para diferentes relações água/aglomerante. Foram estudadas várias combinações de pastas contendo cimento Portland com MC ou RTM com substituição de 0, 10 e 20% dessas adições em relação à massa total dos materiais e relação água-aglomerante de 0,5 e 0,6. As pastas foram analisadas tanto misturadas manualmente como também mecanicamente. Os resultados mostraram que as misturas contendo as adições apresentaram espalhamento menor que as pastas contendo somente cimento Portland e água. As pastas contendo RTM obtiveram espalhamento maior e provocou uma diminuição na tensão de escoamento inicial quando comparado com o uso do MC, o que pode contribuir para uma mistura com maior facilidade de manuseio, ou seja, menos viscosa e também se constatou que em todas o processo de mistura mecânico foi mais eficiente que o processo manual.

**Palavras-Chave:** Pastas, Pozolana, Reologia, Resíduo de Tijolo Cerâmico Moído, Metacaulim.

## ABSTRACT

The construction industry has been looking for the use of sustainable solutions, one of which is the incorporation of waste as building materials. For this, studies have been developed to analyze the feasibility of incorporating these residues into pastes and concrete, as these insertions change the properties of materials both in hardened and fresh state. The analysis of materials such as pastes or concretes in their fresh state is directly linked to the study of a simulation of the demands that these may suffer during mixing, transport and application. The constituent materials and the water/binder ratio play a fundamental role in the properties of the pulps. Characteristics such as binder fineness, particle shape and mineralogical origin can directly affect its workability. To understand the rheological behavior of cementitious pastes in the fresh state, several techniques can be used such as flux and oscillation rheometry, the mini-cone scattering method, flow through the Marsh funnel, the Squeeze flow method and the Vane test. In this research, the rheological behavior of different cementitious pastes prepared with Portland cement CP V-ARI and addition of metakaolin (MK) and addition of ground ceramic brick waste (GBW) was studied. The pastes were analyzed for different water/binder ratios. Various combinations of pastes containing Portland cement with MK or GCW were studied with replacement of 0, 10 and 20% of these additions in relation to the total mass of materials and a water-binder ratio of 0.5 and 0.6. The pastes were analyzed both manually and mechanically mixed. The results showed that the mixtures containing the additions had a lower spread than the pastes containing only Portland cement and water. Pastes containing GCW had greater spread and caused a decrease in the initial yield stress when compared to the use of MK, which can contribute to a mixture that is easier to handle, that is, less viscous, and it was also found that in all mechanical mixing process was more efficient than the manual process.

**Keywords:** Pastes, Pozzolan, Rheology, Ground Ceramic Brick Waste, Metakaolin.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>22</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As pastas, bem como as argamassas e os concretos, são suspensões reativas, que podem ter a sua consistência alterada ao longo do tempo, principalmente pela atuação do cimento (BARBOSA et al., 2011).

As propriedades das pastas cimentícias podem sofrer modificações no momento da mistura pelos materiais que a constituem e pela relação água/aglomerante, podendo ser necessária à modificação no teor de água para manutenção de sua fluidez, o que pode influenciar a resistência mecânica (BETIOLI et al., 2009).

A reologia enquanto ciência é definida como a ciência que se dispõe a verificar a deformação e prever o escoamento de fluidos (TATTERSALL e BANFILL, 1983).

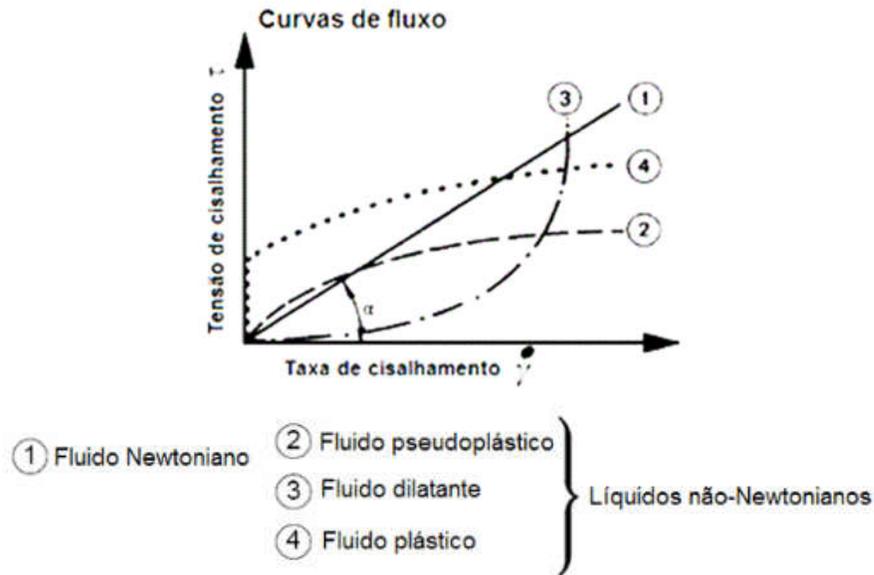
No mercado atual existem inúmeros líquidos com comportamento reológico entre o líquido e o sólido, que se apresentam relativamente viscosos e elásticos, conhecidos de viscoelástico (MACHADO, 2002). Segundo Struble e Lei (1995), o cimento tem comportamento viscoelástico.

Os fluidos são definidos em não-newtonianos e newtonianos. Os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, e são independentes da tensão e do tempo, onde a tensão de Cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento. Já os fluidos não-newtonianos apresentam a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não linear, e a viscosidade do fluido não é constante sob uma certa temperatura e pressão, mas depende da taxa de cisalhamento e da sua história de carregamento (FOX e MCDONALD, 1998). A Figura 1 ilustra essas características, onde é mostrada a curva de fluxo para cada tipo de fluido.

