



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

ALAN RODRIGO PALHETA SILVA

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DA  
ARGAMASSA GEOPOLÍMÉRICA A PARTIR DO  
METACALIM COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO  
FORNO**

ANANINDEUA  
2019

ALAN RODRIGO PALHETA SILVA

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO E MECANICO DA  
ARGAMASSA GEOPOLÍMÉRICA A PARTIR DO  
METATCAULIM COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO  
FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, orientado pelo prof<sup>o</sup> D.SC Alisson Clay Rios da Silva em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof.. D.SC. Alisson Clay Rios Da Silva

ANANINDEUA  
2019

ALAN RORIGO PALHETA SILVA

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DA  
ARGAMASSA GEOPOLÍMÉRICA COM ADIÇÃO DE  
ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, orientado pelo prof<sup>o</sup> D.SC Alisson Clay Rios Da Silva em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO:

CONCEITO:

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Alison Clay Rios da Silva  
(Orientador)

---

Prof. Dra<sup>a</sup> Roseane de Lima Silva  
(FEMat – CAMPUS ANANINDEUA/UFPA)

---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat – CAMPUS ANANINDEUA/UFPA)

*Dedico este trabalho a  
minha família, em  
especial aos meus  
pais, Lúcia e Rodileno,  
que nunca mediram  
esforços para as  
minhas realizações.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela graça da vida.

Ao meu pai Rodileno, que apesar da distância, sempre se colocou disposto a ajudar nas minhas escolhas, a minha mãe Lucia, sem você nada disso teria sentido, obrigado por todo cuidado, todo zelo, conversas e orientações, a meu irmão Marcos Paulo, por ser um dos meus motivos de trilhar com firmeza este caminho.

Agradeço a minha tia Arlene, sem dúvidas voce é uma mulher ímpar, sua força é sem igual, obrigado por todo apoio, uma mulher extraordinária, que é como uma mãe pra mim.

Aos meus amigos de infância, Jean, Carlos Junior, João Matheus, Wellerson, Wesley e Fernanda.

Aos meus tios e avós, maternos e paternos, seria injusto citar um ou outro, vocês são o motivo também dos meus esforços, pois o incentivo e carinho de vocês para comigo, sem duvida é sem precedentes.

Aos meus amigos de ensino médio, Matheus, Lorena, Tayna, Amanda, Felipe, Amanda Ribeiro, Cássio, obrigado pela amizade sólida, pelos conselhos e pela descontrações, vocês certamente representam o significado da palavra “amizade”

Aos meus amigos faculdade, em especial Paulo Victor, Ana Beatriz, Sandy, César, William, Camilly, Liliam, Andrey, Hellen, Clara, Thiago, Diogo, e Felipe, sou grato por te-los conhecido e por suas amizades,

Ao grupo de pesquisa de Geopolimeros, por todo apoio, meu muito obrigado e aos meus professores que se tornaram amigos, obrigado pelos ensinamentos e conselhos, em Especial ao meu orientador Alisson e ao professor Marcos, meu grande amigo Francivaldo e ao professor Edinaldo Cunha.

Aos meus vizinhos e amigos da família, que tanto me ajudaram de diversas formas por toda a vida, obrigado pelo carinho.

Por fim, minha namorada Thais, obrigado por ser minha companheira de todos os momentos.

“O homem não faria o possível  
senão tivesse tentando várias  
vezes o impossível”

Max Weber

## RESUMO

O Termo Geopolimero foi introduzido a partir de Davidovits, e indica materiais com propriedades cimentícias e matérias primas de origens geológicas ou minerais, para que ocorra a reação é necessário um meio alcalino, onde alumínio e silício reagirão e formarão polímeros (de onde surge o nome Geopolimero), e o cálcio entra no interstício da estrutura. Os Geopolímeros são conhecidos por propriedades bem interessantes, tais como rápida cura, resistência igual ou superior ao Portland, além de redução de danos ambientais quando comparado ao tradicional Cimento Portland. Neste trabalho objetivou-se produzir a Argamassa Geopolimérica – AGP, e encontrar as melhores formulações e propriedades utilizando como matéria prima o caulim da Região Norte e o Resíduo Escória de Alto - EAF, o Estudo contém pesquisa em relação a granulometria de EAF e uma análise preliminar de Pasta De Cimento Geopolimérico. Uma comparação foi realizada em relação a Argamassa Refratária Comum – ARC. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com a AGP apresentando uma resistência a compressão melhor que a ARC após a exposição térmica na temperatura de 400°C.

**Palavras chave:** Argamassa Geopolimérica. Exposição Térmica. Cimento Geopolimérico.

## ABSTRACT

The term Geopolimero was introduced from Davidovits, and indicates materials with chemical properties and raw materials of geological or mineral origin, so that the need for an alkaline medium, an aluminum and silicon to react and to form polymers occurs (from where the name Geopolimero ), calcium enters the interstice of the structure. Geopolymers are known for well-intentioned properties, such as curing, equal to or greater than Portland resistance, as well as reducing losses compared to traditional Portland Cements. In this work we aim to create a Geopolymer Mortar - AGP, and to find the best formulations and their main properties as kaolin raw material from the North Region and the High-EAF Slag Residue, the regression study of an EAF granulometry and a preliminary analysis. of Cement Paste Geopolimérico. A comparison was made in relation to the Common Refractory Mortar - ARC. The results were satisfactory, with an AGP having a resistance and a mean temperature of 400 ° C.

**Keywords:** Geopolymer mortar. Thermal Exposure. Cement Geopolimérico.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema dos Polissialatos (Fonte: Davidovits 2013).....	15
Figura 2 – Esquema de ativação Alcalina .....	22
Figura 3 - Quadro Geral das Aplicações .....	24
Figura 4 -Materiais que compõem a Argamassa.....	29
Figura 5–Metacaulim .....	30
Figura 6 – Amostra de Escoria de Aciária peneirada .....	31
Figura 7-A) Hidróxido de potássio b) Silicato de sódio.....	31
Figura 8 - Areia Peneirada .....	32
Figura 9 – Estufa .....	33
Figura 10 – Forno mufla .....	33
Figura 11– Moinho de Bolas.....	34
Figura 12– Agitador mecânico e Série de peneiras.....	35
Figura 13 - Argamassadeira .....	35
Figura 14– a) Moldes para Pasta b) Moldes para Argamassa .....	36
Figura 15 - Máquina de Ensaio Universal .....	37
Figura 16 - Mev-EDS.....	37
Figura 17 - Corpos de Prova da Pasta de Cimento Geopolimerico.....	38
Figura 18– Corpos de prova conformados .....	39
Figura 19 – DRX do Metacaulim .....	40
Figura 20 - DRX da EAF .....	42
Figura 21 - Resistencia a compressão da Pasta.....	43
Figura 22 Resistência a compressão dos corpos de prova de Argamassa Geopolimérica .....	45
Figura 23– a) corpos de prova de 59% b) CP rompido .....	46
Figura 24 - Resistência mecânica a compressão após tratamento térmico e em temperatura ambiente .....	46
Figura 25 - MEV da Amostra de 59%; a)100x b)500x c)1000x d)5000x .....	48
Figura 26– a) Região externa da amostra de 59% a 100x b)EDS.....	49
Figura 27– a) Região externa da amostra de 59% a 100x b)EDS.....	50
Figura 28– a) EDS da região interna da AGP 400° b) MEV Região Interna AGP 400°C 2500X.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química média das Escoria De Alto Forno .....	19
Tabela 2– Relações de variáveis fundamentais .....	21
Tabela 3 - Aplicações .....	24
Tabela 4 - EDS do Mecaulim .....	41
Tabela 5 – Relação entre moagem e passante.....	41
Tabela 6 - Composição química da EAF .....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.2 Objetivo Geral .....	13
1.3 Objetivos Específicos .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1 Estrutura Dos Geopolímeros e Mecanismo De Reação .....	14
2.2 Cálcio na composição dos Geopolímeros .....	16
2.3 Caulim e o Metacaulim .....	17
2.4 Escória de Alto Forno .....	18
2.5 Reatividade das matérias primas .....	20
2.6 Ativação alcalina da mistura Geopolimérica .....	20
2.7 Aplicação dos Geopolímeros .....	23
2.8 Desempenho dos geopolímeros em altas temperaturas .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
3.1 Materiais .....	29
3.2 Matérias-Primas .....	29
3.2.2 Escória de Alto Forno .....	30
3.2.3 Ativador Alcalino (Hidróxido de Potássio e Silicato de Sódio) .....	31
3.2.4 Areia .....	32
3.3 Equipamentos .....	32
3.4.2 Produção da Argamassa Geopolimérica (AGP) .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>40</b>
4.1 Caracterização das Matérias Primas .....	40
4.1.1 Metacaulim .....	40
4.2.2 Argamassa geopolimérica .....	44
4.3 Análise Microestrutural .....	47
4.3.1 Análise da AGP em temperatura ambiente .....	47
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>53</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Davidovits (1991), o cimento é o segundo material mais consumido em todo o planeta, ficando atrás apenas da água, visto o constante crescimento da Construção Civil que visa atender as demandas de uma dinâmica globalização, o cimento entra como material protagonista de todo este crescimento, estando nas casas, prédios, dutos, viadutos, tuneis, minas, dentro de indústrias das mais variadas formas, essa argamassa pode ser manuseada de diferentes maneiras, se adicionando aglomerantes finos e/ou grossos, para revestimento, piso, estruturas, entre outros.

Conforme a Cement Technology Roadmap (2009), os institutos International Energy Agency E World Bussiness Council For Sustainable Development desenvolveram um estudo que cita que a produção global do cimento em 2008 foi de 2,55 bilhões de toneladas, e que mesmo em cenários de crise, em 2050 esse valor alcançará o valor de 3,69 bilhões de toneladas. Estes dados são grandiosos, porém apresentam problemas também, pois, o concreto é um material de geração relativamente alto de gases nocivos a terra. Isso implica em um dado um tanto quanto incomodo, sendo o Cimento portland responsável pela emissão de 5% da taxa global de CO<sub>2</sub>

Davidovits (2015) cita que, buscando alternativas para diminuir impactos ambientais, com a busca da otimização da produção e o produto, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, umas destas novas tecnologias é o desenvolvimento dos materiais geopoliméricos. O geopolímero é uma nova classe de materiais cimentícios, que apresentam uma estrutura análoga a estrutura dos polímeros orgânicos, que são os materiais poliméricos feitos de derivados do petróleo, porém os geopolímeros são produzidos com materiais geológicos como o Caulim e subprodutos como escórias da siderurgia. Os geopolímeros são aluminossilicatos hidratados, que quando em contato de uma mistura com soluções alcalinas liberam uma reação, e através dessa reação de geopolimerização produzem um aglomerante. Os geopolímeros apresentam variadas classes para diferentes tipos de aplicação, são materiais que apresentam ótima resistência mecânica, um tempo de cura menor em relação ao cimento Portland, possibilidade de utilizar diversos resíduos industriais em

sua formulação, além de ao fim diminuir significativamente a relação de impacto ambiental quando comparado ao concreto tradicional.

### **1.1 Justificativa**

Este trabalho visa desenvolver uma argamassa geopolimérica, projetando sua utilização em temperaturas de 400°C, através do uso do Metacaulim e Escória de alto forno para a produção do aglomerante.

### **1.2 Objetivo Geral**

O presente trabalho teve como objetivo principal produzir argamassa de Cimento Geopolimérico a partir da utilização Metacaulim com a adição de resíduo de Escória de Alto Forno (EAF), e comparar com a Argamassa Refratária Comum (ARC)

### **1.3 Objetivos Específicos**

- Produzir formulações distintas de pastas, trabalhando a variação da porcentagem de Escória de Aciária.
- Determinar a quantidade ideal de Areia para a AGP
- Avaliar a resistência mecânica de argamassas geopoliméricas quando submetidas a temperatura elevada e compara-las com a Argamassa Refratária Comum (ARC)
- Realizar a análise microestrutural da AGP.

