



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THIAGO CORRÊA

**ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS  
COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS**

ANANINDEUA

2021

THIAGO CORRÊA

**ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS  
COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia de Materiais, da Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios

ANANINDEUA

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

C824e Corrêa, Thiago Corrêa.  
Estudo morfológico preliminar de materiais geopoliméricos com escória de alto forno submetidos a altastemperaturas / Thiago Corrêa Corrêa. — 2021.  
56 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva Silva  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2021.

1. Geopolímero. 2. Escória. 3. Microestrutura. 4. Temperatura. I. Título.

---

CDD 620

THIAGO CORRÊA

**ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS  
COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Data de Aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva

Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA/Ananindeua

---

Prof. Dra. Verônica Scarpini Cândido

Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA/Ananindeua

---

Prof. Dra. Roseane de Lima Silva

Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA/Ananindeua

---

À minha avó Maria Coelho, *in memoriam*,  
à minha mãe Maria Luiza, sou  
eternamente grato por tudo, amo vocês!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela força e saúde para alcançar meus objetivos.

À minha mãe, Maria Luiza, que nunca mediu esforços para me ajudar e me incentivar a continuar.

À minha avó, Maria Coelho, que infelizmente não se encontra mais entre nós, porém sempre me apoiou e queria me ver formado.

À minha família, em especial, minha tia Kátia, meus padrinhos, Zeca e Lúcia, meus primos, minhas tias e a todos que contribuíram de certa forma para essa conquista.

Aos meus amigos da Ufpa, Kadu, Diogo, Avener, Hellen, Clara, Alan (2014), Beatriz (2014), Amanda, Rafaela, Rodolfo, Kate, obrigado pelo apoio e parceria durante a graduação.

Ao meu parceiro de laboratório, Mathaus, obrigado pela ajuda de sempre.

Agradeço ao meu professor, Dr. Alisson, pela orientação, ensinamentos e confiança, que tornou possível este trabalho.

Às integrantes da banca examinadora, professoras Dra. Verônica Scarpini Cândido e Dra. Roseane de Lima Silva, por terem aceitado o convite para participarem.

À minha amiga Marcielly, obrigado por todo apoio de sempre.

Ao laboratório de práticas da Ufpa/Ananindeua, obrigado por todo o suporte.

## RESUMO

O Cimento Portland, utilizado para a produção do concreto é a matéria-prima mais usada na construção civil e isso implica no desenvolvimento, de forma significativa na economia dos países. Contudo, para cada tonelada de cimento produz-se, aproximadamente, 0,95 toneladas de CO<sub>2</sub> tornando esse material nocivo para o meio ambiente. Desenvolvido pelo pesquisador Joseph Davidovits, os geopolímeros são materiais poliméricos inorgânicos, com microestrutura mista (amorfa à semicristalina) e possuem características básicas de durabilidade, estabilidade térmica, além de ser muito resistente. A produção é feita a partir da mistura vários aluminossilicatos e tipos de ativadores alcalinos. A produção de argamassas geopoliméricas incorporando resíduos industriais vem se tornando nos últimos anos uma maneira de produzir materiais para a construção civil com menores custos, porém uma excelente alternativa para o reaproveitamento de resíduos viável economicamente. Neste trabalho as pastas e argamassas foram produzidas com o uso de Metacaulim, Escória de Alto Forno e ativador alcalino. Este trabalho tem como objetivo desenvolver pasta e argamassa geopolimérica e analisar suas microestruturas através do microscópio óptico quando submetidas a altas temperaturas. Os resultados demonstraram, através das análises microestruturais, que a Escória de Alto Forno e a temperatura podem influenciar na resistência do material.

**Palavras-chave:** Geopolímero. Escória. Microestrutura. Temperatura.

## **ABSTRACT**

Portland cement, used for the production of concrete, is the principal raw material used in civil construction and this implies development, significantly in the economy of countries. However, for each ton of cement, approximately 0.95 tons of CO<sub>2</sub> is produced, making this material prejudicial to the environment. Developed by researcher Joseph Davidovits, geopolymers are inorganic polymeric materials, with mixed microstructure (amorphous to semi-crystalline) and have basic characteristics of durability, thermal stability, in addition to being very resistant. The production is made by mixing many aluminosilicates and types of alkaline activators. The production of geopolymer mortars incorporating industrial waste has become in recent years a way to produce materials for civil construction with lower costs, but an excellent alternative for the reuse of waste economically viable. In this work the pastes and mortars were produced using Metakaolin, Blast Furnace Slag and alkaline activator. This work aims to develop geopolymeric paste and mortar and analyze their microstructures through an optical microscope when subjected to high temperatures. The results showed, through microstructural analysis, that Blast Furnace Slag and temperature can influence the material's strength.

**Keywords:** Geopolymer. Slag. Microstructure. Temperature.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação dos tipos de Polissialatos.....	13
Figura 2 - Tipos de Metacaulim.....	17
Figura 3 - MEV representativo das seções polidas da amostra <i>G1</i> preparada usando hidróxido de sódio e cinza volante classe F.....	22
Figura 4 - MEV representativo das seções polidas de espécime <i>G1.PSS</i> preparado usando silicato de potássio e uma cinza volante classe F.....	23
Figura 5 - MEV representativo das seções polidas do espécime <i>FKSS</i> preparado usando silicato de potássio e uma cinza volante classe F.....	23
Figura 6 - Mapas de composição química obtidas por EDS/MEV em amostras tratadas a 110 C°, 200 C°, 400 C°, 600 C°, 800 C° e 1000 C°.....	25
Figura 7 - Imagens obtidas por MET das amostras tratadas 110 C°, 200 C°, 400 C°, 600 C°, 800 C° e 1000 C°.....	26
Figura 8 - Morfologia do concreto com baixo teor de cimento sinterizado em três temperaturas diferentes (ampliação: 4000) .....	27
Figura 9 - Microestrutura do geopolímero.....	28
Figura 10 – Metaculim.....	30
Figura 11 – DRX do Metacaulim.....	30
Figura 12 - Escória de alto forno.....	31
Figura 13 – DRX Escória de alto forno.....	31
Figura 14 - Ativador Alcalino.....	32
Figura 15 – Areia.....	33
Figura 16 - Representação esquemática das etapas do trabalho experimental.....	34
Figura 17 - Forno mufla.....	34
Figura 18 – Estufa.....	35
Figura 19 - Produção dos corpos de prova .....	36
Figura 20 - Preparação da AGP.....	37
Figura 21 - Máquina Universal.....	37
Figura 22 - Pasta Geopolimérica com 0% de EAF com 7 dias de cura.....	38
Figura 23 - Pasta Geopolimérica com 35% de EAF com 7 dias de cura.....	39
Figura 24 - Pasta Geopolimérica com 45% de EAF com 7 dias de cura.....	39
Figura 25 - Pasta Geopolimérica com 55% de EAF com 7 dias de cura.....	40

Figura 26 - Pasta Geopolimérica com 0% de EAF com 7 dias de cura.....	41
Figura 27 - Pasta Geopolimérica com 35% de EAF com 7 dias de cura.....	41
Figura 28 - Pasta Geopolimérica com 45% de EAF com 7 dias de cura.....	42
Figura 29 - Pasta Geopolimérica com 55% de EAF com 7 dias de cura.....	42
Figura 30 – Pasta Geopolimérica com 0% de Areia com 7 dias de cura.....	43
Figura 31 - Argamassa Geopolimérica 59% de Areia com 7 dias de cura.....	44
Figura 32 - Argamassa Geopolimérica 69% de Areia com 7 dias de cura.....	44
Figura 33 - Argamassa Geopolimérica 75% de Areia com 7 dias de cura.....	45
Figura 34 - Pasta Geopolimérica com 0% de Areia com 7 dias de cura.....	46
Figura 35 - Argamassa Geopolimérica 59% de Areia com 7 dias de cura.....	46
Figura 36 - Argamassa Geopolimérica 69% de Areia com 7 dias de cura.....	47
Figura 37 - Argamassa Geopolimérica 75% de Areia com 7 dias de cura.....	47

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1 Justificativa.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo Geral.....	11
1.2.2 Objetivo Específico.....	11
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
2.1. Geopolímeros.....	11
2.1.1. Estrutura dos geopolímeros.....	12
2.1.2. Mecanismo de reação.....	13
2.1.3. Vantagens e aplicações dos geopolímeros.....	14
2.2. Matérias-primas.....	15
2.2.1. Resíduos industriais.....	17
2.2.2 Resíduos agrícolas.....	18
2.2.3 Ativadores Alcalinos.....	19
2.3 Geopolímeros aplicados em altas temperaturas.....	20
2.4 Microestrutura de Concretos Refratários.....	21
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1 Materiais.....	29
3.1.1 Metacaulim.....	29
3.1.2 Escória de alto forno.....	31
3.1.3 Ativadores alcalinos.....	32
3.1.4 Areia.....	33
3.2 Metodologia.....	33
3.2.1 Calcinação da fonte de aluminossilicatos (Metacaulim).....	34
3.2.2 Secagem da EAF.....	35
3.2.3 Preparação das pastas geopoliméricas.....	35
3.2.4 Preparação das argamassas geopoliméricas.....	36
3.2.5 Microscopia Óptica.....	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>

4.1 Análise Microestrutural das Pastas e Argamassas.....	38
4.1.1 Pastas submetida a temperatura de 300°C.....	38
4.1.2 Pastas submetidas a temperatura de 800°C.....	40
4.1.3 Argamassa submetida à temperatura de 300°C.....	43
4.1.4 Argamassa submetida a temperatura de 800°C.....	45
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Cimento Portland, utilizado para a produção do concreto é a matéria-prima mais usada na construção civil e isso implica no desenvolvimento, de forma significativa na economia dos países. Contudo, para cada tonelada de cimento produz-se, aproximadamente, 0,95 toneladas de CO<sub>2</sub>, tornando esse material nocivo para o meio ambiente (MACCARINI, 2015)

Segundo Borges *et al* (2014), os pesquisadores Glukhovsky e Krivenko, nas décadas de 40 e 50, começaram estudos que apontam substituição do cimento Portland por materiais obtidos na reação alcalina de aluminossilicatos, conhecido como geopolímero.

De acordo com Davidovits (1994), os geopolímeros são materiais poliméricos inorgânicos, com microestrutura mista (amorfa à semicristalina) e possuem características básicas de durabilidade, estabilidade térmica, além de ser muito resistente. A produção é feita a partir da mistura de vários aluminossilicatos e tipos de ativadores alcalinos. Após ser desenvolvido, surgiu como uma alternativa à engenharia civil e aplicações que apresentassem melhor resistência ao fogo. (SALAHUDDIN *et al.*, 2015).

Segundo Sonafrank (2010), em alguns países, como Austrália, Canadá, já se utilizam os geopolímeros na produção de dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos refratários, reparações de rodovias, obras de infraestrutura.

De acordo com Van Jaarsveld *et al.* (1997), o processo de reação do geopolímero é um processo exotérmico, devido a poli condensação. O mecanismo de reação trata-se de um processo químico em um meio alcalino onde ocorre a dissolução do Al e Si, porém não apenas a superfície do material é hidrolisada, como também dissolve a pequena quantidade de CaO, posteriormente a policondensação, por meio da reação de condensação forma um gel, que depois transforma-se em uma estrutura tridimensional de base sílico-aluminosa individual dissolvida pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina.

Segundo Severo (2013), a produção de argamassas geopoliméricas incorporando resíduos industriais vem se tornando nos últimos anos como uma maneira de produzir materiais para a construção civil com menores custos, porém

uma excelente alternativa para o reaproveitamento de resíduos viável economicamente. Este trabalho tem como objetivo desenvolver pasta e argamassa geopolimérica e analisar sua morfologia através do microscópio óptico quando submetidas a altas temperaturas.

### **1.1. Justificativa**

O trabalho se justifica pela importância do conhecimento da influência da escória de alto forno e da temperatura no comportamento da microestrutura dos materiais geopoliméricos.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver pasta e argamassa geopolimérica e analisar sua morfologia através do microscópio óptico quando submetidas a altas temperaturas.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Avaliação da microestrutura dos corpos de prova das pastas e argamassas após 7 dias de cura.
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de escória de alto forno, no desenvolvimento de materiais geopoliméricos, quando submetidos à exposição térmica.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. GEOPOLÍMERO**

Segundo o estudo de Buchwald (2005), o geopolímero é um composto formado por uma fonte de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorfos e uma solução alcalinamente ativada. São materiais poliméricos inorgânicos com composição química semelhante

às zeólitas, porém com microestrutura mista (amorfa a semicristalina). Foi então denominado “geopolímero”, “geo” para simbolizar a semelhança com materiais geológicos e “polímero” baseado na química dos sílico-aluminatos (BUCHWALD *et al.*, 2005).

O cientista Joseph Davidovits, após incêndios ocorridos na França, que envolveu plástico orgânico comum, teve a ideia da formulação de materiais resistentes ao fogo, assim iniciou as suas pesquisas sobre materiais inorgânicos. Depois de ter estudado alguns fragmentos de Pirâmides do Egito, e algumas amostras de Jericó que foram datadas de 7000 a.C., verificou pouco desgaste e alterações químicas, ainda que estivessem sendo expostos a ambientes físicos e agressivos por muito tempo. Davidovits, após as suas análises, identificou concretos formados a partir de calcários caulíníticos com hidróxido de sódio. Em seguida, os concretos passaram por análises químicas e mineralógicas, e foi constatado pelo pesquisador que, existia material amorfo composto aluminossilicatos nas microestruturas dos materiais analisados (DAVIDOVITS, 2002).