Existem diversos modelos reológicos que buscam descrever o escoamento e comportamento dos fluidos. Estudos como o de Nehdi e Rahman (2004), descrevem que os modelos reológicos para relatar fenômenos que acontecem no intermédio entre os estados sólido-elástico e fluido viscoso são capazes de prever a deformação das pastas de cimento com exatidão.

Segundo Nunes et al. (2011), é complicado determinar parâmetros reológicos no processo de hidratação do cimento, porque estes tendem a forma grumos no processo de hidratação. De acordo Ferraris, Oblab e Hillb (2001) outro aspecto que influencia as características reológicas das misturas é a semelhança da finura das adições com as do cimento e a influência da densidade das partículas de adições.

**Figura 1** - Tipos comuns de comportamento de fluxo.



Fonte: SCHRAMM, 2006.

As adições podem ser classificadas como ativas ou não ativas. Quando desenvolver reações químicas são classificadas como ativas e quando desenvolver interações físicas são classificadas como não ativas. Essas adições representam uma função importante quando aplicadas nas misturas de concreto de cimento Portland, com isso, aumentando a resistência e a durabilidade. Isto ocorre devido os mecanismos que agem na microestrutura da pasta de cimento pelas ações pozolânicas ou a mudança na estrutura dos poros em função do seu refinamento devido às partículas [MORAES, ISAIA e GASTALDINI (2000)]; (JERÔNIMO, 2014).

Segundo Jerônimo (2014), as adições por dois motivos diminuem o calor de hidratação por unidade de tempo. O primeiro motivo é a diminuição da quantidade de clínquer no concreto e o segundo motivo é que a reação pozolânica das adições só ocorre após a formação de hidróxido de cálcio.

Estudos como o de Janotka et al. (2009) mostram que as pastas de cimento Portland com 40% de metacaulim quando analisados o comportamento reológico em condição fresca, verificaram que com o aumento do teor de metacaulim a tensão de escoamento também aumentou. Quarcione (2008) concorda com este estudo e evidencia a importância desse tipo de estudo em pastas cimentícias, como sendo de grande valia para avaliar o comportamento do material durante o seu manuseio e aplicação.

A literatura sugere alguns testes como, ensaio de fluxo, ensaio oscilatório e ensaio de

palheta ou Vane test, para a definição dos parâmetros reológicos da pasta cimentícia, tais como tensão de escoamento, viscosidade, perfil reológico do material e os impactos da consolidação desse material associados a hidratação do cimento (SATO et al., 2013). Outro método bastante utilizado é o do espalhamento pelo mini cone. Esse teste é considerado rápido, barato e bastante utilizado para avaliar a capacidade de trabalhabilidade de pastas de cimento frescas. Contudo, esse método necessita de um procedimento padronizado para a sua execução [TAN, BERNAL e PROVIS (2017)].

O ensaio de fluxo mensura a tensão de cisalhamento a um certo índice de cisalhamento (ou vice-versa). Com a variabilidade da taxa ou da tensão de cisalhamento, a curva de escoamento pode ser traçada e, através desta ou de equações de estado reológico, as propriedades reológicas podem ser definidas de viscosidade, ou seja, resistência ao escoamento ou tensão de escoamento que é a tensão mínima necessária para iniciar o escoamento do material (HOPPE et al., 2006).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a influência de dois tipos de adições pozolânicas (Metacaulim - MC e Resíduo de Tijolo Cerâmico Moído - RTM), usadas como substituição de parte do cimento, e do processo de mistura (manual e mecanizado) no comportamento reológico das pastas cimentícias com o uso do mini-cone.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- 1) Estudar comportamento reológico no estado fresco de pastas cimentícias contendo pozolanas e/ou cimento Portland;
- 2) Indicar qual melhor relação água/aglomerante e dosagem dos aglomerantes em função da sua trabalhabilidade;
- 3) Relacionar os dados de parâmetros reológicos no estado fresco de diferentes técnicas de ensaio;

### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Neste item são apresentados os materiais, etapas e métodos necessários para a execução desta pesquisa.

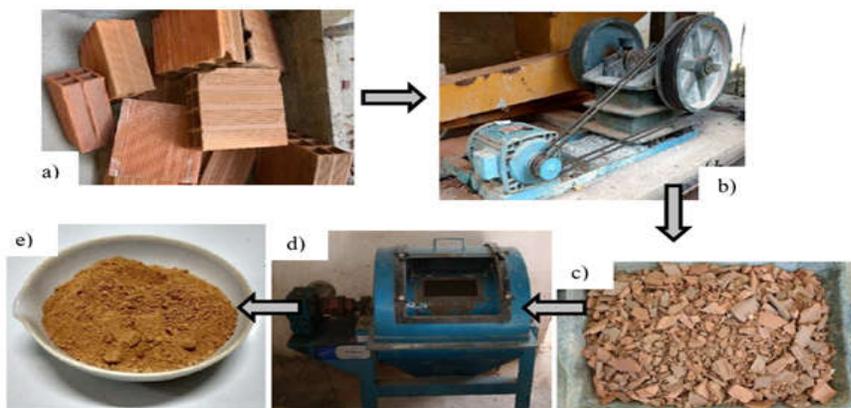
#### a) Coleta de materiais e beneficiamento dos resíduos

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, metacaulim (MC) e resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM). Foi utilizado o cimento Portland CP V-ARI vendido no comércio do estado da Paraíba, por possuir um valor mínimo de adição em sua composição, possibilitando uma melhor análise da influência das adições pozolânicas utilizadas neste estudo. Foi utilizado também um metacaulim comercial que pode ser obtido no comércio nacional. O RTM foi obtido a partir da coleta e do beneficiamento de blocos de tijolos cerâmicos (Figura 2a) em uma loja de materiais de construção local.