Após a introdução e os objetivos descritos neste capítulo, os próximos capítulos do trabalho estão organizados da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta a referência bibliográfica, que coloca a base teórica deste trabalho apresentada para o leitor, o capítulo 3 traz a secção de materiais e métodos, onde será conhecido mais especificamente o trabalho no qual esse texto se objetiva. O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, onde é explorado a maneira como esse trabalho foi aproveitado e juntamente a discussão e análise sobre

os resultados apresentados, assim, respondendo os objetivos principais do trabalho. O capítulo 5 apresenta as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Davidovits (1979) comenta que, o Geopolimero é obtido por meio de matérias primas inorgânicas. Esses novos tipos de materiais surgiram a fim de alcançar características ausentes nos polímeros, tais como resistência a altas temperaturas e determinados esforços mecânicos.

Segundo a Geopolymer Institute, cerca de 9 classes diferentes de geopolímeros são conhecidas, mas a classe com matriz de aluminossilicatos é a que possui melhor aplicabilidade para a indústria de construção civil, torna-se a mais conhecida, pois pode trazer a opção de substituir integralmente o cimento Portland na aplicação em concretos e argamassas.

Silva (2017) e Duxon (2007) citam em seus estudos que, os Geopolímeros também são lembrados como polímeros inorgânicos, cimentos álcali-ativados, geocimentos, cerâmicas de ligação alcalina, hidrocerâmicas, entre outros. O que todos esses materiais possuem em comum é a utilização do mesmo processo químico na polimerização do monômero (-Si-O-Al-O-). São considerados depois da cal e do cimento Portland a terceira geração de materiais cimentícios. O termo “geopolímeros” é genericamente utilizado para descrever um material amorfo de aluminossilicatos.

Davidovits (2002) cita em seu trabalho uma comparação, onde a cada uma tonelada de Cimento geopolimérico, é gerado 0,180 tonelada de CO<sub>2</sub>, enquanto a produção de uma tonelada de cimento portland gera 0,600 tonelada de CO<sub>2</sub>, em comparação dos dois materiais, o Cimento geopolimérico gera 3 vezes menos CO<sub>2</sub> durante a fabricação do que o cimento Portland (DAVIDOVITS, 2002).

### 2.3 Estrutura Dos Geopolímeros e Mecanismo De Reação

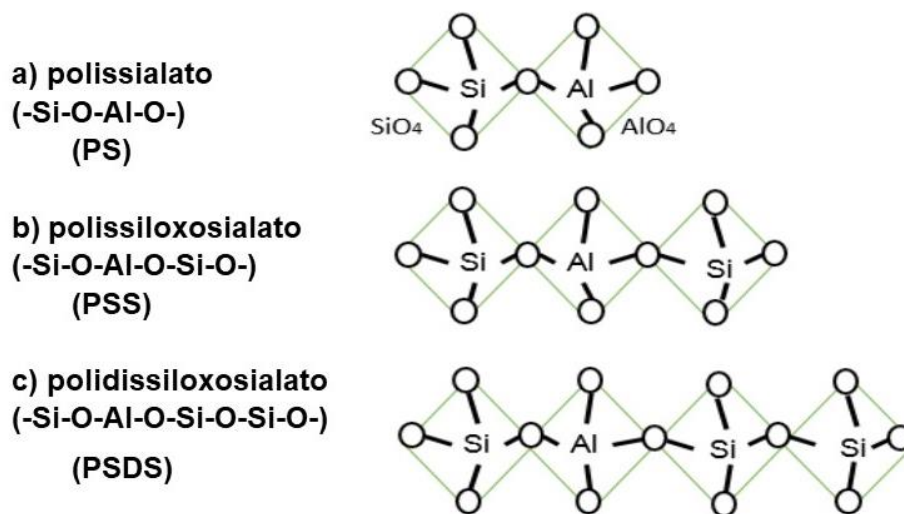
Para Bittencourt (2012), os Geopolímeros são por definição polímeros de origem inorgânica, onde tetraedros de SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> e AlO<sub>4</sub><sup>-</sup> geram uma rede em três dimensões, que se ligam por meio de compartilhamento de todos os seus

átomos de oxigênio, sendo que essa rede deve ser estabilizada com a presença de cátions com monovalência, como o  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . A sua produção deve-se a reações entre as fontes de aluminossilicatos que é inserida em um meio aquoso e alcalino, onde a estrutura sólida varia entre totalmente amorfa a semicristalina.

Segundo Vassalo (2013) e Pinto (2006), a estrutura dos polissialatos representa polímeros naturais resultantes da reação chamada de geosíntese. A partir da reação de geosíntese, o alumínio é induzido a ativação alcalina em uma matriz silicosa. O processo de geosíntese ocorre corriqueiramente na natureza. Dentro da estrutura e arranjo tridimensional ocorre a transformação dos átomos de silício se alternando com os átomos de alumínio em coordenação tetraédrica, compartilhando átomos de oxigênio.

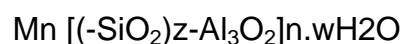
Através da proporção entre Si/Al as estruturas são formadas, estes são apresentados pela figura 1, abaixo:

**Figura 1 – Esquema dos Polissialatos**



Fonte - Davidovits 2013

Segundo Barbosa (2000), a fórmula empírica dos Polissialatos é dada por:



Onde:

- M é um cátion ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ou  $\text{Ca}^+$ ).
- Elemento alcalino **n** é o grau de polimerização.
- O símbolo (-) indica a presença de uma ligação.
- z é 1,2 ou 3 e w é o grau de hidratação.

-Z = 1 o nome é polissialato (PS)

-Z = 2, polissialato-siloxo (PSS)

-Z = 3, polissialato-disiloxo (PSDS)

Descrita por diversos pesquisadores, assim como por VanJaarsveld et al.(1997) e Oliveira (2017), o processo de reação do geopolímero é um processo exotérmico, por causa da policondesação. O mecanismo baseia-se em um meio alcalino onde ocorre a dissolução do Al e Si, onde não apenas a superfície do material é hidrolisada, como também dissolve a pequena quantidade de CaO, posteriormente a policondesação, por meio da reação de condensação forma um gel, que posteriormente transforma-se em uma estrutura tridimensional de base silico-aluminosa individual dissolvida pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina.

Para Rangan (2014), a estrutura amorfa do geopolímero deve-se ao rápido enrijecimento da matriz, que é uma das principais diferenças entre os geopolímeros e as zeolitas. Sódio ou potássio geralmente são as bases das soluções alcalinas utilizadas, mais comumente é usado a combinação de hidróxido de sódio ou potássio com silicato de sódio ou potássio.

## **2.4 Cálcio na composição dos Geopolímeros**

Segundo Santa (2012), uma estrutura mais compacta, com menor porosidade e maior resistência a compressão pode ser encontrada se possuir uma presença maior de cálcio na estrutura quando colocada presença de baixas temperaturas.

Segundo pesquisas de Narang e Chopra (1983), podemos identificar os aluminossilicatos como um grupo, onde nele estão contidas as escórias, que são ricas principalmente em alumina, sílica e cálcio, além do magnésio, pertencentes ao grupo dos metais alcalinos terrosos. Para um maior potencial de reação, as escórias que apresentam melhores valores são as alcalinas que

possuem a razão de  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$  maiores que 1. Se a proporção de  $(\text{CaO}+\text{MgO}) / \text{SiO}_2$  estiver acima de 1,38, por consequência se obtém resistência mecânica nos corpos de prova três vezes melhores do que se utilizado a razão de 1. Assim, fica mais fácil compreender a necessidade da presença dos óxidos alcalino terrosos no material (PINTO, 2006).

Davidovits (2013) cita em seus estudos que, uma pequena quantidade de uma fonte rica em cálcio pode ser adicionada na mistura geopolimérica com o objetivo de catalisar o processo de pega do cimento geopolimérico em estado fresco e facilitar a cura a temperatura ambiente, além de aumentar a dureza e dar ganho de resistência mecânica.

Segundo Melo (2011) e Porto (2018), o cálcio é elemento primordial para a existência dos geopolímeros e posteriormente será transformado no cimento geopolimérico. O cimento Portland tão utilizado pela construção civil no mundo todo pode ser substituído pelo cimento geopolimérico com eficiência, já que o ultimo apresenta a mesma aplicação, com a vantagem de emitir menos  $\text{CO}_2$  e fazer a utilização em grande escala de resíduos industriais. A EAF serve de fonte de Cálcio para diversas pesquisas, isso é comprovado por meio de caracterização mineralógica a composição química do material.

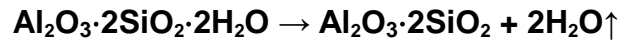
Tashima (2011) cita que, qualquer material inorgânico que seja fonte de aluminossilicatos pode ser usado como matéria prima no processo de ativação alcalina, desde que também esteja no estado amorfo. A partir da natureza pode se obter estes materiais, como o caulim, ou então provindo de resíduos industriais ou agrícolas, como cinzas de casca de arroz e escória de aciária.

## **2.5Caulim e o Metacaulim**

Silva (2001), explica que esta argila é formada principalmente pela caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e possui coloração branca devido ao baixo teor de ferro. O Caulim é um dos materiais mais abundantes da terra, é amplamente utilizado em artigos cerâmicos, indústria de papel, tintas e vernizes, no Brasil está cerca de 28% das reservas mundiais.

Ilic (2010) cita que, quando o caulim passa por um tratamento térmico chamado de calcinação, ele transforma-se em Metacaulim, este processo gera um material com características pozolônicas com reatividade alta. Após o

processo, a água presente na caulinita é retirada ( $\text{AlO}_3 \cdot 2\text{SiO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), logo a estrutura é modificada, gerando uma estrutura de aluminossilicatos amorfa ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) conhecida como metacaulinita. O processo é conhecido como desidroxilação e é apresentado na Equação abaixo.



Lima (2002) cita em seus estudos que, quando o caulim passa pelo processo de calcinação, a sua estrutura é transformada e apresenta-se com uma alta desorganização, o que favorece a sua reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . O processo de calcinação do caulim retira grupos de hidroxila e cria uma estabilidade química devido a mudança do número de coordenação do alumínio, a estrutura do caulim demonstra uma alta desorganização quando calcinada a  $850^\circ\text{C}$ .

## 2.6 Escória de Alto Forno

Alto forno é como se chama a unidade onde o ferro gusa é fabricado segundo Barbosa (2004), que também explica que este é o local onde é feita a redução dos óxidos contidos e a separação das impurezas dos minerais. A fusão ocorrida durante o processo é o responsável por formar a Escória. Essa separação entre escória e ferro gusa é realizada se utilizando das propriedades da EAF, como a insolubilidade e a menor densidade em relação ao gusa, assim, a escória escoia pelos canais até a zona de resfriamento na proporção de 200 a 300 Kg de escória por tonelada de ferro gusa. Logo, a escória é um subproduto da indústria siderúrgica durante a produção do ferro gusa, mas para ser denominada de subproduto necessita apresentar uma função posterior, pois caso contrário, chama-se apenas de resíduo. Os principais constituintes da escória provenientes do minério de ferro são: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ou óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ).

Os estudos de Massucato (2005) mostraram que para a utilização da Escória como subproduto é necessário ter conhecimento da sua composição química e compatibilidade entre as composições e aplicações, além do mais, a

composição das escórias tem variantes que alteram sua composição, tais como estrutura físicas, fundentes, processos de fabricação, método de resfriamento, tipo de minerais utilizados, logo, o papel do engenheiro é crucial tanto no processo quanto na escolha de uma escória para uma determinada aplicação ou estudo.

**Tabela 1-** Composição química média das Escoria De Alto Forno

	Escoria básica	Escoria acida
CaO	40-45	24-39
SiO <sub>2</sub>	30-35	38-55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-18	8-19
MgO	2,5-9	1,5-9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-2	0,4-2,5
FeO	0-2	0,2-1,5
S	0,5-1,5	0,03-0,2
Relação média	1,31	0,68
CaO /SiO <sub>2</sub>		

**Fonte** - Jhon, V.M (2001)

Para Menéndez, *et al* (2003) o mercado onde mais se encontra aplicação da escória de alto forno ainda é o cimentício. No Brasil a sua utilização deu-se a partir de 1952, uma vez que se tem componentes aluminosilicosos e calcíticos na sua composição, algumas classes de cimento tem por obrigação ter na sua mistura uma porcentagem desse resíduo. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece dois tipos de cimentos que utilizam a escória como adição mineral:

a) Cimento Portland Composto (CP II E) – a quantidade de escória varia de 6% a 34% - NBR 11578 (1997).

b) Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) – a quantidade de escória varia de 35% a 70% - NBR 5735 (1991).