A denominação “geopolímero” é explicada por apresentar semelhança com materiais geológicos, como por exemplo; a semelhança química com os sílicos-aluminatos, e que através destes, surgiram os polissialatos, com abreviatura de sílico-oxo-aluminato (Si-O-Al). O material formulado é composto por uma fonte de  $\text{SiO}_2$   $\text{AlO}_3$  amorfos e uma solução alcalina ativadora (SANTA, 2012).

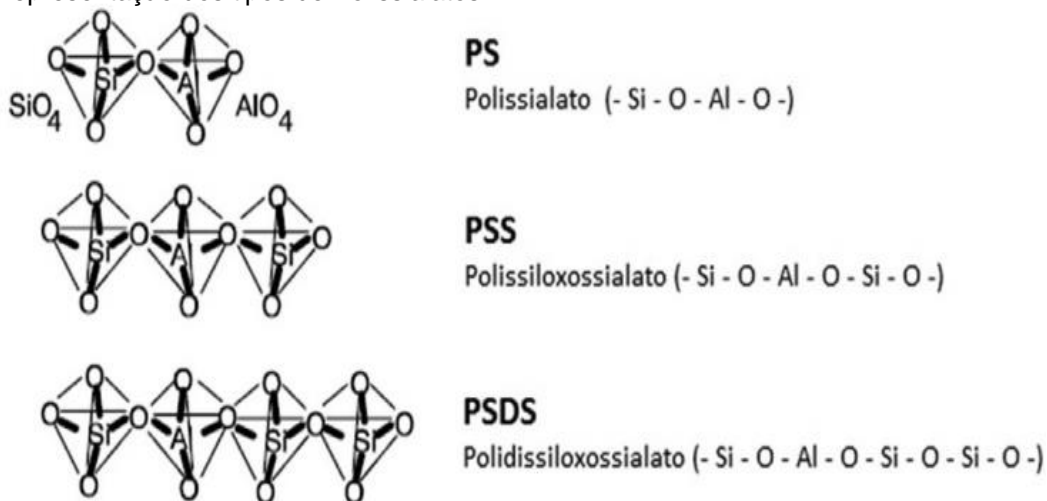
### **2.1.1. Estrutura dos Geopolímeros**

Os geopolímeros são formados por tetraedros de  $\text{SiO}_4$   $\text{AlO}_4$  ligados alternadamente pelo compartilhamento de átomos de oxigênios, e formam uma rede tridimensional após se ligarem, devendo essa rede ser estabilizada pela presença de cátions monovalentes tais como  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , e sua síntese se dá a partir das reações entre fontes de sílico-aluminatos em um meio aquoso e alcalino, sendo que a estrutura do sólido obtido varia entre completamente amorfa a semicristalina (BITTENCOURT, 2012).

O alumínio é induzido por ativação alcalina, na reação de geossíntese, em uma estrutura de matriz silicose. Esta modificação fundamenta-se na organização e arranjo tridimensional em que os átomos de silício (Si) alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando os oxigênios (VASSALO, 2013).

O tipo de geopolímero é definido pela razão  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  da matéria prima, e isso define a ordem dos tetraedros na cadeia, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Representação dos tipos de Polissialatos



Fonte: Davidovits, 1994.

Os polissialatos têm a fórmula empírica que é descrita na equação (1) abaixo:

$$\text{Mn}[(\text{SiO}_2)_z.\text{AlO}_2]_n.w\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

Onde “M” é o elemento alcalino, o símbolo “-” indica a presença de uma ligação, “z” é 1, 2 ou 3 e “n” é o grau de polimerização e w é o grau de hidratação. Quando z é igual a 1 o nome é polissialato (PS), z igual a 2, polissialato-siloxo (PSS), e z igual a 3, polissialato-disiloxo (PSDS) (BARROSO, 2009).

Os geopolímeros são identificados por vários nomes, entre eles: cerâmicas alcalinas, hidrocerâmicas, cimentos ativados alcalinamente, polímeros inorgânicos. Esses materiais têm características cimentícias e podem ser processados em temperatura ambiente. A sua matéria-prima é diferenciada, pois, pode ser obtida por meio de materiais naturais, assim como, através de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos que tenham passado por tratamento térmico (MACCARINI, 2015).

### 2.1.2. Mecanismos de reação

A geopolimerização é um fenômeno exotérmico e o seu mecanismo envolve a dissolução de Al e Si no meio ativado alcalinamente, no qual a superfície do material é hidrolisada, mas também dissolve a pequena quantidade de Al e Si, seguido por uma policondensação, através da reação de condensação. Em seguida, ocorre a

formação de um gel que é transformado em uma rede tridimensional de estrutura sílico-aluminato (VAN JAARSVELD *et al.*, 1998)

Tratando-se de geopolimerização, a dissolução tem dois grandes papéis. O primeiro consiste na liberação dos polissialatos e o segundo é ativação da reação de fixação de superfície (polimerização). Este último contribui de forma significativa para a resistência final da estrutura geopoliméricas e para conseguir uma alta taxa de dissolução é necessário elevar o valor de pH, assim como a alta concentração de sílica solúvel. Tal fato explica quê, os maiores teores de hidróxido de sódio e silicato de sódio tendem a produzir geopolímeros com maior resistência mecânica (MAZZA, 2010).

Segundo Temujin *et al* (2009), o cálcio influencia na geopolimerização. A partir desta influência é possível notar que compostos oriundos deste elemento químico Óxido de Cálcio (CaO) e Hidróxido de Cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  melhoram as propriedades mecânicas dos geopolímeros quando curados à temperatura ambiente. Vale ressaltar que o hidróxido de cálcio é considerado um aditivo mais benéfico do que o óxido de cálcio.

### **2.1.3. Vantagens e aplicações dos Geopolímeros**

Existem várias classes de geopolímeros que têm aplicabilidades variadas, tal como indústrias de pré-fabricados, fabricação de concretos com alto desempenho, pavimentação, compósitos para revestimentos, e outros. Por ter várias aplicações, preza-se sempre por uma produção eficiente e rápida. Além disso, as propriedades dos geopolímeros são significativas, pois apresentam elevada resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e excelente comportamento em altas temperaturas (PINTO, 2006).

Os geopolímeros apresentam diversos ramos de utilizações, e podem ser aplicados no campo das indústrias automobilísticas, aeroespaciais, engenharia civil, entre outras. A estrutura química em termos de proporção atômica de Si/Al no polissialato é que determina o tipo de aplicação dos materiais geopoliméricos. O quadro 1 apresenta a classificação do tipo de aplicação de acordo à proporção supracitada. Uma baixa relação de Si/Al igual a 1, 2, 3, inicia uma rede 3D que é muito rígida, enquanto a proporção Si/Al for superior a 15 fornece um caráter

polimérico para o material geopolimérico. Uma baixa razão Si/Al é apropriada para muitas execuções no campo de engenharia civil (RANGAN, 2014).

Quadro 1 - Aplicação dos geopolímeros conforme a razão Si/Al.

Razão Si/Al	Aplicações
1	-Tijolos; -Cerâmica; -Proteção contra incêndio;
2	-Cimentos e concretos de baixo CO <sub>2</sub> ; -Encapsulamento dos resíduos radioativos e tóxicos;
3	-Compósito de fibra de vidro para proteção contra incêndio; -Equipamentos de fundição; -compósitos resistentes ao calor, 200°C a 1000°C; -Ferramentas para a aeronáutica processo de titânio;
>3	-Selantes para a indústria, 200°C a 600°C; -Ferramentas para a aeronáutica SPF alumínio;
20 – 35	-Resistentes contra fogo e compósitos de fibras resistentes ao calor.

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho a partir de informações de J. Davidovits (2013)

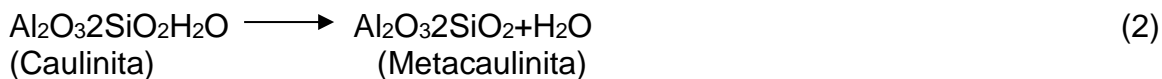
## 2.2. Matérias-primas

Nos tópicos a seguir será realizada uma breve abordagem sobre o caulim, cinza volante, cinza da casca de arroz, cinza da cana-de-açúcar.

### a) Caulim

O Caulim trata-se de um minério argiloso, e sua obtenção se dá através do beneficiamento de argilas cauliníticas, que são compostos por silicatos de alumínio hidratados, e tem como um dos principais constituintes a caulinita. (CASCAES, 2016). Remoção dos grupos hidroxilas e cria uma instabilidade para facilitar a reação do Metacaulim e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ILIC *et al*, 2010).

Quando aquecido em temperaturas específicas, o Caulim passa pelo processo da desidroxilação que é a perda de hidroxilas (OH), que se agrupam na sua estrutura atômica. De forma substitucional, átomos de oxigênio ocupam os espaços antes ocupados pelas (OH). Tal cenário é explicado na equação 2, esta ilustra o processo de desidroxilação do Caulim (PINTO, 2006).



Em alguns estudos realizados por Davidovits ocorreu a calcinação da Caulinita em um intervalo de temperatura que variava de 750 a 800 °C por 6h. Porém, entende-se que a temperatura ideal de calcinação para a geração do Metacaulim está entre 700° a 800°C, isso depende da pureza, composição química e mineralógica e cristalinidade das argilas. Temperaturas abaixo de 600°C e acima de 900°C, de certa forma não são consideradas satisfatórias devido à cristalização do material ou a presença de água (CASCAES, 2016).

## **b) Metacaulim**

O Metacaulim é definido como um material pozolânico amorfo, ou seja, de estrutura cristalina desordenada, obtido por um processo industrial de ativação térmica entre 600 e 850°C e moagem de argilas cauliníticas e caulins. A composição das matérias-primas é predominantemente por silicato de alumínio hidratado [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>], que perdem os íons hidroxila de sua estrutura cristalina com a calcinação, transformando-se em Metacaulinita (Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>), composto constituído essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina e com elevada finura (Cunha et al., 2010). Quando o metacaulim é como fonte de aluminossilicato, tem-se um geopolímero menos impuro e caracterização mais fácil. (Duxon et al., 2005)

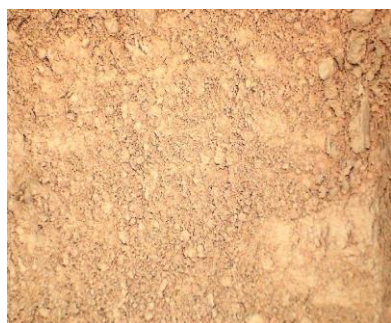
De acordo com Davidovits (1994), quando o caulim é transformado em Metacaulim, deixa o material muito mais reativo, com propriedades pozolânica. Com isso, o produto obtido pode ter diferentes graus de finuras, superfície específica e colorações diferentes. A característica vai depender da composição química mineralógica do caulim de base.

Segundo Rocha e Vasconcelos (2006), a cor do Metacaulim é influenciada pela composição química. Por exemplo, o silicato de alumínio, que é o composto

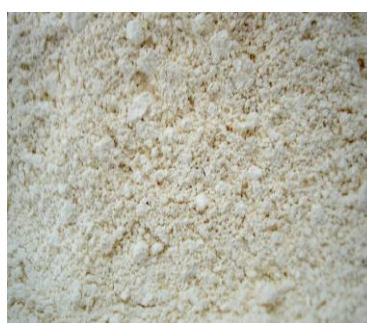
mais abundante do Metacaulim, possui cor branca. Essa variação de cor se dá devido à presença de composto, como ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_2$ ,  $\text{FeO}$ ), que dá uma coloração laranja, vermelha, amarela, ou marrom, já o óxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), á uma coloração cinza ao Metacaulim.

A seguir a Figura 2 mostra três tipos de Metacaulim produzidos por três empresas, Metacaulim do Brasil (a), Advanced Cement Technologies (b) e Engelhard (c):

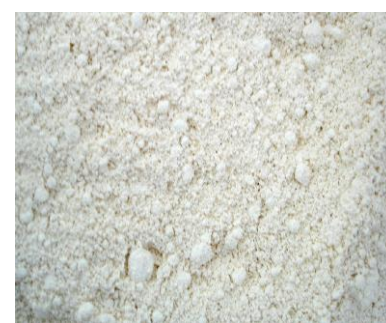
Figura 2 – Tipos de Metacaulim



(a)



(b)



(c)

Fonte: Rocha e Vasconcelos, 2006

### 2.2.1. Resíduos Industriais

#### a) Cinza Volante

As cinzas volantes são geradas a partir da queima do carvão mineral. E a produção de cinza volante passou de 390 milhões de toneladas por ano a partir de 1998, porém em alguns países a sua reutilização e/ou reinserção em novos processos ainda é deficiente (SANTA, 2012).

Estudos feitos com a cinza volante demonstram que esta é uma excelente fonte aluminossilicato para sofrer ativação alcalina e, posteriormente, geopolimerização, pois em sua estrutura há material amorfo e tamanho de partículas adequado ao processo (SANTA, 2012).

## **b) Escória de alto forno**

Porto (2019) cita que, o ferro gusa é fabricado em unidades industriais denominadas Altos Fornos, nos quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam das impurezas que os acompanham. As escórias são formadas pela fusão das impurezas do minério de ferro, junto com a adição de fundentes e as cinzas de coque.