O beneficiamento do RTM se deu através de fragmentação e moagem. A fragmentação foi realizada em um britador de mandíbulas modelo J/58, fabricado pela PLANGG (Figura 2b), com intuito de quebrar os blocos em pedaços menores (Figura 2c) para favorecer a moagem.

Após a fragmentação, colocou-se o material em um moinho de bolas modelo SONNEX I-4205, fabricado pela CONTENCO (Figura 2d). Na moagem foram utilizadas 30.000 rotações, pois conforme estudo realizado por Carvalho (2016), o gasto energético realizado para um número maior de rotações não traria ganhos consideráveis para a finura do material (Figura 2e).

**Figura 2** – Beneficiamento do resíduo de tijolo cerâmico: (a) blocos de tijolos cerâmicos; (b) britador de mandíbulas; (c) resíduo de tijolo cerâmico triturado; (d) moinho de bolas e (e) resíduo de tijolo cerâmico moído.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

## b) Caracterização dos Materiais

Os materiais foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Na Tabela 1 encontra-se um resumo das análises que foram feitas nesses materiais para sua caracterização.

**Tabela 1** – Ensaio de caracterização dos materiais.

<b>Tipo de propriedade avaliada</b>	<b>Ensaio</b>
Física	Granulometria a laser Massa específica (NBR NM 23, 2001 e NBR 52, 2009) Massa unitária
Química	Fluorescência de raios-x (FRX)
Mineralógica	Difração de raios-x (DRX)

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

No que diz respeito às propriedades físicas, foram realizados ensaios de massa unitária, massa específica e granulometria a laser. Na determinação da massa específica foram adotados os procedimentos descritos na NBR NM 23 (ABNT, 2001) e NBR NM 52 (ABNT, 2009).

A massa unitária foi determinada no estado solto utilizando um recipiente de massa e volume conhecidos, no qual se fizeram três leituras para cada material e as médias dessas leituras foi o valor considerado. Na Tabela 2 são apresentados os dados referentes a essas características.

**Tabela 2** – Características físicas dos materiais.

<b>Material</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
CP V-ARI	3,060	0,920
RTM	2,579	0,730
MC	2,584	0,491

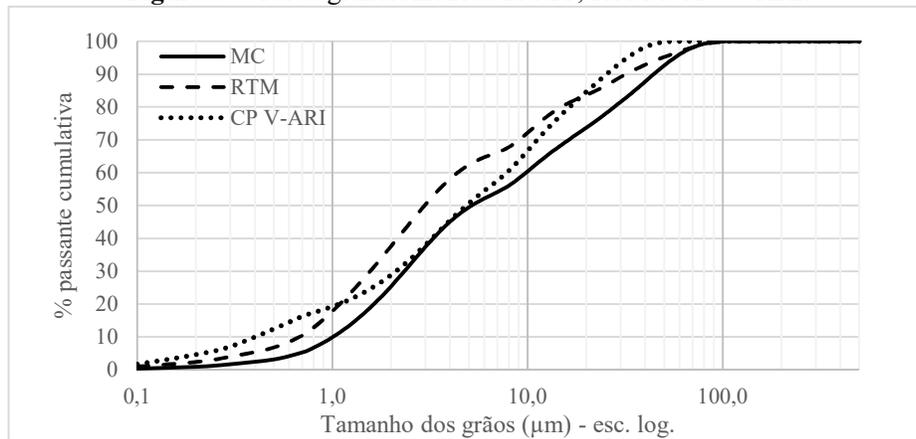
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

De acordo com os dados da Tabela 2, a massa específica do MC e do RTM foram praticamente idênticas. Entretanto, com relação a massa unitária isso não se verifica. O MC apresenta uma massa unitária de 46,6% menor que a do cimento e 32,7% menor que a do RTM. De acordo com SUDO et al. (1981), SANTOS (1992), BERGAYA et al. (2006), MURRAY (2007), as partículas do MC apresentam uma forma lamelar e uma explicação para isso é que pela forma como as mesmas se arranjam, ocorrem mais lacunas entre elas.

A granulometria a laser foi realizada com o granulômetro da marca CILAS modelo 1064, em uma faixa de tamanho entre 40 nm e 500 µm de diâmetro. A amostra foi dispersa no próprio equipamento em uma cuba de 400 ml de água destilada sob ação de um agitador mecânico por 20 minutos. Essa cuba também dispunha de ultrassom, que opera a frequência de

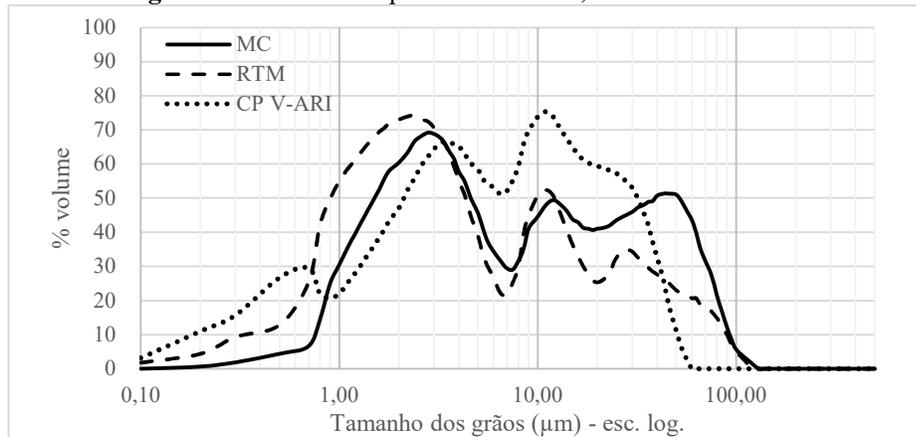
55 Hz e amplitude de 55%. Os Resultados são expressos em curvas de distribuição granulométrica das partículas (Figura 3), assim como o volume das partículas dos materiais finos representado na Figura 4.