O cimento Portland de alto-forno tem em sua composição uma mistura de Clinquer, Portland e escória de alto forno, para sua produção os dois primeiros componentes são misturados, devidamente passados pelo processo de

cominuição e secagem. A EAF é responsável por adicionar a mistura cimentícia algumas propriedades tais como durabilidade, diminuição do calor de hidratação e de permeabilidade, diminuição de retração, aumento da resistência ao ataque por sulfatos e de resistência mecânica em idades mais avançadas. Por outro lado, a reação de hidratação dos cimentos com escória é inicialmente mais lenta do que a do cimento Portland comum (MENÉNDEZ et.al, 2003).

Um outro ponto positivo da utilização da escória alto forno é o aspecto econômico, já que ao substituir calcário por escória se tem uma vantagem na economia de energia devido a produção de clínquer necessitar menos calor e diminuição de gases como o dióxido de carbono (MASSUCATO, 2005).

## **2.7 Reatividade das matérias primas**

Para Hartman (2016), independente desses materiais serem fontes de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , a aplicabilidade do material pode ser influenciada por outras características. Há uma relação direta entre o tamanho das partículas e quantidade de água utilizada na mistura, como exemplo se tem os geopolímeros feitos a partir do Metacaulim, que possuem tamanho de partícula significativamente menor que a do cimento. Contrariamente, partículas maiores são pouco solúveis em meio alcalino, o que diminuirá a produção e cadeias poliméricas. Assim, as fontes de aluminossilicatos tem grande variedade quanto a granulometria e quantidade dos dois principais componentes.

Para Davidovits (2013) e Cataldelli (2013), a razão estequiométrica entre Sílica e Alumina deve ser de ( $SiO_2/Al_2O_3=3,0$ ). A quantidade de partículas reativas não tem um valor fixo, por isso as razões sempre necessitam de adaptações. O excesso de carbono pode promover a absorção de água, e posteriormente aumento da porosidade.

## **2.8 Ativação alcalina da mistura Geopolimérica**

Para a Abiclor (2014) o hidróxido de potássio ou potassa cáustica (KOH) é um subproduto, obtido através da passagem de uma corrente elétrica de alta

intensidade, também denominada eletrólise, através da solução da salmoura de cloreto de potássio.

Ifa (2010) cita que, na forma mais comum, o KOH é uma substância sólida, de cor branca, higroscópica, não combustível, muito solúvel em água, com massa molar de 56,11 g/mol e ponto de ebulição de 1320°C. À temperatura de 20°C, apresenta massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> e coeficiente de solubilidade igual a 1.130 g/L. O pH é igual a 14 quando em concentração de 56 g/L.

Na literatura, alguns estudos que utilizam o hidróxido de potássio como solução ativadora, retratam determinados parâmetros, conforme a Tabela 2, na qual se especifica a taxa de resistência à compressão obtida, de acordo com a divulgação do autor, bem como o uso ou não de silicato, a temperatura de cura e a idade dos corpos de prova

**Tabela 2 – Relações de Matérias primas em vários estudos**

AUTOR	MHP	SC	T°	TC	RM
PALOMO, GRUTZECK E BLANCO (1999) ESTUDO PASTA	18	-	65 85	24 horas	3,9 e 8,7 para 65°C 23,3 e 27,3 para 850°C
HARDJITO TSEN (2008) ESTUDO ARGAMASSA	6, 8, 10, 12 e 14	SP	60	1 dia 7 dias 28 dias	18-66 29-71 31-71
MADEJSKA AL. (2011) ESTUDO PASTA	10 e 16	-	60	8 dias	2,46
KOMLJENOVIC, BAŠČAREVIĆ E BRADIĆ (2010) ESTUDO ARGAMASSA	-	-	55	7 dias	2,46

**Fonte** - Adaptado de Gonçalves (2015)

**Legenda** - MHP – Molaridade Do Hidroxido De Potassio; S -Silicato; T - Temperatura; Tc - Tempo De Cura; Rm - Razão De Molaridade

Silva (2006) cita resumidamente um mecanismo tipo sol-gel a partir da união de uma parte líquida (com uma grande concentração alcalina) e uma parte sólida (fonte de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>) é o que gera o Geopolimero. Para que a

reação ocorra de forma eficiente, vários fatores devem ser considerados no balanço estequiométrico da solução. O KOH tem a função de promover a ativação alcalina na reação, e o silicato é a fonte suplementar de silício.

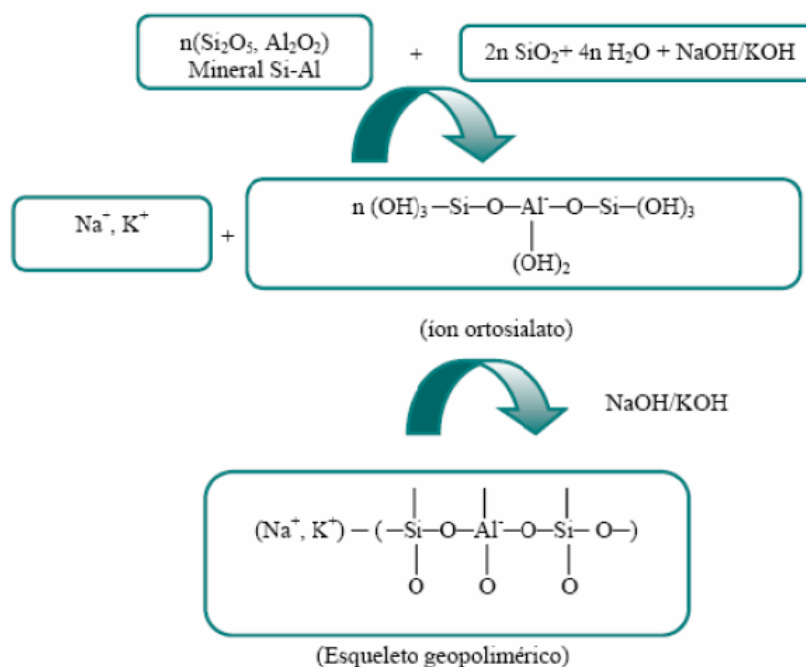
Para Glukhovsky (1967) o processo de ativação alcalina em geopolímeros ocorre em três estágios, diferentemente do processo de hidratação do cimento Portland, que tem como resultado C-S-H- gel ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ).

Os estágios são os seguintes:

- Primeiro estágio: *destruição-coagulação*;
- Segundo estágio: *coagulação-condensação*;
- Terceiro estágio: *condensação-cristalização*.

Ao fim do terceiro estágio, nota-se a forma cristalina, um aluminossilicato alcalino hidratado  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  tipo gel [N-A-S- |H gel]. A Figura 2 apresenta o esquema de ativação alcalina.

**Figura 2** – Esquema de ativação Alcalina



**Fonte** - Davidovits (2013)

## 2.9 Aplicação dos Geopolímeros

Pinto (2006) explica que atualmente, existem nove diferentes classes de geopolímeros, mas é na construção civil que estes polímeros inorgânicos despertam mais interesse, as áreas de aplicações para esses materiais são muito grandes e variáveis. Deve-se dar ênfase as propriedades principais, tal como resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e o excelente comportamento diante alta temperaturas.

Nos últimos anos tem se proposto variados campos de aplicação, tal como aplicação em concretos de elevado desempenho, materiais compósitos anti-fogo, restauração de pedras em monumentos tombados, tecnologia de solos, balística, moldes e etc. (PINTO, 2006).

Para Davidovits (2014) as matérias de origem geopolimérica são materiais do futuro, tendo como projeção as indústrias automobilísticas, aeroespaciais, metalurgia, poliméricas e outras, a aplicação de um material geopolimérico se dá pela estrutura química em termos de proporção atômica de Si/Al no polissialato  $x$ . Uma baixa relação de Si/Al igual a 1, 2 ou 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. Para muitas aplicações no campo de engenharia civil, uma baixa razão Si/Al é apropriada. Na Figura 3 é apresentado um quadro geral de aplicações, assim como na Tabela 3.

Figura 3 - Quadro Geral das Aplicações

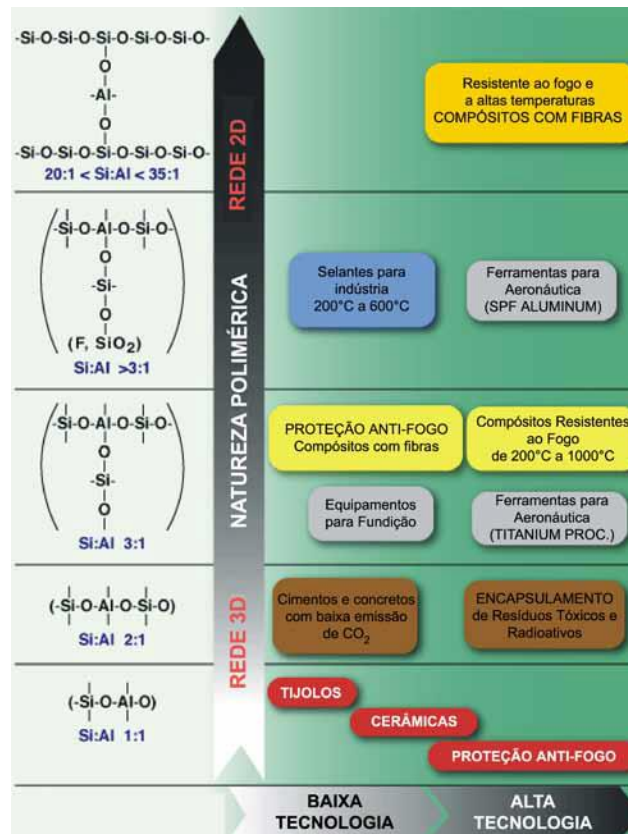


Tabela 3 - Aplicações

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 incêndios; - 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 – Adaptado de J. Davidovits (2013)

## 2.10 Desempenho dos geopolímeros em altas temperaturas

Novais (2016) cita que Refratários de origem geopoliméricas possuem diversas utilizações, em construção civil, ou em indústrias no geral. Leveza e resistência ao fogo são os grandes pontos fortes destes materiais.

Santos (1991) explica que, para se confinar as altas temperaturas dentro dos fornos, reatores e inúmeros outros equipamentos é necessário revesti-los com materiais que, além de apresentarem estabilidade, tanto física quanto química às temperaturas, devem possuir ainda outras propriedades. Assim, muitas vezes, têm que ter resistência a quente, a abrasão, a erosão, ao ataque químico por sólidos, líquidos ou gases e às variações bruscas de temperatura. Seu emprego se faz necessário em temperaturas acima de 500 °C. Conhecidos sob a designação de Refratários.

Na condição de refratário, os materiais devem possuir:

- Alta refratariedade,
- Capacidade de suportar altas temperaturas sem deformar (acima de 1100°C)
- Estabilidade mecânica
- Estabilidade química
- Estabilidade dimensional;
- Estabilidade ao choque térmico;
- Baixa condutividade térmica;
- Baixa permeabilidade

Bittencourt E Pandolfelli (2013) citam que, os cimentos ou 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.

Para Silva (2017), os geopolímeros apresentam ótimas propriedades térmicas, o que certamente abre uma diretriz para a aplicação em refratários, os geopolímeros se apresentam em estudos comparativos as argamassas

refratárias já existentes com qualidade igual ou superior, um fato que instiga uma projeção de estudos e desenvolvimento, uma vez que este é um material como já citado acima, com diversas propriedades que lhe colocam como grande alternativa ao Portland tradicional, como por exemplo o fato de ter sua resistência elevada e processo de cura acelerado, o que diminui um possível tempo de manutenção, levando em consideração sua aplicação em revestimentos industriais.