Barbosa (2004) afirma que através das propriedades de escória de alto forno, tais como, insolubilidade e a menor densidade em relação ao ferro gusa, logo a escória escoia pelos canais até a zona de resfriamento. E a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ou óxido de magnésia ( $\text{MgO}$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), são os principais componentes da escória de alto forno oriundos do minério de ferro.

### **2.2.2. Resíduos Agrícolas**

#### **a) Cinza da Casca de Arroz**

Por ser um dos alimentos mais consumidos mundialmente, o arroz teve uma produção global de aproximadamente 741,3 milhões de toneladas, no ano de 2014. E o Brasil, neste mesmo ano, ficou entre os 10 melhores colocados dentre os produtores deste grão, acumulando mais de 12 milhões de toneladas de arroz com casca, gerando quase 2,4 milhões de toneladas de casca de arroz, transformados em 485 mil toneladas de cinza de casca de arroz (CCA) (LIMA, 2018).

A CCA é obtida a partir da queima da casca de arroz para a geração de energia. Analisando com mais detalhe, uma tonelada de arroz com casca produz aproximadamente 200 kg de casca, em torno de 80 e 110 kg de farelo, dependendo do grau de moagem, e de 680 a 730 kg de arroz branco. De 18 a 20% do peso da casca de arroz é convertido em CCA após a incineração. A sua composição é basicamente de sílica amorfa (80-95%), com traços de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  (PODE, 2016).

Segundo Lima (2018), um estudo realizou a comparação entre o silicato de sódio comercial e dois silicatos de sódio alternativos produzidos a partir da cinza da casca de arroz, mas no primeiro a cinza utilizada foi obtida por queima controlada, já

no segundo foi utilizada uma cinza comercial. Conclui-se que, independentemente do tipo de queima, a cinza da casca de arroz pode ser utilizada como fonte de silicato. Enquanto a cinza obtida por queima se apresenta como material amorfo, a cinza comercial contém também fase cristalina. Porém, o geopolímero obtido com o silicato comercial apresentou maior resistência à compressão em relação aos demais, independente da origem do material aluminossilicato.

### **b) Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar**

A cana de açúcar é cultivada desde a colonização portuguesa, e embora a sua principal destinação seja para a fabricação de açúcar e álcool, existem seus diversos subprodutos, tais como, bagaço, méis, torta de filtro e vinhaça, que também podem ser aproveitados. Posteriormente a extração do caldo da moagem da cana-de-açúcar, é gerado um resíduo sólido: o bagaço. E esse resíduo pode ser transformado em bagaço hidrolisado para alimentação animal ou poder ser queimado na caldeira para a produção de energia (CASTALDELLI, 2013).

Cordeiro (2006) afirma que, a queima do bagaço resulta em um material cuja composição química é, predominantemente, composta por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). E por se tratar de uma composição com alto teor de dióxido de silício, este material se destaca por apresentar potencial aditivo mineral para pastas, argamassas e concretos.

### **2.2.3. Ativadores Alcalinos**

Severo (2013) afirma que, a ativação alcalina é a reação de síntese dos geopolímeros, a qual é definida como uma reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalino-terrosos, sendo que existem vários materiais aptos ao tipo de reação mencionado.

Provis e Bernal (2014), citaram que ativador necessita de um componente alcalino na forma aquosa, e que os mais tradicionais são os hidróxidos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) e os silicatos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ), e ainda utilizar os carbonatos ou sulfatos.

O hidróxido de potássio ou de sódio tem o papel de dissolver as matérias-primas, e os silicatos de sódio apresentam como característica o potencial, o ligante. De um modo geral, são necessário hidróxidos e silicatos alcalinos com valores de

pH maiores que 13 para ativar aluminossilicatos para a produção dos geopolímeros (ROCHA, 2017).

A combinação de NaOH (hidróxido de sódio) e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (silicato de sódio), deixa bem sólido o material produzido, apresentando poucos poros, fortalecendo a ligação entre a matriz polimérica e os agregados. E pôde-se constatar a comprovação de que misturas utilizando o silicato de sódio e mais a solução NaOH, torna bem maior o grau de reação, assim como a resistência mecânica, devido a sílica presente no silicato de sódio e ser mais reativa do que a contida no Metacaulim (ARAUJO, 2017).

### **2.3. Geopolímeros aplicados em altas temperaturas**

De acordo com Rocha (2017), os geopolímeros pertencem a uma classe de materiais com propriedades cimentícias, que possuem um amplo potencial tecnológico, por ser possível incorporar em sua formulação matérias-primas naturais ou resíduos industriais, e apresentam elevada resistência térmica, mecânica e ao ataque químico.

Zuda (2009) explica que, quando um geopolímero é usado em aplicações na construção civil, em que temperaturas elevadas podem ser esperadas, como em paredes e pisos adjacentes a máquinas de calor, sua estabilidade volumétrica, estabilidade de suas fases e resistência a altas temperaturas desempenham papel significativo.

Prefere-se utilizar o hidróxido e silicato de potássio para aplicações em altas temperaturas, mas em geral, os ativadores alcalinos baseados em sódio são comumente utilizados devido à sua grande disponibilidade, baixo custo e alta reatividade (ROCHA, 2017).

Silva (2019) cita que os cimentos refratários são utilizados como revestimento de grandes caldeiras de usinas de açúcar e álcool, painéis de aço, servem para proteger o aço derretido de um lado e a própria caldeira de aço sólido do outro. No alto forno a construção na siderurgia, por exemplo, de tamanho variável, externamente revestido por metal e internamente com material refratário, onde é fundido o minério de ferro, a fim de transformá-lo em ferro-gusa.

Uma avaliação do desempenho de argamassas geopoliméricas (AG), em comparação com argamassas de cimento Portland com escória (ACPE), sob

exposição a temperaturas de até 800°C. Os corpos de prova de ambos os materiais foram ensaiados à compressão axial e à flexão, e de acordo com os resultados, a resistência mecânica residual da ACPE foi superior a da AG para temperaturas de até 400°C, e após esta temperatura um comportamento oposto ocorreu. A ACPE manteve 28% da sua resistência à compressão axial e 13% da sua resistência à flexão a 800°C, enquanto que AG manteve 48% e 35%, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que a AG é termicamente mais estável do que a ACPE (Dias *et al.*, 2005).

## 2.4 Microestrutura de Concretos Refratários

Bakharev (2006) relatou um estudo de estabilidade térmica de propriedades após queima a 800-1200 ° C de materiais geopoliméricos preparados usando cinzas volantes classe Fe ativadores alcalinos de Na e K. Nas amostras preparadas com ativadores contendo sódio, observou-se uma rápida deterioração da resistência a 800°C, associada a um aumento do tamanho médio dos poros.

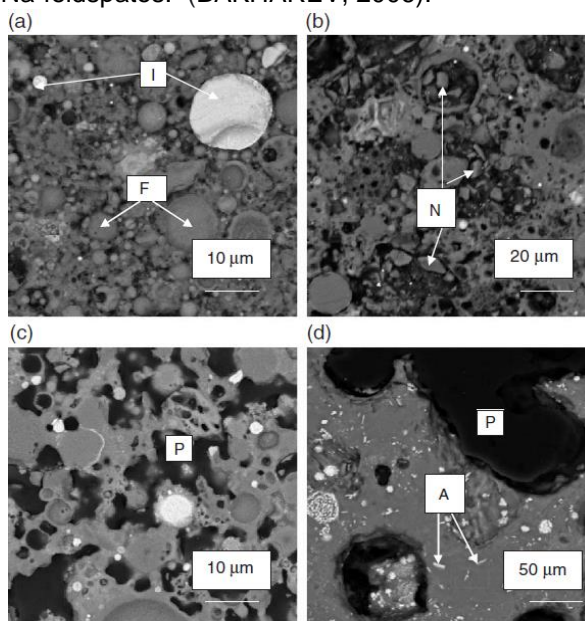
Em materiais preparados com cinzas volantes e silicato de potássio, a resistência à compressão aumentou significativamente com o aquecimento, a deterioração da resistência começou a 1000 ° C. Após a queima, esses materiais permaneceram amorfos com tamanho médio de poro reduzido e resistência à compressão significativamente aumentada. Compactação em 1-10 MPa reduziu o encolhimento na queima em todos os materiais. (BAKAREV, 2006)

Os materiais geopoliméricos preparados usando cinzas volantes classe F e ativadores alcalinos mostraram alta retração, bem como grandes mudanças na resistência à compressão com o aumento da temperatura de queima na faixa de 800-1200°C. Assim, os materiais foram considerados inadequados para aplicações de isolamento refratário. (BAKAREV, 2006)

A Figura 3 em (a e b) apresentam as imagens em MEV obtidas em retroespalhamento elétrons das seções polidas do espécime G1 antes e depois de experimentos de queima a 800, 1000 e 1200°C. A matriz G1 contendo principalmente material não reagido apresentado na Figura 3 (a) foi transformada em uma matriz contendo mais material reagido com produtos de reação cristalinos. Um aumento significativo na porosidade foi observado após o aumento para em 1000 ° C com poros de até 10 µm, enquanto após queima a 1200 ° C, atrasos de baixa

porosidade e poros grandes (50-200  $\mu\text{m}$ ) dominados a matriz (figura 3 (c, d)). O desenvolvimento desses poros grandes é possivelmente conectado à decomposição do material em aquecimento. (BAKHAREV, 2006).

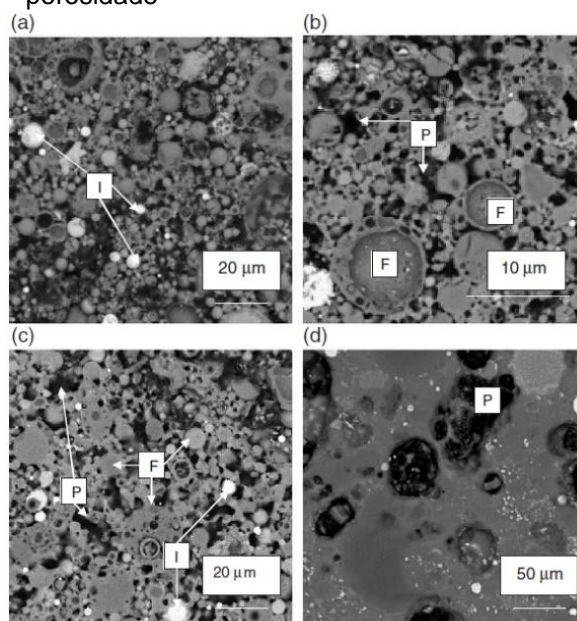
Figura 3 - MEV representativo das seções polidas da amostra G1 preparada usando hidróxido de sódio e cinza volante classe F (a) antes do teste e após a exposição a (b) 800°C, (c) 1000°C, (d) 1200°C. F-partícula de cinza volante, eu-partícula de cinza volante com alto teor de impureza de ferro, P - porosidade; N / D-Na-feldspatos. (BAKHAREV, 2006).



Fonte - Bakharev (2006)

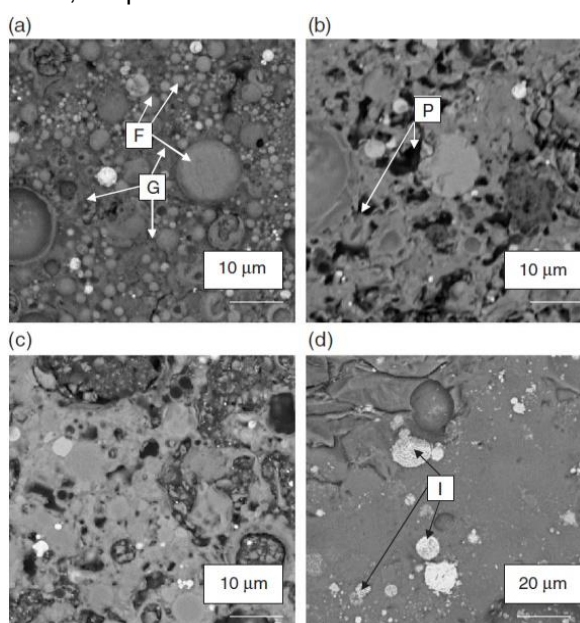
A Figura 4 indica que a microestrutura de G1.PSS ( $w / b = 0,166$ ) não apresentou grandes mudanças após queima a 800 e 1000°C, enquanto uma densificação significativa foi observada após queima a 1200°C. A Figura z mostra as mudanças que ocorreram na microestrutura do FKSS ( $w / b = 0,345$ ) após queima a 800, 1000 e 1200°C. As imagens em MEV da Figura 5 mostram um aumento significativo do tamanho médio dos poros após o tratamento a 800 ° C, que foi progressivamente reduzido após o tratamento a 1000 e 1200°C. Uma matriz muito densa foi produzida no resultado do tratamento a 1200°C. No entanto, poros grandes de tamanho 20-100  $\mu\text{m}$  que apareceu na microestrutura pode causar degradação da resistência. (BAKHAREV, 2006).

Figura 4 - MEV representativo das seções polidas de espécime G1.PSS preparado usando silicato de potássio e uma cinza volante classe F (a) antes do teste, e depois exposição a (b) 800 ° C, (c) 1000 ° C, (d) 1200 ° C testes de queima. F — partícula de cinza volante, I - partícula de cinza volante com alto teor de impureza de ferro, P - porosidade



Fonte: Bakharev (2006)

Figura 5 - MEV representativo das seções polidas do espécime FKSS preparado usando silicato de potássio e uma cinza volante classe F (a) antes do teste, e depois exposição a (b) 800°C, (c) 1000 °C, (d) 1200 °C. G - gel de aluminossilicato, F -partícula de cinza volante, I - partícula de cinza volante com alto teor de impureza de ferro, P - porosidade.



