



## **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS, A PARTIR DE ARGILA, CAULIM FERRUGINOSO E CINZAS VOLANTES - CLASSE C**

**Carmen Raiza Aires Soares Preza**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Belém

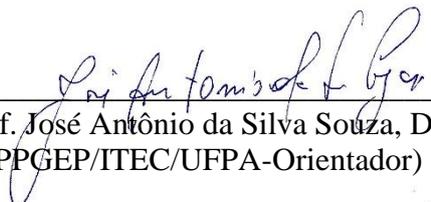
Agosto de 2021

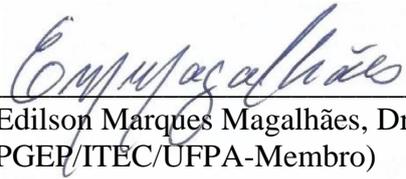
**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS, A PARTIR DE  
ARGILA, CAULIM FERRUGINOSO E CINZAS VOLANTES - CLASSE C**

Carmen Raiza Aires Soares Preza

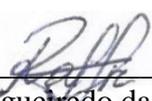
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Antônio da Silva Souza, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Edilson Marques Magalhães, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Edinaldo José da Sousa Cunha, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Raimunda Figueiredo da Silva Maia, Dr<sup>a</sup>.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

AGOSTO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Preza, Carmen Raiza Aires Soares, 1996-  
Síntese e caracterização de geopolímeros, a partir de  
argila, caulim ferruginoso e cinzas volantes - Classe C /  
Carmen Raiza Aires Soares Preza - 2021.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade  
Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Processos, 2021.

1. Materiais e Processos 2. Resíduos industriais 3.  
Argila 4. Geopolímeros 5. Resistência a compressão I. Título

CDD 670.42.

---

*Dedico este trabalho a todos aqueles que  
nunca deixam de sonhar, pois é os  
sonhos que nos mantem fortes para  
levantarmos todos os dias.*

*Nunca pare, Nunca!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, Nossa Senhora de Nazaré e Dona Mariana, por mais esta conquista. Eles que me abriram portas onde eu nem poderia imaginar que teria. Vejo o quanto estou feliz e realizada por ter trilhado caminhos onde eles sempre passaram a frente.

Aos meus pais, por terem me acompanhado em mais uma jornada, Maria do Socorro, José Fortunato e Cleverson Preza, pois sem eles nada disso seria possível. Eles que conhecem os meus sonhos, sendo um deles a minha realização acadêmica, que sempre foi muito importante em minha vida. Imensamente grata! Assim como, toda a minha família, que torce por mim mesmo que de longe, mas a qual eu sei que posso sempre contar.

Ao meu namorado Felipe Macedo, que sempre me apoia e me motiva. Que acredita que eu posso ir muito mais além, ele que acompanha minha jornada e me ajuda em muitos segmentos. Muito obrigada, por tudo!

Aos meus orientadores, José Antônio e Edilson Magalhães, que aceitaram me orientar, obrigada pelo conhecimento passado, pela atenção, pelo comprometimento, e pelo tratamento, desde o primeiro momento.

Agradeço em especial a professora Raimunda Maia, pela imensa contribuição para o aperfeiçoamento da dissertação.

Agradeço ao Woshington Brito e Lêda Racanelli pela imensa ajuda, pelo conhecimento, pelo companheirismo. Obrigada, de coração!

E a todos os professores que passaram pela minha formação, pois sem eles meu conhecimento não teria amadurecido o suficiente para eu chegar até aqui! Profissão esta que tenho muita admiração, pois são formadores de opiniões, de caráter, de atitudes e além do mais são de extrema importância para a sociedade como um todo.

A banca examinadora, por terem aceitado o convite e colaborado para a melhoria da pesquisa.

Agradeço também a Universidade Federal do Pará, a Usina de Materiais, da Faculdade de Engenharia Química, aos técnicos Jamily e Augusto, pelo apoio e pela dedicação do seu tempo em me atender, tanto para tirar dúvidas, quanto para ceder os equipamentos e o espaço.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao PPGEP, ao coordenador Edilson Magalhães e a todo o corpo docente.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

## **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS, A PARTIR DE ARGILA, CAULIM FERRUGINOSO E CINZAS VOLANTES - CLASSE C**

**Carmen Raiza Aires Soares Preza**

Agosto/2021

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Engenharia de Processos

A alta demanda no ramo da construção civil, tem ocasionado um cenário negativo ao meio ambiente. Com isso, pesquisas surgem com o objetivo de descobrir alternativas sustentáveis à tecnologia já existente. Pensando nisso, pode-se abrandar a situação com algumas das técnicas que existem há milênios e ainda têm relevância. Estudos sobre geopolímeros estão em crescente expansão, principalmente em países desenvolvidos. A principal aplicação desse material, composto por minerais e resíduos da indústria, é a substituição ao cimento Portland. Assim, este trabalho teve como propósito produzir geopolímeros com propriedades físico-químicas superiores. A elaboração de geopolímeros foram direcionadas a partir de diferentes concentrações de argila/cinzas volantes e caulim ferrítico/cinzas volantes. As matérias-primas foram analisadas *in natura* e calcinadas a 600 °C e 800 °C /2 horas, utilizando difração de raio -X, fluorescência de raios -X e análise granulométrica a laser. Os resultados demonstraram que as matérias-primas são tecnologicamente viáveis para o estudo, devido aos seus teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sendo: 63,89 % e 16,65 % para a argila; 38,57 % e 36,85 % para o caulim ferrítico; e 42,53 % e 16,40 % para cinzas volantes, respectivamente. As matérias-primas apresentaram granulometrias finas, sendo mais reativas. Os geopolímeros A3 (80 % de argila/20 % de cinza volante) e C3 (80 % de caulim/20 % de cinza volante), apresentaram os melhores resultados para resistência a compressão, 13,19 MPa e 31,22 MPa, no 28º dia, respectivamente. Os valores encontrados estão dentro dos limites encontrados para alguns cimentos Portland.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

## **SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF GEOPOLYMERS FROM CLAY, RUSTY KAOLIN AND FLYING ASH – CLASS C**

**Carmen Raiza Aires Soares Preza**

Agosto/2021

Advisor: José Antônio da Silva Souza

Research Area: Process Engineering

The high demand in the civil construction sector has caused a negative scenario for the environment. With this, researches arise with the objective of discovering sustainable alternatives to the existing technology, because, it is known that over the years, the concern with nature was significantly lost. With that in mind, the situation can be softened with some of the techniques that have been around for millennia and are still relevant. Studies on geopolymers are growing, especially in developed countries. The main application of this material, composed of minerals and industrial residues, is the replacement of Portland cement. Thus, this work aimed to produce geopolymers with superior physicochemical properties. The elaboration of geopolymers was directed from different concentrations of clay/flying ash and ferritic kaolin/flying ash. The raw materials were analyzed in natura and calcined at 600 °C/2 hours and 800 °C, using X-ray diffraction, X-ray fluorescence and laser particle size analysis. The results showed that the raw materials are technologically viable for the study, due to their SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents, being: 63.89% and 16.65% for clay; 38.57% and 36.85% for ferritic kaolin; and 42.53% and 16.40% for fly ash, respectively. The raw materials presented fine grain sizes, being more reactive. Geopolymers A3 (80% clay/20% fly ash) and C3 (80% kaolin/20% fly ash) showed the best results for compressive strength, 13.19 MPa and 31.22 MPa, in the 28th day, respectively. The values found are within the limits found for some Portland cements.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	3
<b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>	<b>3</b>
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - GEOPOLÍMEROS.....	5
<b>2.1.1 - Histórico.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 - Definição.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3 - Aplicações.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.4 - Constituintes.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.5 - Questões ambientais.....</b>	<b>12</b>
2.2 - ARGILA DO RIO GUAMÁ.....	14
<b>2.2.1 - Composição química e funcional.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 - Tratamento térmico.....</b>	<b>17</b>
2.3 - CAULIM FERRÍTICO.....	18
<b>2.3.1 - Composição química e funcional.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 - Tratamento térmico.....</b>	<b>21</b>
2.4 - CINZA VOLANTE.....	22
<b>2.4.1 - Composição química e funcional.....</b>	<b>23</b>
2.5 - GRANULOMETRIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	24
2.6 - ATIVAÇÃO ALCALINA.....	25
<b>2.6.1 - Silicato de sódio (<math>\text{Na}_2\text{SiO}_3</math>).....</b>	<b>26</b>
<b>2.6.2 - Hidróxido de sódio (<math>\text{NaOH}</math>).....</b>	<b>27</b>
2.7 - EFLORESCÊNCIA.....	28
2.8 - INFLUÊNCIAS NA SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO.....	30
<b>2.8.1 - Razão molar.....</b>	<b>31</b>
<b>2.8.2 - Água.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.3 - Temperatura e tempo de cura.....</b>	<b>34</b>

2.9 - GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	34
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 - MATERIAIS.....	38
<b>3.1.1 - Matérias-primas.....</b>	<b>38</b>
3.2 - BENEFICIAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	38
<b>3.2.1 - Calcinação da argila do Rio Guamá e do caulim ferrítico.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2 - Cominuição da argila do Rio Guamá e do caulim ferrítico.....</b>	<b>40</b>
3.3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	40
<b>3.3.1 - Caracterização das matérias-primas.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.2 - Fluorescência de raio - X (FRX).....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3 - Difração de raio - X (DRX).....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.4 - Análise granulométrica a laser.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.5 - Processo de elaboração dos geopolímeros.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.6 - Caracterização dos geopolímeros.....</b>	<b>46</b>
3.3.6.1 - Ensaio de resistência a compressão.....	47
3.3.6.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	48
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS DA ARGILA DO RIO GUAMÁ.....	49
<b>4.1.1 - Fluorescência de raio - X (FRX).....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.2 - Difração de raio - X (DRX).....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.3 - Análise granulométrica a laser.....</b>	<b>53</b>
4.2 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS DA CAULIM FERRUGINOSO.....	54
<b>4.2.1 - Fluorescência de raio - X (FRX).....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2 - Difração de raio - X (DRX).....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.3 - Análise granulométrica a laser.....</b>	<b>56</b>
4.3 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS DA CINZA VOLANTE.....	57
<b>4.3.1 - Fluorescência de raio - X (FRX).....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.2 - Difração de raio - X (DRX).....</b>	<b>58</b>
4.4 - CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS.....	59
<b>4.4.1 - Resistência a compressão.....</b>	<b>59</b>
<b>4.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....</b>	<b>62</b>

4.4.2.1 - Geopolímero a base de argila do Rio Guamá.....	62
4.4.2.2 - Geopolímero a base de caulim ferrítico.....	64
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>68</b>
5.1 - CONCLUSÕES.....	68
5.2 - SUGESTÕES.....	69
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Prédios ainda existente em Bruxelas construídos parcialmente com <i>Purdocement</i> (a) esquina entre Rua Brendel nº 9 e Avenida Oudergem nº 15 (b) Praça King Victor nº 12 e 13.....	7
Figura 2.2	Ilustração do aeroporto de Brisbane (BWWA).....	8
Figura 2.3	Taxa de dissolução em meio ácido (em solução a 5%) .....	8
Figura 2.4	Cadeias poliméricas polissialato Mn-(-Si-O-Al-O-)n e polissiloxo-ssialato Mn-(-Si-O-Al-O-Si-O-)n, e estruturas relacionadas.....	10
Figura 2.5	Modelo conceitual para geopolimerização.....	12
Figura 2.6	Extensão do Rio Guamá.....	15
Figura 2.7	Transformação de caulinita em metacaulinita, pelo tratamento térmico.....	17
Figura 2.8	Localização das duas maiores companhias de mineração de caulim do Brasil.....	18
Figura 2.9	Perfil da composição longitudinal do solo.....	19
Figura 2.10	Caulim duro ferrítico, beneficiado.....	20
Figura 2.11	Estrutura da caulinita.....	21
Figura 2.12	Transformação de caulinita em metacaulim, pelo processo de calcinação.....	22
Figura 2.13	Cinzas volantes.....	23
Figura 2.14	Fórmula do hidróxido de sódio – NaOH.....	28
Figura 2.15	Eflorescência no concreto.....	29
Figura 2.16	Reação de geopolimerização.....	35
Figura 2.17	Esquema típico do processo de geopolimerização.....	36
Figura 3.1	Fluxograma de beneficiamento da matéria-prima: argila do Rio Guamá e caulim ferrítico.....	39
Figura 3.2	Argila do Rio Guamá (a) e caulim ferrítico (b) beneficiado.....	40
Figura 3.3	Fluxograma da caracterização das matérias-primas.....	41
Figura 3.4	Fluxograma do processo de elaboração dos geopolímeros.....	42
Figura 3.5	Corpos de prova moldados, de geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.....	45
Figura 3.6	Corpos de prova moldados, de geopolímeros a base de caulim ferrítico.....	45

Figura 3.7	Corpos de prova desmoldados, de geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.....	46
Figura 3.8	Corpos de prova desmoldados, de geopolímeros a base caulim ferrítico.....	46
Figura 3.9	Fluxograma de caracterização dos geopolímeros.....	47
Figura 3.10	Corpo de prova geopolimérico na prensa (a) e amostra A-5 fraturada (b).....	48
Figura 4.1	Difratograma de Raio-X da argila do Rio Guamá.....	51
Figura 4.2	Difratograma de Raio-X da argila do Rio Guamá, tratada a 600 °C...	52
Figura 4.3	Análise granulométrica a laser da argila do Rio Guamá.....	53
Figura 4.4	Difratograma de Raio-X do caulim ferruginoso.....	55
Figura 4.5	Difratograma de Raio-X do caulim ferruginoso, tratado a 800 °C.....	56
Figura 4.6	Análise granulométrica a laser caulim ferruginoso e cinza volante....	57
Figura 4.7	Difratograma de Raio-X da cinza volante.....	58
Figura 4.8	Resistência a compressão dos geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.....	60
Figura 4.9	Resistência a compressão dos geopolímeros a base de caulim ferrítico.....	61
Figura 4.10	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra A3, com (a) ampliação de 200X e (b) ampliação de 300X.....	62
Figura 4.11	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A3 no ponto 3.....	63
Figura 4.12	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra A4, com (a) ampliação de 100X e (b) ampliação de 1.0KX.....	63
Figura 4.13	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A4 no ponto 3.....	64
Figura 4.14	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra C3, com ampliação (a) de 100X e (b) de 300X.....	65
Figura 4.15	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C3 no ponto 4.....	65
Figura 4.16	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra C4, com ampliação (a) 200X e (b) de 1.0 KX.....	66
Figura 4.17	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C4 no ponto 3	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Melhores intervalos entre as relações molares.....	10
Tabela 2.2	Monômeros de base de formação de geopolímeros.....	11
Tabela 2.3	Especificações técnicas do silicato de sódio.....	27
Tabela 2.4	Especificações do hidróxido de sódio de alta pureza.....	28
Tabela 3.1	Arranjo das misturas, dos geopolímeros de argila do Rio Guamá e caulim ferrítico.....	43
Tabela 3.2	Proporção das misturas, dos geopolímeros de argila do Rio Guamá....	43
Tabela 3.3	Razões molares das formulações de argila.....	43
Tabela 3.4	Proporção das misturas, dos geopolímeros de caulim ferrítico.....	44
Tabela 3.5	Razões molares das formulações de caulim ferruginoso.....	44
Tabela 4.1	Composição química da argila do Rio Guamá, determinada por FRX.	49
Tabela 4.2	Composição química do caulim ferruginoso, determinada por FRX....	54
Tabela 4.3	Composição química da cinza volante – classe C, determinada por FRX.....	58
Tabela 4.4	Resistência a compressão no 7º e no 28º dia, após a moldagem.....	59
Tabela 4.5	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A3 no ponto 3.....	63
Tabela 4.6	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A4 no ponto 3.....	64
Tabela 4.7	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C3 no ponto 4.....	66
Tabela 4.8	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C4 no ponto 3.....	67

## NOMENCLATURA

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
CP's	CORPOS DE PROVA
CV	CINZA VOLANTE
DRX	DIFRAÇÃO DE RAIO – X
EDS	ESPECTROSCOPIA DE DISPERSIVOS DE ENERGIA
FRX	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X
GEE	GASES DO EFEITO ESTUFA
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
MEV	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
MK	METACALIM
NBR	NORMAS BRASILEIRAS
pH	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO
PIB	PRODUTO INTERNO BRUTO
USIMAT	USINA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - MOTIVAÇÃO

A demanda por novos produtos e serviços, obriga os grandes mercados e a população, a cada vez mais investir em inovação e buscar melhorias em diversos setores mundiais, essa necessidade por sempre está em primeiro nacionalmente e mundialmente, faz com que novos produtos e serviços sejam pensados e postos em práticas a cada dia, seja em nível acadêmico ou empresarial.

Para atender às demandas do mercado, vários produtos são criados, onde muitos deles, além de utilizar recursos naturais, geram diferentes tipos de resíduos (PINTO *et al.*, 2019).

A forte preocupação ambiental vem se mostrando como uma das principais motivações para a busca de materiais alternativos, que reduzam o consumo de energia e apresentem baixo custo produtivo. A produção intensa de cimento Portland é responsável por cerca de 8 % de toda a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, além de consumir grande energia (PAN *et al.*, 2013, TOPÇU *et al.*, 2014, İLKENTAPAR *et al.*, 2017, TONIOLO e BOCCACCINI, 2017, FAN *et al.*, 2018)

A utilização de recursos renováveis, a redução de consumo de recursos não renováveis, a reutilização e reciclagem desses, tornam as intervenções do homem menos agressivas ao ambiente natural. Assim, os 3 R's citados na Agenda 21 (1992) – Reduzir, Reutilizar e Reciclar são a base para a gestão ambiental dos resíduos.

O aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima destinada à construção civil vem se consolidando como uma alternativa viável do ponto de vista técnico, ambiental e econômico, pois tende a minimizar ou até mesmo eliminar estes resíduos (SIQUEIRA *et al.*, 2012).

A necessidade por novos materiais dá-se pelo fato do esgotamento dos recursos naturais utilizados na construção civil e pela busca do desenvolvimento consciente, visto que, para a produção de 1 tonelada de clínquer de cimento, produz-se 0,5 toneladas de dióxido de carbono, devido à calcinação de calcário e 0,45 toneladas em razão da queima de combustível. Tornando a indústria do Cimento Portland Comum uma das mais poluentes no mundo (HELMY, 2016).

A preocupação ambiental é uma constante, pois a presença em demasia de CO<sub>2</sub>, o principal gás de efeito estufa, pode elevar a temperatura da superfície terrestre e com isso provocar mudanças climáticas drásticas (LIVI, 2013). Além disso, a energia elétrica consumida pelas usinas de cimento no Brasil atinge 5000 GWh/ano, o suficiente para abastecer uma cidade de 10 milhões de habitantes por um ano (SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO, 2011).

Na busca de novas tecnologias e inovações, a indústria da construção civil busca constantemente encontrar e desenvolver novos materiais que atendam de forma mais eficaz suas necessidades, minimizando efetivamente os danos causados ao meio ambiente (WANDERLEY, 2018).

Novas pesquisas têm sido propostas para produzir cimentos ecologicamente amigáveis e mitigar este efeito que só tende a crescer. Dentre as tecnologias para produção de cimentos alternativos, um grande destaque se dá para a produção de geopolímeros, produzidos a partir da álcali-ativação de materiais pozolânicos, como o metacaulim (MK) (DORNELLES, 2018).

Os materiais geopoliméricos têm sido estudados há várias décadas como uma alternativa aos cimentos tradicionais em determinadas aplicações e estão atraindo uma maior atenção comercial devido às suas baixas emissões de CO<sub>2</sub> e boas propriedades mecânicas e de durabilidade (FENG *et al.*, 2012).