Norton (1968) e Raad (2008) comentam que nem todos elementos podem ser utilizados para fabricar-se refratários, apenas alguns, onde os principais são: silício (Si), alumínio (Al), magnésio (Mg), cálcio (Ca), cromo (Cr), zircônio (Zr), e Carbono (C). As propriedades refratárias e bom desempenho são formadas a partir de óxidos, como por exemplo como o  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{ZrO}_2$ .

Os tijolos refratários ácidos são formados em sua maior parte por sílica e isso os torna resistentes a temperaturas próximas a  $1700^\circ\text{C}$ , além de serem resistentes a escórias ricas em sílica, em contrapartida, tem resistência baixa a escórias de teor alcalino, tem bastante aplicação em tetos de fornos para a fabricação de vidros. Nos tijolos refratários alcalinos a sílica presente não tem capacidade de suportar altas temperaturas, o que a torna prejudicial. Para essa classe de tijolos, é mais comumente utilizado os tijolos de magnésia e suportam temperaturas próximas  $1535^\circ\text{C}$  e  $1845^\circ\text{C}$ . Por fim, presente no grupo dos tijolos especiais estão a magnetita, alumina, e zircônia entre outros. Para os materiais refratários é de extrema necessidade um cuidado especial quanto a porosidade, pois outras propriedades tais como: resistência a compressão, resistência a abrasão, e entre outras, são afetadas por ela (RAAD, 2005).

Pascoal e Pandolfelli (2000) cita a diminuição a resistência mecânica e refratariedade o material com o aumento da porosidade, uma vez que isso traz consigo pontos de concentração de tensão no material.

Innocentini e Pandolfelli (1999) também comentam que a porosidade do material está ligada a durabilidade de um material, uma vez que isso é relacionado a capacidade do material em não reagir com fluidos que possam desgastar o material. Isso explica a importância da porosidade do material, que

quanto maior, mais fácil a penetração de líquidos e gases, o que também trará dano ao material.

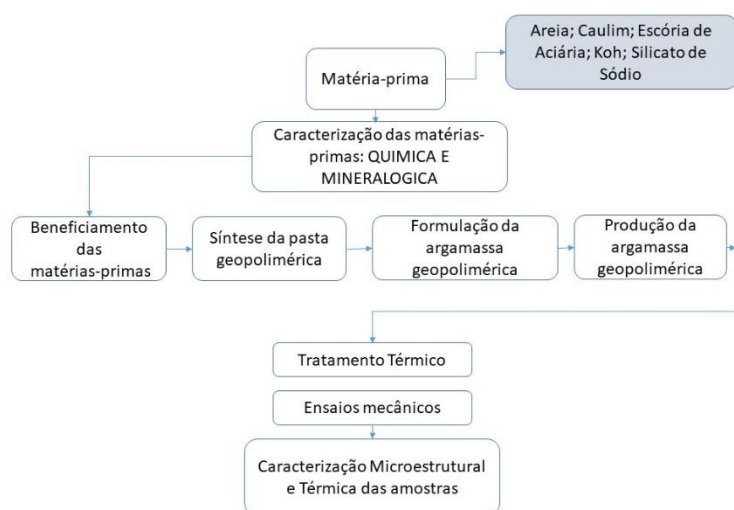
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento de argamassas geopoliméricas refratárias. O processo de obtenção da Argamassa Geopolimérica (AGP) será desenvolvido com base em informações descritas em patentes de Silva (2011).

Para a produção deste material, as formulações estudadas contêm como principal matéria prima o Metacaulim, silicatos alcalinos solúveis, Escória de Alto Forno (EAF) e areia. O estudo foi realizado através da variação molar entre os constituintes argilominerais usados como matérias primas e a solução alcalina de ativação. O ativador alcalino foi obtido pela combinação do silicato de sódio alcalino, água e KOH.

Como fonte de alumínio e silício foi utilizado o Metacaulim e como fonte principal de cálcio a EAF, a Figura (4) mostra o fluxograma de metodologia para este estudo. Foram analisadas a microestrutura e as propriedades mecânicas da argamassa geopolimérica. As propriedades descritas da AGP foram comparadas com as da Argamassa Refratária Comum (ARC).

Para desenvolver o estudo proposto, foram adotados os procedimentos recomendados pela ABNT e patentes de Silva (2011), baseados na experiência do grupo de pesquisa Materiais Compósitos do Campus Ananindeua da UFPa, para a moldagem, análises e ensaios dos cimentos.

**Figura 4 - Materiais que compõem a Argamassa**

**Fonte** – Autor (2018)

Por fim, os corpos de prova cilíndricos foram produzidos, seguindo a norma ABNT 7215, nas dimensões de 5 x10 cm, onde foram produzidas 5 réplicas de cada formulação, para 14 dias de cura.

### 3.3 Materiais

### 3.4 Matérias-Primas

#### 3.4.1 Metacaulim

O caulim é a fonte de Alumínio e Silício no estudo, como matéria prima foi utilizado o caulim comercial, o Metacaulim é resultante da calcinação do Caulim. O procedimento de calcinação é realizado como o objetivo de retirar umidade do material segundo Santos (1992), removendo os grupos de hidroxila do material e criando uma instabilidade, essa instabilidade química que favorece a reação do Metacaulim com  $\text{Ca(OH)}_2$ . O procedimento de calcinação foi realizado no Laboratório de práticas tecnológicas da FEMatT/UFGA (LAPIT/FeMat-UFGA) em Forno mufla durante um tempo de 2 HORAS a  $850^\circ\text{C}$ , utilizando cadinhos de grafite para comportarem o Caulim durante o processo. A figura 5 apresenta uma amostra de Metacaulim.

**Figura 5 – Metacaulim**

**Fonte - Autor (2019)**

### 3.4.2 Escória de Alto Forno

Como fonte principal de CaO foi utilizada a Escória de Alto Forno (EAF), sua escolha deve-se a sua constituição química ter correspondido a uma mistura de óxidos, silicatos metálicos, metais nas suas formas elementares, tendo como componentes básicos os óxidos de Ca, Fe, Mg e Al. A EAF foi fornecida pela empresa Cimento Verde do Brasil, sediada na cidade de Ananindeua-Pa.

A EAF passou por um processo de secagem a 100°C durante duas horas em estufa, o objetivo foi retirar umidade do material, logo em seguida foi realizado um procedimento de moagem em moinho de bolas de aço por um período de três horas em um período de duas semanas, tendo um aproveitamento de 90 % em forma de passante no processo de peneiramento na malha de 200#. A moagem e peneiramento da EAF foi realizada com o objetivo de alcançar a uniformização na granulometria das matérias primas, o Laboratório utilizado foi o Laboratório de Tratamento de Materiais do IFPA (LTM – IFPa). A figura 6 apresenta a EAF.

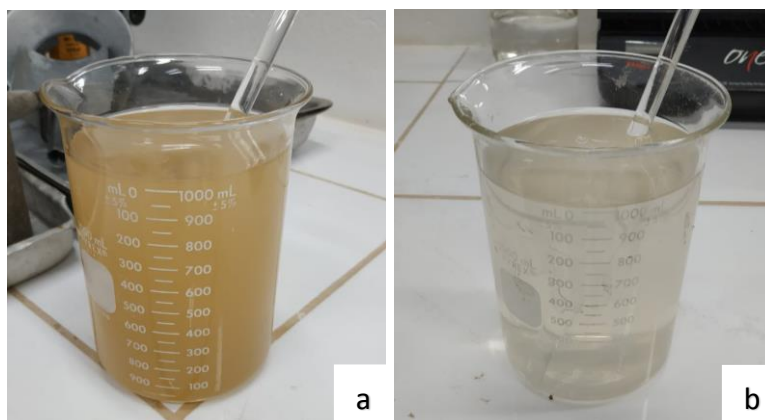
**Figura 6** – Amostra de Escória de Alto Forno

Fonte – Autor (2019)

### 3.4.3 Ativador Alcalino (Hidróxido de Potássio e Silicato de Sódio)

Com o objetivo de gerar um ativador alcalino foi utilizado o hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). O desenvolvimento baseou-se em informações descritas nos estudos de Silva (2011), através da variação molar dos álcalis presentes na solução ativadora que envolve a água, silicatos e hidróxido de potássio.

Para a produção foi utilizado KOH em escamas na proporção de 1:05, e o silicato de sódio alcalino da Parquímica Ind. LTDA, O procedimento foi realizado no LAPIT/FeMat-UFPa. As Figuras 7a e 7b mostram as soluções.

**Figura 7-** A) Hidróxido de potássio b) Silicato de sódio

Fonte – Autor (2019)

#### 3.4.4 Areia

Como agregado miúdo foi utilizada areia comercial, quartzosa, passante na peneira de 4,8 mm, cedida pela empresa POLIMIX S.A, localizada na cidade de Marituba - Pa. A areia foi secada em estufa durante duas horas a 100° C para a retirada da umidade, em seguida a mesma passou por série de peneira, passando na malha de 4,8 mm como requerido pela ABNT 7211-2005. O peneiramento e secagem foi realizado no LAPIT/FEMat-UFPa. A Figura 8 apresenta a areia peneirada.

**Figura 8** - Areia Peneirada



**Fonte** - Autor (2019)

### 3.5 Equipamentos

#### 3.5.1 Estufa

A estufa utilizada foi da Marca QUIMIS<sup>®</sup> do LAPIT/FEMat-UFPa, esse equipamento foi utilizado para realizar a secagem das matérias primas em temperatura de 100°C. A figura 9 apresenta a estufa.

**Figura 9 – Estufa**

**Fonte - Autor (2019)**

### 3.5.2 Forno mufla

O Forno Mufla utilizado para a calcinação do Caulim e estudo de exposição térmica foi da marca ZEZIMARQ® e pertence ao LAPIT/FEMat-UFPa, a sua capacidade de aquecimento é de até 1200°C. Na Figura 10 é mostrado o forno mufla.

**Figura 10 – Forno mufla**

**Fonte – Autor (2019)**

### 3.5.3 Moinho de bolas

O moinho de bolas foi utilizado com o objetivo de realizar a cominuição da EAF, o equipamento foi da marca MATOLI®, e este equipamento pertence ao LTM-IFPA. A Figura 11 apresenta o equipamento.

**Figura 11**– Moinho de Bolas



**Fonte** – Autor (2019)

### 3.5.4 Agitador mecânico e Série de Peneiras

O agitador mecânico foi utilizado em associação com as peneiras para a realização da separação granulométrica das matérias primas (EAF, Metacaulim e Areia) afim de alcançar as granulometrias adequadas para o estudo, o equipamento utilizado foi da marca RETSCH® e as peneiras das marcas MRK®, GRANUTEST® e BERTEL®, ambos equipamentos pertencentes ao LAPIT/FEMat-UFPa. A figura 12 apresenta o agitador equipado com a série de peneiras.

**Figura 12**– Agitador mecânico e Série de peneiras



**Fonte** – Autor (2019)

### 3.5.5 Argamassadeira

Com o objetivo de realizar a mistura das matérias primas para confecção dos corpos de prova de pasta e argamassa foi utilizado uma argamassadeira da marca G.PANIZ, pertencente ao LAPIT/FEMat-UFGA. A Figura 13 mostra o equipamento.

Figura 13 - Argamassadeira



**Fonte** - Autor, 2019)

### 3.5.6 Moldes Cilíndricos

Os moldes cilíndricos foram utilizados com o objetivo de realizar a confecção dos corpos de prova de pasta e argamassa, seguindo a Norma ABNT 7215- 96. Esses acessórios são pertencentes ao LAPIT/FEMat-UFPa e possuem a medida de 2,5 x 5 cm para pasta e 5 x 10 cm para Argamassa. A Figura 14 apresenta os acessórios.

**Figura 14**– a) Moldes para Pasta b) Moldes para Argamassa

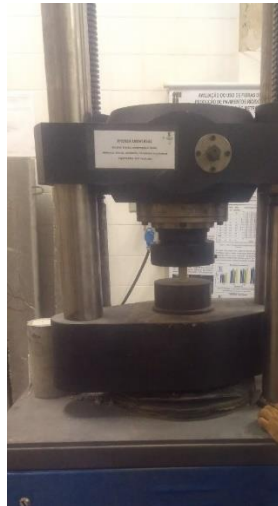


Fonte - Autor, (2019)

### 3.5.7 Máquina de Ensaio Universal

Com o objetivo de realizar o ensaio de Compressão nos corpos de prova, seguindo a norma ABNT 7215 – 96, foi utilizado uma máquina de ensaio universal da marca EMIC, do laboratório de solos do IFPA (LSOL-IFPA). O equipamento é apresentado na figura 15.