Fonte - Bakharev (2006)

De acordo com Santos *et al* (2011), o CAC também chamado de cimento aluminoso ou cimento de alta alumina possui composição química que varia entre 40 e 80% de  $Al_2O_3$ . Os CACs são mais caros que o cimento Portland e são utilizados

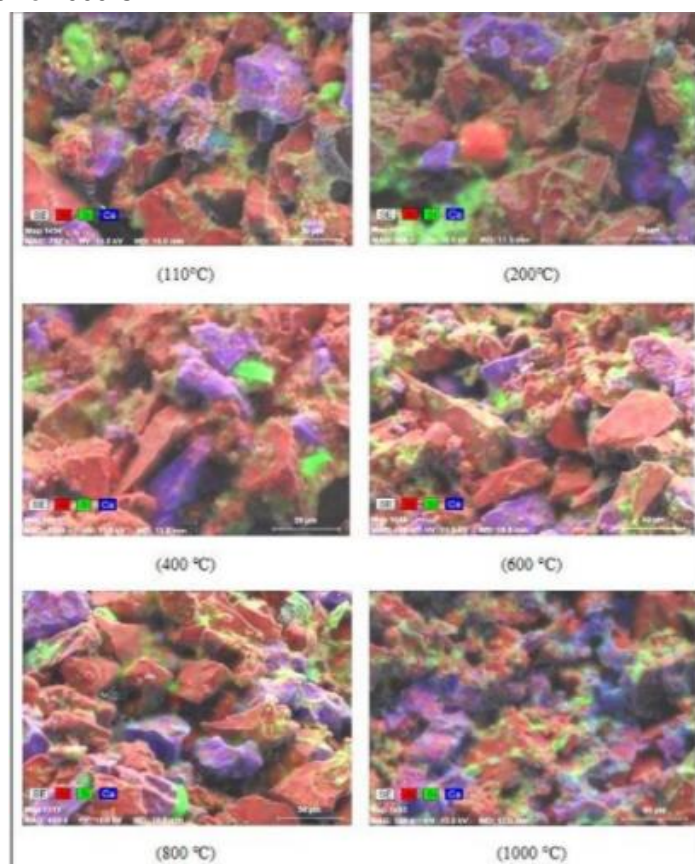
onde o Portland não pode ser usado satisfatoriamente como é o caso da utilização em Refratários, mas diferença básica entre o Portland e o CAC é a natureza das fases ativas inicialmente e o processo de endurecimento.

O Portland contém CaO e SiO<sub>2</sub> como óxidos principais e na reação com a água são formados hidratos de silicato de cálcio amorfo e hidróxido de cálcio cristalino. Em contrapartida, os CACs contêm CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como óxidos principais e pouco ou nenhum SiO<sub>2</sub>. (SANTOS *et al*, 2014)

Nos estudos de Santos *et al* (2011) diz que o cimento aluminato de cálcio (CAC) é um dos ligantes mais utilizados no concreto refratário, principalmente devido à sua abundância, baixo custo, refratariedade e por conferir elevada resistência mecânica á verde e resistência química. Durante a queima, estes materiais apresentam evoluções microestruturais que alteram as suas propriedades e condicionam o seu desempenho. O trabalho teve como objetivo estudar as alterações microestruturais, durante o tratamento térmico, de um concreto refratário contendo CAC e agregados de alumina, e as temperaturas de tratamento variavam entre 110°C e 1000°C. (SANTOS *et al*, 2011).

Foi possível observar na Figura 6 que existe uma grande quantidade de alumina bem como a presença de aluminato de cálcio e sílica. Não foram observadas alterações significativas da microestrutura com o aumento da temperatura até 800°C. No entanto, após tratamento térmico a 1000°C, os resultados obtidos sugerem a reação da sílica com o aluminato de cálcio, o que é compatível com a formação de guelinita e anortita detectadas por difração de raios-X. (SANTOS *et al*, 2011).

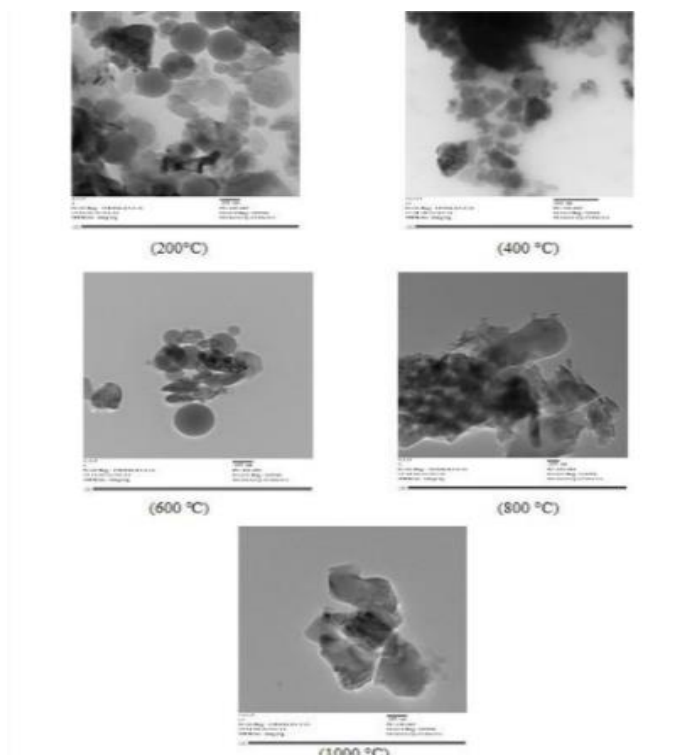
Figura 6 - Mapas de composição química obtidas por EDS/MEV em amostras tratadas a 110 C°, 200 C°, 400 C°, 600 C°, 800 C° e 1000 C°.



Fonte: Santos (2011)

Santos *et al* (2011) observou na Figura 7 a presença de partículas hexagonais, identificadas como sendo caulinita, de sílica amorfa sob a forma de microesferas e alumina. A 800°C a imagem obtida sugere o início da reação entre as diferentes fases e a 1000°C a microestrutura apresenta maior grau de homogeneização.

Figura 7- Imagens obtidas por MET das amostras tratadas 110 C°, 200 C°, 400 C°, 600 C°, 800 C° e 1000 C°.



Fonte: Santos (2011)

Martinovic (2014) em seus estudos procurou investigar a termoestabilidade de concretos refratários com diferentes morfologias e microestruturas causadas por diferentes temperaturas de sinterização: 1100°C, 1300°C e 1600°C. O método de têmpera com água modificada foi aplicado como método destrutivo, o único método experimental para testar a termoestabilidade de materiais refratários por anos. Os testes convencionais de resistência ao choque térmico são baseados no aquecimento e resfriamento cíclicos do material refratário até que a superfície das amostras se degrade em até 50% da superfície original.

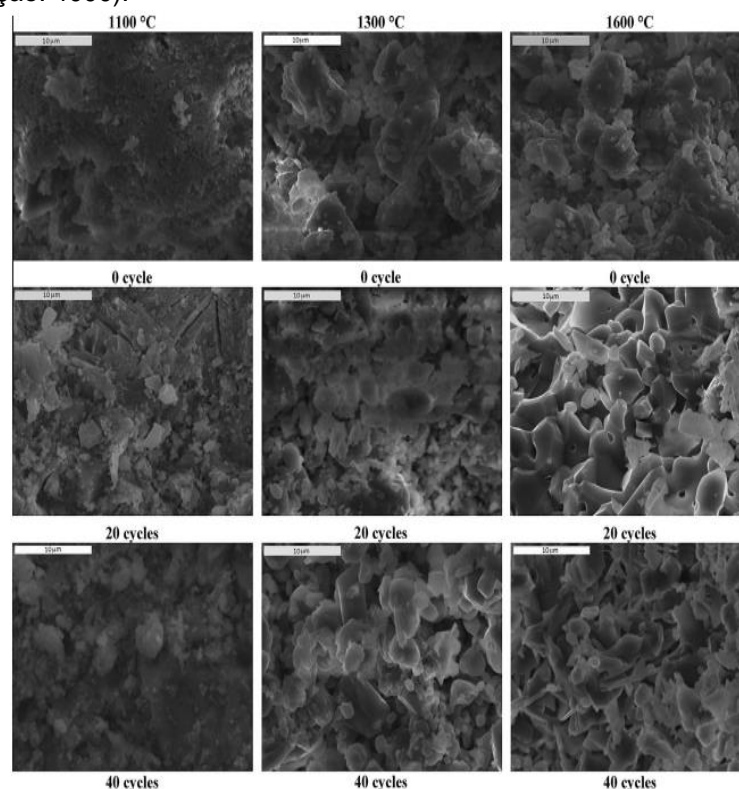
Martinovic *et al* (2014) observou que as amostras sinterizadas a 1300°C apresentaram nível de degradação superficial e interior ligeiramente superior antes do ensaio em comparação com as amostras sinterizadas a 1100 C, com os valores de 2,95% e 2,92%, respectivamente. E semelhante às amostras sinterizadas a 1100°C, o aumento do nível de degradação da superfície aconteceu mais rápido do que a degradação dentro das amostras. As diferenças entre esses dois valores foram percebidas após 10 ciclos de choque térmico.

Além disso, as diferenças entre os valores de degradação da superfície e interior durante o teste foram aumentando mais lentamente do que no caso das

amostras sinterizadas a 1100°C. Ou seja, essas amostras resistiram a 60 ciclos de choque térmico com o nível de degradação da superfície de apenas 15,88% e o nível de degradação dentro do grosso de 12,66%. Como as amostras resistiram a 110 ciclos sem trincar, ficou óbvio que as amostras sinterizadas a 1300°C apresentaram bom comportamento durante o choque térmico e excelente estabilidade térmica e no caso das amostras sinterizadas a 1600°C, os níveis de degradação da superfície e do interior da amostra antes do teste eram de 4,3% e 4,5%, respectivamente (MARTINOVIC *et al*, 2014).

Em seus resultados Martinovic *et al* (2014), em comparação com outras séries testadas, essas amostras apresentaram menor estabilidade térmica, embora apresentassem as melhores propriedades antes da exposição ao choque térmico. As diferenças entre os níveis de degradação da superfície e do interior da amostra foram perceptíveis após 10 ciclos de choque térmico e foram de 6,95% e 19,26%, respectivamente, após 40 ciclos de choque térmico, mostrado na Figura 8 (MARTINOVIC *et al*, 2014)

Figura 8 - Morfologia do concreto com baixo teor de cimento sinterizado em três temperaturas diferentes (ampliação: 4000).

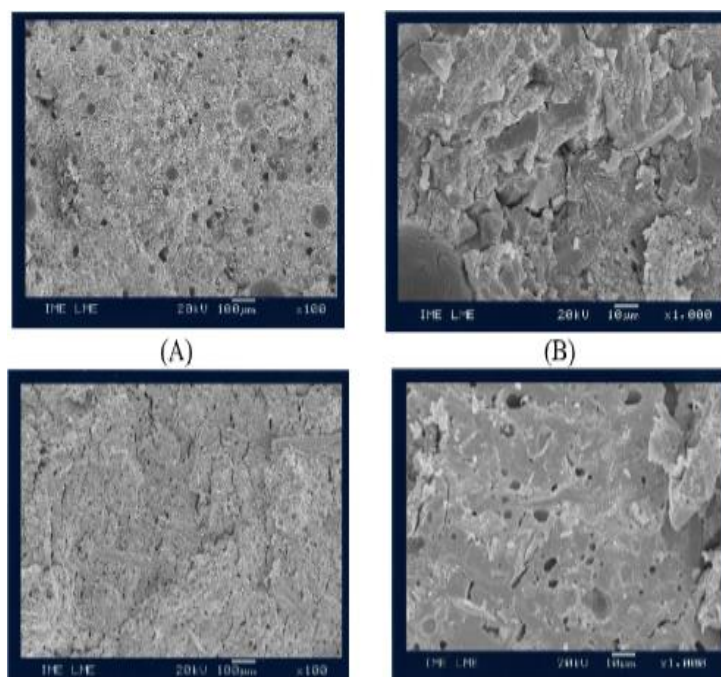


Fonte: Martinovic *et al* (2014)

A pesquisa de Porto (2018) a sua pesquisa teve como objetivo, a partir do estudo de dosagem, o desenvolvimento de pastas geopoliméricas para a produção de produtos com propriedades refratárias a partir disso, foram avaliadas as propriedades termomecânicas dos geopolímeros através dos ensaios mecânicos antes e após a exposição a altas temperaturas. Os resultados termomecânicos, após exposição a altas temperaturas, mostraram que os geopolímeros permanecem íntegros e mantendo suas características estruturais. Por fim, os resultados microestruturais mostraram que os geopolímeros não apresentaram degradação significativa até 500°C (PORTO, 2018).

Os resultados de Porto (2018) mostraram que não foi observada mudança significativa na morfologia do geopolímero exposto a até 800°C. Isso mostra a boa estabilidade térmica deste material frente à ação de altas temperaturas. E para a exposição a 800°C é possível observar a morfologia densa e com a presença de uma pequena quantidade de vazios na microestrutura após a exposição. Assim, não foi observada mudança significativa na morfologia do geopolímero exposto a até 500°C e para a temperatura de 800°C a morfologia foi caracterizada como densa e com a presença de uma pequena quantidade de vazios na microestrutura após a exposição, observado na Figura 9 (PORTO, 2018).