**Figura 3** – Curva granulométrica do MC, RTM e CPV – ARI.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 4** – Volume das partículas do MC, RTM e CPV – ARI.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

A composição química dos materiais foi determinada de forma semi-quantitativa por espectrômetro de fluorescência de raios-x em um equipamento SHIMADZU, modelo XRF-1800. Na Tabela 3 são apresentados os dados obtidos dessa análise química.

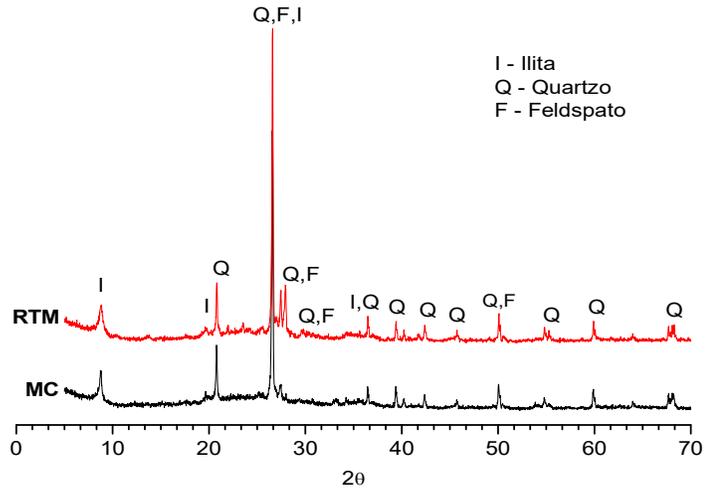
**Tabela 3** – Composição química dos materiais (Fluorescência de Raio X).

Material	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Outros
MC	53,655	31,790	9,895	0,122	1,172	0,083	0,203	0,655	1,844	0,581
RTM	56,487	24,176	12,149	0,208	2,398	-	1,351	0,740	2,067	0,424
CP V-ARI	25,286	3,885	4,346	58,190	3,014	3,384	0,331	0,452	0,414	0,698

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.



**Figura 6** – Difração de raios-x do resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM) e do Metacaulim (MC).



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**c) Preparação das pastas para ensaios no estado fresco**

De posse dos materiais, as pastas foram produzidas em laboratório. Inicialmente separou-se o material seco de cada composição (mistura) em sacos plásticos e a partir daí foram avaliadas várias dosagens de misturas com as combinações dos materiais como mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4** - Combinação dos materiais constituintes para as misturas estudadas

Misturas	Materiais aglomerantes
1	Cimento Portland + Metacaulim comercial
2	Cimento Portland + Resíduo de Tijolo Cerâmico Moído

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

As pastas foram avaliadas em seu estado fresco para diferentes relações água/aglomerante (0,5 e 0,6), diferentes proporções em massa dos materiais (0%, 10% e 20%) e de acordo com o procedimento de mistura (manual ou mecânico), os quais estão definidos nas Tabelas 5 e 5.1 a seguir.

**Tabela 5** - Misturas de referência estudadas apenas com cimento Portland.

Referência manual e mecanizado (a/agl = 0,5 e 0,6)	
Material	100%
CP V-ARI	100 g

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Tabela 5.1** - Combinação dos materiais constituintes para as misturas estudadas com cimento Portland.

Adição <sup>1</sup> manual e mecanizado – P/ 100 g de CP V-ARI (a/agl = 0,5 e 0,6)		
<i>Material</i>	10%	20%
<b>MC</b>	10 g	20 g
<b>RTM</b>	10 g	20 g
Substituição manual e mecanizado – Variação do CP V-ARI (a/agl = 0,5 e 0,6)		
<i>Material</i>	CP V-ARI	
	90 g	80 g
	10%	20%
<b>MC</b>	10 g	20 g
<b>RTM</b>	10 g	20 g

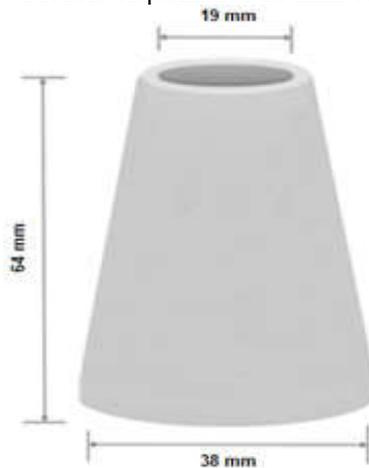
**Nota<sup>1</sup>:** Para os ensaios que contêm o termo “adição” é considerada a massa fixa de 100g de CP V-ARI e as pozolanas são adicionadas nas proporções indicadas.

**Nota<sup>2</sup>:** Para os ensaios que contêm o termo “substituição” são consideradas as variações das massas do CP V-ARI e as pozolanas nas proporções indicadas, de tal forma que, a soma da massa total é igual a 100g.

**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

Para avaliar o comportamento reológico das pastas utilizou-se um mini cone. O dispositivo de ensaio possui formato do cone Abrams reduzido: 19 mm de diâmetro superior, diâmetro inferior de 38 mm e altura de 64 mm, como ilustrado na Figura 7.