**Figura 15** - Máquina de Ensaio Universal



**Fonte** - Autor, (2019)

### 3.5.8 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Com o objetivo de realizar a caracterização das amostras das matérias primas e dos corpos de prova rompidos após o processo de ensaio mecânico, foi utilizado o MEV da marca TESCAN equipado com EDS da marca OXFORD, ambos pertencentes ao laboratório de caracterização do IFPA (LC-IFPA).

**Figura 16** - Mev-EDS



**Fonte** - Autor, (2019)

## 3.6 METODOLOGIA

### 3.6.1 Produção da Pasta Geopolimérica

Com o objetivo de desenvolver as formulações que pudessem alcançar o melhor resultado de ensaio mecânico nas argamassas, foi feito um estudo preliminar na pasta geopolimérica para avaliar o melhor resultado e partir dele desenvolver a argamassa. Dessa forma foi realizado um estudo em pastas de cimento geopolimérico, baseado nos estudos de Silva (2011).

Para a produção da pasta foram utilizados Metacaulim, EAF e como ativador alcalino uma solução de KOH e silicato de sódio. As proporções da pasta se baseiam no estudo de Silva (2017) que possui no seu trabalho o melhor valor de resistência na proporção de 44% de escória, sendo assim foi feita uma variação em valores de proporções que estivessem próximo a 44%, neste estudo as proporções utilizadas foram de 35%;45%;55% ;60% e 65%, sendo a proporção de 45% de EAF escolhida, pois apresentou o melhor desempenho mecânico, com um valor aproximado ao encontrado no estudo de Silva (2017), as variações foram motivadas por se tratarem de matérias primas de origem diferente das descritas por Silva (2017).

As conformações dos corpos de prova cilíndricos foram feitas em moldes cilíndricos de 2,5 cm x 5 cm. A figura 17 apresenta os corpos de prova de pasta.

**Figura 17** - Corpos de Prova da Pasta de Cimento Geopolimérico



**Fonte** - Autor, (2019)

### 3.6.1 Produção da Argamassa Geopolimérica (AGP)

De acordo com o melhor resultado encontrado no estudo de Pastas Geopoliméricas, foram produzidos corpos de prova de AGP para o estudo de

resistência compressiva com diferentes percentuais de adição de Areia. Seguiu-se os estudos de SILVA (2011), onde o material foi separado, e posteriormente seguindo um padrão de homogeneização, onde primeiro mistura-se e as Mp's secas em suas proporções, e posteriormente adiciona-se aos poucos a solução alcalina até todos estarem em uma mistura homogênea.

A conformação dos corpos de prova foi feita em moldes cilíndricos de 5 x 10 cm, com auxílio de bastão quando necessário, utilizando 12 batidas para cada uma das 3 camadas colocada nos moldes para o adensamento da AGP. Após conformados, os corpos de provas passaram pela mesa vibratória por um tempo de 30 segundos, em seguida os cp's conformados foram deixados para cura durante um dia para depois serem retirados dos moldes. A figura 18 apresenta os corpos de prova conformados.

**Figura 18**– Corpos de prova conformados



**Fonte** - Autor, (2019)

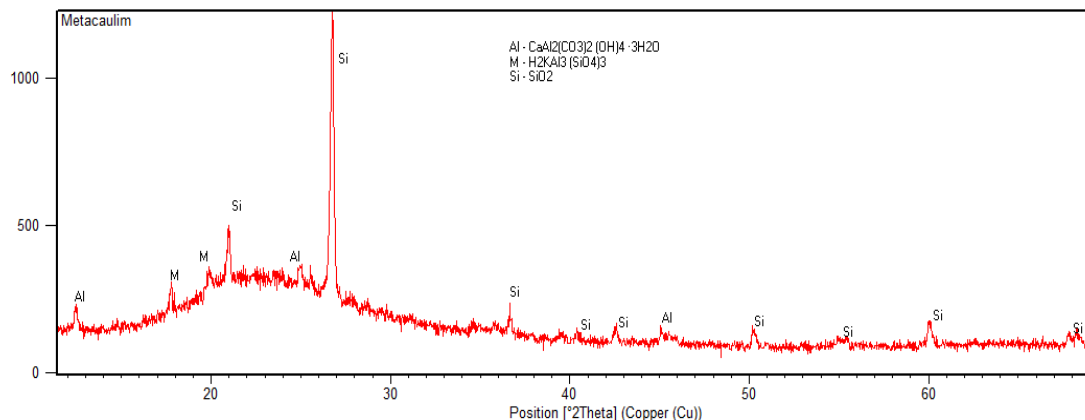
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.3 Caracterização das Matérias Primas

#### 4.3.1 Metacaulim

O Metacaulim como a principal fonte de aluminossilicatos nesse estudo apresentou uma composição assim como relatada por Porto (2018), com os picos de alumínio e silício aparecendo de forma significativa no DRX, estes elementos químicos são apresentados na forma de óxidos e identificados na Figura 19 como Alumohidrocalcita, quartzo e muscovita. Melo (2011) em seus estudos cita que altas temperatura não alteram a composição dos óxidos presentes no metacaulim, e sim geram uma desorganização da estrutura, esta estrutura que se apresenta de forma amorfa a partir das fases cristalinas dos aluminossilicatos. A Figura 19 apresenta a análise por difratograma do Metacaulim.

**Figura 19** – Análise mineralógica do Metacaulim



Fonte - Autor, (2019)

A análise do Metacaulim para a determinação das suas composições foi feita por análise de Espectroscopia Por Dispersão de Energia – EDS (ENERGY DISPERSIVE SPECTROSCOPY). A Tabela 4 apresenta os valores encontrados via EDS.

**Tabela 4** - EDS do Mecaullim

OXIDOS	PERCENTUAL (%)
SiO <sub>2</sub>	54,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,04
CaO + MgO	0,59
K <sub>2</sub> O	2,12
DENSIDADE (G/CM3)	2,56

Fonte - Autor (2019)

A Tabela 4 mostra a composição do Metacaulim com uma presença de 54,87% de SiO<sub>2</sub> e de 39,38% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o que demonstra um comportamento esperado das quantidades de óxidos, assim também foi encontrado por Santa (2012), que em seu estudo também obteve em sua caracterização valores análogos.

#### 4.3.2 Escória de alto forno

Com o objetivo de avaliar a melhor relação de moagem e quantidade passante no peneiramento, foi realizado um estudo preliminar correlacionando o tempo de moagem da EAF com a quantidade passante na malha #200. A moagem realizada com o tempo de três horas se mostrou mais. A tabela 5 ilustra o estudo e os resultados obtidos

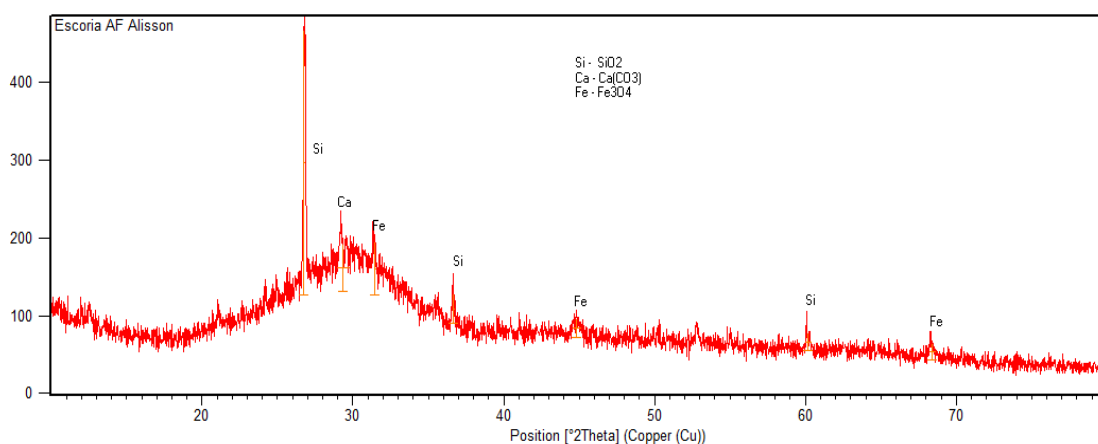
**Tabela 5** – Relação entre moagem e passante

Tempo de moagem (horas)	Passante #200 (%)
1 HORA	60%
2 HORAS	70%
3 HORAS	85%
4 HORAS	90%

Fonte - Autor, (2019)

Com o objetivo de realizar a caracterização química da EAF, foi desenvolvida a análise por raio-x no material. Nota-se na Figura 20 um comportamento esperado para a EAF, com picos de Si e Ca, o que condiz com os estudos de Porto (2018), que cita maior presença de tais elementos químicos, que na figura 20 estão em forma de quartzo e calcita, e também pode-se notar um pico menor a presença de Magnetita. A Figura 20 traz a análise mineralógica da EAF.

**Figura 20** – Análise mineralógica da EAF



Fonte - Autor, (2019)

Massucato (2005) cita em seu estudo que EAF é majoritariamente amorfa devido a proveniência do material, no caso de indústria siderúrgicas, e como o seu resfriamento é rápido, não há tempo para formação de cristais, isto pode ser observado no difratograma da Figura 20 com a predominância amorfa no material. Uma análise da composição química da EAF foi feita utilizando o EDS, A Tabela 6 mostra os resultados obtidos.

**Tabela 6** - Composição química da EAF

OXIDOS	PERCENTUAL (%)
SiO <sub>2</sub>	44,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,99
CaO	29,24
MgO	2,9
DENSIDADE (G/CM3)	3,05

Fonte - Autor, (2019)

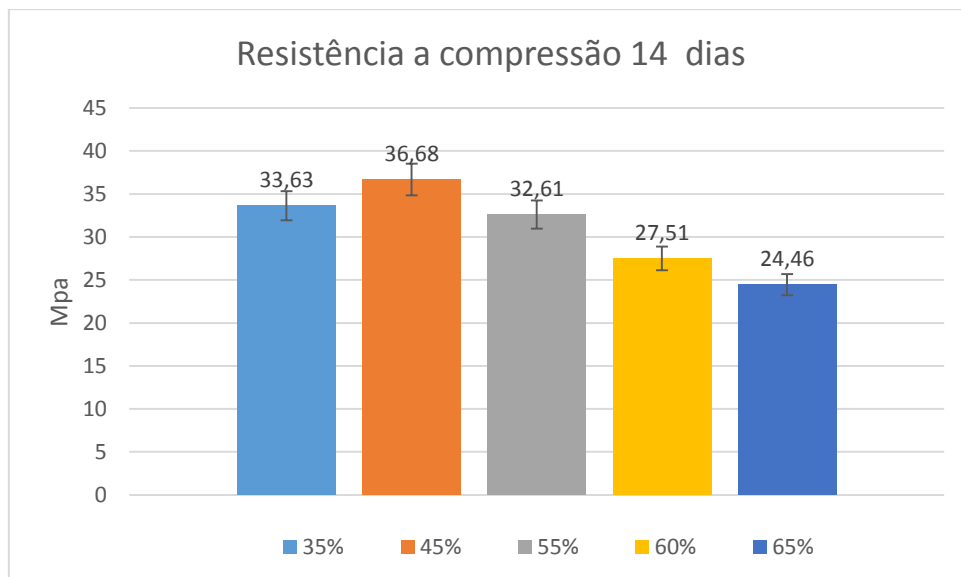
Analisando a tabela podemos observar a maior presença de  $\text{SiO}_2$  com 44,86% e o  $\text{CaO}$  com 29,24% de massa no material, isso segundo os estudos de Jhon (2001) torna a EAF deste estudo denominada como Escória de Teor Alcalino ou Básico, como a Tabela 1 demonstra. Além disso a tabela 6 demonstra que o  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  representam mais de 85% da quantidade total da EAF, estando de acordo com as análises de Pinto (2006) em seu estudo de argamassas utilizando EAF.