Para DAVIDOVITS (1994), a introdução de cimentos geopoliméricos para fins ambientais, como o aprisionamento de elementos tóxicos em sua estrutura, assim como para fins de construção civil, poderia causar uma redução de 80 % das emissões de CO<sub>2</sub> das indústrias de cimento e concreto. Essa afirmação é devido ao fato de a síntese desses materiais não necessitar de altas temperaturas e grandes volumes de combustível.

Muita atenção tem sido dada ao desenvolvimento de geopolímeros nas últimas duas décadas, uma vez que, alguns desses materiais podem oferecer grandes vantagens em termos de resistência mecânica, durabilidade química, resistência térmica, e imobilização de resíduos tóxicos e perigosos (BORGES *et al.*, 2016).

MEMON *et al.* (2011), acreditam que o desenvolvimento de geopolímeros é um grande progresso por agregar valor à materiais residuais, ser ambientalmente amigáveis e ter similar comportamento mecânico quando comparado à tecnologia tradicional.

Autores, seguindo linhas de pesquisas, obtiveram êxito em seus experimentos evidenciando a capacidade de produzirem pozolanas de alta reatividade através da

calcinação de argilas provenientes de jazidas naturais, como argilas caulínicas (ALUJAS *et al.*, 2015, TIRONI *et al.*, 2015, ALMENARES *et al.*, 2017).

A cinza volante classe - C vem sendo utilizada na formulação de geopolímeros que essa nova classe de material apresenta propriedades ligantes semelhantes aos cimentos convencionais (BRITO *et al.*, 2019). A reutilização de cinzas na formulação de argamassas e concretos é uma alternativa interessante, visto que este material possui atividade pozolânica e para as empresas geradoras, este resíduo torna-se um problema em relação ao descarte final (SIQUEIRA *et al.*, 2012).

Segundo SABIR *et al.* (2001), os estudos referentes à aplicação de pozolanas tornaram-se atraentes devido às vantagens técnicas manifestadas em matrizes de cimento com a utilização destes materiais, como significativa contribuição à resistência mecânica e durabilidade.

O desenvolvimento de geopolímeros a base de Argila do Rio Guamá e Caulim Ferrítico, com adição de cinzas volantes – classe C, é uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos da indústria, e a incorporação de um material estéril, e espera-se contribuir para a tecnologia, ajudando na redução de impactos ambientais e minimização de resíduos industriais.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - Objetivo geral

Desenvolver e avaliar as características físico-químicas, dos geopolímeros com diferentes concentrações de argila, caulim ferrítico e cinza volante, através do aproveitamento de resíduos industriais e material estéril.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

- Caracterizar as matérias-primas (argila do Rio Guamá, Caulim ferrítico e cinza volante) a fim de identificar seus potenciais de aplicação;
- Síntese de formulações com diferentes concentrações de argila e cinza volante;
- Síntese de formulações com diferentes concentrações de caulim ferrítico e cinza volante;

- Sugerir uma alternativa para a redução de problemas ambientais causados pelo descarte de caulim ferrítico e cinza volante – classe C;
- Agregar valor a argila “fraca” do Rio Guamá, para testar a resistência à compressão, e sua utilização nesse processamento;
- Determinar as melhores formulações a partir dos resultados do ensaio de resistência a compressão, com o propósito de substituir o cimento Portland.

### 1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

As contribuições esperadas são:

- Desenvolvimento de novos materiais;
- Redução de impactos ambientais e minimização do descarte inadequado dos resíduos industriais;
- Viabilizar a inserção de resíduos, como subprodutos;
- Viabilizar a inserção de argila “fraca” ao processamento;
- Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros;
- Realizar publicação de artigo.

### 1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está organizada em 5 capítulos, onde:

O capítulo 1 apresenta a introdução, motivação, objetivos, contribuições da dissertação e a forma de organização do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura (sobre os geopolímeros, e as questões ambientais aliadas a eles, as matérias-primas que serão utilizadas, assim como o processo de geopolimerização).

O capítulo 3 apresenta materiais e métodos (estão abordados os materiais utilizados e os métodos, e os locais onde foi desenvolvido a pesquisa).

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões (os resultados obtidos, estão apresentados e comparados com outros estudos, para fim de validar a pesquisa).

O capítulo 5 apresenta a conclusão (por fim, está concluído o raciocínio da pesquisa, sugerindo trabalhos futuros, para que os estudos sempre estejam em fase de aperfeiçoamento).

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - GEOPOLÍMEROS

##### 2.1.1 - Histórico

Pesquisadores da Ucrânia, Glukhovsky e Kryvenko, têm trabalhado no desenvolvimento de cimentos álcali-ativados desde os anos 50, porém o termo geopolímero foi primeiramente utilizado pelo francês Davidovits na década de 1970 (DAVIDOVITS, 1988, DUXSON *et al.*, 2006).

Os geopolímeros tem sido erroneamente assimilado por diversas pessoas como uma simples ativação alcalina. Eles afirmam que qualquer resíduo que é ativado alcalinamente é geopolímero, no entanto, para ser considerado geopolímero necessita que ocorra a reação de geopolimerização, que é caracterizada pela utilização de materiais aluminossilicatos amorfos (DAVIDOVITS, 2004).

Os chamados geopolímeros ou polissialatos, terminologia adotada para abreviatura de poli-silicoaluminatos, foram descritos pela primeira vez em patentes pelo Prof. J. Davidovits em 1981, onde são apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland (GEO-POL, 2007). Segundo DAVIDOVITS (1994), trata-se de uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos cauliníticos ou lateríticos com cal ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ), feita pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de peças estruturais. Em sua publicação, intitulada “The Pyramids: An Enigma Solved”, afirmou que as grandes pirâmides do Egito foram erguidas, há 4.500 anos, com blocos moldados com este material. Estudos de difração de raios - X de amostras removidas dos blocos das pirâmides de Cheops, Chefren, Teti e Sneferu indicam que a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) é a fase cristalina predominante. Entretanto, um material amorfo composto por silicatos e aluminossilicatos complexos e um material criptocristalino (zeólita do tipo analcima,  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), acompanham a microestrutura (GEO-POL, 2007).

### 2.1.2 - Definição

O termo "geopolímero" descreve as propriedades químicas dos polímeros inorgânicos à base de aluminossilicatos. Eles apresentam propriedades de cimento e, portanto, um grande potencial de uso na indústria da construção civil (DAVIDOVITS, 2011). O geopolímero é um polímero de origem mineral (AZEREDO MELO, 2010, OSORIO, 2006).

Os polímeros inorgânicos são materiais obtidos pela reação entre a Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) constituintes dos aluminossilicatos, em um ambiente fortemente alcalino e, ao contrário do Cimento Portland Comum, sem a presença de Cálcio (PINTO, 2006).

O valor da tecnologia de geopolímeros pode estar na sua capacidade de produzir aglutinantes de alto desempenho a partir de materiais como cinza volante, escória de alto forno, de aciaria e outros, ou seja, converter materiais residuais em produtos úteis (WANG *et al.*, 1995; ROY, 1999).

Os geopolímeros são materiais que demonstram ser uma alternativa ao cimento Portland, por se tratar de um material com uma menor emissão de carbono em sua produção, chegando a emitir 80 % menos carbono. (TURNER e COLLINS, 2013, YAN *et al.*, 2017).

Esses polímeros inorgânicos apresentam grandes vantagens quando comparados ao cimento Portland. Entre as várias propriedades podemos destacar a elevada resistência mecânica, ganho de resistência mecânica em curtos períodos de cura, resistência a ataques ácidos e de sulfatos, resistência a ciclos de gelo-degelo, estabilidade estrutural quando submetidos a elevadas temperaturas, (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; GÖRÜR *et al.*, 2015; FERNANDEZ-JIMENEZ *et al.*, 2006), redução da emissão de  $\text{CO}_2$  até 6 vezes, baixa condutividade térmica, capacidade de imobilizar metais pesados e imune à reação alcali-sílica (DAVIDOVITS, 2008).

### 2.1.3 - Aplicações

Purdon, em 1940, realizou estudos sobre cimentos que consistiam em escória e NaOH, com a avaliação conjunta de outros ativadores (SHI *et al.*, 2006). Anos depois foi criada uma companhia que durou apenas três anos, mas produziu e comercializou seus cimentos de escória ativados alcalinamente com os quais foram construídas

(parcialmente) diversas edificações até hoje existentes, como pode ser visto na Figura 2.1 (BUCHWALD *et al.*, 2013).



Figura 2.1 - Prédios ainda existente em Bruxelas construídos parcialmente com *Purdocement* (a) esquina entre Rua Brendel nº 9 e Avenida Oudergem nº 15 (b) Praça King Victor nº 12 e 13.  
Fonte: FROENER (2016).

Davidovits formulou num congresso de egiptologia em 1979 a hipótese das pirâmides do Egito terem sido construídas há 4.500 anos com blocos moldados contendo geopolímeros (GEOPOLYMER-INSTITUTE, 1996). Apesar da controvérsia gerada quanto à química envolvida poder ser comparável à atual geopolimerização, não restam dúvidas que são blocos rochosos sintéticos (PROVIS e DEVENTER, 2009), tendo investigações químicas e mineralógicas posteriores, constatado que num mesmo bloco se encontravam fragmentos de rocha de diferente proveniência unidos por um ligante artificial (VIEIRA, 2013).

Em relação ao emprego dos geopolímeros a maioria das iniciativas se concentra em países já desenvolvidos. Isto decorre da política de incentivo entre o governo e seus pesquisadores. O país que se destaca nestas iniciativas é a Austrália, a exemplo do aeroporto de Brisbane (BWWA), na Figura 2.2, que se tornou o aeroporto mais sustentável do mundo. Para a sua construção foram utilizados cerca de 30.000 metros cúbicos de concreto geopolimérico, o que gerou uma redução superior a 6.000 toneladas de CO<sub>2</sub> (MACCARINI, 2015).



Figura 2.2 - Ilustração do aeroporto de Brisbane (BWBA).  
Fonte: MACCARINI (2015).

Os geopolímeros são uma classe de materiais de aluminossilicatos sintéticos com propriedades químicas e mecânicas superiores. Têm uso potencial em uma série de áreas, essencialmente como substituto do cimento Portland, aplicações cerâmicas, compósitos de tecnologia avançada (DAVIDOVITS, 2008).

As características físico-químicas garantem propriedades especiais, tais como rápido desenvolvimentos de resistência mecânica e excelente durabilidade química (BORGES *et al.*, 2014). Na Figura 2.3, pode observar a taxa de dissolução em meio ácido de diferentes materiais.



Figura 2.3 - Taxa de dissolução em meio ácido (em solução a 5%).  
Fonte: PINTO (2002).

#### 2.1.4 - Constituintes

Há dois principais constituintes dos geopolímeros: os materiais de base e os líquidos alcalinos. Os materiais de base para os geopolímeros de aluminossilicato devem ser ricos em silício (Si) e alumínio (Al). Estas fontes poderiam ser os minerais naturais, cinzas volantes, escórias de alto forno, lama vermelha, argilas, cinza de casca de arroz etc.; todos podendo ser utilizados como matéria prima. A escolha dos materiais de base para a produção de geopolímeros depende de fatores como disponibilidade e custo. Os líquidos alcalinos são de metais alcalinos solúveis, que são geralmente de sódio ou de potássio (RANGAN, 2006).

Algumas matérias-primas já vêm sendo estudadas e testadas como aditivos para reação geopolimérica como é o caso das cinzas volantes, que obtiveram bons resultados na geopolimerização (KUMAR, 2012).

A produção de geopolímeros à base de metacaulim e cinza volante são interessantes uma vez que contribui para a reutilização desse material pouco reciclado, favorecendo a diminuição dessa classe de resíduos em aterros destinados a materiais de demolição da indústria da construção civil (AZEVEDO *et al.*, 2018).

O geopolímero possui baixo custo de produção, pois é baseado em aluminossilicatos que ocorrem em abundância na crosta terrestre ou derivam de resíduos industriais. O processo de produção é energeticamente econômico, visto que ele é curado e seco em temperaturas abaixo de 100 °C (AZEREDO MELO, 2010).

A modificação química dos geopolímeros promove a obtenção de diferentes unidades repetidoras, o que modifica as propriedades finais do ligante (AZEVEDO e STRECKER, 2017). Estes materiais são produzidos a partir da polimerização de silício, alumínio e oxigênio para formar uma estrutura tridimensional amorfa (KOMNITSAS e ZAHARAKI, 2007).

Segundo DAVIDOVITS (1991), a designação química do material é de poli(sialato), sendo sialato uma abreviatura de silício-oxo-aluminato. A rede sialato consiste em tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  ligados alternadamente através do compartilhamento de todos os átomos de oxigênio. Na Figura 2.4, podem-se observar algumas redes polissialatos relacionadas.

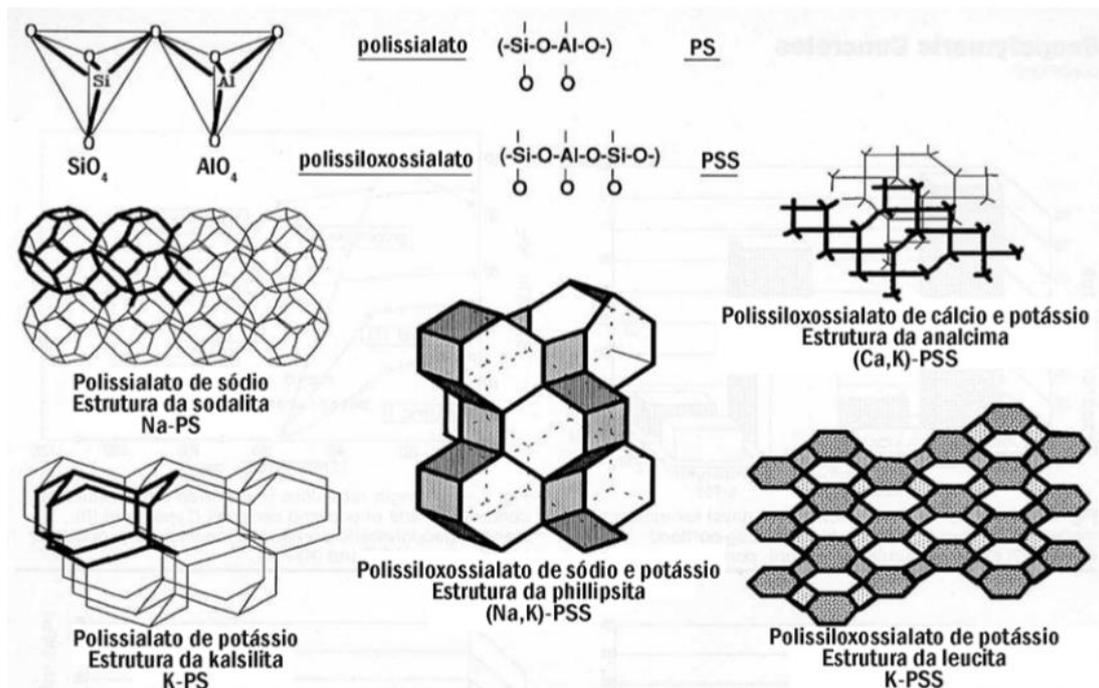


Figura 2.4 - Cadeias poliméricas polissialato  $Mn(-Si-O-Al-O)_n$  e polissiloxossilato  $Mn(-Si-O-Al-O-Si-O)_n$ , e estruturas relacionadas.

Fonte: Adaptado de DAVIDOVITS (1991).

A presença dos íons de  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $NH_4$ ,  $H_3O^+$  é necessária para equilibrar a carga negativa de  $Al_3^+$  em coordenação IV (DAVIDOVITS, 1989). Os polissialatos apresentam a seguinte fórmula empírica na Eq. (2.1):

$$M_n = \{-(SiO_2)_z - AlO_2\}_n * wH_2O \quad (2.1)$$

Onde "M" é um cátion, como potássio, sódio ou cálcio, "n" é o grau de polimerização e "z" assume os valores 1 (sialato), 2 (polissialato-siloxo) ou 3 (polissialato-dissiloxo). DAVIDOVITS *et al.* (1994) sugerem alguns limites para a síntese dos geopolímeros, de modo que haja melhores condições para formação de produtos resistentes, onde as relações molares dos elementos devem estar dentro dos seguintes parâmetros, mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Melhores intervalos entre as relações molares.

Relações molares	Melhores intervalos
$M_2O/SiO_2$	0,2 a 0,48
$SiO_2/Al_2O_3$	3,3 a 4,5
$H_2O/M_2O$	10 a 25
$M_2O/Al_2O_3$	0,8 a 1,6

Fonte: Adaptado de DAVIDOVITS *et al.* (1994).

Os geopolímeros ou polímeros inorgânicos apresentam estruturas que variam de acordo com a composição química (PALOMO *et al.*, 1999, PROVIS *et al.*, 2014). Na Tabela 2.2 são mostradas as unidades repetitivas bases de formação dos geopolímeros.

Tabela 2.2 - Monômeros de base de formação de geopolímeros.

<b>Unidades repetitivas</b>	<b>Razão Si/Al</b>
Poli(sialato) (-Si-O-Al-O-)	1:1
Poli(sialato-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-)	2:1
Poli(sialato-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)	3:1

Fonte: AZEVEDO *et al.* (2017).

As soluções alcalinas utilizadas na produção dos geopolímeros devem possuir grande quantidade de íons OH<sup>-</sup> para que a rede tridimensional amorfa comumente encontrada nos materiais de partida seja dissolvida. As matrizes com baixo ordenamento atômico são solubilizadas pelas soluções e posteriormente se transformam em matrizes compactas e com grande resistência mecânica devido aos processos de policondensação (KHALE, 2007).

O mecanismo de reação que dá origem aos materiais ativados trata-se de um processo químico na sua dissolução alcalina e precipitação numa solução aquosa de um precursor, sendo responsável pelo endurecimento e propriedades dos geopolímeros. O sistema de geopolimerização, fenômeno exotérmico, tem sido alvo de estudos de muitos pesquisadores e algumas pequenas dúvidas ainda existem na literatura, mas o princípio geral está muito bem definido (DAVIDOVITS, 1991, PROVIS *et al.*, 2005 AHMARUZZAMAN, 2010).

O primeiro passo consiste na quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, que ocorre quando o pH da solução alcalina aumenta, de modo que esses grupos são transformados em uma fase coloidal. Em seguida, ocorre a acumulação dos produtos das quebras de ligações, que simultaneamente interagem entre eles para formar uma estrutura coagulada, conduzindo a uma terceira fase com a geração de uma estrutura condensada e, com o tempo e a temperatura podem desenvolver cristalização (PROVIS, 2005). Na Figura 2.5, observa-se o fluxograma da reação de geopolimerização.