**Figura 7** – Modelo esquemático do mini-cone utilizado.



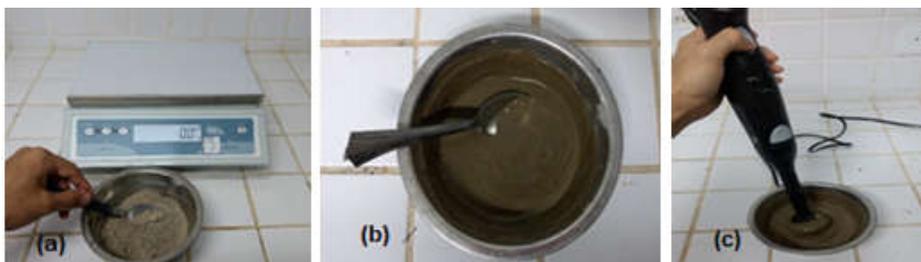
**Fonte:** Adaptado de TAN, BERNAL e PROVIS (2017).

Primeiramente, pesou-se separadamente a quantidade de água, cimento e adições minerais numa balança eletrônica digital com precisão de 0,1g. Em seguida, foi realizada uma pré-mistura manual dos pós secos durante 1 min, antes de se adicionar água (Figura 8a).

Para cada ensaio de mini cone, os finos foram misturados com água em um recipiente metálico (diâmetro de 15 cm e altura de 5 cm). Como descrito acima, as pastas foram avaliadas

tanto pela forma manual quanto pela forma mecânica. Pelo processo de mistura manual, após a junção dos materiais e adição da água, os mesmos foram misturados por 2 min de forma a se obter uma pasta homogênea, como mostrado na Figura 8b. No processo de mistura mecânica, seguindo os mesmos passos já citados, os materiais foram misturados com o auxílio de um mixer (Figura 8c), durante 2 min.

**Figura 8** – Preparação das pastas: (a) mistura dos finos; (b) processo de mistura manual; (c) processo de mistura mecanizado.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

As pastas recém misturadas foram então derramadas dentro do cone, e, em seguida, o cone foi levantado tão lentamente quanto possível, tomando cuidado para que o mesmo não sofresse alguma inclinação. Logo após, verificou-se o espalhamento (obtido através da média entre duas medidas perpendiculares uma a outra) e o flow (obtido medindo-se a diferença de nível entre altura inicial e a altura final da pasta).

Todos os ensaios do mini cone foram realizados em um dispositivo com base de madeira adaptada para o ensaio (Figura 9), que continha sobre a mesma uma placa de vidro, com o intuito de minimizar possíveis atritos entre as pastas e a superfície da base.

**Figura 9** – Base de madeira utilizada para ensaio do mini cone.



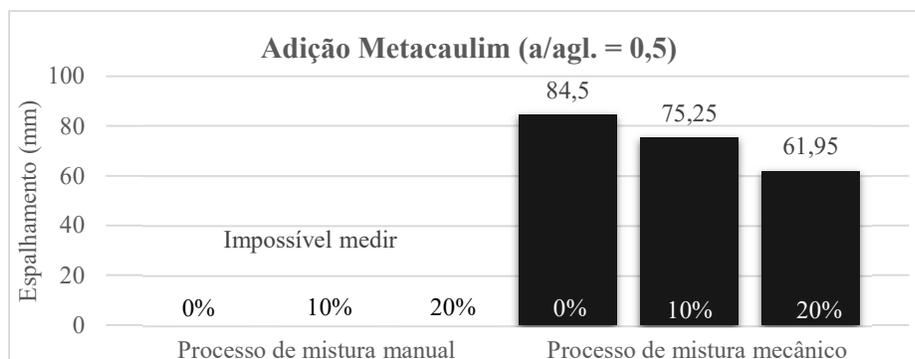
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os resultados obtidos através do ensaio do mini cone, realizado com as pastas de cimento Portland e adições pozolânicas, foi possível traçar os gráficos dos

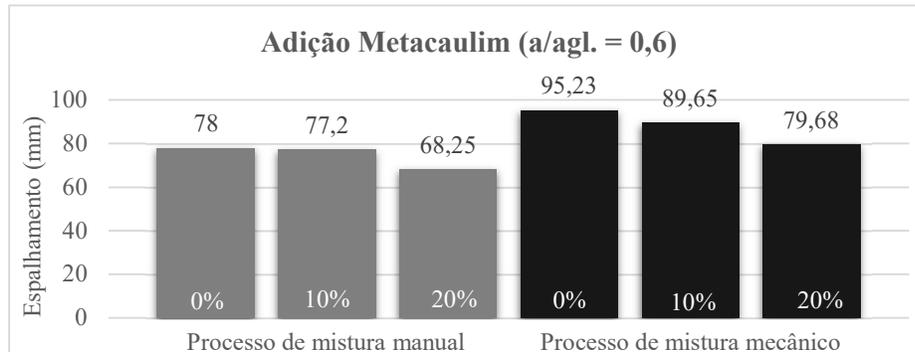
espalhamentos das pastas versos o tipo de processo de mistura utilizado (manual ou mecanizado). As Figuras 10 e 11 se referem as pastas, preparadas pelo processo manual e mecanizado, com adição de metacaulim (MC) ao cimento Portland e relação a/agl. de 0,5 e 0,6, respectivamente.

**Figura 10** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 11** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor 2021.

Na Figura 12 estão representadas as pastas com adição de MC ao cimento Portland, misturadas de forma manual e relação a/agl. 0,5, que não foram possíveis de se medir o espalhamento, pois as mesmas não apresentaram fluidez o suficiente para que ocorresse tal espalhamento.