#### 4.4 Resistência mecânica

##### 4.4.1 Pasta Geopolimérica

Com o objetivo de analisar o comportamento mecânico da Pasta geopolimérica, foi feito o ensaio de compressão dos Corpos de Prova (CP's) como forma de pré-requisito para encontrar a melhor formulação para ser utilizado posteriormente na argamassa. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos.

**Figura 21** - Resistencia a compressão da Pasta



Fonte - Autor, 2019)

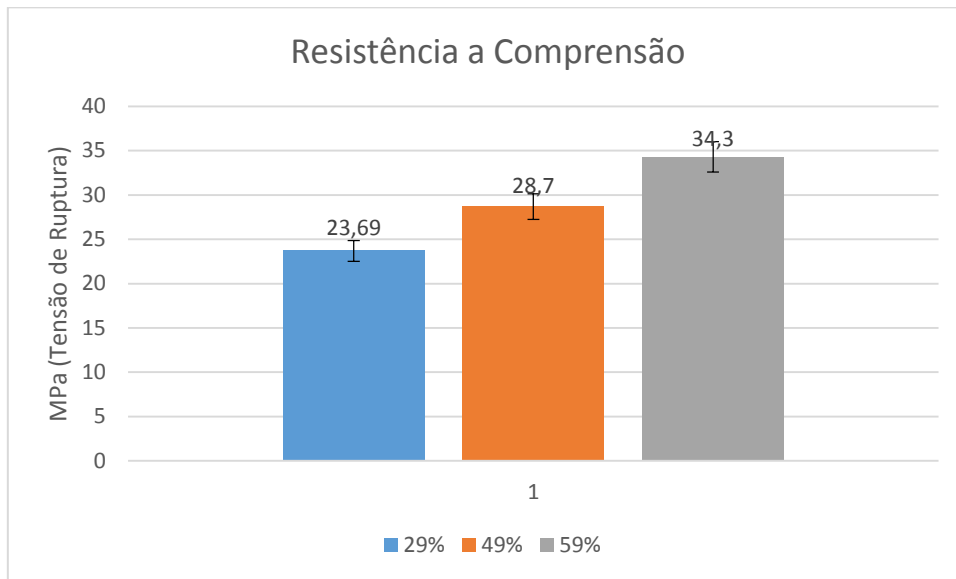
A partir desse estudo foi definido a melhor relação de pasta geopolimérica no percentual de 45%, na Figura 21 podemos notar que percentuais maiores

que 45% apresentam uma queda na resistência mecânica. Madejska (2011) cita em seu estudo de pastas que a presença de impurezas na EAF, como Óxidos de Ferro podem interferir na resistência mecânica do material como elementos formadores de poros, a partir de 55% de Massa, a EAF leva para a pasta um aumento na quantidade de Oxido de Ferro, ainda que em pouca quantidade, o que pode explicar o decréscimo da resistência dos CP's com mais de 45% de EAF em sua composição.

Também podemos notar que com um percentual menor que 45% de EAF a resistência mecânica da pasta teve uma queda, que pode ser explicado, segundo os estudos de Davidovits (2013) com a quantidade menor de CaO, que no estudo é proveniente da EAF. O CaO na reação geopolimérica tem como função tornar o processo de pega no Cimento Geopolimerico mais rápida, com a sua entrada nos interstícios da estrutura.

#### 4.4.2 Argamassa geopolimérica

Com o objetivo de encontrar a maior resistência mecânica com percentuais diferentes de areia em relação a melhor proporção encontrada na pasta, foi feito a análise por ensaio de compreensão na AGP. Os procedimentos utilizados para o ensaio mecânico seguem a norma ASTM C198 - 09 e o estudo de SILVA (2011). Neste teste são utilizados uma máquina de ensaio universal em modo de compressão uniaxial. A análise aplicada serviu para se observar o comportamento da AGP diante o esforço citado, no qual simula o trabalho do material. Na Figura 22 são demonstrados os percentuais utilizados na AGP e seu desempenho mecânico.

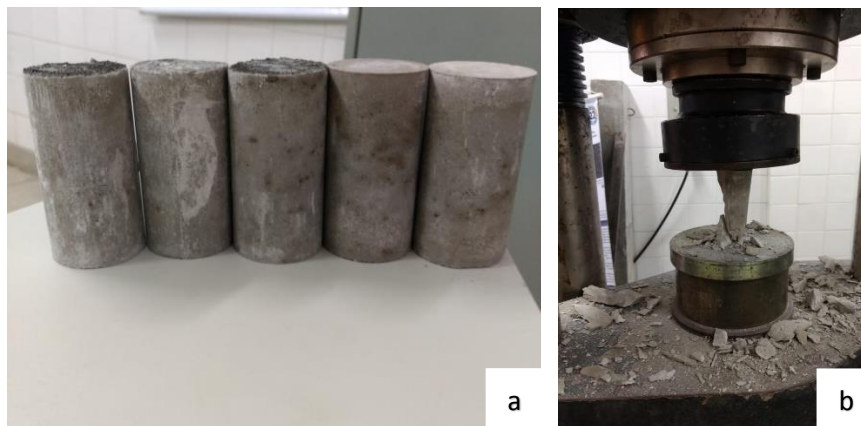
**Figura 22** - Resistência a compressão dos corpos de prova de Argamassa Geopolimérica

Fonte - Autor, (2019)

Segundo a figura 22, a melhor relação encontrada foi de 59% de areia em relação ao total da Massa seca. A argamassa apresentou uma consistência satisfatória, o que demonstra uma boa relação de massa seca/solução devido a granulometria das matérias primas e uma boa relação de ativador alcalino, como relatado nos estudos de Silva (2011)

Uma observação a ser feita é o aspecto da região externa no corpo de prova da argamassa geopolimérica, que mostra uma boa relação entre as MP'S, além de uma boa reatividade entre elas, quanto menor a quantidade de irregularidades, também se diminui a quantidade de pontos de concentração de tensão no material (HARTMANN 2016). A Figura 23 apresenta os corpos de prova de AGP.

**Figura 23**– a) corpos de prova de 59% b) CP rompido

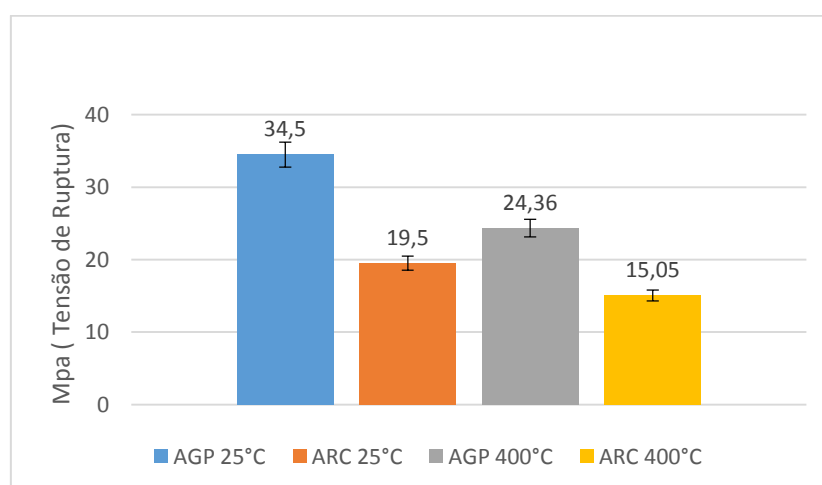


Fonte - Autor, (2019)

#### 4.4.3 Argamassa Geopolimérica após exposição térmica

Após os estudos de argamassas em temperatura ambiente, foi feito um estudo após a exposição térmica de 400°C dos CP's de AGP com o objetivo de analisar mecanicamente o comportamento da AGP após passar pela temperatura referida acima, foi feita a comparação com ARC. A Figura 24 traz uma comparação entre a AGP e a ARC com a idade de 14 dias.

**Figura 24** - Resistência mecânica a compressão após tratamento térmico e em temperatura ambiente



Fonte - Autor, (2019)

A ARC utilizada em comparação neste estudo foi da marca Weber – quartzolit, onde sua especificação indica que sua máxima operação em trabalho deve ser em 400° C, logo, as duas argamassas (AGP e ARC) foram submetidas a uma exposição térmica sob mesmas condições. A AGP apresentou resultados satisfatórios quando submetida a temperatura limite da ARC, que é de 400°C, com uma diferença de resistência mecânica de aproximadamente 10 MPa, uma comparação também foi realizada correlacionando a resistência mecânica da AGP e da ARC em temperatura ambiente (25°C).

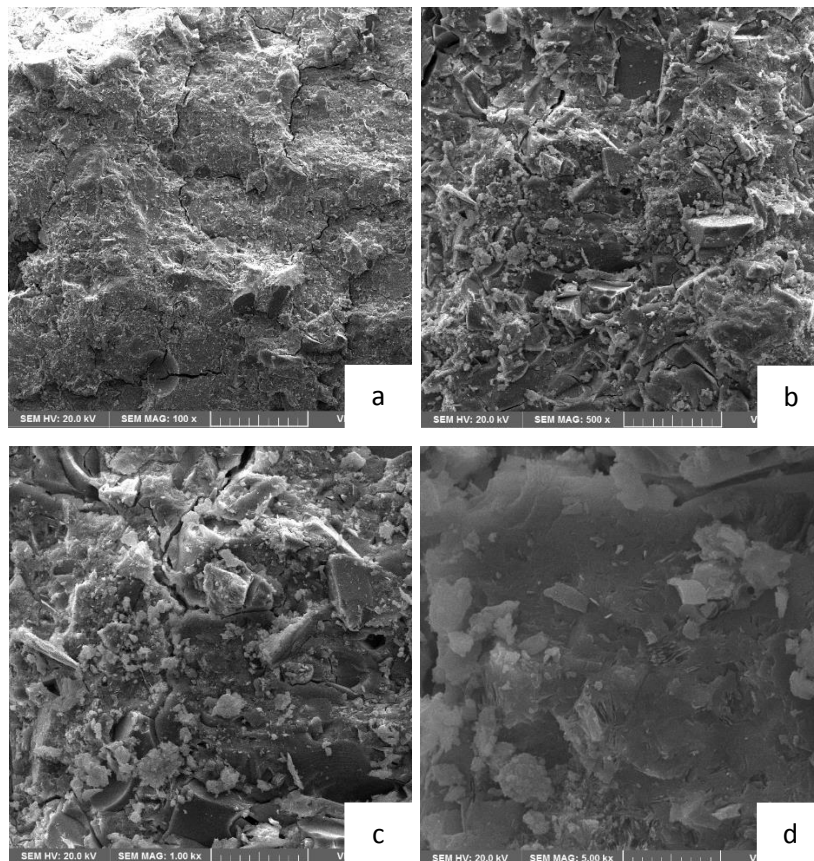
Na Figura 24 podemos observar que em ambas situações a AGP apresentou melhor resistência mecânica, porém também foi notado que em relação a ARC, a AGP apresentou uma queda significativa de resistência em comparação diferença de temperatura dos ensaios (25°C e 400°C). Melo (2011) cita que impurezas provenientes de ferro e carbono podem influenciar na resistência do material, causando poros, estima-se que com o aumento da temperatura esses elementos tenham influenciado na queda de resistência em relação a temperatura ambiente, uma alternativa a isso pode ser a alteração na dosagem de Metacaulim em relação a escória, ou também buscar uma EAF com teor maior de materiais inorgânicos, preferencialmente com teor ácido, que é a EAF que possui as melhores relações de componentes segundo Massucato (2006).

## **4.5 Análise Microestrutural**

### **4.5.1 Análise da AGP em temperatura ambiente**

Com o objetivo de analisar microestruturalmente os percentuais diferentes das amostras de AGP, foi feita uma análise utilizando o MEV, esta análise nos permite ter uma noção do comportamento da argamassa geopolimérica, como fases presentes, poros, tamanho de grãos, trincas e micro trincas, entre outras características de interesse para o estudo, as análises foram feitas nos corpos de prova em temperatura ambiente. As amostras foram retiradas das regiões de ruptura e externas dos cp's. A Figura 25 apresenta diferentes aumentos da melhor proporção de AGP.