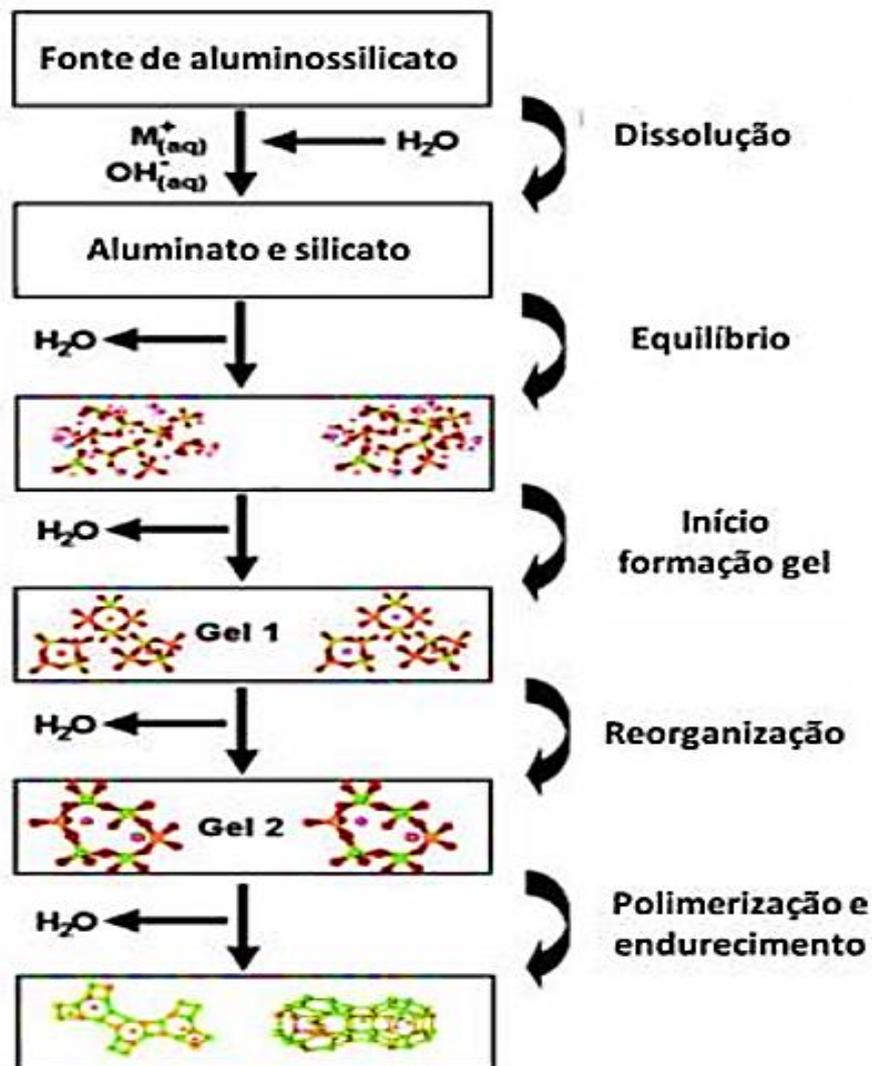


Figura 2.5 - Modelo conceitual para geopolimerização.  
 Fonte: Adaptado de DUXSON *et al.* (2007).

A composição mineralógica do material de partida, temperatura e tempo de cura, quantidade de água e a concentração dos compostos presentes na solução alcalina ativadora são os principais parâmetros controlados durante a produção desses materiais (BIGNOZZI *et al.*, 2014, GÖRHAN e KÜRKLÜ, 2014).

### 2.1.5 - Questões ambientais

Os problemas ambientais estão cada vez mais presentes atualmente, a cada reportagem nova que é publicada uma boa parte está relacionada a desastres, que muitas das vezes são causadas pelas mãos do homem.

Diante desses problemas, aumenta a preocupação de mudar os velhos hábitos e surge a criação de movimentos ligados ao desenvolvimento consciente (THYEN TSAI, 2013).

Há amplo consenso entre os cientistas de que o aquecimento global é causado principalmente pela atividade humana. Em particular, a queima de combustíveis fósseis aumenta os níveis atmosféricos de dióxido de carbono e de outros gases do efeito estufa (VEJA, 2019).

O grande consumo de cimento Portland tem gerado preocupações relacionadas a seu processo produtivo, dado que uma das etapas mais importantes, a clinquerização, requer a queima de matérias-primas (calcário e argilas) a uma temperatura de aproximadamente 1.500 °C. A outra parcela é resultante predominantemente da queima de combustíveis no forno de clinquerização, onde a chama atinge uma temperatura de até 2.000 °C (SINIC, 2011).

A indústria da construção é uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais. Estima-se internacionalmente que entre 40 % e 75 % dos recursos naturais existentes são consumidos por esse setor, resultando assim em uma enorme geração de resíduos (MENDES, 2013).

Segundo levantamento do IBGE, o setor da construção civil cresceu 2 % no segundo trimestre de 2019 em relação ao mesmo período do ano passado. É estimulante observar que o setor tem adensado sua importância em muitos países em função da percepção com relação à necessidade de ações orientadas pelos princípios de sustentabilidade. É cada vez maior o número de políticas públicas em diferentes países como Inglaterra, Alemanha, Japão, China, Índia orientadas por princípios de sustentabilidade que demandam de numerosas empresas novos materiais e processos (ABRAINC, 2019).

No Brasil, o setor da construção civil é responsável por 4,2 % do PIB, 20 % das exportações e gera cerca de um milhão de empregos. (SILVA *et al.*, 2011)

A produção de cimento apresenta impacto elevado em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o dióxido de carbono, que corresponde a quase o total dos GEE emitidos (ABDI, 2012). As emissões dessa indústria em nível mundial são estimadas em cerca de 5 % do total das emissões antrópicas de carbono (WBCSD, 2010).

No Brasil, a indústria de cimento foi responsável por 29,7 % das emissões de CO<sub>2</sub> de processos industriais em 2012 (BRASIL, 2014). A emissão de CO<sub>2</sub> é

responsável por 65 % do total de gases do efeito estufa (ALIABDO *et al*, 2016). A indústria de cimento Portland é uma das 5 maiores responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> que causam mudanças climáticas (SILVA, 2016).

Os geopolímeros em relação à sustentabilidade, é interessante, pois o processo de geopolimerização é energeticamente menos intensivo (em comparação ao processo de produção do cimento Portland, por exemplo) e, principalmente, poderiam fazer uso de materiais cujo aproveitamento tem se transformado em uma questão de interesse mundial, que são justamente os resíduos industriais (DOMBROWSKI *et al.*, 2006, KOMNITSAS *et al.*, 2007, DUXSON *et al.*, 2007, PACHECO-TORGAL *et al.*, 2008).

Os polímeros inorgânicos, possuem vantagens ecológicas e físico-químicas quando comparados ao cimento Portland. As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de ser produzidos à temperatura ambiente (ou até 80 °C) sem aparente liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Alguns estudos apontam o uso de geopolímeros com potencial para reduzir até 80 % das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto convencional. Além disso, os geopolímeros não utilizam cimento Portland, na sua produção, e podem aproveitar resíduos industriais ricos em silicatos e aluminatos (SILVA, 2016).

## 2.2 - ARGILA DO RIO GUAMÁ

O Rio Guamá forma uma típica paisagem ribeirinha amazônica. É do Guamá que sai parte da água que abastece a região metropolitana de Belém e seus mais de dois milhões de habitantes. Na sua margem direita se situa o campus principal da Universidade Federal do Pará, à altura de Belém. O Rio Guamá percorre por vários municípios do nordeste do Pará (PINHO, 2014), observa-se na Figura 2.6.

A população da Amazônia tem fortes laços com os cursos d'água, utilizando-os como fonte de recurso, via de circulação, espaço de lazer, sociabilidades etc. (FERREIRA, 1995).



Figura 2.6 - Extensão do Rio Guamá.  
Fonte: GOOGLE MAPS (s/d).

O solo é um dos mais básicos e importantes recursos naturais, de papel destacado dentro dos ecossistemas e para a sociedade (OLIVEIRA, 2010). A argila encontrada nos solos é matéria-prima utilizada na fabricação de uma grande série de produtos cerâmicos. As razões para isto são: a plasticidade, a resistência mecânica após a queima, possibilita a aplicação de técnicas de processamento simples, e é disponível em grandes quantidades (VIERA, 2000).

As argilas são consideradas materiais com grande capacidade de modificação superficial, o que possibilita a formação de uma gama de produtos, e por isso, os argilominerais vêm ganhando espaço nas áreas de pesquisa (MORAES, 2014).

Há uma diversidade de características das argilas (DONDI *et al.*, 2008), principalmente as de argilas plásticas, conhecidas como argilas de bolas, usadas na tecnologia de porcelana (LAURSEN *et al.*, 2019). O termo argila esférica é usado para descrever argilas caulínicas sedimentares de grão fino e altamente plásticas (MURRAY, 2007).

A NBR 12653 define argila calcinada como uma pozolana artificial proveniente da calcinação de argilas submetidas a temperaturas entre 500 °C e 900 °C, garantindo sua reatividade (ABNT, 2015).

Argilas do município de São Miguel do Guamá são constantemente exploradas para a fabricação de cerâmica vermelha (SEBRAE, 2008).

Durante a decomposição térmica das argilas, a água é liberada para o ambiente, ao invés do CO<sub>2</sub>, que é liberado durante a decarbonatação de calcário no processo de produção de clínquer (SABIR *et al.*, 2001). As argilas desenvolvem boa reatividade

pozolânica quando são calcinadas devido à formação de fase amorfa reativa denominada metacaulinita (MK) (SABIR *et al.*, 2011).

As argilas são classificadas, geralmente, com teor de areia. Por exemplo, as argilas mais arenosas são denominadas de argilas “não plásticas” e as argilas menos arenosas são denominadas de argilas “plásticas” (VIEIRA, 2009).

A argila é considerada como um bem mineral de uso social por sua importância na construção civil, principalmente para os setores de habitação, saneamento e transportes (SILVA, 2007). Com este minério, são fabricados blocos, telhas, lajotas, pisos, entre outros materiais consumidos em grande escala nos processos construtivos usuais (BARGA, 2018).

A abundância de argila bruta na superfície terrestre torna a argila calcinada uma das mais promissoras alternativas com potencial de substituição do cimento em matrizes cimentantes (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

### **2.2.1 - Composição química e funcional**

De acordo com PINHEIRO (2003), a argila é a fração do solo, cujas partículas apresentam um diâmetro inferior a 0,002 mm e que adquire plasticidade em contato com a água. A fração argila, no entanto, não é constituída só de partículas que apresentam plasticidade. É constituída também de diversos tipos de partículas, que podem ser classificadas em substâncias inorgânicas (argilominerais e minerais não argílicos) e substâncias orgânicas (BETINI, 2007).

As argilas apresentam em sua composição inúmeros elementos que são responsáveis pelas suas colorações, ou seja, argilas brancas podem ser ricas em carbonato de cálcio ou magnésio, as esverdeadas contêm óxido de cromo, as rosadas óxidos de ferro, cada uma dessas substâncias dará uma qualidade especial a argila (CARVALHO, 2009).

As argilas comuns têm mineralogia variável, com grau médio de seleção podendo conter silte e areia (VISA, 2001). É de grande importância a composição química das argilas para se ter uma estimativa do comportamento deste material e suas funções (PEDROTI, 2011)

As argilas naturais são compostas basicamente de argilominerais de composição variável, sílica livre (sendo o quartzo cristalino com partícula superior a 10 micrômetros), carbonatos com partícula de tamanho ultrafino, feldspatos (representado

pelos alcalinos e alcalinos terrosos), micas não hidratadas (como biotita e muscovita), compostos de ferro e titânio, sais solúveis, matéria orgânica e resíduos carbonáticos (PEDROTI, 2011).

### 2.2.2 - Tratamento térmico

A calcinação da argila provoca modificações em sua estrutura e torna-a adequada ao estudo em meio aquoso, visto que não ocorre expansão em água, minimizando o desfolhamento de suas lâminas, e aumentando com isto a estabilidade da argila (ARAUJO *et al.*, 2012).

Durante o aquecimento até 200 °C, toda a água adsorvida à superfície da argila é eliminada. A 450 °C, inicia-se a reação de desidroxilação, que é completada a 600 °C, ocorrendo um colapso na sua estrutura original, convertendo-se em metacaulinita, uma forma com menor cristalinidade (SANTOS, 1992). Na Figura 2.7, verifica-se a ocorrência da reação de desidroxilação.

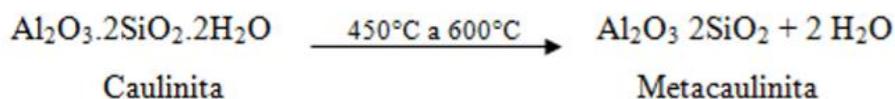


Figura 2.7 - Transformação de Caulinita em Metacaulinita, pelo tratamento térmico.  
Fonte: SANTOS (1992).

Os estudos de ELIMBI *et al.* (2011), mostraram que a resistência à compressão de um geopolímero à base de metacaulinita aumenta com a temperatura de desidroxilação até 700 °C e decresce a partir daí.

Segundo PAIVA *et al.* (2008), a modificação de argilas é uma área que tem recebido bastante atenção, pois permite a pesquisa de novos materiais e novas aplicações.

A Caulinita é o principal argilomineral componente das argilas, sendo a responsável pela elevada resistência mecânica dos produtos cerâmicos (SANTOS, 1989). A unidade estrutural básica da caulinita é constituída de uma camada de tetraedros de sílica e de uma camada de octaedros de alumínio (gipsita), onde as hidroxilas desta são parcialmente substituídas pelos oxigênios dos vértices dos tetraedros da camada de sílica. A unidade estrutural da caulinita, do ponto de vista

iônico, é neutra. Frequentemente, as caulinitas são constituídas de 6 unidades estruturais (PINHEIRO, 2003). Segundo REED (1995), a fórmula estrutural é  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ .

### 2.3 - CAULIM FERRÍTICO

As maiores produtoras de caulim no Brasil (Figura 2.8), situam-se na Região Norte do País, são elas: a CADAM e IMERYS, representando cerca de 96 % da produção nacional. O Estado do Pará representou cerca de 92,5 % do total da produção interna do caulim beneficiado brasileiro em 2015, com 1,67 Mt produzidas (FARIA, 2019).

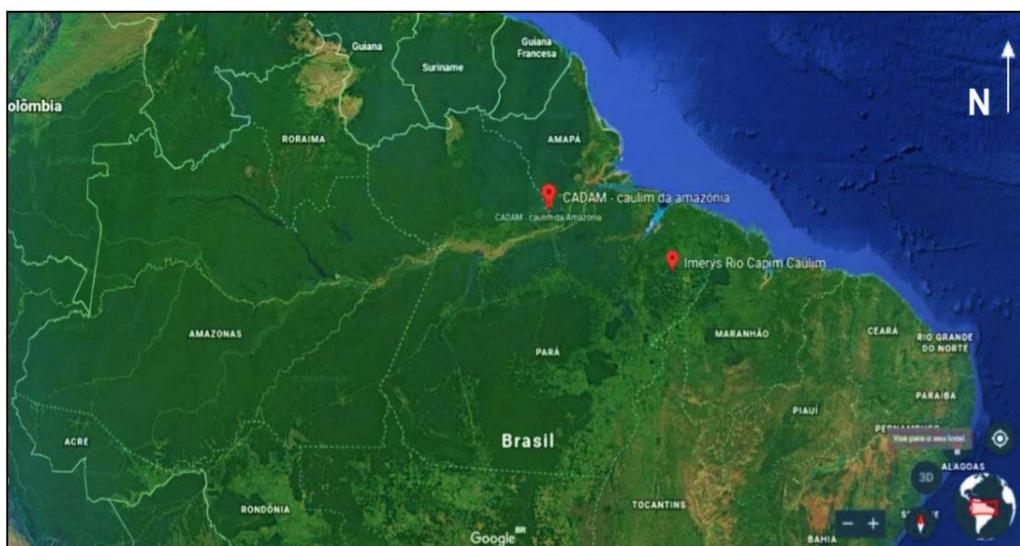


Figura 2.8 - Localização das duas maiores companhias de mineração de caulim do Brasil.

Fonte: FARIA (2019).

As reservas mundiais de caulim são abundantes e de ampla distribuição geográfica. Apenas 4 países detêm 95 % de um total estimado de aproximadamente 15 bilhões de toneladas (Estados Unidos (53 %), Brasil (28 %), Ucrânia (7 %) e Índia (7 %)). As reservas brasileiras de caulim (medida + indicada + inferida) são de 24,5 bilhões de toneladas, das quais 9,4 bilhões são medidas (MÁRTIRES, 2009).

O Brasil é o sexto maior produtor de caulim, com aproximadamente 2.400 milhões de toneladas em 2010, cerca de 7,8 % da produção mundial, que é de 31 milhões de toneladas (IBRAM, 2012, SIMINERAL, 2012).

Os Estados do Pará, Amazonas e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando, respectivamente, com 56 %, 41 % e 2 % do total (MÁRTIRES, 2009).

Este minério, possui dois tipos de gêneses: caulim primário (oriundo de alteração de rochas *in situ*) e caulim secundário (formado pela deposição da argila já formada), onde cada um destes depósitos irão apresentar características peculiares, lhes direcionando diferentes destinos nos segmentos industriais (FARIAS, 2019).

A região amazônica dispõe de grandes e valiosos depósitos de caulim que por sua natureza geológica, são adequadas ao seu uso mais nobre, a cobertura de papel (BARATA *et al.*, 2005). Neste processamento três resíduos são gerados: um rico em quartzo, outro constituído principalmente em caulim com granulometria grosseira e o terceiro formado por caulim com alto teor de ferro (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2015).

No caso do caulim ferruginoso ou ferrítico, existe um aproveitamento de 15 % para ser usado com o caulim industrialmente aproveitável, quando ele apresenta um teor baixo em ferro, ficando o restante disposto na mina após a exploração. Tendo em vista um melhor aproveitamento do caulim duro ferruginoso, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas no sentido de melhorar a utilização do flint em vários processos tecnológicos, como na produção de zeólitas (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2015). Na Figura 2.9, observa-se a composição do solo.

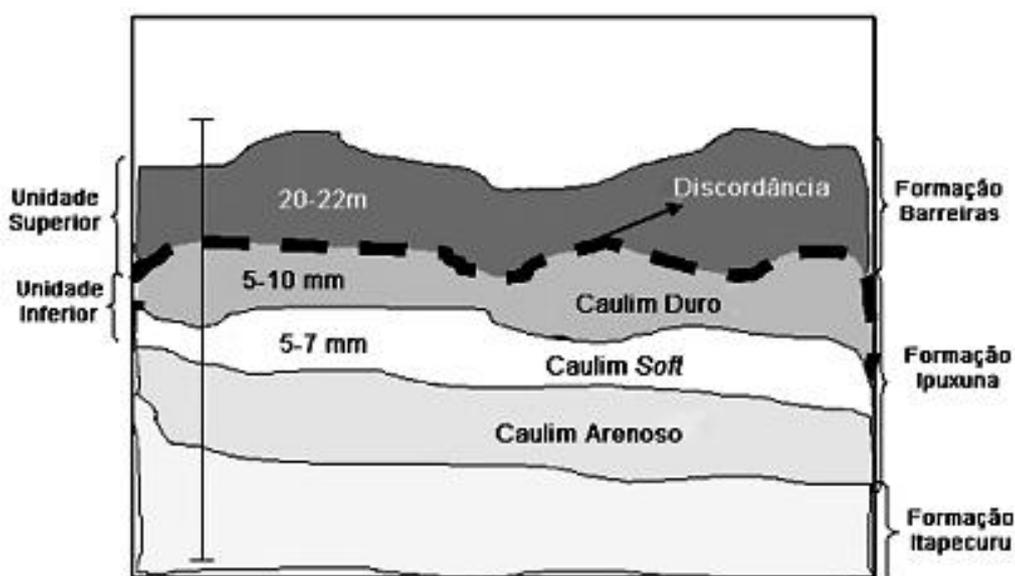


Figura 2.9 - Perfil da composição longitudinal do solo.  
Fonte: CARNEIRO *et al.* (2003).

O caulim duro ou flint, não é geralmente utilizado, por apresentar elevadas concentrações de ferro (PINHEIRO *et al.*, 2016). Busca-se desenvolver alternativas para a sua aplicação, devido aos impactos que ele pode trazer ao meio ambiente, além do mais, ele tem grande potencial para ser utilizado como fonte de aluminossilicato (DOYLE *et al.*, 2016).

A argila de caulim, é uma matéria-prima barata e abundante encontrada em numerosas localizações geográficas e tem sido usado com sucesso na síntese de aluminossilicatos (DOYLE *et al.*, 2016). E o caulim duro ferruginoso é considerado como estéril, em função do elevado teor de ferro, e sedimentos argiloarenosos sotopostos (Formação Barreiras) (CARNEIRO *et al.*, 2003).

### 2.3.1 - Composição química e funcional

O Caulim é uma rocha formada por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Contém outras substâncias sob forma de impurezas como areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio etc. (MÁRTIRES, 2009).