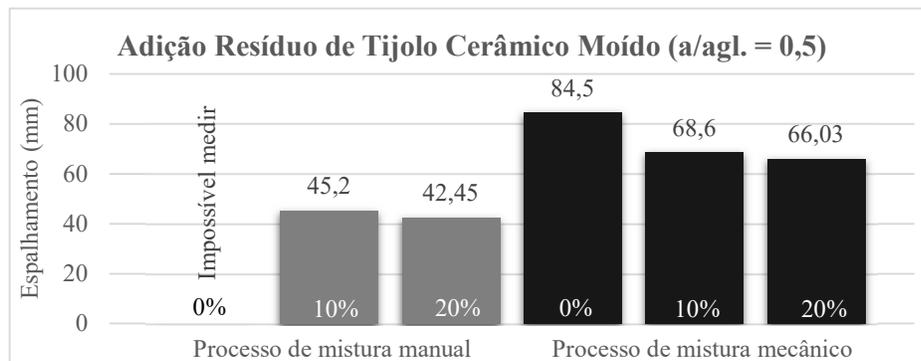
As Figuras 13 e 14 se referem as pastas, preparadas pelo processo de mistura manual e mecanizado, com adição de resíduo de tijolo cerâmico moído (RTM) ao cimento Portland e relação a/agl. de 0,5 e 0,6, respectivamente.

**Figura 12** – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de MC adicionado ao cimento Portland; c) pasta com 20% de MC adicionado ao cimento Portland.



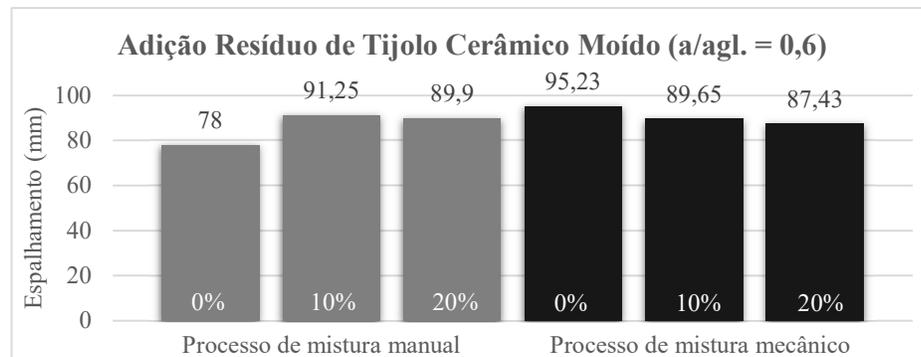
**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 13** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 14** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

Na Figura 15 está representada a pasta composta somente de cimento Portland, misturada manualmente e relação a/agl. 0,5, que não foi possível de se medir o espalhamento, pois a mesma não apresentou fluidez o suficiente para que ocorresse tal espalhamento.

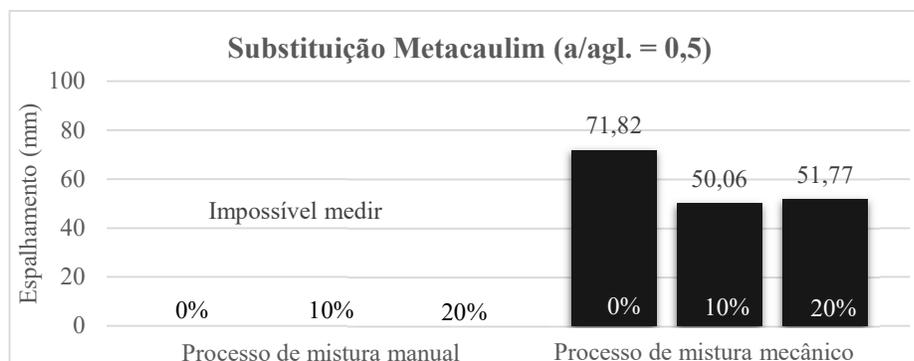
**Figura 15** – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual e pasta composta por 100% de cimento Portland.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

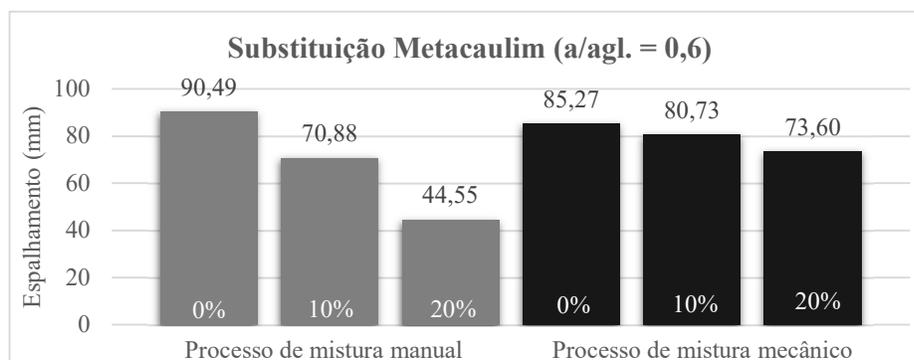
As Figuras 16 e 17 se referem às pastas, preparadas pelo processo de mistura manual e mecanizado, com substituição de parte do cimento Portland por metacaulim (MC) e relação a/agl. de 0,5 e 0,6, respectivamente.

**Figura 16** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 17** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e MC e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

Como mostrado na Figura 16, não foi possível se verificar o espalhamento das pastas com substituição de parte do cimento por MC e relação a/agl. 0,5, preparadas de forma manual,

visto que estas se apresentaram de maneira bastante irregular e/ou então, com pouca ou nenhuma variação no espalhamento. Entretanto, aquelas pastas preparadas com o auxílio do mixer, mostraram-se com um espalhamento possível de se medir, principalmente a pasta que possui em sua composição apenas água e cimento.