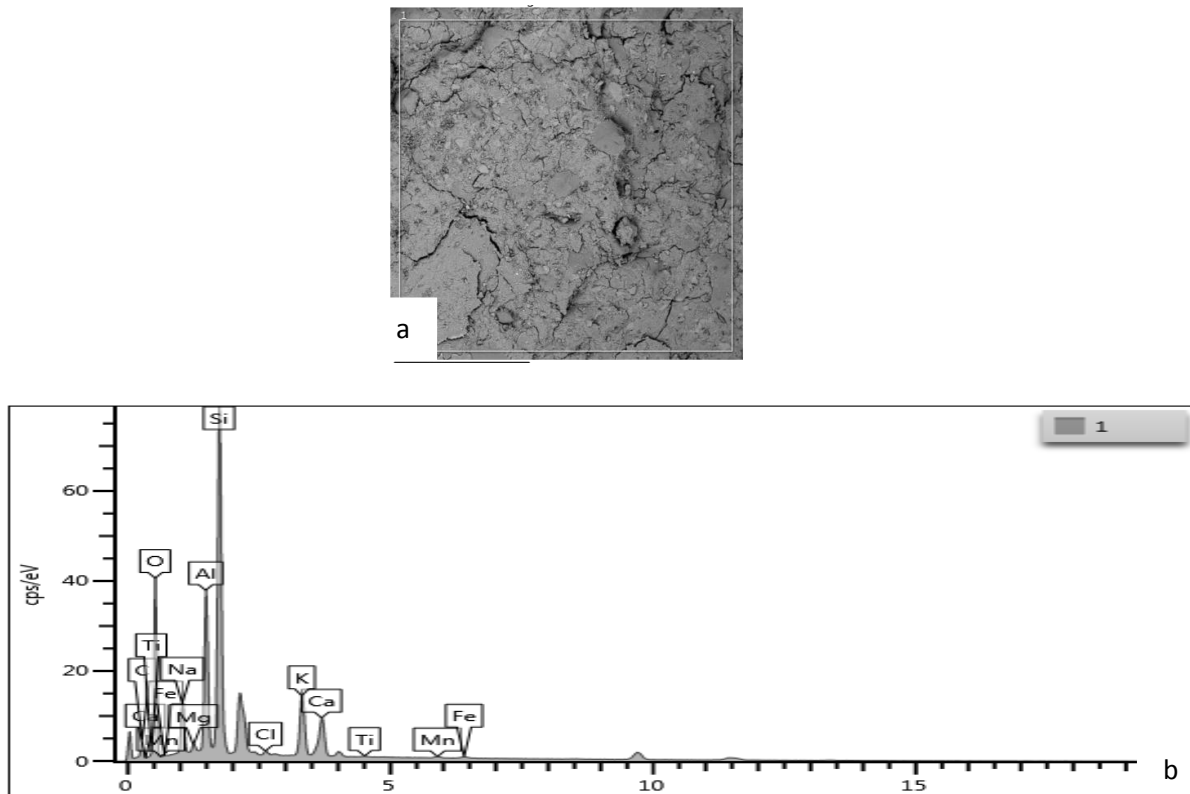
**Figura 25** - MEV da Amostra de 59%; a)100x b)500x c)1000x d)5000x



**Fonte** - Autor, (2019)

Os geopolímeros apresentam uma quantidade menor de poros devido suas partículas encontrarem uma boa solubilidade em meio alcalino, as imagens de MEV nos mostram uma densificação dos poros como pode se observar na Figura 25a, com uma quantidade pequena e não tão marcante de poros, isso pode se dar pela granulometria das matérias primas estarem passantes em #200, o que facilita a interação, além de uma menor quantidade de carbono na Escória, que é um agente formador de poros segundo Hartmann (2016), essas observações podem ser visualizadas também nas figuras 25b e 25c. Nos estudos de Silva (2009) são relatadas as lamelas pertencentes a estrutura da Metacaulinita que pode ser observado na figura 25d, em partículas não reagidas de Metacaulim em meio a matriz, de morfologia não definida A figura 26 traz uma análise por MEV-EDS da região externa da proporção de 59%.

**Figura 26**– a) Região externa da amostra de 59% a 100x b)EDS



Fonte - Autor, (2019)

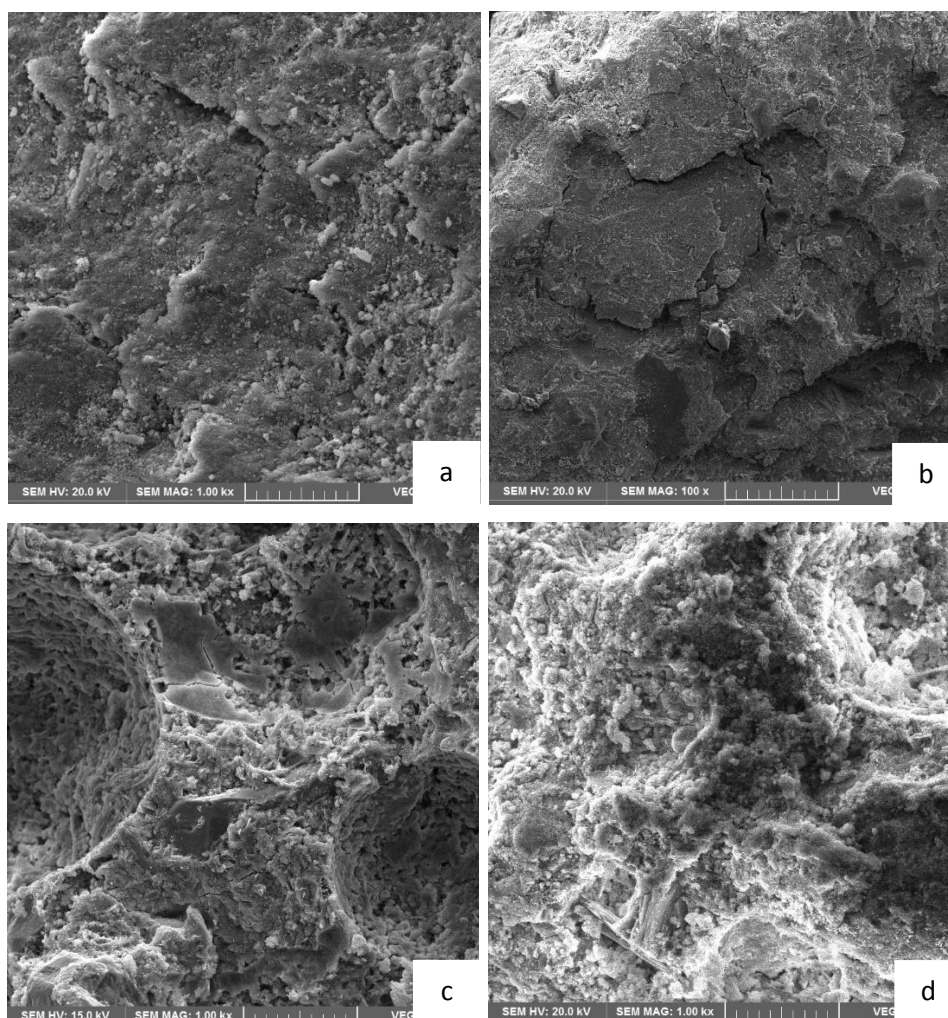
Observa-se uma baixa quantidade de carbono na análise do EDS, o que segundo Castaldelli (2013) é positivo para o Geopolímero, uma vez que taxas altas de carbono no material o faz absorver uma quantidade maior de água, o que conseqüentemente levaria a mais imperfeições, logo assim, este é um ponto positivo para estas amostras, o que se torna interessante, uma vez que na maioria dos estudos o resíduo integrado ao material é o responsável em sua maioria pelas impurezas.

Candido (2018) verificou em seus estudos que, assim como na Figura 26a, as fissuras não se encontram em uniformidade, podendo-se notar uma dispersão na posição das fissuras, o que pode indicar uma boa relação das matérias primas, que em associação com a baixa quantidade de poros traz a constatação de que as fissuras encontraram dificuldade em se propagar, e conseqüentemente buscaram outras regiões do material para continuar, enquanto havia essa busca, as mesmas perdem energia por dissipação.

#### 4.5.2 Análise da AGP e ARC após exposição térmica

A figura 27 apresenta uma análise por MEV em um comparativo entre a AGP de 59% de areia e a ARC nas temperaturas ambiente e de 400°C da região externa das amostras. Os Cp's que foram levados a temperatura de 400°C passaram por uma exposição térmica na temperatura referida em um tempo de 2 horas como desenvolvido nos estudos de Silva (2017), logo em seguida as mesmas resfriaram em temperatura ambiente durante 15-20 minutos e foram levadas para o ensaio mecânico em regime de compressão logo em seguida.

**Figura 27** – a) Região externa da amostra de 59% a 100x b)EDS



Fonte - Autor, (2019)

Na figura 27 tem-se uma análise microestrutural da região externa da AGP de 59% após exposição térmica, sendo colocado em comparação a ARC

diante a mesma temperatura, na ocasião, 400°C e na temperatura ambiente (25°C), a temperatura de 400°C é a recomendada pelo fabricante da ARC como a temperatura limite de trabalho. Primeiramente, pode-se observar uma adesão satisfatória entre matriz e agregado na AGP, com fissuras descontínuas, o que indica que durante a propagação das fissuras as mesmas não tiveram energia suficiente, precisando procurar pontos mais vulneráveis no material para se propagar, como relatado por Silva (2011), não sendo possível distinguir fases na figura também, possuindo uma estrutura predominantemente amorfa, assim como os estudos de Silva (2018) mostraram. A Figura 27 b apresenta uma quantidade menor de fissurações e continuidade nas mesmas, elementos como Carbono e Ferro podem ter influenciado a perda de resistência acentuada de 25°C para 400°C, a alternativa para se obter melhores resultados pode estar na escolha de matérias primas com maior teor dos aluminossilicatos e CaO para dosagem.

As Figuras 27 C e 27 D demonstram as microestruturas da ARC nas temperaturas de 400°C e 25°C respectivamente, em ambas encontramos uma morfologia bem aproximadas, com as fases e quantidades de poros, que pouco se alteraram entre as duas temperaturas, segundo Pandolfelli (2011) as argamassas refratárias na faixa de 500°C apresentam uma composição básica de aluminossilicatos e CaO. O CaO é inserido como o elemento responsável por dar uma pega mais veloz ao material, segundo as micrografias do seu estudo, Freitas (1993) verificou que, assim como nas Figuras C e D, a presença de regiões descontínuas e formação de particulados, o que em materiais refratários de maior resistência térmica não ocorre, devido a maior pureza dos materiais, e a sua aplicação. A Figura 28 apresenta o EDS e Micrografia da região interna da AGP exposta a temperatura de 400°C.