Figura 9 - Microestrutura do geopolímero: (A) Na temperatura ambiente (100X); (B) Na temperatura ambiente (1000X); (C) na temperatura de 800°C (100X); (D) na temperatura de 800°C (1000X).



Fonte: Porto (2018)

### **3. Materiais e Métodos**

No presente trabalho são apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados na pesquisa para a obtenção da argamassa geopolimérica refratária. Assim como as análises de caracterização das amostras, baseados nos estudos de Silva (2019).

Os constituintes para a produção do material são: Metacaulim, silicatos alcalinos, areia e Escória de Alto Forno. Através da razão mássica de cada material, serão feitas combinações diferentes para produção da argamassa geopolimérica com propriedades e características desejadas, e utilizar-se a ativação alcalina pela combinação de silicato de sódio alcalino, água e KOH.

A produção das argamassas será no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua) e as micrografias serão feitas no laboratório de Caracterização da Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA (Campus Ananindeua).

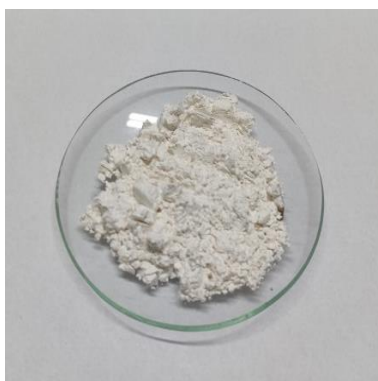
#### **3.1. Materiais**

##### **3.1.1. Metacaulim**

O metacaulim foi utilizado como fonte de alumínio e silício, através da calcinação do caulim, este foi oriundo do interior do Bahia.

A calcinação foi realizada em um forno mufla, modelo SSFm, da marca SOLIDSTEEL, por um período de 2h em uma temperatura de 850°C, esse procedimento foi efetivado no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua). A Figura 10 apresenta a amostra de Metacaulim.

Figura 10 – Metacaulim como fonte de alumínio e silicato usado na formulação dos geopolímeros

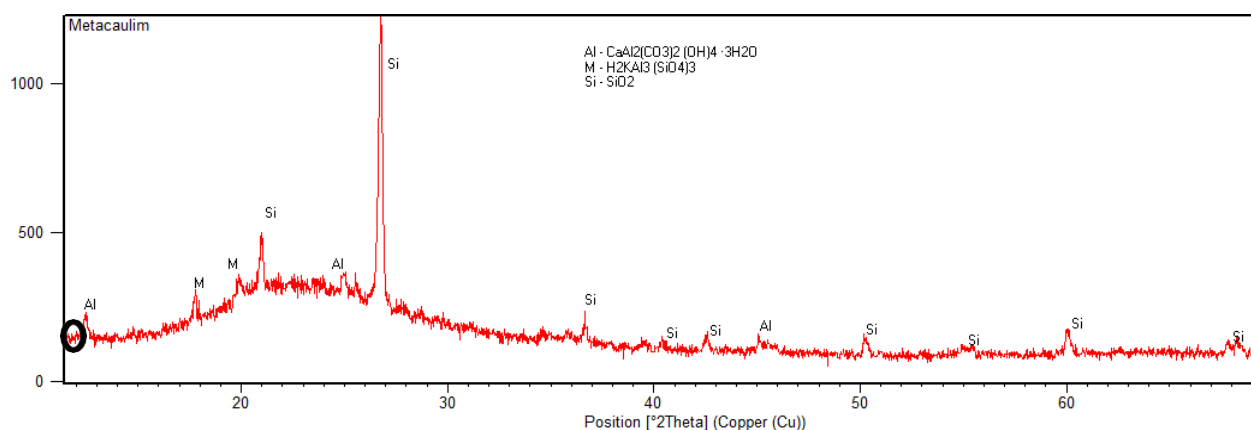


Fonte: Autor, (2020)

### 3.1.1.1 DRX do Metacaulim

A Figura 11 apresenta as fases mineralógicas do Metacaulim, obtidas através da análise de DRX.

Figura 11 – Difratoograma de Raio-X do Metacaulim



Fonte: Porto, 2019.

Segundo os resultados de Porto (2019), os dados de difração de raio-x do Metacaulim, o círculo no gráfico indica o não aparecimento de picos intensos a  $2\theta \approx 12,5^\circ$ , e indica que ocorreu uma desorganização na estrutura da caulinita. Após a calcinação, demonstraram que o material apresenta picos significativos de silício e alumínio, e esses elementos estão ligados à presença de Quartzo (Si), Alumohidrocalcita (Al).

### 3.1.2. Escória de Alto Forno (EAF)

A escória de alto forno, proveniente da empresa Cimento Verde Brasil, situada no Estado do Maranhão, foi utilizada como fonte de cálcio. A Figura 12 apresenta a escória de alto forno a qual fora fonte de cálcio para o desenvolvimento do geopolímero.

Figura 12 - Escória de alto forno utilizada no estudo como fonte cálcio para o desenvolvimento do geopolímero.

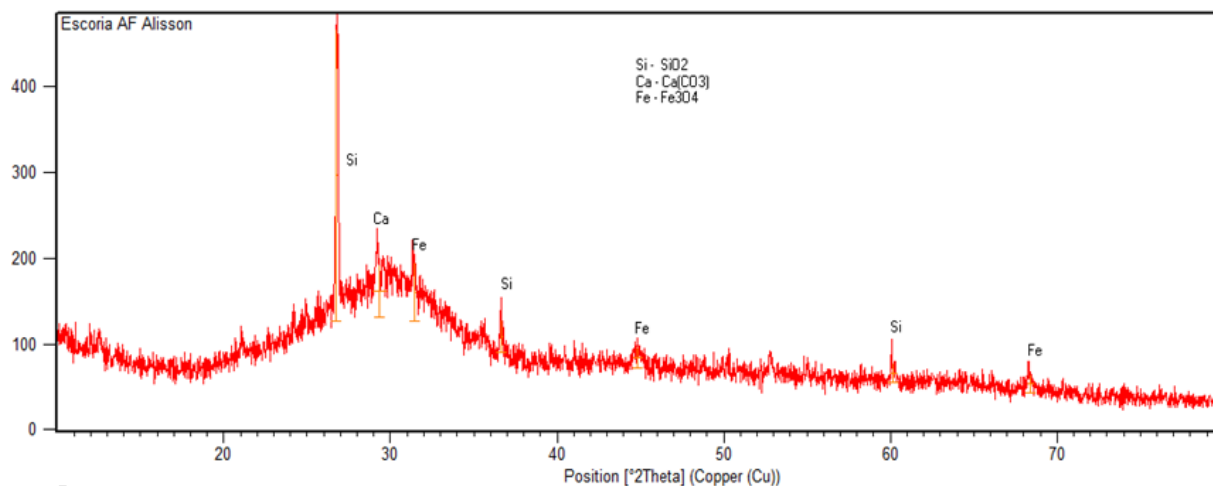


Fonte: Autor, (2021)

#### 3.1.2.1 DRX da Escória de Alto Forno

A Figura 13 apresenta as fases mineralógicas da Escória de Alto Forno, obtidas através da análise de DRX.

Figura 13 – Difratoograma de Raio-X de Escória de Alto Forno



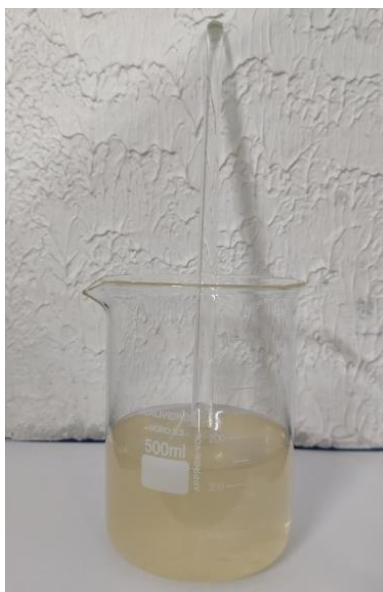
Fonte: Porto, 2019.

De acordo com os resultados de Porto (2019), a escória de alto forno tem uma predominância amorfa, por se tratar de um resíduo precedente da produção do ferro gusa, e por ser um material metálico e seu resfriamento ser rápido, não há formação de cristais por falta de tempo. Pode - se observar, através das análises de DRX, os picos de Magnetita, Calcita (Ca) e Quartzo (Si), confirmando a maior presença dos elementos químicos Si e Ca. Além disso, a calcita encontrada no DRX da Figura 13 está relacionada com o calcário presente na produção do ferro gusa e a presença do cálcio nas escórias de alto forno provém do carbonato de cálcio usado como fundente para baixar o ponto de fusão do minério de ferro.

### 3.1.3. Ativador Alcalino

Hidróxido de Potássio (KOH) e Silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) foram utilizados para determinar o ativador alcalino. Estudos realizados com soluções de metacaulim comprovaram que o grau de reação em misturas ativadas com silicato de sódio + solução de NaOH é maior do que nas misturas utilizando apenas NaOH, isto se deve ao fato da sílica do silicato de sódio reagir antes da sílica do metacaulim, deixando uma maior proporção de composto sem reagir (em comparação com a ativação com (NaOH) (SEVERO, 2013). A Figura 14 apresenta o ativador alcalino usado na preparação dos geopolímeros

Figura 14 – Ativador Alcalino usado na preparação dos geopolímeros para ativar materiais de aluminossilicato.

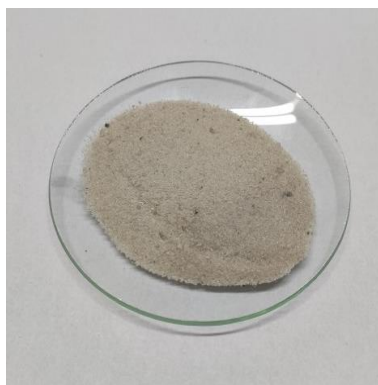


Fonte: Autor, (2021)

### 3.1.4. Areia

A areia comercial foi utilizada com agregado miúdo. Esse material foi obtido da empresa POLIMIX S.A, situada na cidade de Marituba-PA. A areia passou por um processo de secagem e o peneiramento. O material foi secado em estufa a temperatura de 100°C por um período de 4 horas. Em seguida foi peneirada em peneira de abertura de malha 4,8 mm, de acordo com a norma NBR 7211 (2005). A Figura 15 apresenta a areia peneirada material usado na produção do geopolímero.

Figura 15 – Areia utilizada como agregado miúdo na produção do geopolímeros



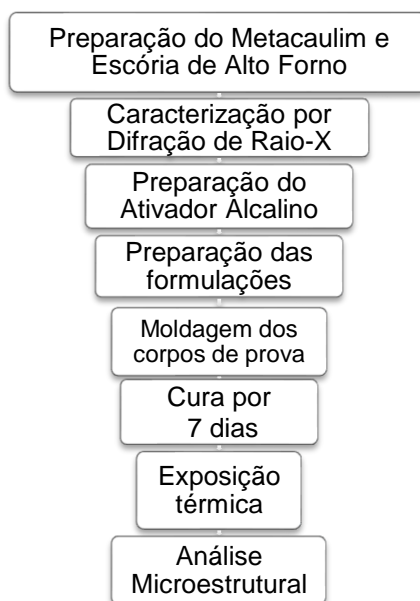
Fonte: Autor, (2021)

## 3.2. Metodologia

Com base nos estudos de Porto (2019), relacionados a pasta geopoliméricas, a metodologia deste trabalho realizou estudos de formulações de pastas com adição de escória de alto forno, que foram analisadas por microscopia óptica, após o período de cura.

A representação esquemática das etapas do trabalho experimental é apresentada na figura 16. Essas atividades foram desenvolvidas no laboratório de práticas e do laboratório de Caracterização da UFPA/Ananindeua.

Figura 16 – Representação esquemática das etapas do trabalho experimental



Fonte: Autor, (2021)

### 3.2.1. Calcinação da fonte de aluminossilicatos e cálcio (Metacaulim)

De acordo com Melo (2011), a calcinação tem como objetivo ativar o caulim, no qual a transformação consiste em modificar do estado cristalino para o estado amorfo, e que permite a reatividade sob ataque alcalino. A calcinação foi realizada no Forno Mufla da marca SOLIDSTEEL do laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua), com capacidade de aquecimento de até 1200°C. A Figura 17 apresenta o forno mufla utilizado para a exposição térmica.

Figura 17 - Forno mufla utilizado na exposição térmica das pastas e argamassas geopoliméricas



Fonte: Autor, 2021.

### 3.2.2. Secagem da EAF

A escória foi secada em estufa da marca QUIMIS, do laboratório de práticas da FEMat-UFGA, a uma temperatura de 100°C por 24 horas. A figura 18 apresenta a estufa utilizada para a secagem do material.

Figura 18 – Estufa utilizada para a secagem da escória de alto forno



Fonte: Autor, 2021.