As pastas com 10 e 20% desse grupo se comportaram de forma inesperada, uma vez que, esperava-se que com o aumento da porcentagem de substituição do MC ocorresse um decréscimo no espalhamento, porém, não foi exatamente isso que aconteceu. Como se imaginava, houve um decréscimo no espalhamento da pasta contendo só cimento Portland para a pasta com 10% de adição de MC.

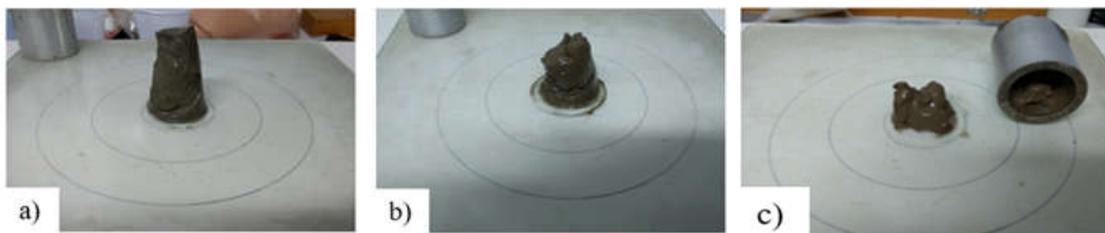
Outro motivo pode ser atribuído a uma melhor distribuição dos grãos na mistura para a porcentagem de 20%. O fato das misturas que passaram pelo mixer terem apresentado espalhamento possível de se medir pode ser explicado pela incorporação de ar presente na mistura devido ao processo mecânico de mistura, visto que foi possível observar a presença de várias microbolhas nessas misturas.

Ao aumentar a relação  $a/agl$  de 0,5 para 0,6, ainda para as pastas com MC, ficou bem claro o aumento dos espalhamentos para ambos os processos, como mostrado na Figura 17.

Observa-se que a pasta apenas com cimento Portland, obtida pelo processo de mistura manual, apresentou maior espalhamento em comparação com a mesma pasta obtida pelo processamento de mistura mecanizado. Neste caso, no processo manual a incorporação de ar foi mais eficiente, fazendo então essa mistura ter maior espalhamento. Aqui também é possível perceber o mesmo comportamento discutido anteriormente, com relação ao espalhamento à medida que se substitui o cimento pelo MC.

Na Figura 18 estão representadas as pastas com adição de MC, misturadas manualmente e relação  $a/agl$ . 0,5, que não foram possíveis de se medir o espalhamento, pois as mesmas não apresentaram fluidez o suficiente para que ocorresse tal espalhamento.

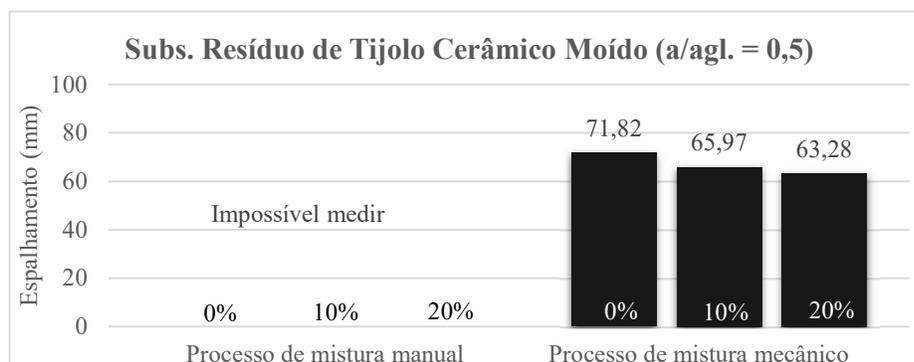
**Figura 18** – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de cimento Portland substituído por MC; c) pasta com 20% de cimento Portland substituído por MC.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

De acordo com a Figura 19, também não foi possível se verificar o espalhamento para as pastas com substituição de parte do cimento por RTM e relação a/agl. 0,5, misturadas manualmente, uma vez que estas se comportaram de maneira bastante irregular e/ou então, com pouca ou nenhuma variação no espalhamento, como pode ser observado na Figura 21.

**Figura 19** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,5, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

No caso das pastas misturadas mecanicamente, o espalhamento ocorreu e foi possível medir, e comparando com as pastas contendo MC, esse espalhamento foi menor. Este acontecimento pode ser explicado pelo fato do teor de água ter sido ineficiente para causar um melhor deslizamento das partículas de RTM na mistura, que pode ter formado mais pontos de nucleação, conforme discutido por Carvalho (2006), dificultando, assim, o espalhamento.

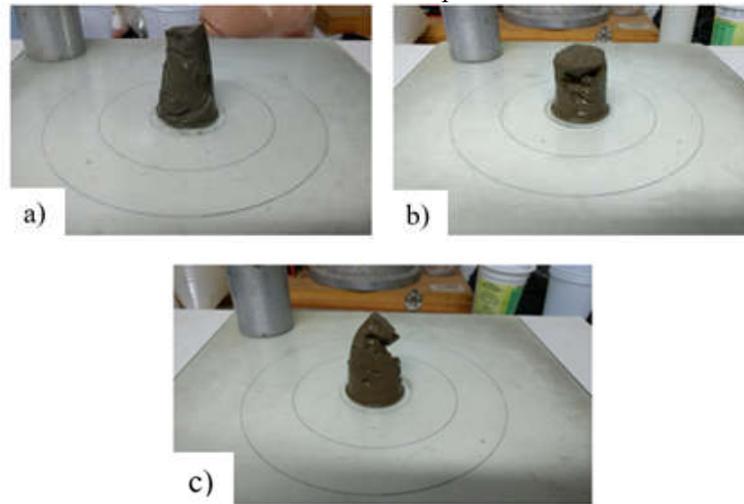
Ao aumentar a relação a/agl. de 0,5 para 0,6 as pastas com RTM, obtidas pelo processo de mistura manual, apresentaram maiores valores de espalhamentos, comparados com aqueles das pastas que continham MC, quando misturadas manualmente. Contudo, com relação as pastas processadas mecanicamente, não houve diferença significativa nos espalhamentos, conforme pode ser visto na Figura 20.