**Figura 28** – a) EDS da região interna da AGP 400° b) MEV Região Interna AGP 400°C 2500X

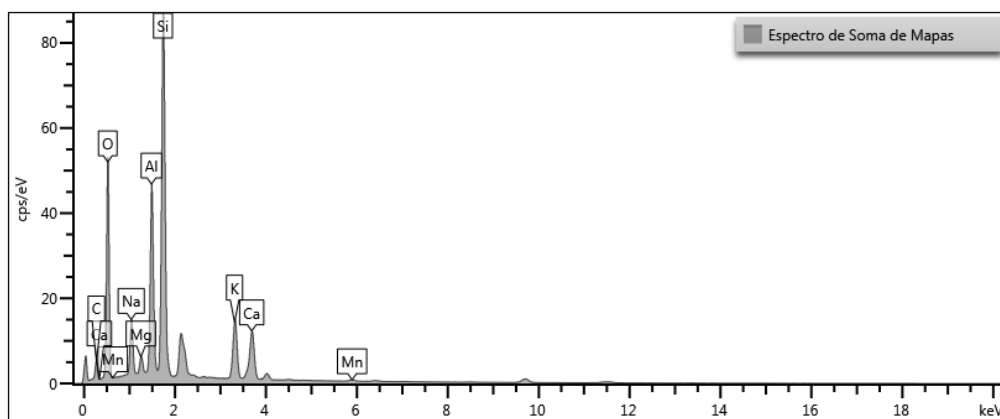
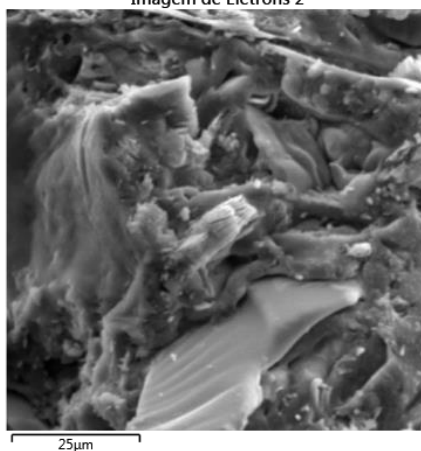


Imagem de Elétrons 2



a

Fonte - Autor, (2019)

Na figura 28 b nota-se novamente e partículas de Metacaulim não reagido, e nelas a presença das lamelas que a compõe.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estes estudos mostram bons resultados da AGP para aplicações em exposições térmicas até 400°C, durante os ensaios notou-se uma superfície densa na AGP, e uma estrutura amorfa. A pouca quantidade de fissurações mostra uma boa relação das matérias primas mesmo sob temperatura de 400°C.

- A Pasta de Cimento Geopolimérico com melhor desempenho diante a resistência mecânica foi a formulação de 45% de EAF, que atingiu uma média de ruptura DE 36,68 MPa.
- Um dos principais objetivos do trabalho foi encontrar a relação ideal de argamassa. A melhor formulação entre todas as argamassas foi a de 59% de areia, com uma resistência mecânica de 34,3 MPa.
- Foi realizada a comparação com a ARC e a AGP na temperatura limite de 400°C, a AGP mostrou um comportamento superior a ARC, os resultados da AGP mostraram uma resistência mecânica de 24,3 Mpa, enquanto a ARC suportou até 15 MPa de compressão.
- A análise microestrutural da AGP mostrou que não houve presença de fases no material, houveram fissurações descontínuas e pouca presença de poros na matriz, além de uma estrutura densa e compacta.

O estudo mostrou que a AGP, mesmo diante temperaturas mais elevadas, apresentou um bom desempenho térmico e mecânico quando comparada a ARC, atendendo as normas e seguindo os estudos de Silva (2011) como o esperado.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Os geopolímeros são materiais com qualidades excelentes, e apresentam resultados que justificam sua possibilidade utilização. Assim, este trabalho sugere algumas possíveis diretrizes para serem seguidas a partir desse estudo.

- Utilização de temperaturas mais elevadas
- Utilizar normas específicas para refratários
- Dosagem de matérias primas
- Variar condições de reatividade

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735 (EB208) - **Cimento Portland de Alto-forno**. Rio de Janeiro. Julho. 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (MB3) – **Cimento Portland – Determinação de Resistência a compressão**. Rio de Janeiro. Julho. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 (MB212) - **Argamassa e Concreto - Determinação da resistência por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. Abril. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 (MB212) – **Agregados e composição Granulométrica**. Rio de Janeiro. Abril. 1987.
- ABLICOR. **Associação Brasileira Da Indústria De Álcalis, Cloro E Derivado**. RELATORIO ANUAL. 2014
- ASTM C198 - 09(2019) **Standard Test Method for Cold Bonding Strength of Mortar**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019
- BARBOSA, M.T.G. **Análise Crítica De Materiais Alternativos Empregados Na Construção Civil. Argentina**, 2004. Jornadas Sud-Americanas De Ingeniería Estructural
- BARBOSA, V.F.F.; MACKENZIE, K.J.D.; THAUMATURGO, C. **Synthesis And Characterisation Of Materials Based On Inorganic Polymers Of Alumina And Silica: Sodium Polysialate Polymers**. International Journal Of Inorganic Materials. Vol. 2, 2000, Pp. 309317
- BITENCOURT, C. S. Et Al. **A Geopolimerização Como Técnica Para A Aplicação Do Resíduo De Bauxita**, São Paulo, V. 58, N. 345, Mar. 2012
- BITENCOURT, C. S. PANDOLFELLI V. C, “**Resinas Termofixas E A Produção De Refratários Contendo Carbono: Base Teórica E Insights Para Futuros Desenvolvimentos**”, Cerâmica 59, 349 (2013) 1-26.
- CÂNDIDO, V. S., SILVA, R A., SIMANASSIB, T. N. **Mechanical and microstructural characterization of Geopolymeric concrete subjected to fatigue**. 566-570p. Revista Journal of Materials Research and Technology. 2018.
- CASTALDELLI, V. N. **Estudo De Geopolímeros Utilizando Cinzas Residuais Do Bagaço De Cana-De-Açúcar**. São Paulo, 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa De Mestrado Em Engenharia Civil, Faculdade De Engenharia De Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2013
- CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP 2009: **Carbon Emissions Reductions Up To 2050**. Paris, França: International Energy Agency (IEA): Conches-Geneva; Suíça: World Business Council For Sustainable Development (WBCSD). 2009

- DAVIDOVITS, J. (1979). **“Synthesis Of New High-Temperature Geopolymers For Reinforced Plastics/Composites.”** *Proceedings Of PACTEC*, 4, 151-154.
- DAVIDOVITS, J. (1991). **“Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials.”** *Journal Of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- DAVIDOVITS, J. **30 Years Of Successes And Failures In Geopolymer Applications. Market Trends And Potential Breakthroughs**, Austrália, P. 1-16, Out. 2002
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement**. A Review, Geopolymer Institute Library, P. 111, Jan. 2013.
- DAVIDOVITS, 2015. **Geopolymer, Chemistry And Applications**. Institute Geopolymer. 4<sup>o</sup> Edition
- DUXSON, P Et Al. **Geopolymer Technology: The Current State Of The Art**. Journal Of Materials Science, V. 42, N. 9, P. 2917–2933, 2007.
- GONÇALVES, F. M; **Desenvolvimento De Geopolímero À Base De Cinza Volante, Solução Ativadora De Hidróxido De Potássio E Aditivo Dispersante**. UFSC Florianopolis 2015
- GLUKHOVSKY, V. D. **Soil Silicate Articles And Structures**, Ucrânia, P. 156, 1967
- 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
- INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (IFA). **GESTIS Substance Database - Potassium Hydroxide**, 2010.
- INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Considerações Sobre A Estimativa Da Permeabilidade Em Concretos Refratários Através Das Equações De Darcy E Forchheimer**. Ufscar – Universidade Federal De São Carlos. São Carlos / SP. 1999.
- INNOCENTINI, M. D. M.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Permeabilidade De Concretos Refratários Multifuncionais**. Ufscar – Universidade Federal De São Carlos. São Carlos / SP. 2001.
- JOHN, V. M.; SILVA, V. G; AGOPYAN, V. **Agenda 21: Uma Proposta De Discussão Para O Construbusiness Brasileiro**. In: encontro nacional e encontro latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, 1., 2001, canela. Anais... Canela: antac-2001.
- JUNIOR, V.M.T. **Desenvolvimento De Novos Materiais Cerâmicos A Partir De Lodo De Estações De Tratamento De Água, Microesferas De Vidro De Jateamento, Sais De Neutralização De Ácidos De Baterias E Areias De Fundição**. Dissertação De Mestrado. Programa De Pós-Graduação De Engenharia. Universidade Federal Do Paraná. Curitiba. 2009

- LIMA, F. T. **Caracterização micro e nanoestrutural de compósitos geopoliméricos metacauliníticos**. 162p. Dissertação de mestrado em Ciências dos Materiais . Instituto Militar de Engenharia (IME) . Rio de Janeiro, 2004.
- MASSUCATO, C.J. **Utilização De Escória De Alto-Forno À Carvão Vegetal Como Adição No Concreto**. 2005. 17f. Dissertação. (Mestrado Em Engenharia Civil, Arquitetura E Urbanismo), Universidade Estadual De Campinas, Campinas, 2005
- MADEJSKA, L. *Et al.* **Properties of geopolymer binder obtained from fly ash. Technical Transactions. Chemistry**, v. 8, 2011. p. 113-118.
- MELO, L. G. A. **Síntese E Caracterização De Geopolímeros Contendo Filitos**. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Mecânica E De Materiais – Instituto Militar De Engenharia, Rio De Janeiro, 185p, 2011.
- MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, E.F.; IRASSAR, E. **Strength Development Of Ternary Blended Cement With Limestone Filler And Blast-Furnace Slag**. *Cement & Concrete Composites*, V. 25, N.1, P.61-67, 2003
- NARANG, K.C., CHOPRA, S.K. **“Studies On Alkaline Activation Of Blastfurnace, Steel And Alloy Slags”**, *Silicate Industry* 9, Pp. 175-182.(1983)
- NOVAIS, Rui M. Et Al. **Waste Glass From End-Of-Life Fluorescent Lamps As Raw Material In Geopolymers**. *Waste Management*. V. 52, P. 245–255, 2016b.
- NORTON, F. H. **Refractories**. Fourth Edition. Mcgraw-Hill Book Company. USA. 1968.
- PINTO, A. T. **Geo-Pol. Introdução Ao Estudo Dos Geopolímeros**. Apostila, Vila Real, P. 92, 2006.
- PORTO, A. B. R; CANDIDO, V. S; SILCA. A. C. R; MONTEIRO, S. N. **Estudo das propriedades termomecânicas de geopolímeros produzidos a partir de Metacaulim**. 73º Congresso anual. Abm week 2018 – São Paulo
- OLIVEIRA, W. S. CANDIDO, V. S., MONTEIRO, S. N., SILVA, A. C. R **Desenvolvimento de geopolímero para aplicação como refratário a partir do uso de metacaulim da região norte do brasil**. Anais do 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Gramado -2017.
- RAAD, H.J. **Influência Das Condições De Mistura E Moldagem Na Permeabilidade De Concretos Refratários Aluminosos**. Pós-Graduação Em Construção Civil. Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008
- RANGAN, B. V. **Geopolymer Concrete For Environmental Protection**, *Australia, The Indian Concrete Journal* V. 88, P. 41-59, Abr. 2014.

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

SANTOS, F. D. **Mecanismo De Proteção E Corrosão Dos Refratarios De Mg-O-C Aditivos Metálicos.** 199177 P Dissertação (Mestrado Em Engenharia De Materiais) – Centro De Ciências Exatas Tecnologia Uscar, São Carlos, 1991

SANTOS, P; S. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** Editora Edegard Blucher Ltda, 2ª Edição, 1992

SILVA, A. C. R da. **Comportamento do concreto geopolimérico para Pavimento sob carregamento cíclico.** Monografia de mestrado em Ciência dos Materiais. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2006.

SILVA, A. C. R. **Compósitos geopolimérico com fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto.** Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011

SILVA, A. C. R. CANDIDO, V. S., MONTEIRO, S. N., SILVA. **Estudo da dosagem de geopolímeros à base de caulins e escória de alto forno para aplicação como refratarios** Anais do 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Gramado -2017.

SILVA, A. R. P; CANDIDO, V. S; SILCA. A. C. R; MONTEIRO, S. N. **Estudo das propriedades térmicas de geopolímeros à base de caulins e escória de alto forno** 73º Congresso anual. Abm week 2018 – São Paulo

SINGH, B. **Geopolymer concrete: A Review Of Some Recent Developments.** Csircentral Building Research Institute. Roorkee, India, P. 78-90, 2015.

TASHIMA, M. M. Et Al. **Reaproveitamento Da Cinza De Casca De Arroz Na Construção Civil.** HOLOS Environment, V.11 N.1, P. 81-89, 2011.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção De Geopolímero A Partir De Metacaulim Ativado.** Dissertação De Mestrado Em Construção Civil – Universidade Federal De Minas Gerais, 104p, 2013.

VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., & LORENZEN, L. **The Potential Use Of Geopolymeric Materials To Immobilise Toxic Metals: Part I. Theory And Applications.** Minerals Engineering, 10(7), 659-669. (1997)