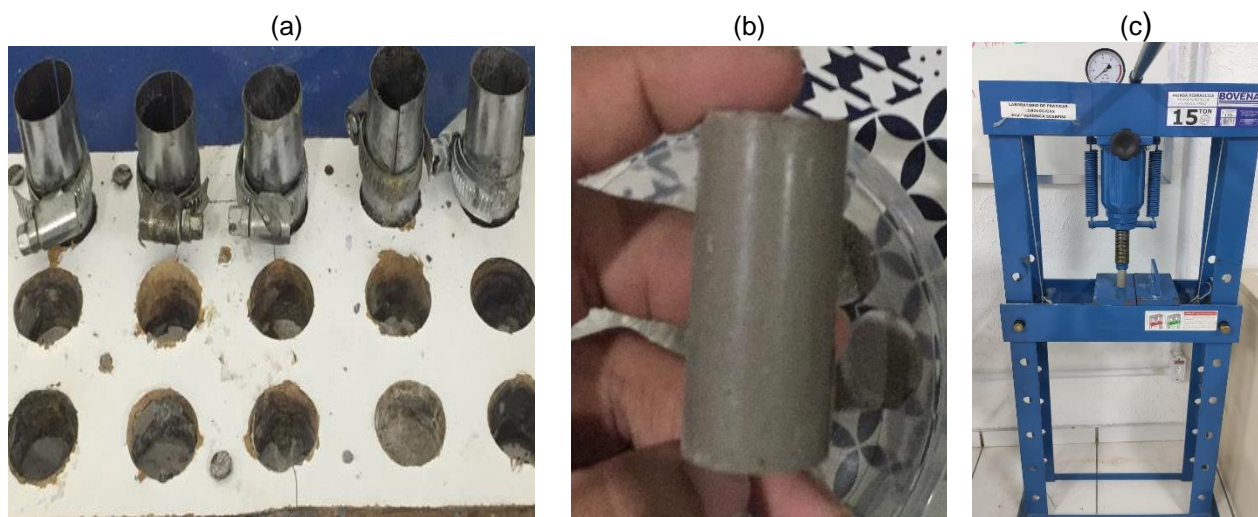
### 3.2.3. Preparação das pastas geopoliméricas

Para a produção da pasta geopolimérica, baseou-se no estudo de Porto (2019), o qual apresentou melhor resultado em relação à resistência, que foi no valor de 45% na proporção de escória. A partir desse estudo, foram produzidos os corpos de prova nos percentuais 0%, 35%, 45%, 55%, em relação a quantidade EAF, para serem analisados no microscópio óptico.

Assim, primeiramente, foi preparada a solução alcalina. Em seguida, foi realizada a mistura dos materiais (metacaulim, escória, solução alcalina), por alguns minutos, no liquidificador industrial da marca SPOLU ATTACK do laboratório de práticas da UFGA (Ananindeua). Após a preparação da pasta, foram moldados 5 corpos de provas de cada formulação em moldes metálicos cilíndricos de diâmetro Ø2,5 cm x 5 cm de comprimento. Depois de 24 horas, os CPs foram desmoldados e passaram por um tempo de cura de 7 dias. Após esse período de cura, os corpos de prova foram rompidos na prensa manual da marca BOVENAU, e posteriormente submetidos às temperaturas de 300°C e 800°C, por 1h cada temperatura. A figura

19 apresenta os moldes metálicos, corpos de prova e a prensa manual utilizados no estudo.

Figura 19 - Produção dos corpos de prova: (a) moldes metálicos, (b) corpo de prova e (c) prensa manual



Fonte: Autor, 2021.

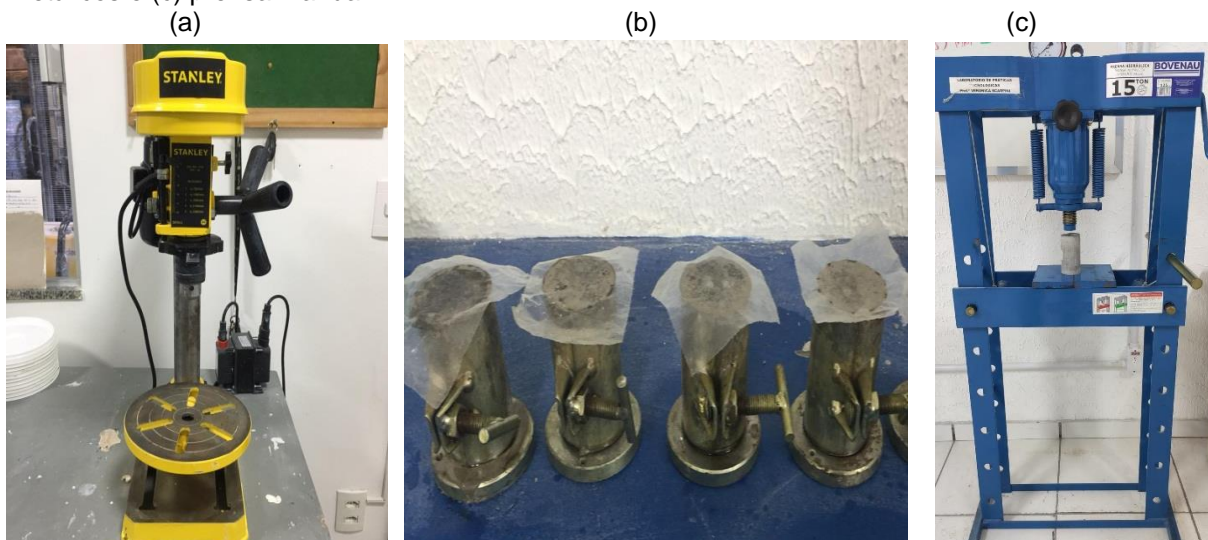
### 3.2.4. Preparação das argamassas geopoliméricas (AGP)

Seguindo o estudo de Porto (2019) e Silva (2019) em relação aos diferentes percentuais de areia utilizada e partindo do melhor resultado das pastas geopoliméricas, foram feitos corpos de provas de argamassa geopoliméricas nas percentagens 0%, 59%, 69% e 75% para serem analisados no microscópio óptico.

Primeiramente, preparou-se a solução alcalina. Em seguida, divididas em cada proporção, os materiais foram misturados manualmente até atingir uma homogeneidade. Depois foi adicionada, a solução alcalina e areia e novamente, misturou-se por alguns minutos a furadeira de bancada da marca STANLEY.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos em moldes metálicos de diâmetro  $\varnothing 5$  x 10 cm de comprimento, seguindo as normas ABNT 7215. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e colocados em temperatura ambiente para cura de 7 dias. Após os dias de cura, os corpos de prova foram rompidos na prensa manual da marca BOVENAU, e posteriormente submetidos às temperaturas de 300°C e 800°C, por 1h cada temperatura. A figura 20 apresenta a furadeira de bancada, corpos de prova nos moldes metálicos e a prensa manual.

**Figura 20** - Preparação da AGP: (a) furadeira de bancada, (b) corpos de prova nos moldes cilíndricos metálicos e (c) prensa manual

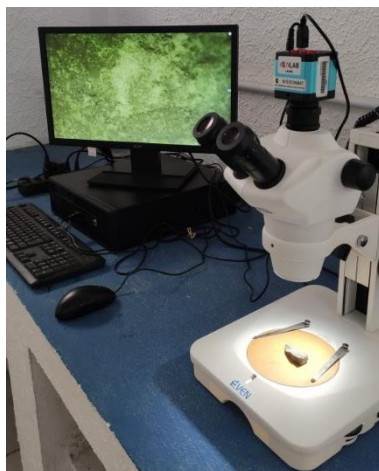


Fonte: Autor, (2020)

### 3.2.5. Microscopia Óptica

Os corpos de prova foram submetidos à análise em microscópio óptico da marca EVEN, pertencente ao laboratório de Caracterização da UFPA/Ananindeua. Após a ruptura dos CPs, argamassa e pasta, foram retirados fragmentos rompidos para análise da microscopia óptica. A seguir a figura 21 apresenta o microscópio óptico.

Figura 21 – Microscópio óptico



Fonte: Autor, (2020)

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Análise Microestrutural das Pastas e Argamassas

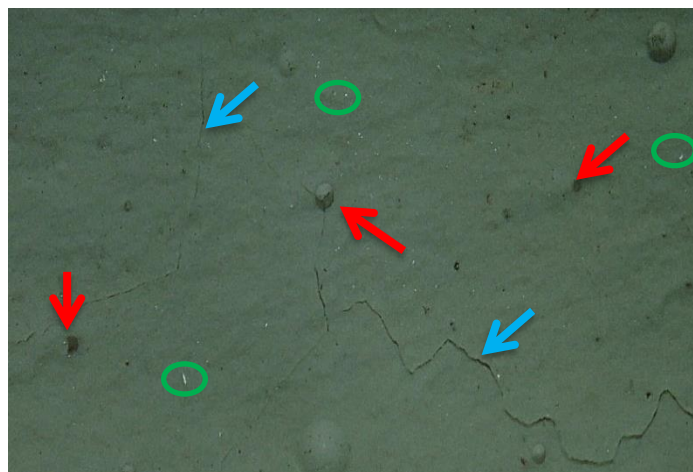
#### 4.1.1 Pasta submetida a temperatura de 300°C

As Figuras 22, 23, 24 e 25 mostram as macroestruturas (a), e microestruturas (b) com aumento de 10x das pastas submetidas à temperatura de 300°C, e verificam possivelmente a apresentação de materiais não reagidos (círculos verdes), a presença de poros (setas vermelhas) e a existência de trincas (setas azuis).

Figura 22 – Pasta Geopolimérica com 0% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrututa; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



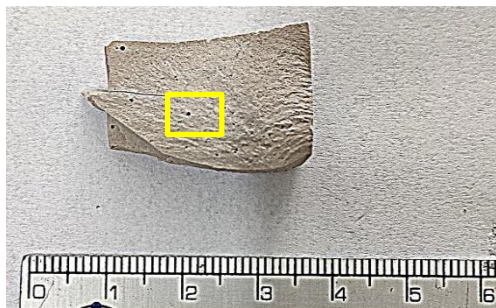
(a) Macroestrututa



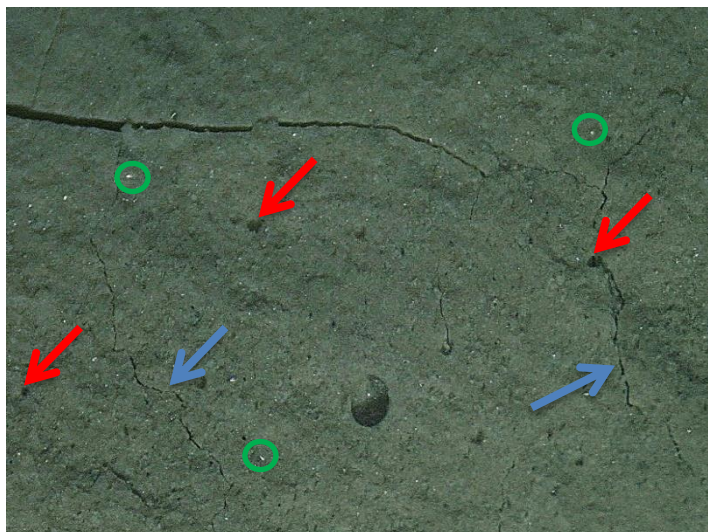
(b) Microestrututa

Fonte: Autor, 2021

Figura 23 – Pasta Geopolimérica com 35% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



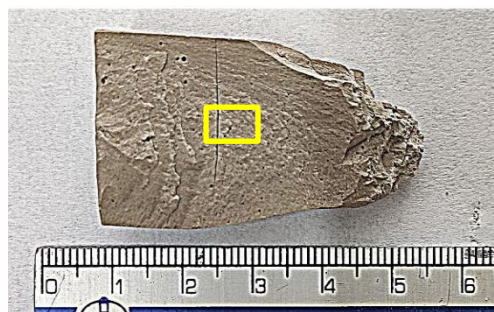
(a) Macroestrutura



(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 24 – Pasta Geopolimérica com 45% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 25 – Pasta Geopolimérica com 55% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



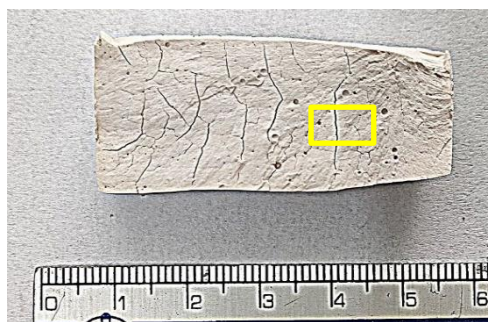
Fonte: Autor, 2021

De acordo com as figuras é possível observar que a presença maior de trinca esteja relacionada com o rompimento dos corpos de prova feito antes de serem submetidos às temperaturas. O material não reagido pode estar relacionado com a concentração de Metacaulim. Madejska (2011) menciona que pastas a partir de 55% em massa de escória, segundo os ensaios mecânicos, apresentam uma queda na resistência. Porém observa-se que a pasta deste trabalho, que apresenta 55%, nota-se diminuição o número de poros e trincas, logo, talvez a exposição a temperatura de 300°C esteja interferindo na resistência mecânica do material. E segundo Pinto (2006), o cálcio presente na escória de alto forno se aloja nos interstícios vazios, e provavelmente forma a estrutura da pasta geopolimérica mais compacta, com menos quantidade de poros.