**Figura 20** – Espalhamento das pastas contendo cimento Portland e RTM e relação a/agl. de 0,6, misturadas manual e mecanicamente.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

**Figura 21** – Ensaio de mini cone com processo de mistura manual: a) pasta com 100% de cimento Portland; b) pasta com 10% de cimento Portland substituído por RTM c) pasta com 20% de cimento Portland substituído por RTM.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

Com o aumento da relação de  $a/agl.$  de 0,5 para 0,6, foi possível fazer a mistura ficar fácil de se misturar com o RTM pelo processo de mistura manual. Esse aumento de água pode ter contribuído também para a incorporação de ar nas misturas, além de que, como a massa unitária do RTM é maior que a do MC, então há um menor volume de finos também na mistura, facilitando, então, a dispersão das partículas [BARNES, HITTON and WALTERS (1989)]. Entretanto observa-se que para a relação de 0,6 as misturas com RTM apresentaram espalhamento muito semelhante àquelas contendo MC, que entre elas houve pouca variação. Isto pode indicar que para a relação  $a/agl.$  de 0,6, nas misturas com RTM, não houve dificuldade de deslizamento das partículas, mesmo para teores de até 20%.

Para termos de comparação, na Figura 22 está representada a pasta composta somente de cimento Portland, misturada de forma mecânica e relação  $a/agl.$  0,6, onde foi possível de se medir o espalhamento.

**Figura 22** – Espalhamento de pasta contendo somente cimento Portland e relação  $a/agl.$  de 0,6, misturada de forma mecânica.



**Fonte:** Elaborada pelo autor, 2021.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise dos materiais é possível constatar uma similaridade em uma das características físicas do MC e do RTM, como a massa específica em torno de  $2,58 \text{ g/cm}^3$ . Porém, as massas unitárias foram bem diferentes, onde a do MC foi 38% menor que a massa do RTM.

No geral, as pastas contendo RTM apresentaram um maior espalhamento comparadas com aquelas contendo MC, o que pode ser explicado pelo fato da sua massa unitária ser maior, fazendo com que as misturas com substituição de RTM apresentem um menor volume de partículas, facilitando então o deslizamento das mesmas durante o processo de mistura.

Em todas as pastas houve um maior espalhamento com o aumento da relação água/aglomerante de 0,5 para 0,6. Desta forma, a melhor trabalhabilidade foi atingida com a relação de a/agl 0,6.

O misturador mecânico funciona melhor que misturando manualmente, reduzindo a dispersão dos resultados do ensaio do mini cone.

As pastas com 10% de adições minerais pozolânicas, de um modo geral, apresentaram melhores resultados de fluidez quando comparadas às com 20%.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros Materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

BARBOSA, P. M. et al. Determination of rheological parameters of mortar and concrete by alternative techniques. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 3, 2011.

BARNES, H. A.; HITTON, J. F.; K. WALTERS, F. R. S., **An introduction to rheology**. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier, Amsterdam, 1989.

BERGAYA, F.; THENG, B. K. G. e LAGALY, G. **Handbook of clay science**. 1<sup>st</sup> edition. Elsevier, Oxford, UK, 2006.

BETIOLI, M. A. et al. Rheological characterization of cement paste: association of complementary techniques. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, 2009.

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

FERRARIS, C. F.; OBLAB, H.; HILLB, R. The influence of mineral admistures on therheology of cement paste and concrete. **Cement and concrete research**. V. 31, p. 245- 255, 2001.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: HOPPE, F. J. et al. Técnicas de caracterização reológica de argamassas. **E- Mat**, Porto Alegre, v. 3, p. 103-115, 2006.

JANOTKA, I. et al. Metakaolin sand-blend-cement pastes: Rheology, hidration process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 791-802, 2009.

JERÔNIMO, V.L. **Estudo de concreto com adição de resíduo da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armadura**. 2014. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Livros Técnicos e Científicos, 1998.

MACHADO, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo. **Ed. Interciência**, Rio de Janeiro, 2002.

MORAES, R. K.; ISAIA, G. C. GASTALDINI, A. L. G. Efeitos das cinzas volantes, cinza de casca de arroz e filler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. **IBRACON**, Fortaleza,

2000.

MURRAY, H. H. **Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskitesepiolite, and Common clays (Development in Clay Science)**. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier, Oxford, UK, 2007.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. “Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction”. **The University of Western Ontario**; Ontario, Canada, 2004.

NUNES, S. et al. Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery. **Cement and Concrete Composites**, v.33, p.103–115, 2011.

QUARCIONE, A. V. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta**. São Paulo, 2008.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. 2 ed. rev. amp., São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

SATO, V. Y. et al. Aplicação dos Conceitos de Reologia no Estudo de Pastas Cimentícias. **Ibracon**, 2013.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artliber Editora. 2 ed., 2006.

STRUBLE, L. J. e LEI, W-G. Rheological Changes Associated with setting on cement paste. **Advance Cement Based Materials**, vol. 2, p. 224-230, 1995.

SUDO, T.; SHIMODA, S.; YOTSUMOTO, H. e AITA, S. Electron micrographs of clay mineral. Elsevier, Kodammnsa LTD., Tokyo, 1981.

TAN, Z.; BERNAL, A. S.; PROVIS, L. J. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, 2017.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL. P. F. G. The reology of fresh concrete. **Pitman Advanced Pub**, p. 347, 1983.