Com composição química teórica de 39 % de  $Al_2O_3$ , 46, 54 % de  $SiO_2$  e 13, 96 % de  $H_2O$ , no entanto, podem ser observadas pequenas variações em sua composição (LUZ *et al.*, 2005 apud DIAS, 2015). O Caulim Duro Ferruginoso (CDF), tem um teor de  $Fe_2O_3$  de 10, 36 % (CARNEIRO *et al.*, 2003).



Figura 2.10 - Caulim duro ferrítico, beneficiado.

O caulim é formado essencialmente pelo grupo caulinita (Figura 2.11), provavelmente é um dos seis minerais mais abundante da crosta terrestre e no Brasil, o estado do Pará (região amazônica) destaca-se por ter um dos mais importantes depósitos internacionais de caulim para as indústrias, principalmente, a de papel (SCHACKOW, 2015).

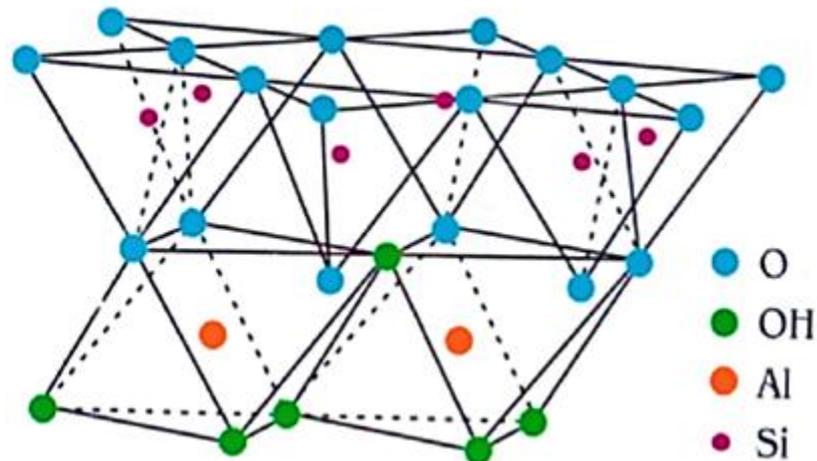


Figura 2.11 - Estrutura da caulinita.  
Fonte: SCHACKOW (2018).

### 2.3.2 - Tratamento térmico

O tratamento térmico é necessário para que ocorra a desidroxilação do caulim. A desidroxilação é o processo que transforma o caulim em metacaulim (AZEVEDO, 2017). DAVIDOVITS (1999) propõe utilizar temperatura de 750 °C por 6 h para aumentar a fase amorfa da metacaulinita, que é considerada a fase mais reativa e esta é necessária para o processo de geopolimerização. Na Figura 2.12, observa-se o processo de desidroxilação

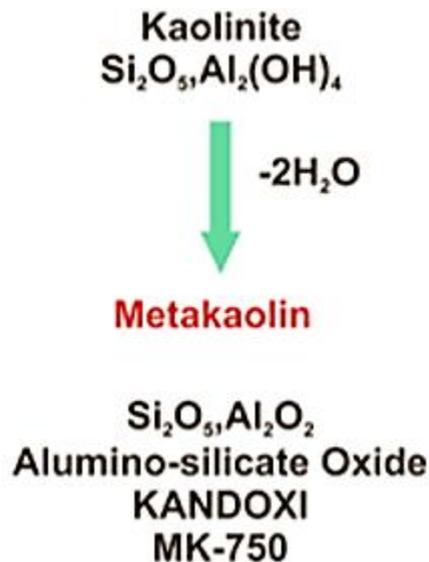


Figura 2.12 - Transformação de caulinita em metacaulim, pelo processo de calcinação.  
 Fonte: DAVIDOVITS (1977).

#### 2.4 - CINZA VOLANTE

A NBR-12653 classifica os materiais pozolânicos quanto a sua origem, dividindo em três classes, descritas da seguinte forma:

- a) Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.
- b) Classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoeletricas.
- c) Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores (ABNT, 2014).

Cinzas volantes são as cinzas de textura mais fina arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e abatidas por precipitadores eletrostáticos com rendimento teórico entre 95 % a 99 % (SILVA, 1999).

Há mais de 2000 anos atrás, os Romanos utilizavam um material nas construções, chamado “Pulvis Puteolonis”, que era uma espécie de cinza de origem vulcânica, encontrada em uma localidade que foi denominada de Pozzuoli, na Baía de Nápoles – Itália (POZO-FLY, 2019).

O conjunto de resíduos provenientes da combustão do carvão, relativos aos diferentes processos de queima, abrange cinzas volantes, cinzas de fundo (também chamada de cinza pesada), escória de caldeira, cinzas de combustão em leito fluidizado e outras partículas sólidas finas (ASOKAN, SAXENA & ASOLEKAR, 2005; SAJWAN *et al.*, 2006). Destes resíduos os principais são as cinzas volantes, Figura

2.13, partículas com tamanhos inferiores a 100 µm que acabam transportadas junto com os gases da combustão (FROENER, 2016).



Figura 2.13 - Cinzas volantes.  
Fonte: IndiaMART (2019).

A utilização de cinza volante, quando aplicada em substituição parcial do cimento Portland, é tida como uma solução que pode minimizar o processo de elevação de temperatura (JUNCKES, 2015), além de dá um destino para esse resíduo industrial. As cinzas volantes não comercializadas são transferidas, através de caminhões, para as minas de carvão desativadas, onde são estocadas (SILVA, 1999).

A ação da temperatura, devido à queima do carvão, faz com que as cinzas (compostas de argilas, materiais silicosos e aluminosos) adquiram propriedades pozolânicas. Devido às suas características mineralógicas e granulométricas peculiares, a cinza volante geralmente não necessita passar por nenhum processo de beneficiamento antes de ser utilizada como substituição mineral (JUNCKES, 2015).

#### **2.4.1 - Composição química e funcional**

A composição química dessas cinzas varia de acordo com as características do carvão calcinado, além dos processos de combustão utilizados (FROENER, 2016). As cinzas de carvão compõem-se basicamente por compostos de silício e alumínio, baixos teores em ferro e menores quantidades por Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K (SILVA, 1999). Elas são pobres em nitrogênio e têm pH entre 4,5 e 12, e apresentam uma pequena porção de carbono não queimado dentro do intervalo de 1 % a 2 % (PIRES *et al.*, 2002).

As características estruturais e a composição química destas cinzas, que vão determinar as suas propriedades tecnológicas (PIRES *et al.*, 2002).

De acordo com a ASTM (C618) as cinzas volantes podem ser classificadas em duas categorias: Cinzas volantes de classe C e F. Quando a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro for superior a 70 %, a cinza volante é classificada como de Classe F. Na cinza volante de Classe C esta soma precisa ser superior a 50 % (ACI 232.2R, 1996).

As da Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedecem também aos requisitos aplicáveis na NBR 12653/1992 (SILVA, 2017). A construção civil já vem adotando o aproveitamento de resíduos impactantes para a produção de cimentos e argamassas. A cinza volante classe C vem sendo utilizada na formulação de geopolímeros, essa nova classe de material apresenta propriedades ligantes semelhantes aos cimentos convencionais (BRITO *et al.*, 2019).

A maior parte das publicações relacionadas utiliza cinzas volantes em substituição parcial ou total ao metacaulim, por exemplo, com reduções significativas (> 40 %) de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa. (HABERT *et al.*, 2011, SINGH *et al.*, 2015).

## 2.5 - GRANULOMETRIA DAS MATERIAIS-PRIMAS

A granulometria é um fator determinante no comportamento mecânico dos corpos geopoliméricos (COSTA *et al.*, 2013).

Como forma de combater problema, como à elevada porosidade, a qual permite a degradação das armaduras resultante do ataque químico, fenômeno denominado de carbonatação, que provoca a diminuição do pH, este decréscimo induz a corrosão e a permeabilidade ao ataque dos cloretos, utiliza-se a adição de materiais com uma granulometria mais fina e que reage quimicamente com os compostos do meio (BASTOS, 2011).

É importante se usar uma mistura muito bem graduada de agregados para se obter um material de qualidade. O material vai buscar grande parte da sua resistência mecânica ao grau de compactação da mistura dos diferentes tipos de partículas que compõem tradicionalmente o compósito, sendo necessário que as dimensões e frequências relativas das partículas se encaixem dentro de um determinado fuso

granulométrico. Independentemente das questões de ordem técnica, estas exigências implicam obviamente um razoável agravamento de custos (PINTO, 2006).

WANG *et al.* (2008), ao comparar geopolímeros produzidos com metacaulinitas com diferentes tamanhos de partícula e superfície específica, variando de 285 m<sup>2</sup>/kg a 512 m<sup>2</sup>/kg, observaram uma maior resistência à compressão nos geopolímeros baseados em precursores com maior área superficial. Esse resultado indica a importância da finura do metacaulim na produção de geopolímeros com alta resistência.

## 2.6 - ATIVAÇÃO ALCALINA

A ativação alcalina é uma alternativa para tornar materiais aluminossilicosos em materiais com propriedades cimentantes (BEZERRA *et al.*, 2013).

A utilização de ativadores alcalinos dentro das margens estritamente necessárias representa uma melhoria na qualidade do material, assegurando que todo sódio inserido à mistura é consumido na composição da estrutura. Isso também é responsável por diminuição severa dos impactos ambientais na produção de geopolímeros (HABERT *et al.*, 2011).

Os ativadores alcalinos mais utilizados na obtenção de materiais geopoliméricos são os hidróxidos de sódio ou de potássio, o carbonato de sódio, os silicatos de sódio ou de potássio, e, sobretudo suas misturas (PINTO, 2004).

A natureza e a concentração dos ativadores influenciam diretamente na estrutura e nas propriedades mecânicas dos produtos originados na geopolimerização. A escolha do ativador utilizado no processo de geopolimerização deve basear-se nas características dos precursores de origem. A concentração do ativador alcalino é muito importante no processo de geopolimerização (BEZERRA *et al.*, 2013).

De acordo com GASTEIGER *et al.* (1992) a solubilidade do material aluminossilicato aumenta com o aumento da concentração dos íons hidróxidos. Por outro lado, elevada concentração do ativador provoca atraso na formação do geopolímero, pois o aumento na concentração de espécies iônicas limita a mobilidade dos íons promovendo o retardo na formação de estruturas coaguladas (ALONSO *et al.*, 2001). Além do mais, existe uma dosagem ótima para a concentração de hidroxilas, a partir da qual o excesso pode causar perda de resistência (PALOMO *et al.*, 1999), além de necessitar mais tempo ou temperatura para evaporar o excesso de água em

decorrência da maior viscosidade da solução (XU e VAN DEVENTER, 2002 apud XU e VAN DEVENTER, 2003).

VAN JAARSVELD *et al.* (1997) complementam que, para ocorrer a polimerização, é necessário um meio fortemente alcalino para ser possível dissolver certa quantidade de sílica e alumina, assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas. Este ambiente pode ser conseguido por meio do uso de soluções alcalinas, de forma simples ou combinada, denominadas ativadoras.

Normalmente se usam como ativadores a mescla entre silicatos (líquido ou sólido dissolvido em água) e hidróxidos (sólido com dissolução em água) (CRIADO *et al.*, 2005). O silicato da solução composta é uma fonte adicional de SiO<sub>2</sub> ao sistema, enquanto o hidróxido garante alta alcalinidade à solução (LIMA *et al.*, 2005).

É necessário uma solução alcalina muito forte, algo na faixa de pH 13, uma vez que a sílica é altamente solúvel em um meio básico, já a alumina é solúvel tanto nas faixas extremas ácida quanto na básica. Desta forma o caminho lógico é o emprego de uma solução alcalina que contenham elementos que complementam as carências do material precursor (WENG e SAGOE-CRENTSIL, 2007, SEVERO, 2013).

### **2.6.1 - Silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)**

A composição química do silicato de sódio é usualmente expressa pela relação ponderal ou molecular entre os óxidos de silício e sódio. Pertence ao grupo químico de silicatos e seu aspecto é líquido viscoso incolor a turvo acinzentado ou marrom avermelhado. Sua aplicação na indústria cerâmica é como agente redutor de viscosidade, sua aplicação é geradora de grande economia e qualidade no produto (PORTANTIOLO, 2013).

Os ativadores com silicato ocasionam o aumento da sílica e uma aceleração no processo de geopolimerização, pois a sílica reage com a alumina livre na mistura (SEVERO, 2013). Assim, os silicatos ajudam na produção de uma nova estrutura com mais Si e maior resistência mecânica (SANTOS e MESQUITA, 2019).

Tabela 2.3 - Especificações técnicas do silicato de sódio.

PRODUTO			ONU	0000
Silicato de Sódio			Nº RISCO	00
			Nº CAS	1344-09-8
Características	Mínimo	Máximo	Unidade	Método
Densidade	1, 563	1, 600	g/l	C.F
° Bé	52	54	-	C.F
Viscosidade	900	1350	cPs	C.F
Na <sub>2</sub> O	14, 6	15, 2	%	C.F
SiO <sub>2</sub>	32	34	%	C.F
H <sub>2</sub> O	50, 8	53, 4	%	C.F
Sólidos Totais	46, 6	49, 2	%	C.F
Relação Ponderal	2, 15	2, 40	-	C.F
Teor de Ferro	-	120	Ppm	C.F
pH em solução 1 %	-	> 11	-	C.F

C.F: Conforme fabricante – Dados transcritos da Especificação Técnica do fabricante que se encontra em nosso poder.

Solubilidade: Miscível com água em qualquer proporção, apresentando uma solução alcalina

Fonte: GOTAQUÍMICA (2017).

### 2.6.2 - Hidróxido de sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio é um sólido branco, cristalino, altamente tóxico e corrosivo, com ponto de fusão igual a 318 °C. Ele é bastante solúvel em água, e essa dissolução é muito exotérmica, ou seja, libera energia na forma de calor. Por reagir lentamente com o vidro é aconselhável que conserve em frascos feitos de plástico (FOGAÇA, 2019).

As soluções de hidróxido de sódio são consideradas bases fortes. A produção mundial anual de hidróxido de sódio é da ordem de 60 milhões de toneladas (PRADO FILHO, 2019).

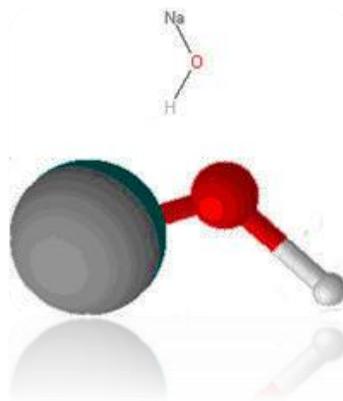


Figura 2.14 - Fórmula do hidróxido de sódio – NaOH.  
Fonte: FOGAÇA (2019).

Tabela 2.4 - Especificações do hidróxido de sódio de alta pureza.

<b>Hidróxido de Sódio</b>	
Teor	98,4 %
Ferro (Fe)	5 ppm
Potássio (K)	0,038 %
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	10 ppm
Cálcio (Ca)	0,005 %
Cloreto (Cl)	10 ppm
Compostos nitrogenados (N)	0,00057 %
Mercúrio (Hg)	0,06 ppm
Magnésio (Mg)	0,002 ppm
Carbonato (CO <sub>3</sub> )	0,08 %
Aparência Lentilhas brancas	

Fonte: FERREIRA (2018).

As soluções ativadoras que fornecem o meio alcalino para que as reações de policondensação ocorram podem ser de hidróxido de sódio. O hidróxido de sódio apresenta a vantagem de menor custo para sua aquisição e a um maior consentimento quanto à sua influência no mecanismo de ativação (LIVI, 2013).

## 2.7 - EFLORESCÊNCIA

A eflorescência é uma das chamadas patologias que se dá na construção civil e se apresenta como manchas brancas em revestimentos cerâmicos, alvenaria e concreto. Ela é o produto de reações químicas que acontecem da seguinte maneira: alguns materiais, como a cal, podem ter alto teor de hidróxido de cálcio. Esse hidróxido, em presença de água, é dissolvido. Quando a água evapora, ele vai para a superfície do

material e reage com o dióxido de carbono do ar. Com essa reação, surgem as manchas (POINTER, 2018).

Esse fenômeno ocorre devido à coexistência de umidade, sais solúveis, porosidade dos materiais e possibilidade de evaporação. É considerado um dano, por alterar a aparência do elemento onde se deposita, mas há casos em que os sais constituintes podem ser agressivos e causar degradação profunda, principalmente quando ficam no interior das peças, exercendo expansão (RIBEIRO *et al.*, 2017).

Existem várias causas para a degradação de uma edificação. É importante que se tenha conhecimento sobre as diversas causas de origem da enfermidade, para que um correto diagnóstico das manifestações patológicas seja feito. Tais causas podem ser classificadas em diretas ou indiretas. Os sais solúveis contidos nos tijolos, pedras e argamassas são causas diretas e químicas, que, com auxílio da umidade, podem provocar eflorescências (GEWEHR, 2004). Na Figura 2.15, tem a demonstração desse fenômeno.



Figura 2.15 - Eflorescência no concreto.  
Fonte: SABAI (2017).

A combinação de umidade, sais e condições ambientais suscetíveis de causar ciclos de cristalização ou dissolução trazem muitos malefícios a uma edificação, seja ela antiga, nova, ou até em fase de execução (RIBEIRO, 2017).

A eflorescência resulta na formação de sulfatos de elementos alcalinos, sódio ou potássio, que se manifestam após aplicação dos produtos em obra ou após umedecidos no estoque da fábrica (chuva, manhãs úmidas). Tem uma forma de depósitos pulverulentos mais ou menos espessos. São sais solúveis em água e, por isso,

desaparecem após as primeiras chuvas, quando as faces manchadas estão sujeitas ao tempo. Este tipo de eflorescência manifesta-se mais nos períodos de inverno ou tempo úmido (COSTA, 2013).

Podemos diferenciar três tipos de eflorescências: Eflorescência de Secagem, Eflorescência de Secador e Eflorescência de Forno.

- Eflorescência de Secagem: As eflorescências se formam por secagem ao ar livre nas argilas sem moldar. Chamam-se “véus de secagem”. Um exemplo é a película salina que se forma sobre as partes protuberantes de um torrão de argila que seca espontaneamente no campo.
- Eflorescência de Secador: Contrariamente ao caso anterior, nas eflorescências de secador a secagem se produz pela ação do ar industrial, possivelmente contaminado, sobre argilas que foram tratadas mecanicamente. Nelas ficaram impressas as características geométricas e texturas impostas pelas máquinas.
- Eflorescência de Forno: As eflorescências de secador, formadas na superfície dos tijolos crus, se consolidam no forno pela ação de diversas reações, se transformam no que denominamos eflorescências de forno. Por tanto as eflorescências de forno são eflorescências de secador consolidadas, tornadas permanentes pela queima no ambiente e nas condições térmicas específicas de um forno determinado (VERDUCH; SOLANA, 2000).

## 2.8 - INFLUÊNCIAS NA SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO

Segundo KHALE e CHAUDHARY (2007), o principal elemento constituinte da estrutura geopolimérica é a estrutura Al-O-Si. A taxa de formação do polímero é influenciada por muitos parâmetros. As reações são aceleradas pela temperatura de cura, teor de água, razão alcalina, o teor inicial de sólidos, a relação silicato e aluminato, o pH e o tipo de ativadores utilizados. Esses parâmetros têm efeitos substanciais sobre as propriedades finais dos geopolímeros.

As propriedades mecânicas dos materiais geopoliméricos dependem do cátion alcalino ( $\text{Na}^+$ ) ou ( $\text{K}^+$ ), da razão de Davidovits  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e das condições com que a reação ocorre podendo ser a temperatura ambiente ou utilizando-se câmara térmica com outras temperaturas de processamento do geopolímero (DAVIDOVITS, 2008; SALIH *et al.*, 2014). A concentração da solução de NaOH influencia diretamente na velocidade

de ganho de resistência, uma vez que afeta a taxa e a quantidade de dissolução (SILVA *et al.*, 2014).