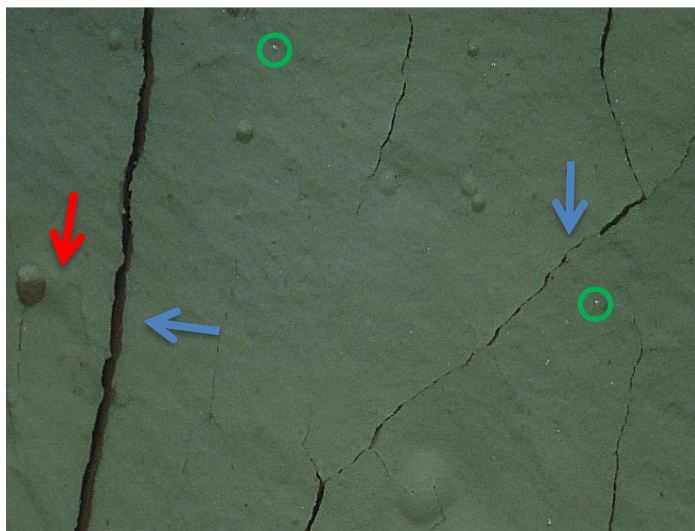
#### 4.3.2. Pastas submetidas a temperatura de 800°C

As Figura 26, 27, 28 e 29 mostram as macroestruturas (a), e microestrutura (b) com aumento de 10x das pastas submetidas à temperatura de 800°C, e verificam possivelmente a apresentação de materiais não reagidos (círculos verdes), a presença de poros (setas vermelhas) e a existência de trincas (setas azuis).

Figura 26 – Pasta Geopolimérica com 0% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestruturas



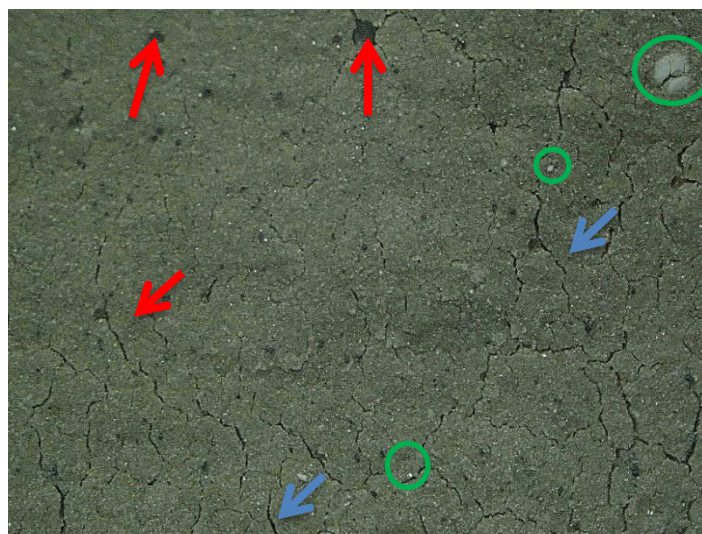
(b) Microestruturas

Fonte: Autor, 2021

Figura 27 – Pasta Geopolimérica com 35% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



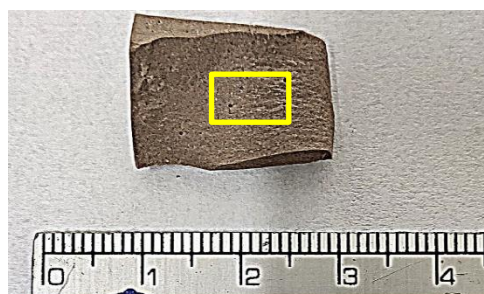
(a) Macroestrutura



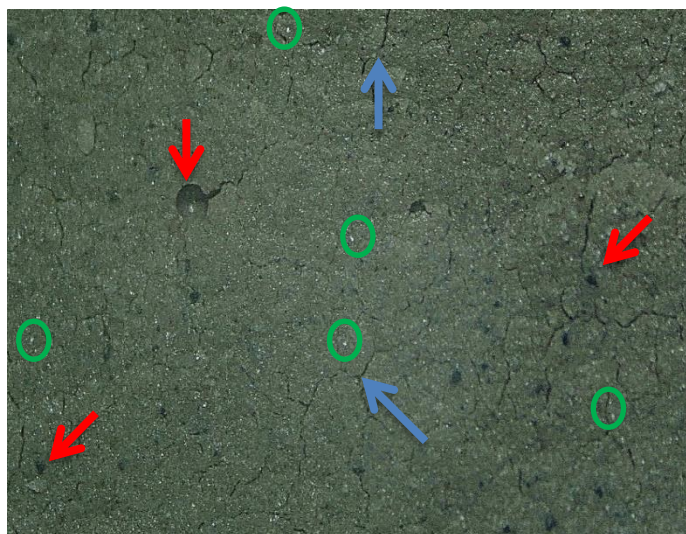
(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 28 – Pasta Geopolimérica com 45% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



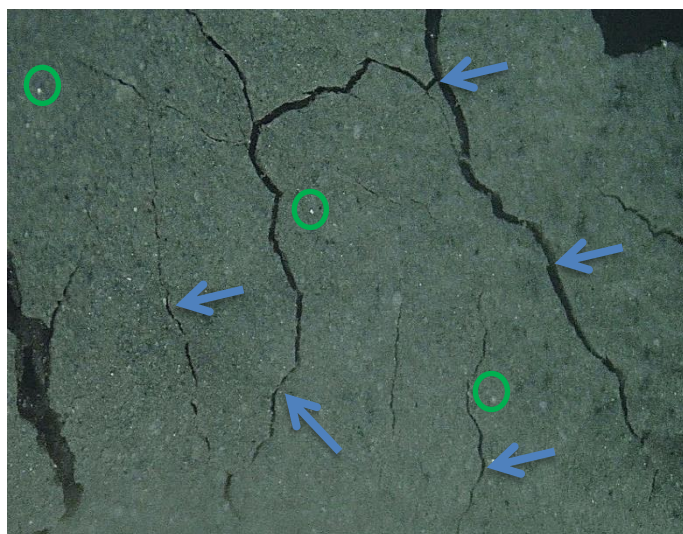
(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 29 – Pasta Geopolimérica com 55% de EAF com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Da mesma forma que se analisaram as pastas a 300°C, as pastas com 35% e 45% submetidos a 800°C, apresentaram uma maior quantidade de poros e material não reagido. Os poros podem ser consequência da quantidade de escória presente no material, pois o trabalho de Silva (2019) cita que na escória contém impurezas na forma de óxidos de ferro, gerando a formação de poros.

Já nas pastas com percentagem de 0% e 55%, nota-se a pouca presença de material não reagido, praticamente sem poros, porém com maior presença de

trincas, que pode ter relação com o rompimento dos corpos de prova, pois Porto (2018) diz que, quando o material sai de uma temperatura para 800°C, percebe-se que não há mudança significativa na sua morfologia, e esta é caracterizada como densa com pequena quantidade de vazios. Vale ressaltar que essa ausência de poros na pasta de 55% pode ser interferência da temperatura, como já foi citado na pasta de 55% submetida a 300°C.

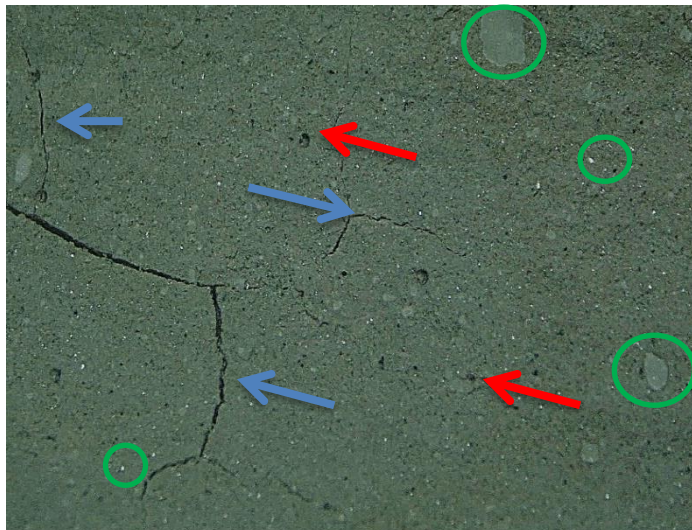
#### 4.3.3. Argamassa submetida a temperatura de 300°C

As figuras 30 (pasta), 31, 32 e 33 mostram as macroestruturas (a), e microestruturas (b) com aumento de 10x das argamassas geopoliméricas submetidas a temperatura de 300°C, e verificam possivelmente a apresentação de materiais não reagidos (círculos verdes), a presença de poros (setas vermelhas), a existência de trincas (setas azuis) e agora a apresentação de agregado miúdo (setas laranjas).

Figura 30 – Pasta Geopolimérica com 0% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



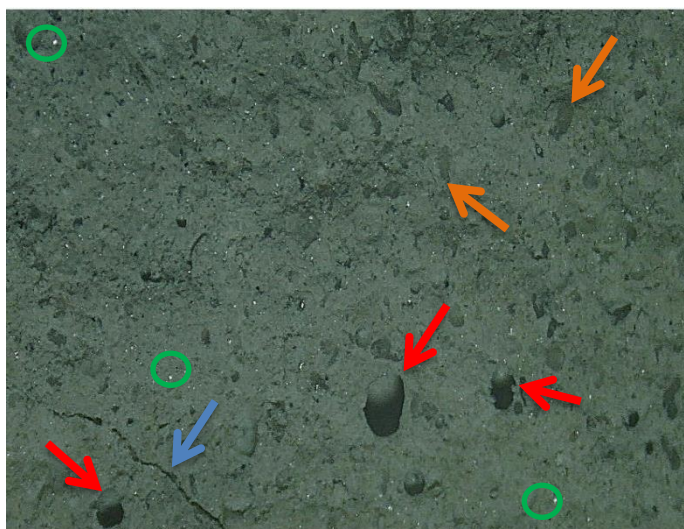
(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 31 – Argamassa Geopolimérica 59% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestruturas



(b) Microestruturas

Fonte: Autor, 2021

Figura 32 – Argamassa Geopolimérica 69% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestruturas



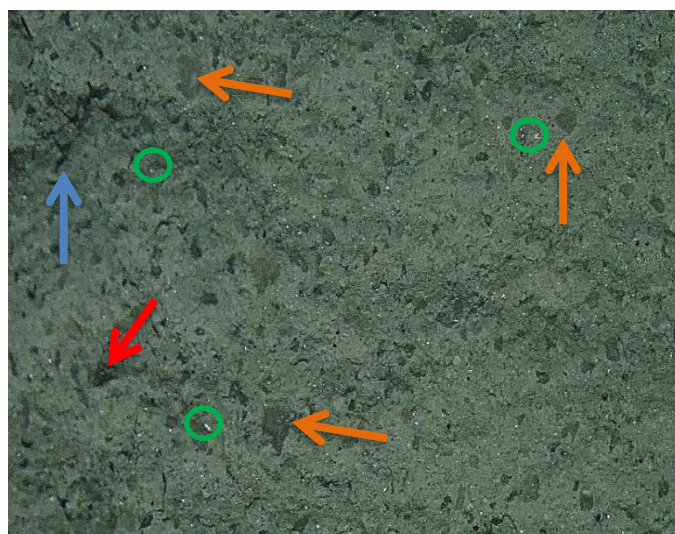
(b) Microestruturas

Fonte: Autor, 2021

Figura 33 – Argamassa Geopolimérica 75% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Percebe-se que na pasta 0% apresenta poucos poros, e nota-se um material não reagido, além disso há também a presença de trincas, porém além do material não reagido ter relação com o Metacaulim, as trincas também podem ter relação com os rompimentos dos corpos de prova.

Já na argamassa de 59% já se verifica a existência de agregado miúdo, maior número de poros e partículas não reagidas, e Melo (2011) diz que a criação de poros pode ter relação com as impurezas oriundas do ferro, além do carbono presente na escória. Percebe-se também que há uma boa aderência matriz e pasta.

Na argamassa de 69% se nota uma ausência de poros, porém um número maior de material não reagido. Em 75% se identifica bastante agregado miúdo, poucos poros e material não reagido.

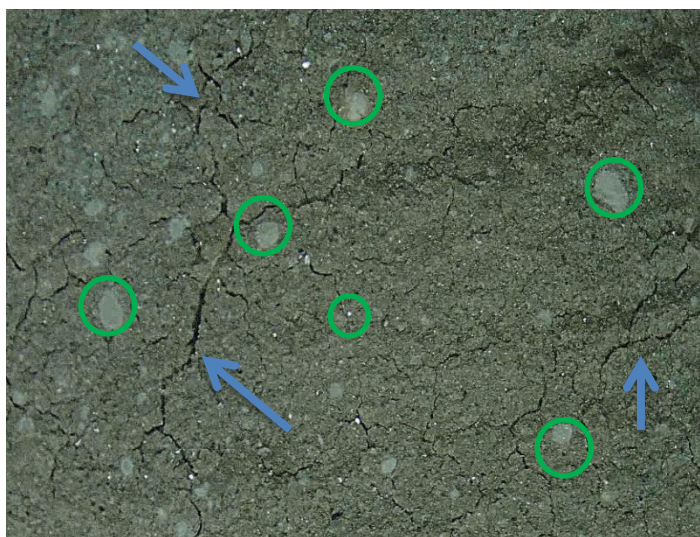
#### 4.3.4. Argamassa submetida a temperatura de 800°C

As figuras 34 (pasta), 35, 36 e 37 mostram as macroestruturas (a) e microestruturas (b) com aumento de 10x das argamassas geopoliméricas submetidas à temperatura de 800°C. É possível verificar nas figuras, possivelmente, a presença de materiais não reagidos (círculos verdes), a presença de poros (setas vermelhas), a existência de trincas (setas azuis) e também a apresentação de agregado miúdo (setas laranjas).