### 2.8.1 - Razão molar

As relações molares têm grande impacto na síntese dos geopolímeros, pois a quantidade de SiO<sub>2</sub> disponível influencia diretamente a formação das redes poliméricas Si-O-Al, sendo parâmetro necessário para a produção de geopolímeros para uma determinada aplicação, como concretos geopoliméricos de altíssima resistência, materiais de construção à prova de fogo, entre outras (SANTOS, 2017).

Dependendo da razão SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as propriedades podem variar de cerâmicas a plásticas sendo possível produzir materiais aglomerantes quando esta relação está entre 3,5 a 4,5. Assim, os geopolímeros são candidatos às aplicações dos produtos do cimento Portland (DAVIDOVITS, 1994).

A relação entre SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O é responsável pelo grau de geopolimerização através da dissolução (DUXSON *et al.*, 2007). Essa relação possui influência maior que a razão de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a temperatura (ZHANG *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2013). Segundo LONGHI (2015), as relações de óxidos correspondem ao principal parâmetro para formação de geopolímeros. No trabalho de BIGNO (2008), foi observado que as relações SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O e SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são responsáveis pela resistência à compressão. Segundo Wang *et al.* (2005, apud BIGNO, 2008, p. 132), a concentração molar do NaOH, tem a capacidade de alterar a resistência à flexão, compressão e a densidade aparente.

Conforme o trabalho de SUNG *et al.* (2015), este investiga os efeitos da concentração do ativador alcalino e como a proporção do hidróxido de sódio e silicato de sódio na mistura influencia na resistência a compressão. Para isso, ele usa como variável controle a concentração do ativador hidróxido de sódio e a proporção entre as soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio. As Eq. referentes aos cálculos das razões molares, são:

– Cálculo da razão  $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$

Esta razão é a quantidade de SiO<sub>2</sub> presente no ativador e precursor, pela quantidade de alumínio Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente no precursor. Eq. (2.2):

$$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = \frac{(A+B)/M.M \text{ do } SiO_2}{(C)/M.M \text{ do } Al_2O_3} \quad (2.2)$$

Sendo:

A = % SiO<sub>2</sub> precursor x massa do precursor;

B = % SiO<sub>2</sub> ativador x massa do ativador;

C = % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> precursor x massa do precursor.

– **Cálculo da razão  $\frac{SiO_2}{Na_2O}$**

Tem-se que primeiramente calcular a % de Na<sub>2</sub>O, presente nas soluções, e então calcular a relação entre SiO<sub>2</sub> presente no ativador e precursor, pela Na<sub>2</sub>O presente no precursor. Eq. (2.3):

$$\frac{SiO_2}{Na_2O} = \frac{(A+B)/M.M \text{ do } SiO_2}{(D)/M.M \text{ do } Na_2O} \quad (2.3)$$

Sendo:

A = % SiO<sub>2</sub> precursor x massa do precursor;

B = % SiO<sub>2</sub> ativador x massa do ativador;

D = % Na<sub>2</sub>O precursor x massa do precursor.

– **Cálculo da razão  $\frac{Na_2O}{Al_2O_3}$**

Usa-se o mesmo raciocínio anterior, em relação a % de Na<sub>2</sub>O, e então calcular a relação entre Na<sub>2</sub>O presente no precursor, pelo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente no precursor. Eq. (2.4):

$$\frac{Na_2O}{Al_2O_3} = \frac{(D)/M.M \text{ do } Na_2O}{(C)/M.M \text{ do } Al_2O_3} \quad (2.4)$$

Sendo:

C = % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> precursor x massa do precursor.

D = % Na<sub>2</sub>O precursor x massa do precursor.

– **Cálculo da razão  $\frac{Al_2O_3}{Na_2O}$**

Usa-se o mesmo raciocínio anterior, em relação a % de  $Na_2O$ , e então calcular a relação entre  $Al_2O_3$  presente no precursor, pelo  $Na_2O$  presente no precursor, no entanto, inverte a equação, ou seja, o denominador torna o numerador, e o numerador torna o denominador. Eq. (2.5):

$$\frac{Al_2O_3}{Na_2O} = \frac{(C)/M.M \text{ do } Al_2O_3}{(D)/M.M \text{ do } Na_2O} \quad (2.5)$$

Sendo:

C = %  $Al_2O_3$  precursor x massa do precursor.

D = %  $Na_2O$  precursor x massa do precursor.

– **Cálculo da razão  $\frac{Si}{Al}$**

Esta razão nada mais é do que, a divisão por 2, da razão  $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ . Eq. (2.6)

$$\frac{Si}{Al} = \left[ \frac{(A+B)/M.M \text{ do } SiO_2}{(C)/M.M \text{ do } Al_2O_3} \right] / 2 \quad (2.6)$$

Sendo:

A = %  $SiO_2$  precursor x massa do precursor;

B = %  $SiO_2$  ativador x massa do ativador;

C = %  $Al_2O_3$  precursor x massa do precursor.

### 2.8.2 - Água

A função da água é garantir a capacidade aglutinante dos vários constituintes das argamassas no estado fresco, de forma a conferir a consistência necessária para a sua aplicação. A quantidade de água utilizada em argamassas permite diminuir ou dificultar a trabalhabilidade das mesmas, assim como variar a sua resistência (CUNHA, 2013).

A água presente na solução ativadora não exerce influência direta na reação de policondensação, entretanto seu teor pode afetar as propriedades da mistura tanto no

estado fresco, melhorando a trabalhabilidade; quanto endurecido, em que a resistência à compressão é prejudicada (HARDJITO; RANGAN, 2005).

### 2.8.3 - Temperatura e tempo de cura

A temperatura e o tempo de cura desempenham papéis importantes no desenvolvimento dos geopolímeros (KHALE e CHAUDHARY, 2007). A temperatura entre 30 °C e 90 °C durante a cura é especialmente benéfica nas primeiras horas, e favorece a dissolução das espécies reativas, possibilitando a produção de geopolímeros com maiores resistências à compressão (PALOMO, GRUTZECK e BLANCO, 1999; WANG, SHAH e MISHULOVICH, 2004; BAKHAREV, 2005). No entanto, van Jaarsveld, van Deventer e Lukey (2002) relatam que o prolongamento da cura, em temperaturas elevadas, pode levar à quebra da estrutura granular dos geopolímeros, resultando em desidratação e retração excessiva devido à contração de gel, fazendo com que os geopolímeros apresentem menores resistências mecânicas.

Dependendo das condições de síntese e de cura, os geopolímeros possuem facilmente valores de resistência mecânica na ordem dos 60 MPa a 80 MPa em compressão simples e 7 MPa a 8 MPa em flexão/tração. A sua fabricação é normalmente realizada a temperatura e pressão ambiental, podendo, eventualmente, aplicarem-se pressões no caso de se desejar um produto com porosidade muito baixa. Em muitos casos 70 % da resistência final é atingida nas primeiras 4 horas, embora se verifique um acréscimo com a idade, no entanto é menos significativo do que no cimento Portland (PINTO, 2002).

## 2.9 - GEOPOLIMERIZAÇÃO

A geopolimerização é um processo de endurecimento e estabilização de estruturas de base alumino-silicato, alternativa ou complementar dos sistemas ligantes comuns que utilizam cimento Portland ou cal (MARQUES *et al.*, 2014).

O processo de geopolimerização envolve a reação química sob condições altamente alcalinas dos minerais Al-Si, produzindo a ligação polimérica Si-O-Al (SILVA, 2015). Observa-se a reação de geopolimerização na Figura 2.16.



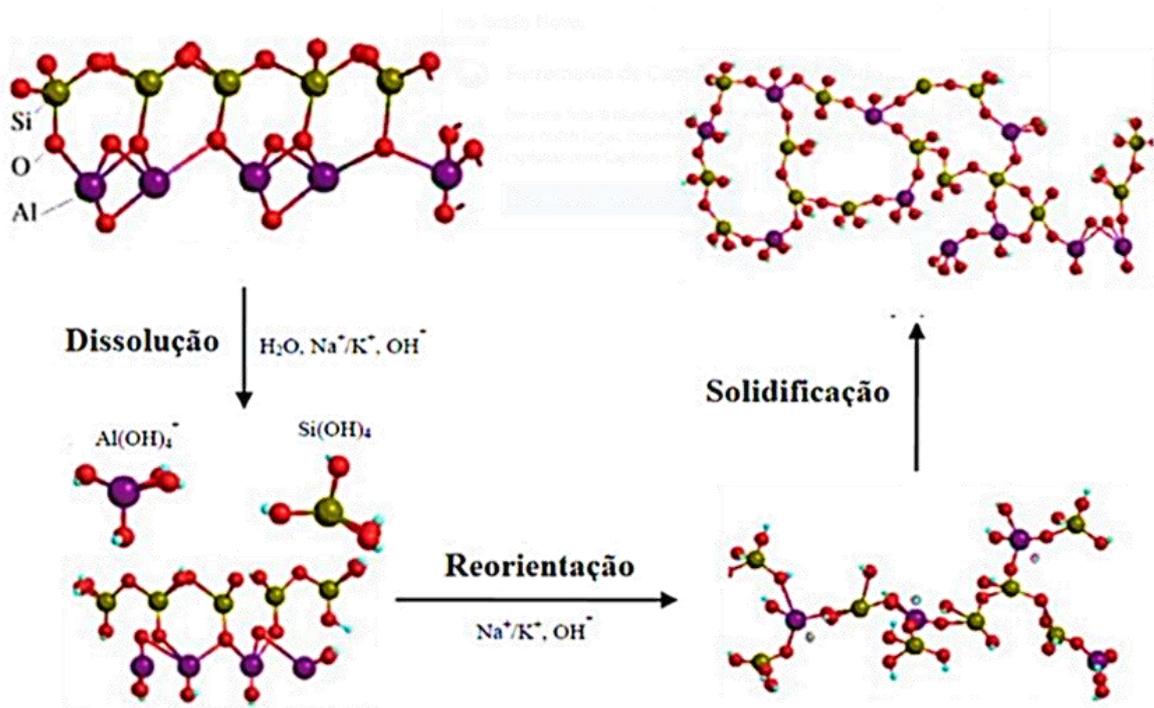


Figura 2.17 - Esquema típico do processo de geopolimerização.  
 Fonte: Adaptado de YAO (2009).

O professor Davidovits concluiu ainda que para a reação de geopolimerização ocorrer era necessário formular, do mesmo modo que nas zeólitas sintéticas, certos critérios de composição, como:

- A razão molar  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  deve encontrar-se entre 4:1 e 6,6:1 na solução aquosa de silicatos, onde “M” é um cátion metálico alcalino;
- O aluminossilicato deve conter alumínio que seja rapidamente solúvel;
- A razão molar global  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  deve estar compreendida entre 1:5,5 e 1:6,5 (PINTO, 2002).

Em geral, a geopolimerização é um processo multifásico complexo, compreendendo uma série de reações de reorientação/solidificação de dissolução (BUCHWALD, 2004; DAVIDOVITS, 1991; DUXSON, 2007):

- A geração de espécies reativas ou ativação alcalina, que é a dissolução de fases amorfas (por exemplo, aluminossilicato) por álcali para produzir sílica e alumina reativas pequenas;
- Reorientação, que é o transporte ou orientação ou condensação de íons precursores em oligômeros; e
- A reação de fixação efetiva, que é o processo de policondensação que conduz à formação de polímeros de aluminossilicato amorfo a semicristalino.

No entanto, estas três etapas podem sobrepor-se uma à outra e ocorrem quase simultaneamente, tornando assim difícil isolar e examinar cada uma delas separadamente (PALOMO, 1999).

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos deste capítulo serão apresentados os materiais para o desenvolvimento dos geopolímeros, as técnicas empregadas para o procedimento e caracterização das matérias-primas e das amostras geopoliméricas obtidas.

#### 3.1 - MATERIAIS

##### 3.1.1 - Matérias-primas

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado argila do Rio Guamá, coletada nas margens direita do rio, caulim ferrítico e cinzas volantes (coletada das caldeiras do processo Bayer), ambas fornecidas pelas refinarias de alumínio do município de Barcarena, no estado do Para. Como ativador alcalino foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH) adquirido no Comercial Aliança de Produtos Químicos e o silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) adquirido na Parquímica Indústria.

#### 3.2 - BENEFICIAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

O processo de beneficiamento, foi aplicado na argila do Rio Guamá e no caulim ferrítico, para retirar impurezas, umidade e ajustar as respectivas granulometrias. Para o beneficiamento da argila e do caulim ferrítico foi utilizado balança analítica da marca Gehaka, forno tipo mufla da marca Quimis, moinho de bolas da marca CIMAQ e peneira de #150 mesh. Não foi realizada o processo de beneficiamento nas cinzas volantes, porque suas partículas, já possuem o diâmetro médio de 24  $\mu\text{m}$ , sendo resíduo do alto forno, foi considerado como material seco.

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 apresenta as etapas realizadas no beneficiamento da matéria-prima argila do Rio Guamá e o caulim ferrítico.

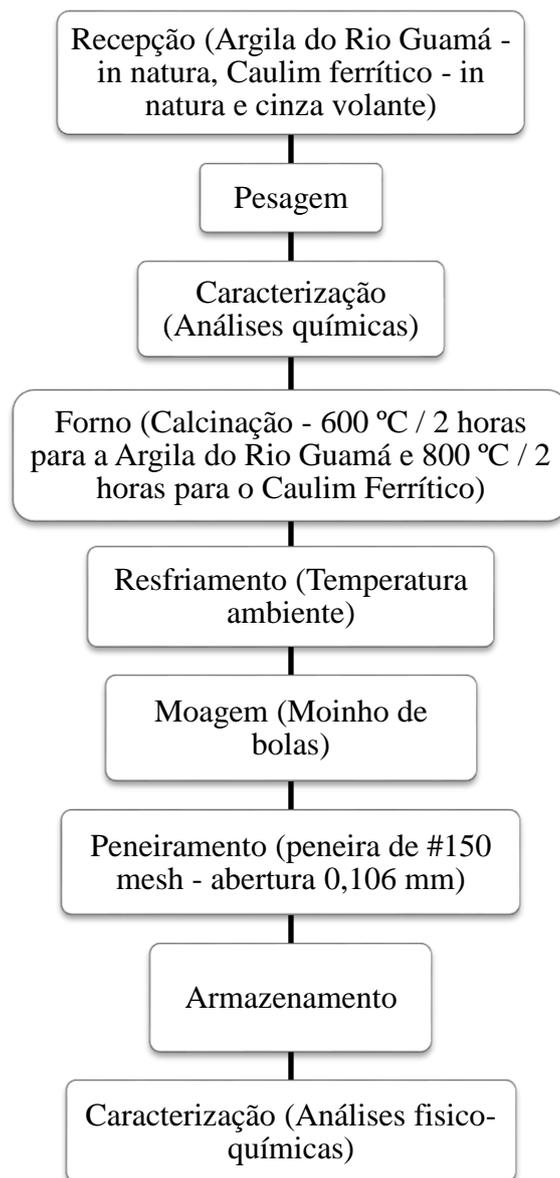


Figura 3.1 - Fluxograma de beneficiamento da matéria-prima: argila do Rio Guamá e caulim ferrítico.

### 3.2.1 - Calcinação da argila do Rio Guamá e do caulim ferrítico

A argila e o caulim ferrítico recebidos *in natura* foram pesadas e retiradas amostras para a análise química. Na sequência a argila foi levado ao forno, em tabuleiros de alumínio, para calcinação a temperatura de 600 °C por um período de 2 horas, seguindo a metodologia utilizada por SANTOS (1992) e DAVIDOVITS (1999). O procedimento de calcinação usado para o beneficiamento do caulim ferrítico, teve como base o procedimento de calcinação citado por DAVIDOVITS (1999), que propõe utilizar temperatura de 750 °C por 6 horas para aumentar a fase amorfa da metacaulinita.

Como forma de reduzir esse tempo de calcinação, foi aplicado aumento de temperatura, 800 °C por 2 horas. A etapa de ativação térmica dos minerais argilosos tem grande importância na obtenção dos corpos geopoliméricos, pois este processo aumenta a reatividade do material, além de que ocorre a padronização da matéria-prima. O procedimento de calcinação seguiu a metodologia utilizada por SANTOS (1992) e DAVIDOVITS (1999). Os materiais calcinados foram resfriados na temperatura ambiente.

### 3.2.2 - Cominuição da argila do Rio Guamá e do caulim ferrítico

O material calcinado foi cominuído usando moinho de bolas da marca CIMAQ por 30 minutos e peneirado em peneira de #150 mesh. A Figura 3.2 (a, b) é composta pela argila do Rio Guamá e o caulim ferrítico após o tratamento de beneficiamento.

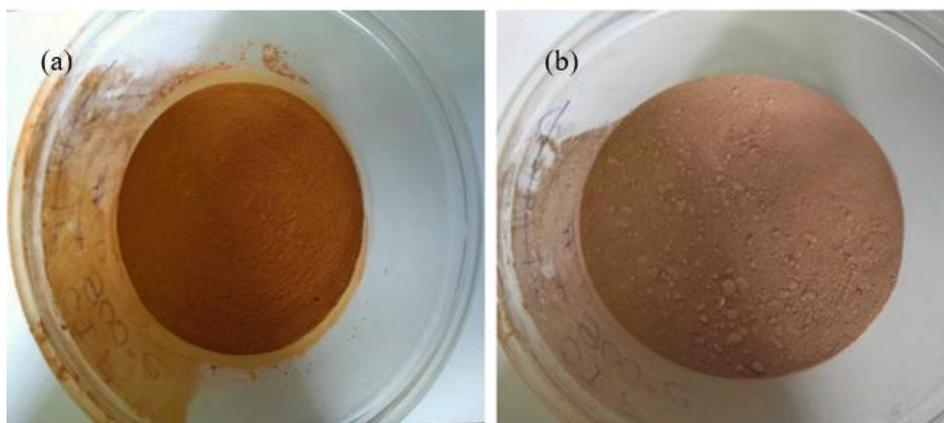


Figura 3.2 - Argila do Rio Guamá (a) e caulim ferrítico (b) beneficiado.

## 3.3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.3.1 - Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram caracterizadas, *in natura* e após o processo de tratamento térmico, a fim de conferir, as fases presentes na composição, para qualificar e quantificar seus componentes. A Figura 3.3 apresenta o fluxograma das etapas de caracterização das matérias-primas.

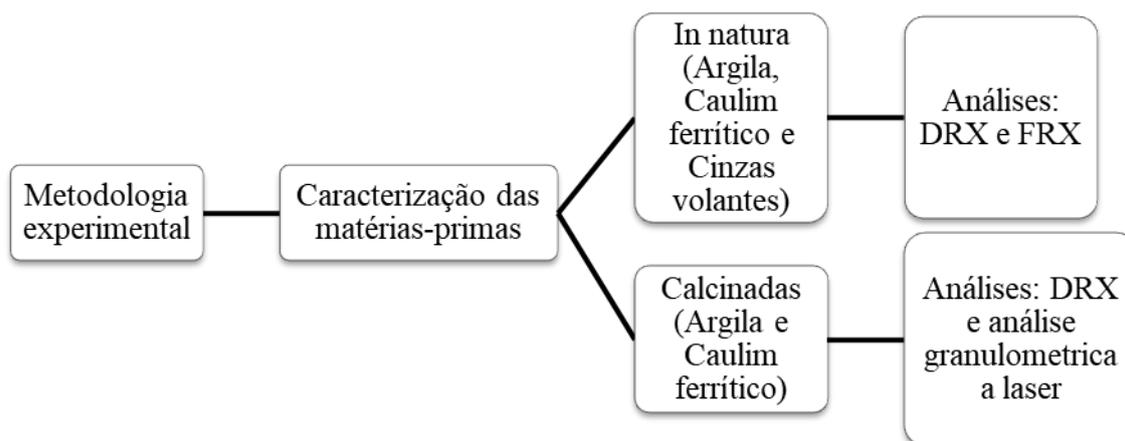


Figura 3.3 - Fluxograma da caracterização das matérias-primas.