Figura 34 – Pasta Geopolimérica com 0% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



a) Macroestruturas



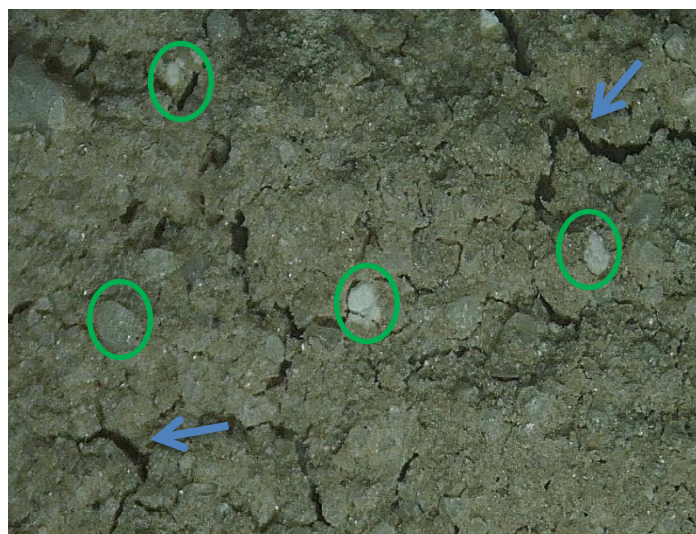
(b) Microestruturas

Fonte: Autor, 2021

Figura 35 – Argamassa Geopolimérica 59% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



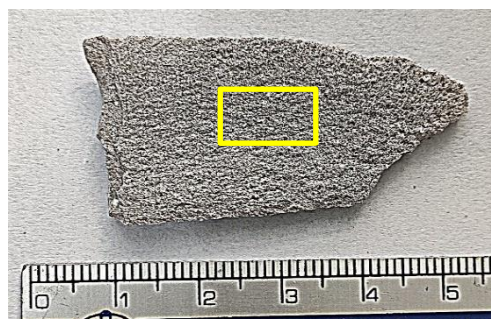
(a) Macroestrutura



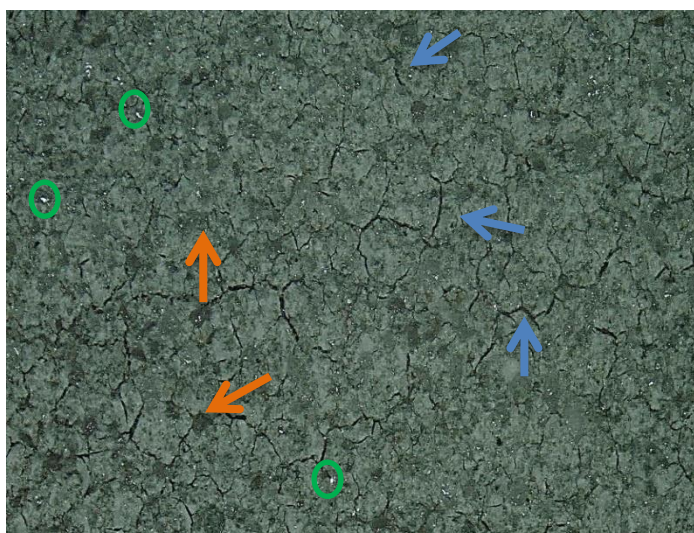
(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 36 – Argamassa Geopolimérica 69% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



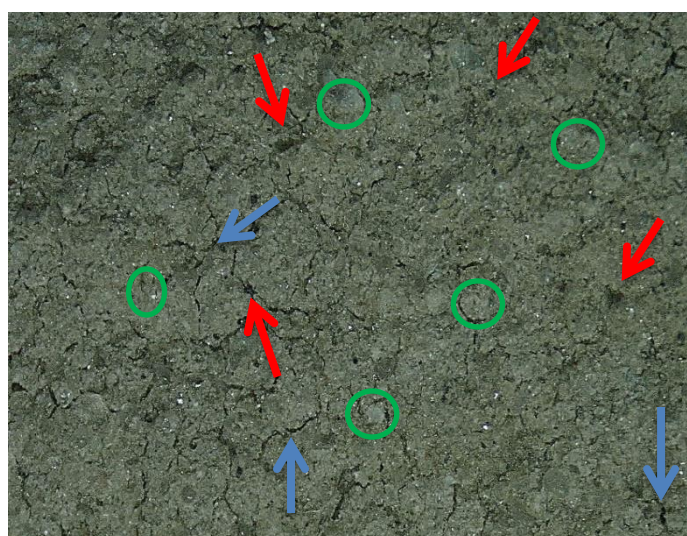
(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

Figura 37 – Argamassa Geopolimérica 75% de Areia com 7 dias de cura. (a) Macroestrutura; (b) Microestrutura com aumento de 10x.



(a) Macroestrutura



(b) Microestrutura

Fonte: Autor, 2021

De acordo com as figuras, na pasta 0% se nota uma frequência maior de material não reagido e um número considerável de trincas. Na argamassa 59% também se percebe boa quantidade de partículas não reagidas, que pode ser devido o metacaulim, além de trincas mais abertas, e nos estudos de Silva (2019), os corpos submetidos a altas temperaturas e após a exposição, passaram pelo ensaio de compressão, percebeu-se que argamassas acima de 69% apresentaram uma queda na resistência, pois pode ter uma maior quantidade de carbono, que exige maior quantidade de água, e conseqüentemente a formação de poros. Castaldelli

(2013), segundo seus estudos observa que taxas altas de carbono no material, o faz absorver uma quantidade maior de água, o que conseqüentemente levaria a mais imperfeições. E a argamassa 75% apresentaram, visivelmente, uma certa quantidade de poros e algumas trincas, porém sua resistência só pode ser comprovada através de ensaios de compressão.

## **5. CONCLUSÃO**

As análises de DRX do Metacaulim demonstraram que o material apresenta picos significativos de silício e alumínio. E o DRX da Escória de Alto Forno demonstrou ser um resíduo que poder ser utilizado como fonte de cálcio, sendo viável para a produção de materiais geopoliméricos.

A partir das análises do ensaio de microestrutura óptica, observou-se que as pastas geopoliméricas, com o aumento da temperatura de 300° para 800°C, até 55% pode apresentar um aumento na resistência, pois apresentou uma queda no número de poros, e sugere-se que faça o ensaio de compressão futuramente para comprovar.

Diante da variação percentual 0%, 59%, 69% e 75%, das argamassas, foi observado que o percentual de 75% apresentou um maior número de poros, um maior número de trincas, principalmente quando ocorre o aumento de exposição térmica de 300°C para 800°C. Assim foi possível observar que diante da exposição térmica de 300°C e 800°C das variações feitas do presente estudo, o percentual que apresentou o menor número de defeitos foi o de 69%. Dessa forma sugere-se que para trabalhos futuros o percentual de 69% apresente uma maior resistência mecânica para aplicação das argamassas geopoliméricas utilizadas em ambientes de altas temperaturas.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Experimentar novos ativadores e novas formulações;
- Realizar ensaio de compressão e flexão;
- Realizar ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);

## 7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. A; LOPES, A. B; RIBEIRO, S.; SANTOS, E. M. B. **Evolução microestrutural de concretos refratários durante a queima**. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2011, Porto de Galinhas. Cerâmica. 20-28.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (MB3) –**Cimento Portland – Determinação de Resistência a compressão**. Rio de Janeiro. Julho. 1994.

ARAUJO, L. E. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso de resíduo de construção e demolição**. 2017. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Infraestrutura, no curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. Joinville. 2017.

BAKHAREV, T. **Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing**. Cement and Concrete Research. Austrália, 36, 1134–1147 p, Março, 2006.

BARBOSA, M.T.G. **Análise Crítica De Materiais Alternativos Empregados Na Construção Civil. Argentina**, 2004. Jornadas Sud-Americanas De Ingeniería Estructural.

BARROSO, M. D. B. **Desenvolvimento de compósitos com matriz de geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, 64p, 2009.

BERNAL, S. A; PROVIS, J. L. (2014). **Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials**. Annual Review of Materials research. 44: 299-327.

BITENCOURT, C. S. *et al.* **A Geopolimerização Como Técnica Para A Aplicação Do Resíduo De Bauxita**, São Paulo, V. 58, N. 345, Mar. 2012.

BORGES, P. H. R.; FOUREAUX, A. F. S.; LOURENÇO, T. M. F.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr/jun. 2014.

BOLJANAC, T.; HUSOVIC, T. V; MATINOVIC, S.; VLAHOVIC, M.; MAJSTOROVIC, J. **Influence of sintering temperature on thermal shock behavior of low cement high alumina refractory concrete**. Composites: Part B. Sérvia, 60, 400-412, jan. 2014.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. (2005) **Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools**. Proceedings of the 2nd International Synposiun of Non-tradition Cement and Concrete. 25-35.

CANDIDO, V. S.; CORREA, T.; MONTEIRO, S. N; PORTO, A. B. R.; SILVA, A. C. R. **Desenvolvimento de concreto geopolimérico com adição de escória de alto forno para aplicação como refratário através da caracterização mecânica e microestrutural**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. 2018. Foz do Iguaçu.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de Geopolímeros Utilizando Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2013. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Ilha Solteira, SP. 2013.

CASCAES, M.E.L. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz**. Trabalho de conclusão de curso em curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville, 2016.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp 445, Rio de Janeiro, 2012.

CUNHA, M. F.; FORTI, B. A.; SILVA B. I. (2010) **Tendências da normalização de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho**. Reunião Anual do Ibrancon 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável, 2010, Ceará. Anais: IBRACON 2010, p 46.

DAVIDOVTS, J. **“Properties of Geopolymeric Cements”**, Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, pp. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications**. Market Trends and Potential Breakthroughs, Australia, p. 1-16, Out. 2002.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement. A review.** Geopolymer Institute Library. Jan. 2013.

DÉSIR, J. M.; DIAS, D. P.; SILVA, P. F. (2005) **Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Mortars Made from Alkali-Activated Metakaolim.** IV Internayonal ACI/CANMET Conference on quality of Concrete Structures and recent advances in concrete materials and testing. Brasil. Fire Resistance. 9: 420-429.

DEVENTER, V; DUXSON, P; LUKEY, G.C.; PROVIS, J.L.; SEPAROVIC, F.J. **Study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels.** Langmuir, vol.21, p.3028-3036, 2005.

HARTMANN, E. A; **Argamassa Geopolimérica Utilizando Pó De Alumínio Como Agente Formador De Poros** UFSC- Joinville (2016).

ILIC, B., R.; MITROVIC, A. A.; MILICIC, L. R., **Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin.** Hem. Ind. Vol. 64, P. 351-356, 2010.

LIMA, J. S. **Efeito da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e das condições de cura nas propriedades de geopolímeros obtidos com silicato de cinza da casca de arroz.** 2018. 96 f. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2018.

LORENZEN, L.; VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J. **The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals: Part I. Theory and Applications.** Minerals Engineering, 10, 7, 659-669. Jullho. 1997.

LORENZEN, L.; VAN JAARRVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, L. S. J. **Factors affecting the immobilization of metal in geopolymerized fly ash.** Metallurgical and materials transactions. 29, p 283–291. Fev. 1998.

MADEJSKA, L. *et al.* **Properties of geopolymer binder obtained from fly ash.** Technical Transactions. Chemistry, v. 8, 2011. p. 113-118.

MACCARINI, H. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim.** 2015. 59 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

MAZZA, S. C. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland.** 2010. 188 f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana (MEAU) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2010.

MELO, L. G. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. 2011. 185p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

MOURA, J. S. **desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria, refratário dolomítico *post-mortem* e Metacaulim**. 2014. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA. Marabá. 2014.

MUSTAPHA, F; NORKHAIRUNNISA, M; SALAHUDDIN, M.B.M. **A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers**. Ceramic International. 41,3. p. 4273–4281. Abril. 2015.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. 88 p. Apostila. Universidade de Trás-os-Montes e alto douro, Vila Real, 2006.

PODE, R. **Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass powerplant**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

PORTO, A. B. R. **Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto forno**. 2019. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

RANGAN, B. V. **Geopolymer Concrete for Environmental Protection**, Australia, The Indian Concrete Journal V. 88, P. 41-59, Abr. 2014.

ROCHA, G. G. N.; VASCONCELOS, W. L. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Resistência**. Revista Concreto. Nº 42, p. 98 -106, 2006.

ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017. 108 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. 2017.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina, 135p, 2012.

SEVERO, C. G. S. et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente.** 2013. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v 8.2, p. 55-67. 2013.

SILVA, A. R. P. **Estudo do desempenho térmico e mecânico da argamassa Geopolimérica a partir do metacaulim com adição de escória de alto forno.** 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

SONAFRANK, G.H.C., **Investigating 21 Century Cement Production. Cold Climate.** Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010.

TEMUJIN, J., VAN RIESSEN, A. WILLIAMS, R. **Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymers pastes.** Journal of Hazardous Materials, v. 167, p. 82 – 88, 2009.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

ZUDA, L; CERNY, R. **Measurement of linear thermal expansion coefficient of alkali-activated aluminosilicate composites up to 1000°C.** Cement & Concrete Composites. República Tcheca. 31, 263–267. Fev. 2009.