### 3.3.2 - Fluorescência de raios-X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X permite identificar os elementos presentes na amostra, fornecendo uma proporção qualitativa desses componentes. O equipamento utilizado foi o philips pw 1390 com tensão aplicada de 60 kV e 30 mA. Para determinar a perda ao fogo utilizou-se a estufa de modelo DIMATE, à temperatura de 110 °C durante 24h.

### 3.3.3 - Difração de raios-X (DRX)

O estudo cristalográfico foi feito a partir da difração de raios X. Os difratogramas de raios - X desta pesquisa foram obtidos pelo método onde um átomo é bombeado por um feixe de elétrons ou por raios-X primários, sendo estes capazes de expulsar um elétron da camada mais interna deste átomo. Assim, outro elétron de uma camada mais externa ocupa esta vacância e assim sucessivamente. Esta emissão de luz na região do espectro eletromagnético corresponde aos raios-X (0,1-100nm), no difratômetro da marca D8 Advance da Bruker com geometria Bragg-Brentano e detector LynxEye tubo de Cu, Radiação Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ) Faixa angular ( $^{\circ}2\theta$ ) = 5-75°, Voltagem do tubo = 40 kV, Corrente do tubo = 40 mA com fenda divergente = 0,6mm, Fenda Soller = 2,5° e Filtro  $K\beta$  de Ni. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0.2s. tempo total de coleta = 714,4s. Esse equipamento pertence ao laboratório de física pesquisa da UFPA. A identificação dos minerais foi feita com auxílio do software X-pert high Score Plus.

### 3.3.4 - Análise granulométrica a laser

A análise granulométrica a laser da argila do Rio Guamá e do caulim ferrítico foi realizada para fornecer o tamanho e a distribuição das partículas das amostras estudadas. A análise granulométrica foi realizada utilizando o granulômetro a laser ANALYSETTE 22/FRITSCH, do LAMIGA (Laboratório de Mineralogia Geoquímica e Aplicações) do Museu de Geociências da UFPA. O software do equipamento gera uma Tabela onde estão contidas as informações granulométricas da amostra.

### 3.3.5 - Processo de elaboração dos geopolímeros

Na elaboração dos geopolímeros foi utilizado o mesmo processo tanto para argila do Rio Guamá como, para o caulim ferrítico. As etapas estão apresentadas na Figura 3.4. As misturas foram homogeneizadas em um misturador mecânico. Os corpos de prova foram moldados utilizando cilindros, com as seguintes dimensões 100 mm de altura e diâmetro de 50 mm, para determinação da resistência à compressão após o 7º dia e o 28º dia de cura a temperatura ambiente.

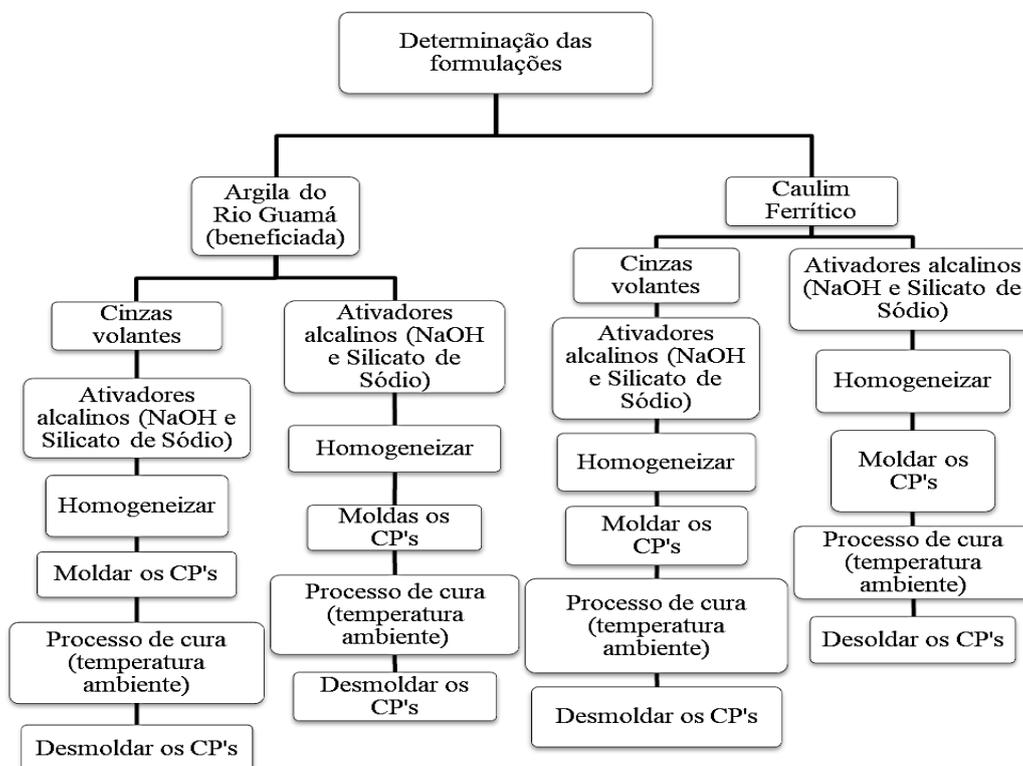


Figura 3.4 - Fluxograma do processo de elaboração dos geopolímeros.

A Tabela 3.1 apresenta as proporções em percentagem das composições dos geopolímeros de argila do Rio Guamá e de caulim ferrítico, respectivamente.

Tabela 3.1 -Arranjo das misturas, dos geopolímeros de argila do Rio Guamá e caulim ferrítico.

<b>Formulações</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Cinzas volantes Classe – C (%)</b>
<b>A – 1</b>	100 %	0 %
<b>A – 2</b>	90 %	10 %
<b>A – 3</b>	80 %	20 %
<b>A – 4</b>	60 %	40 %
<b>A – 5</b>	50 %	50 %
<b>Formulações</b>	<b>Caulim ferrítico (%)</b>	<b>Cinzas volantes Classe – C (%)</b>
<b>C – 1</b>	100 %	0 %
<b>C – 2</b>	90 %	10 %
<b>C – 3</b>	80 %	20 %
<b>C – 4</b>	60 %	40 %
<b>C – 5</b>	50 %	50 %

Na Tabelas 3.2 estão listadas as proporções de composição para a formação dos geopolímeros de argila do Rio Guamá e na Tabela 3.3 as respectivas razões molares de formulação.

Tabela 3.2 - Proporção das misturas, dos geopolímeros de argila do Rio Guamá.

<b>Misturas</b>	<b>Argila do Rio Guamá</b>	<b>Cinza Volante</b>	<b>Silicato de sódio</b>	<b>Hidróxido de sódio 8 M</b>
<b>A – 1</b>	780 g	-	360 mL	120 mL
<b>A – 2</b>	702 g	78 g	360 mL	120 mL
<b>A – 3</b>	624 g	156 g	360 mL	120 mL
<b>A – 4</b>	468 g	312 g	360 mL	120 mL
<b>A – 5</b>	390 g	390 g	360 mL	120 mL

\*A Tabela está calculada para elaboração em triplicata, para cada formulação.

Tabela 3.3 - Razões molares das formulações de argila.

<b>MISTURAS</b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Si/Al</b>
<b>A – 1</b>	8,8001	4,3885*10 <sup>-4</sup>	0,5555	1,7999	4,4004
<b>A – 2</b>	8,6939	10,3977	0,5626	1,7774	4,3469
<b>A – 3</b>	8,5841	7,6375	0,5698	1,7548	4,2920
<b>A – 4</b>	8,3557	4,8514	0,5848	1,7097	4,1778
<b>A – 5</b>	8,2370	4,0506	0,5927	1,6871	4,1185

Na Tabela 3.4 estão listadas as proporções de composição para a formação dos geopolímeros de caulim ferrítico e na Tabela 3.5 as respectivas razões molares de formulação.

Tabela 3.4 - Proporção das misturas, dos geopolímeros de caulim ferrítico.

<b>Misturas</b>	<b>Caulim Ferruginoso</b>	<b>Cinza Volante</b>	<b>Silicato de sódio</b>	<b>Hidróxido de sódio 8 M</b>
<b>C – 1</b>	780 g	-	360 mL	120 mL
<b>C – 2</b>	702 g	78 g	360 mL	120 mL
<b>C – 3</b>	624 g	156 g	360 mL	120 mL
<b>C – 4</b>	468 g	312 g	360 mL	120 mL
<b>C – 5</b>	390 g	390 g	360 mL	120 mL

\*A Tabela está calculada para elaboração em triplicata, para cada formulação.

Tabela 3.5 - Razões molares das formulações de caulim ferruginoso.

<b>MISTURAS</b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Si/Al</b>
<b>C – 1</b>	3,1944	3,1322*10 <sup>-4</sup>	0,2825	3,5394	1,5972
<b>C – 2</b>	3,4015	7,6515	0,2991	3,3429	1,7007
<b>C – 3</b>	3,6345	5,7981	0,3178	3,1464	1,8172
<b>C – 4</b>	4,2002	3,9274	0,3631	2,7533	2,1001
<b>C – 5</b>	4,5483	3,3897	0,3911	2,5568	2,2741

A Figuras 3.5 apresenta os corpos de provas, de geopolímeros a base de argila do rio Guamá e a Figura 3.6 os corpos de provas, de geopolímeros a base de caulim ferrítico em seus respectivos moldes, respeitando o período mínimo de cura. Os corpos de prova foram deixados em temperatura ambiente, para ocorrer o processo de cura, ou seja, para que ocorra o endurecimento e estabilização dos geopolímeros, ficando moldados até o momento das análises de ensaio de resistência a compressão. A primeira triplicata de cada formulação foi desmoldada com 6 dias e a segunda triplicata de cada formulação foi desmoldada com 27 dias.



Figura 3.5 - Corpos de prova moldados, de geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.



Figura 3.6 - Corpos de prova moldados, de geopolímeros a base de caulim ferrítico.

A Figuras 3.7 apresentam os corpos de provas, de geopolímeros a base de argila do Rio Guamá e a Figura 3.8 os corpos de provas, de geopolímeros a base de caulim ferrítico, desmoldados. O primeiro ensaio de resistência a compressão foi realizado no 7º dia de cura e o segundo após o 28º dia.



Figura 3.7 - Corpos de prova desmoldados, de geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.

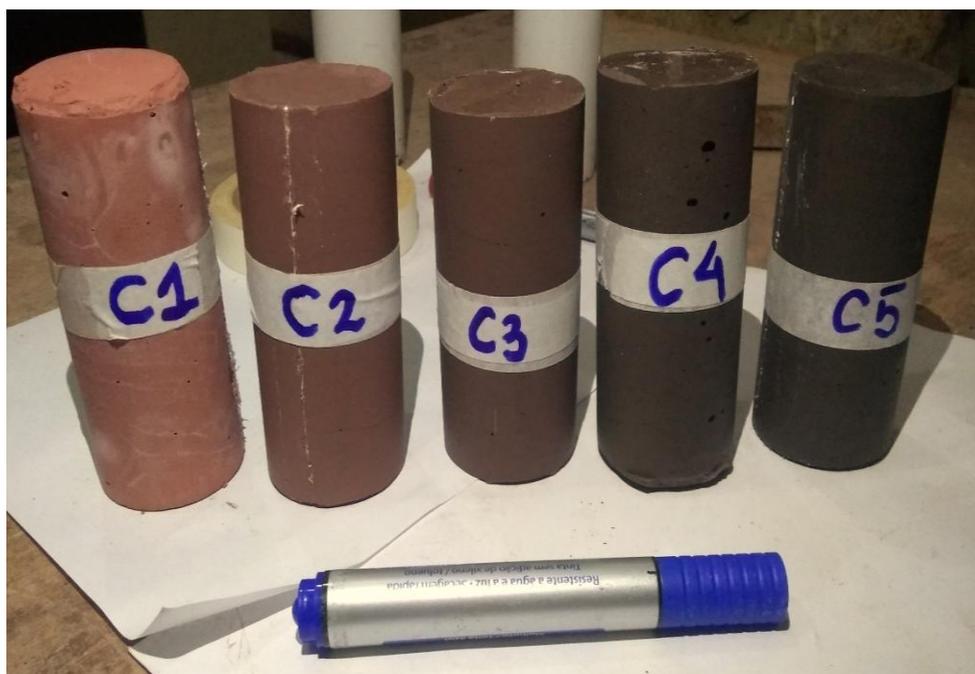


Figura 3.8 - Corpos de prova desmoldados, de geopolímeros a base caulim ferrítico.

### 3.3.6 - Caracterização dos geopolímeros

Para a caracterização dos geopolímeros foram realizados o ensaio mecânico e a análise microestrutural. A Figura 3.9 apresenta o fluxograma de caracterização dos geopolímeros

Os ensaios de resistência a compressão foram realizados na prensa hidráulica manual digital 100t i-3001-c, da marca Contenco.

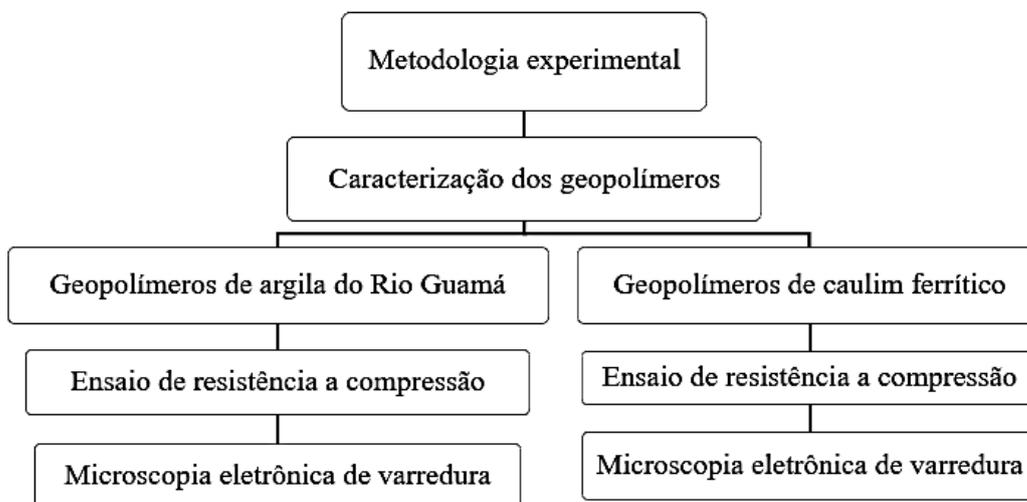


Figura 3.9 - Fluxograma de caracterização dos geopolímeros.

#### 3.3.6.1 - Ensaio de resistência a compressão

Os parâmetros utilizados para os ensaios de resistências à compressão dos geopolímeros estão de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABTN)-NBR 7215/1996. No entanto, a NBR 7215/1996 foi elaborada para ser aplicada em argamassas de cimento, especificando o método de determinação da resistência à compressão de cimento Portland. Porém, foi possível aplicar o ensaio nas amostras de geopolímeros, já que não se utilizou areia e nem qualquer agregado. Os ensaios de resistência a compressão foram realizados na prensa hidráulica manual digital 100t i-3001-c, na Empresa Totalmix Controle Tecnológico em Concretos e Argamassas. A Figura 3.10, apresenta a foto de um corpo de prova, posicionado na prensa para o ensaio.



Figura 3.10 - Corpo de prova geopolimérico na prensa (a) e amostra A-5 fraturada (b).

### 3.3.6.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

A análise de falhas em materiais depende de técnicas analíticas, que possibilitem a determinação da composição química da amostra, correlacionando com sua microestrutura. A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite analisar a morfologia das amostras em escala micrométrica. Para análise dos geopolímeros produzidos foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Hitachi, modelo TM 3000, e acoplado a ele o software EDS (espectrometria por dispersão de energia de raios-x) para realização de análise química qualitativa e semi-quantitativa das cargas ou contaminantes. As imagens das superfícies foram obtidas por elétrons retroespalhados (BSE), mais sensíveis ao número atômico e acelerada a voltagem de 15 kV ou 5 kV.

O estudo de superfície pode ser efetuado utilizando microscopia ótica (MO), no entanto quando a superfície é rugosa, os desníveis dificultam as análises ao MO. Isso porque tem pouca profundidade de foco o que limita uma boa imagem.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho são apresentados em quatro partes: na primeira tem-se a composição mineralógica e análise granulométrica da argila do Rio Guamá, na segunda a composição mineralógica e análise granulométrica da caulín ferroginoso, na terceira a composição mineralógica da cinza volante e na quarta as análises para os geopolímeros obtidos

#### 4.1 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICAS DA ARGILA DO RIO GUAMÁ

Esse sedimento pode ser formado por apenas um mineral argiloso, mas o mais comum é ser formado por uma mistura deles, o predomínio de um, e suas variações na composição, pode ser modificada por vários fatores externos (BRANCO, 2014).

##### 4.1.1 - Fluorescência de raios-X (FRX)

A Tabela 4.1 apresenta a composição química da argila do Rio Guamá, em percentagem mássica dos respectivos óxidos juntamente com o resultado de Perda ao Fogo.

Tabela 4.1 - Composição química da argila do Rio Guamá, determinada por FRX.

Composição química (%)	Argila do Rio Guamá
SiO <sub>2</sub>	63,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,52
CaO	0,82
MgO	0,20
MnO	0,11
TiO <sub>2</sub>	1,54
K <sub>2</sub> O	4,32
PF (perda ao fogo)	4,95

A composição química, encontrada para a argila do Rio Guamá, ficou bem semelhante aos valores da composição de Correia *et al.* (2005), para argilas da região

norte de Santa Catarina, Santos *et al.* (2012), para argilas de Marabá-Pa, e Santos *et al.* (2016), para argila do estado de Sergipe da jazida Pau-de-leite.

A sílica é o composto predominante na argila do Rio Guamá, vindo após uma presença de alumina, no qual indica a provável presença de argilominerais tais como: caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e o quartzo.

Há presença de ferro (7,52 %) também, este devido ao caráter ferrítico da argila, o que já era de se esperar, devido a sua coloração avermelhada, após a queima.

Os minerais argilosos (argilominerais) como a caulinita são responsáveis pela alta plasticidade das massas cerâmicas, uma vez que suas pequenas partículas são envelopadas por água adsorvida em sua superfície, fazendo um efeito lubrificante entre elas (SANTOS *et al.*, 2012).

Os minerais predominantes foram quartzo, caulinita e a muscovita. Outras fases de menor importância, que também estavam presentes foram a hematita e a anátasio.

Vale ressaltar que os valores da análise racional fecham em torno de 93 % devido à difração de raios - X, pois esta técnica não detecta fases que possuem teores inferiores a 5 %, como provavelmente os carbonatos de cálcio e magnésio, comuns em argilas, sendo atribuída a esta diferença devido à presença dos minerais acessórios (SANTOS *et al.*, 2012).

#### **4.1.2 - Difração de raios-X (DRX)**

Nas Figuras 4.1 e 4.2, encontram-se os difratogramas de raio-X, da composição mineralógica da argila fraca, in natura, e a 600 °C, respectivamente.

A Figura 4.1 mostra as fases cristalinas presentes, que são a caulinita, quartzo, muscovita e anátasio. Os picos mais intensos verificados são os de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e de caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). O quartzo tem muita cristalinidade, isso explica os picos intensos, e não significa que seja sua concentração no material.

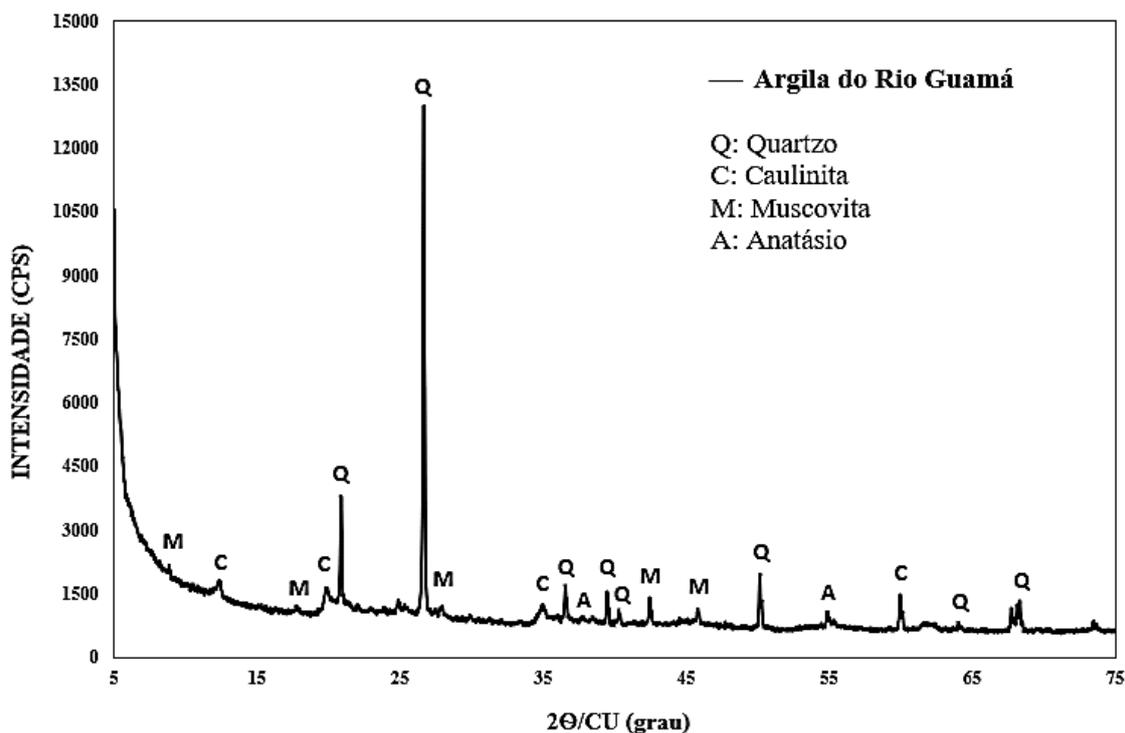


Figura 4.1 - Difratoograma de Raio-X da argila do Rio Guamá.

Rodrigues *et al.* (2004) avaliou sua amostra de argila bentonítica (35-48 mesh), sem tratamento térmico, e seu difratograma de raio-X, apresentou picos bem semelhantes aos encontrados na argila do Rio Guamá. A difração de raios x de alta resolução (Inls) de Balduino (2016), para argila vermelha, também apresentou resultados semelhantes aos encontrados para a argila fraca do Rio Guamá.

A presença de quartzo na composição da argila é considerada uma espécie indesejada, pois o quartzo é definido como um mineral acessório, não sendo considerado um argilomineral (BALDUINO, 2016). Além do mais, os picos de quartzo, por ser intensos, podem interferir na leitura do material, quando o raio-X incide na amostra, mascarando outros elementos.

A presença de quartzo, caulinita e muscovita, é de se esperar devido ao alto teor de sílica (63,89 %) na argila do Rio Guamá.

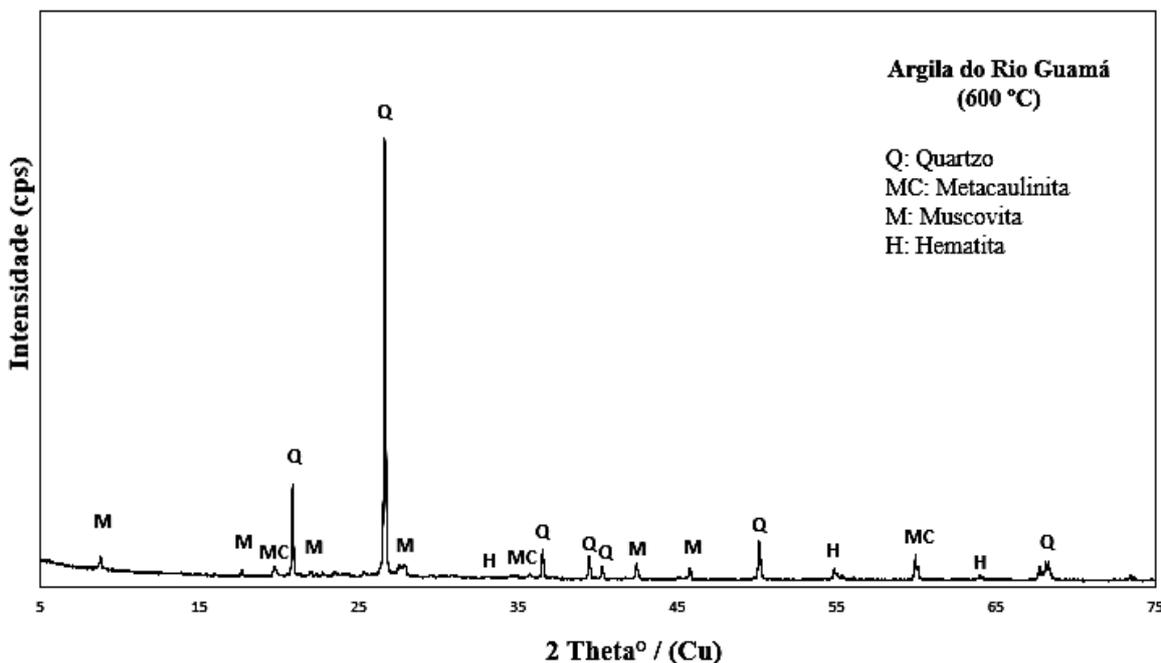


Figura 4.2 - Difratoograma de Raio-X da argila do Rio Guamá, tratada a 600 °C

São várias as propriedades (superfície específica, diâmetro médio, massa volumétrica e cristalinidade) dos produtos argilosos que sofrem modificações com a calcinação a várias temperaturas (VIEIRA, 2013).

A caulinita é a que possui o maior potencial para atividade pozolânica quando calcinado a temperaturas entre 650 °C e 800 °C, dependendo do seu grau de pureza e minerais associados. A argila beneficiada por sedimentação permite produzir argila com menor teor de minerais não argilosos, tais como o quartzo e o feldspato (LOPEZ, 2009).

A calcinação da argila a 600 °C foi satisfatória, devido a destruição parcial da caulinita, que passa a ser metacaulinita. Segundo a literatura apresentada por Davidovits (1999) a argila só se encontra em perfeito estado reativo de geopolimerização, a temperaturas de até 750 °C. A partir desta temperatura, ocorre a total destruição da metacaulinita, e inicia o processo de recristalização, e esta fase não é reativa, o que gera falhas no processo de geopolimerização, acarretando um geopolímero que necessita de grandes intervalos de tempo, para que ocorra a cura. Isso tem seu lado positivo, pois a temperatura de 600 °C, apresenta bom desempenho para a geopolimerização, com isso, há redução de energia para a formulação do material, não necessitando utilizar elevadas temperaturas.

Para a caulinita a desidroxilação termina ao atingir a temperatura de 650 °C (VIEIRA, 2013), e o produto deste processo é a metacaulinita.

As micas atuam como fundentes em temperaturas mais elevadas de sinterização, enquanto o quartzo está relacionado à resistência mecânica e diminuição de retração de queima do corpo cerâmico, formando o chamado esqueleto do corpo cerâmico junto a óxidos alcalinos terrosos durante a formação de fase líquida (SANTOS, 2012).

#### 4.1.3 - Análise granulométrica a laser

Na Figura 4.3, pode-se verificar a curva de distribuição granulométrica das partículas de argila beneficiada observa-se que as partículas, se apresentam em 100 % destas com tamanhos de até 10mm. Sendo que, 10 % das partículas possuem dimensão inferior a 1  $\mu\text{m}$ , 50 % das partículas possuem dimensão inferior a 10  $\mu\text{m}$  e superior a 1  $\mu\text{m}$  e 90 % das partículas possuem dimensão inferior a 10  $\mu\text{m}$ , indicando que essas partículas apresentam uma elevada reatividade.

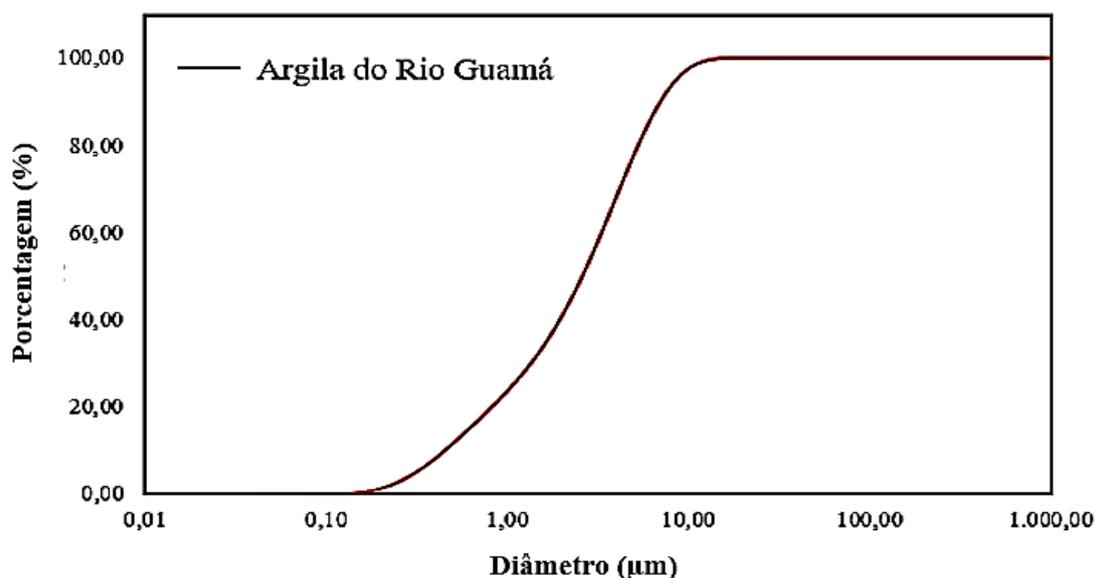


Figura 4.3 - Análise granulométrica a laser da argila do Rio Guamá.

A maior concentração das partículas está nos intervalos de 1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ , considerando que o processo de beneficiamento, foi consideravelmente eficaz quando a eliminação de elementos acessórios, no entanto, não se pode descartar que ainda possua estes elementos no meio.

Estudos realizados por Rodrigues *et al.* (2007) encontraram valores bem próximos para argila chocolate purificada e tratada com hidróxido de amônia (agente dispersante).

## 4.2 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICA DO CAULIM FERRUGINOSO

O caulim é constituído principalmente de caulinita, um silicato de alumínio hidratado, cuja célula unitária é expressa por  $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ . A caulinita é um filossilicato (argilo-mineral) com composição química teórica de 39,50 % de  $Al_2O_3$ , 46,54 % de  $SiO_2$  e 13,96 % de  $H_2O$ ; no entanto, podem ser observadas pequenas variações em sua composição (LUZ *et al.*, 2005). Além da caulinita, podem ocorrer, no mesmo depósito, outros minerais como haloisita- $4H_2O$ , haloisita- $2H_2O$  ou metahaloesita, diquita e nacrita, que apresentam composição química muito similar, porém com diferenças estruturais importantes (SANTOS, 1975).

### 4.2.1 - Fluorescência de raios-X (FRX)

A Tabela 4.2 apresenta a composição química do Caulim Ferruginoso, em percentagem mássica dos respectivos óxidos juntamente com o resultado de Perda ao Fogo.

Tabela 4.2 - Composição química do caulim ferruginoso, determinada por FRX.

Composição química (%)	Caulim Ferruginoso
$SiO_2$	38,57
$Al_2O_3$	36,85
$Fe_2O_3$	10,47
CaO	0,01
MgO	0,00
$TiO_2$	1,13
$Na_2O$	0,13
$P_2O_5$	< 0,001
PF (perda ao fogo)	12,84

Observa-se que o caulim ferruginoso apresenta valores bem significativos quanto a silício e alumínio, com 38,57 % e 36,85 %, respectivamente. Além de possuir também em sua composição, alto teor de ferro (10,47 %), o que caracteriza a sua coloração mais rosada. Devido a esses teores, confirma-se a presença de caulinita e óxidos de ferro, no material.

Os resultados encontrados para o caulim ferruginoso, foram bem semelhantes aos encontrados por Carneiro *et al.* (2003), para o caulim duro ferruginoso da região do Rio Capim no Pará.

#### 4.2.2 - Difração de raios-X (DRX)

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os difratogramas de raio - X do caulim in natura e calcinado a 800 °C, respectivamente.

Os picos mais intensos presentes no caulim são os de caulinita, seguindo de picos de anatásio e hematita.

A haloisita dos caulins brasileiros geralmente contém pequenos teores de ferro, o que lhe confere cor rosada (COELHO *et al.*, 2007). Os picos intensos encontrados no difratograma, pode acobertar outros elementos, como é o caso da haloisita. No entanto, a coloração do caulim, tom rosado, pode ser proveniente do teor de ferro, presente também na hematita.

Os minerais goethita (FeOOH) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), são característicos do caulim ferruginoso, pelo seu teor de ferro.

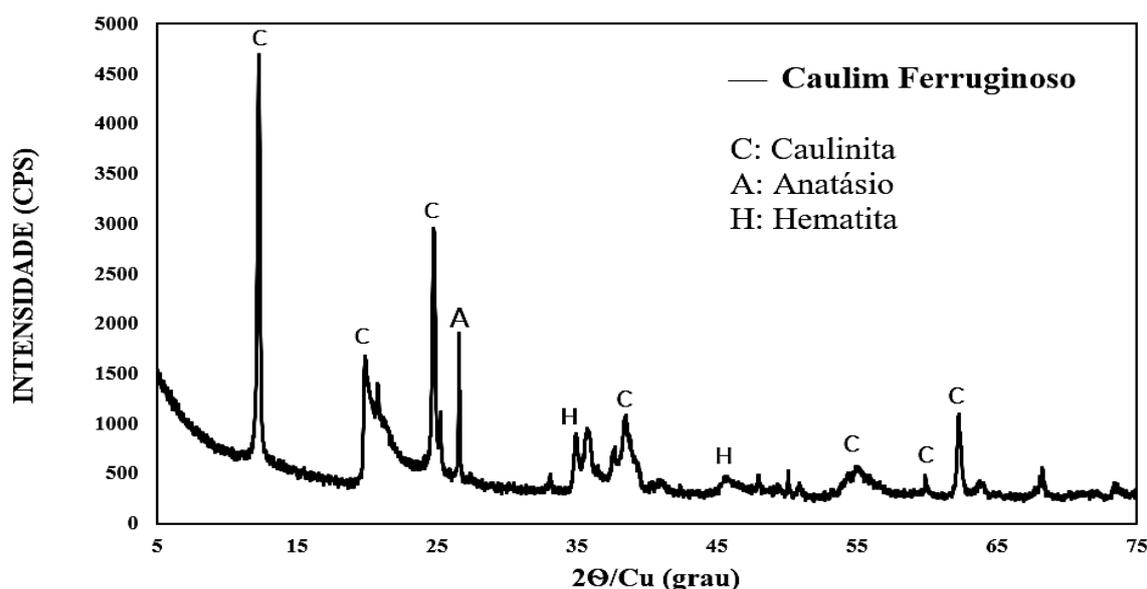


Figura 4.4 - Difratograma de Raio-X do caulim ferruginoso.

Na Figura 4.5 do caulim submetido a temperaturas de 800 °C pode-se observar que os picos de caulinita ficaram menos intensos, característica da destruição estrutural, formando um material com alta reatividade, metacaulinita.

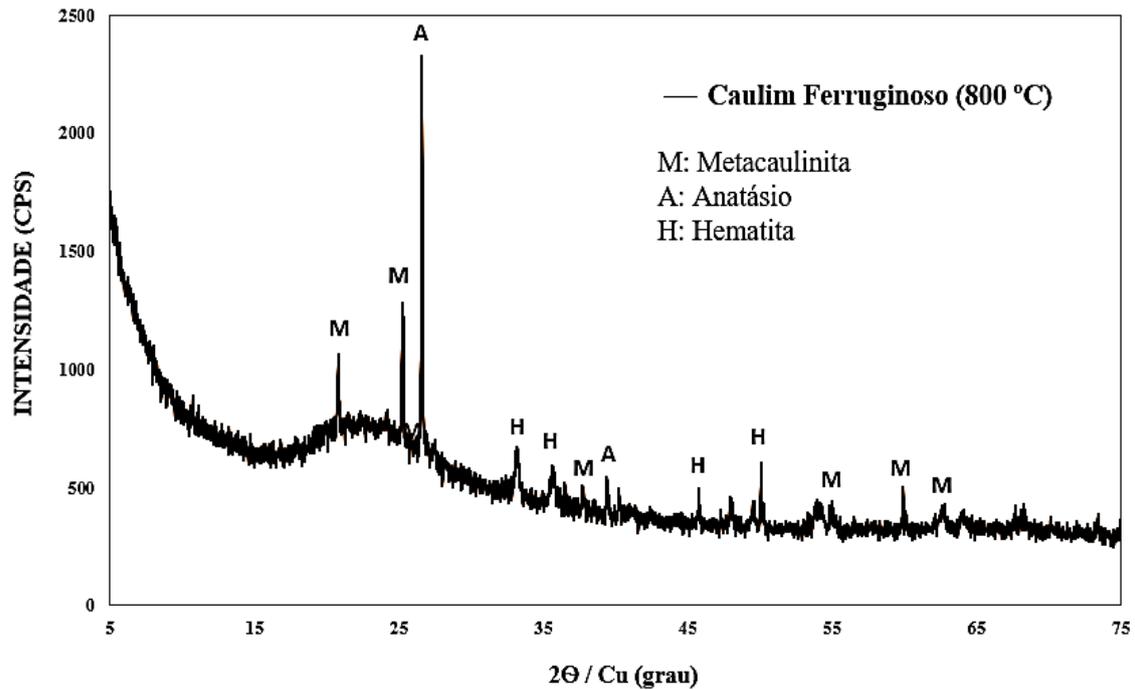


Figura 4.5 - Difratoograma de Raio-X do caulim ferruginoso, tratado a 800 °C.

Este colapso estrutural está associado ao seu processo de desidroxilação entre 450 °C e 800 °C formando um material amorfo denominado de metacaulim (SANTOS, 1989).

#### 4.2.3 - Análise granulométrica a laser

A Figura 4.6, é a curva de distribuição granulométrica das partículas de metacaulim ferruginoso, beneficiado e a de cinza volante. Observa-se que as partículas, apresentam quase o mesmo comportamento e 100 % destas partículas são menores que 20  $\mu\text{m}$ . Sendo que, 10 % das partículas possuem dimensão inferior a 1  $\mu\text{m}$ , 50 % das partículas possuem dimensão inferior a 10  $\mu\text{m}$  e 90 % das partículas possuem dimensão aproximadamente de 10  $\mu\text{m}$ , indicando que essas partículas apresentam uma elevada reatividade.

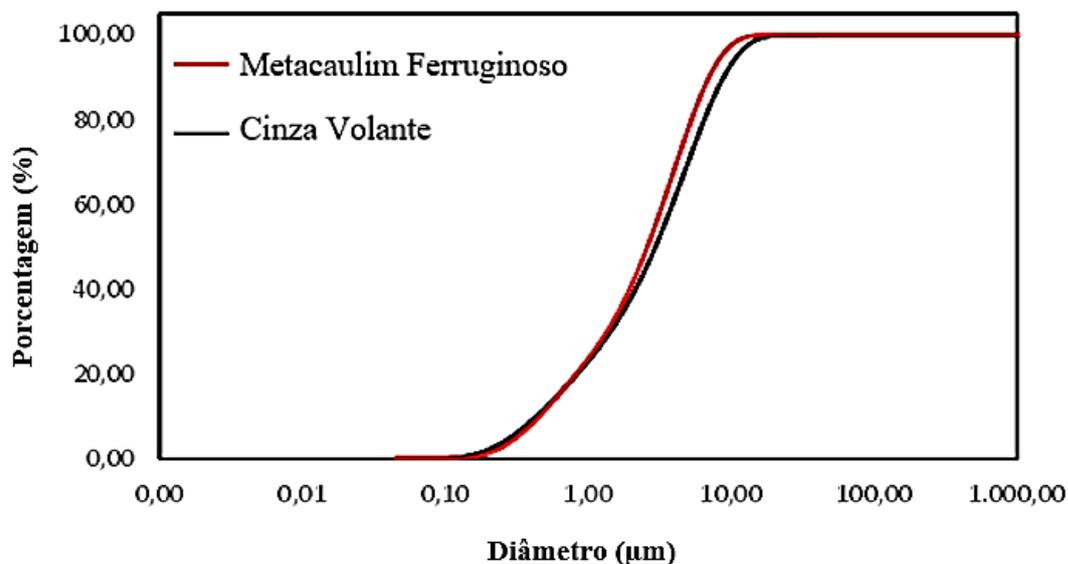


Figura 4.6 - Análise granulométrica a laser caulim ferruginoso e cinza volante.

#### 4.3 - COMPOSIÇÕES MINERALÓGICA DA CINZA VOLANTE

Segundo BIGNO (2008), cada indústria produz um tipo de cinza volante e variam suas características de acordo com os seguintes fatores: composição química inorgânica do carvão (fonte e tipos), o estado do carvão (se contém ou não mistura), grau de pulverização, condições de combustão, temperatura de queima, meios de recolhimento, manuseio, tipo de controle de emissão e forma de beneficiamento.

Através dos resultados de caracterização das cinzas volantes foi possível avaliar as propriedades mineralógicas.

##### 4.3.1 - Fluorescência de raios-X (FRX)

A Tabela 4.3 apresenta a composição química da Cinza Volante – classe C, em percentagem mássica dos respectivos óxidos juntamente com o resultado de Perda ao Fogo.

Tabela 4.3 - Composição química da cinza volante – classe C, determinada por FRX.

Composição química (%)	Cinza Volante – classe C
SiO <sub>2</sub>	42,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,08
CaO	19,01
MgO	0,26
TiO <sub>2</sub>	0,89
Na <sub>2</sub> O	0,94
PF (perda ao fogo)	12,88

Nos resultados da Fluorescência de raios-X a soma relativa as quantidades de sílica, alumina e hematite é equivalente a 66,01 %, valor que permite dizer que a natureza da cinza volante utilizada na pesquisa pertence à classe C. Esta afirmativa esta em concordância com estudo realizado por DASSEKPO *et al.* (2017), que diz que para teores de sílica, alumina e hematita inferiores a 70 % a cinza é pertencente à classe C e quando a soma for superior a 70 % a cinza pertence à classe F.

#### 4.3.2 - Difração de raios-X (DRX)

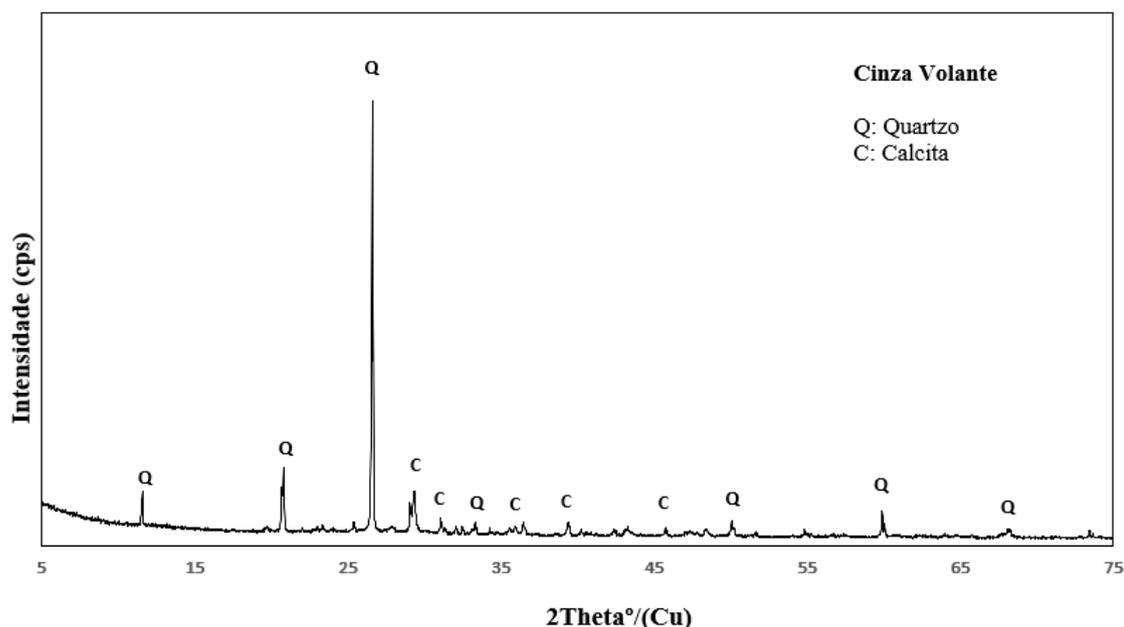


Figura 4.7 - Difratograma de Raio-X da cinza volante.

A Figura 4.7 apresenta o DRX da cinza volante coletada das caldeiras do processo Bayer.

Os picos de quartzo são os mais frequentes, ocorrendo, secundariamente, a calcita. Essa verificação se confirma com a união dos resultados do FRX, visto que, há valores consideráveis de SiO<sub>2</sub> e CaO. No entanto, não se pode descartar presença de outros elementos como hematita, mulita, entre outros, devido a intensidade dos picos de quartzo, que pode camuflar outros picos.

O teor de material amorfo na cinza volante resulta em (2,1 %), são na maioria das vezes indícios de formação de estruturas quimicamente mais instáveis e, portanto, mais ativas, indicadas para a formação de poli(sialato). O percentual amorfo presente na cinza volante revela ser este material tem potencial para a reação de geopolimerização.

#### 4.4 - CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

##### 4.4.1 - Resistência a compressão

A Tabela 4.4 apresenta a média dos resultados do ensaio mecânico de resistência a compressão, realizados no 7º e no 28º dia após a moldagem.

Tabela 4.4 - Resistência a compressão no 7º e no 28º dia, após a moldagem.\*

CP's	Força (toneladas)		Área do CP (mm <sup>2</sup> )	Resistência (Mpa)		Desvio Padrão
	7º dia	28º dia		7º dia	28º dia	
A-1	0,89	2,39	1963,5	4,53	12,17	5,401897897
A-2	0,75	2,08	1963,5	3,82	10,59	4,789682802
A-3	1,54	2,59	1963,5	7,84	13,19	3,781328528
A-4	1,37	2,55	1963,5	6,98	12,99	4,249493012
A-5	1,21	2,34	1963,5	6,16	11,92	4,069429749
C-1	3,38	4,79	1963,5	17,21	24,40	5,077784023
C-2	2,08	4,80	1963,5	10,59	24,45	9,79544152
C-3	4,85	6,13	1963,5	24,70	31,22	4,609619539
C-4	4,03	5,72	1963,5	20,52	29,13	6,086138297
C-5	3,80	5,55	1963,5	19,35	28,27	6,302214213

\* Cada valor representa a média

Os geopolímeros sintetizado com metacaulim apresentaram melhores resultados, para a resistência a compressão, no 7º dia e no 28º dia, destacando principalmente a amostra C-3 (80 % de caulim ferrítico e 20 % de cinzas volantes), com 31,22 Mpa, no 28º dia. O geopolímero que apresentou o resultado mais inferior foi a amostra sintetizada com argila do Rio Guamá, A-2 (90 % de argila do Rio Guamá e 10 % de cinzas volantes), com 10,59 Mpa, no 28º dia.

Os geopolímeros a base de argila do Rio Guamá e caulim ferrítico, caracterizaram-se seu aumento de resistência a compressão, a cada aumento na adição de cinzas volantes, no entanto, nas formulações, com 10 % de cinzas volantes, houve um decréscimo, como observamos na Tabela 4.4, nas amostras A-2 e C-2, assim como a utilização de 50 % de cinzas volantes, também apresentou um decréscimo na resistência a compressão, no entanto, não consideravelmente significativa.

As amostras que demonstraram os melhores resultados para a resistência a compressão, foram a A-3 e C-3, ambas com 20 % de cinzas volantes.

As amostras de geopolímeros a base de Caulim Ferrítico, se torna uma alternativa para a substituição do cimento Portland, visto que, a sua resistência está bem próxima as encontradas para o cimento Portland. Segundo Pugliesi et. al. (2018), o cimento Portland possui uma lasse de resistência de 25, 32 e 40 MPa.

As amostras de geopolímeros a base de Argila do Rio Guamá, por terem apresentado resistência mecânica 13,19 Mpa, podem ser utilizados para preencher vazios de concretagem. Desempenhando o papel do graute, que é usado para aumentar a resistência de paredes, solução também é indicada para reforços estruturais, preenchimento de colunas, fixação de equipamentos em blocos de concreto e reparo de pisos, possui a resistência à compressão em torno de 14 MPa (NAZAR, 2018).

Na Figura 4.8 apresenta os resultados do ensaio a resistência a compressão, dos geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.

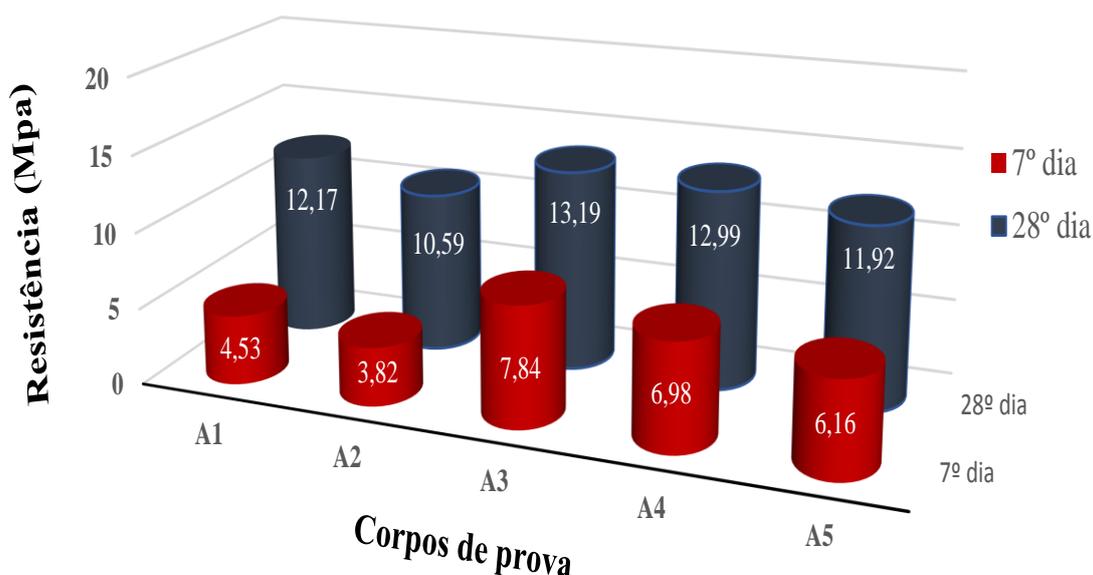


Figura 4.8 - Resistência a compressão dos geopolímeros a base de argila do Rio Guamá.

Na Figura 4.9 apresenta os resultados do ensaio a resistência a compressão, dos geopolímeros a base de caulim ferrítico.

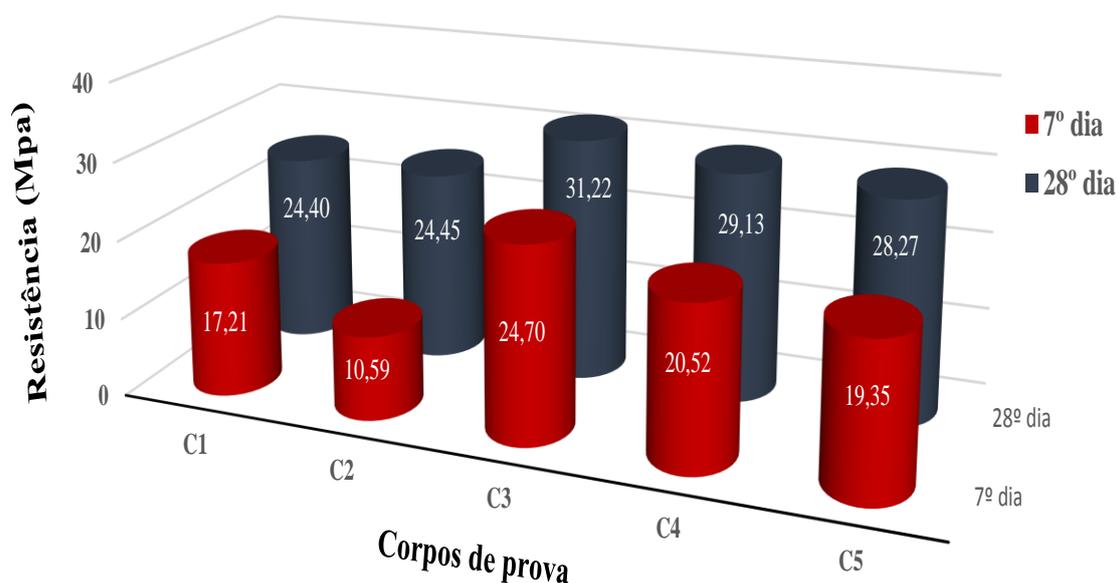


Figura 4.9 - Resistência a compressão dos geopolímeros a base de caulim ferrítico.

Como esperado, os corpos geopoliméricos, para todas as formulações, apresentaram aumento na sua resistência mecânica, como o passar dos dias, no entanto, é notável verificar, que algumas formulações tiveram aumentos mais consideráveis do que outros.

Segundo DECRETO-LEI N° 278, o cimento Portland comum, no 7º tem resistência a compressão de 7,64 Mpa, em média, com isso, os resultados são satisfatórios, pela resistência a compressão, apresentada nas Figuras acima, dos geopolímeros de caulim ferrítico, e a amostra A3, do geopolímero a base de argila do rio Guamá.

Segundo DAVIDOVITS *et al.* (1994), o melhor intervalo entre a razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  é de 3,3 a 4,5, e os geopolímeros a base de caulim ferrítico, foram os que apresentaram o intervalo mais próximo de 3,19 a 3,63, outro fator determinante para uma boa resistência a compressão. Os geopolímeros a base de argila do Rio Guamá, apresentaram intervalos muito altos, entre 8,23 a 8,80, possivelmente essa razão molar interferiu consideravelmente na resistência mecânica do material, devido a razão molar ter interferência direta na síntese do material e no produto final.

#### 4.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

As amostras A3, A4, C3 e C4, foram as que apresentaram os melhores resultados de ensaio de resistência a compressão, com isso, decidiu-se realizar análise da fratura para observar essas regiões.

##### 4.4.2.1 - Geopolímeros a base de argila do Rio Guamá

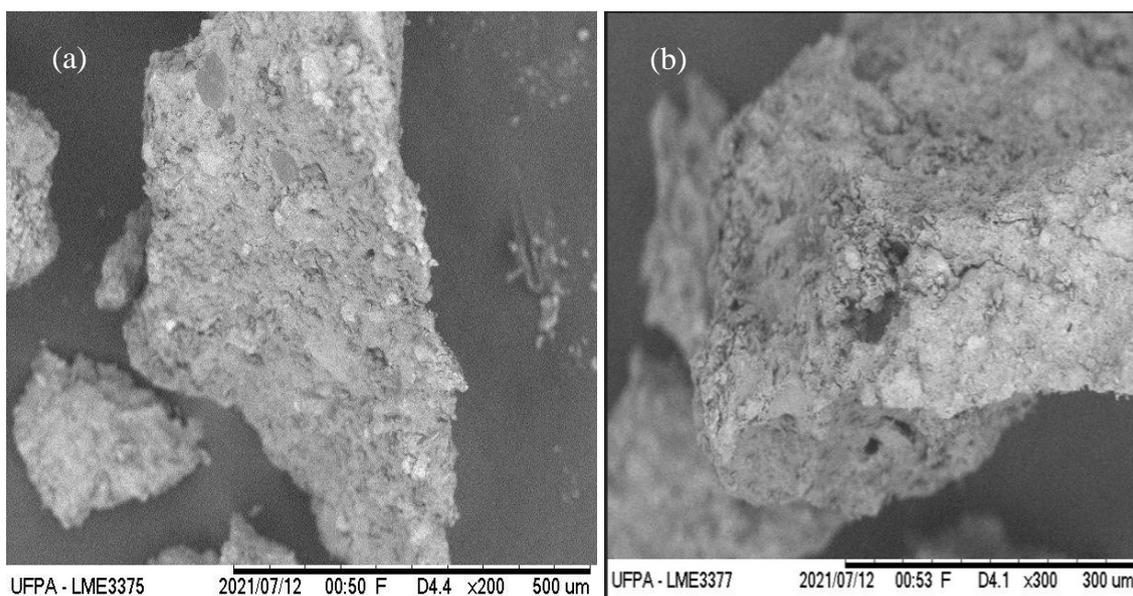


Figura 4.10 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra A3, com (a) ampliação de 200X e (b) ampliação de 300X.

É possível observar, na Figura 4.10, a existência de poros e materiais que possivelmente não interagiram no processo químico de produção do geopolímero, indicando menor grau de geopolimerização, após a reação. No entanto, foi possível verificar, com o ensaio de resistência a compressão, uma resistência considerável, não descartando a utilização desse material para a elaboração de geopolímeros.

As análises de composição qualitativa e semiquantitativa para o geopolímero A3 realizadas por EDS estão apresentadas na Figura 4.11, que é composta por uma microestrutura da fratura do corpo de prova do geopolímero apresentando a média dos pontos de análise, um espectro e a Tabela de composição da média dos pontos analisados.

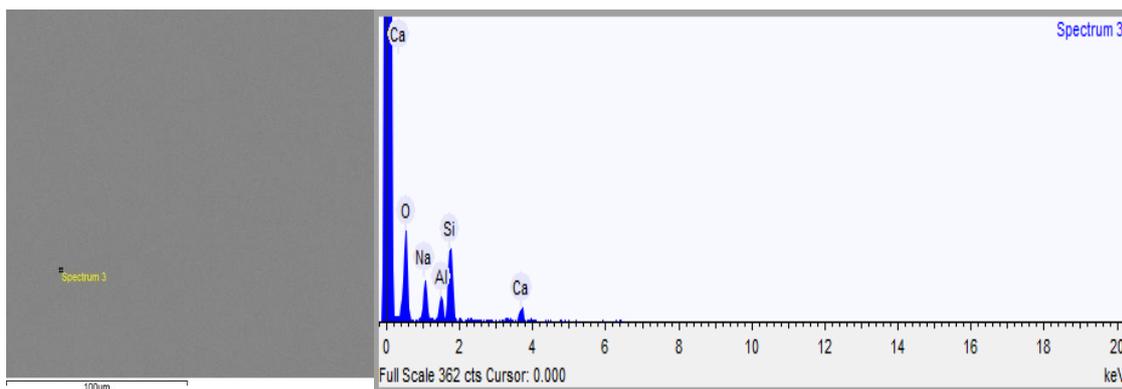


Figura 4.11 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A3 no ponto 3.

Tabela 4.5 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A3 no ponto 3.

<b>Summary results</b>			
Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	57.851	4.594	75.503
Aluminum	6.970	2.114	5.303
Silicon	29,733	0.002	100.000
Sodium	11.872	1.093	10.185
Calcium	5.550	0.748	2.705

Na Figura 4.12 têm-se a morfologia da superfície de fratura da amostra A4. Apresentando poros, materiais que não interagiram na reação de geopolimerização, que possivelmente interferiram na resistência mecânica do material. Uma interferência considerável também, deve ser a granulometria da matéria-prima, devido a isso, que provavelmente os materiais não interagiram por completo.

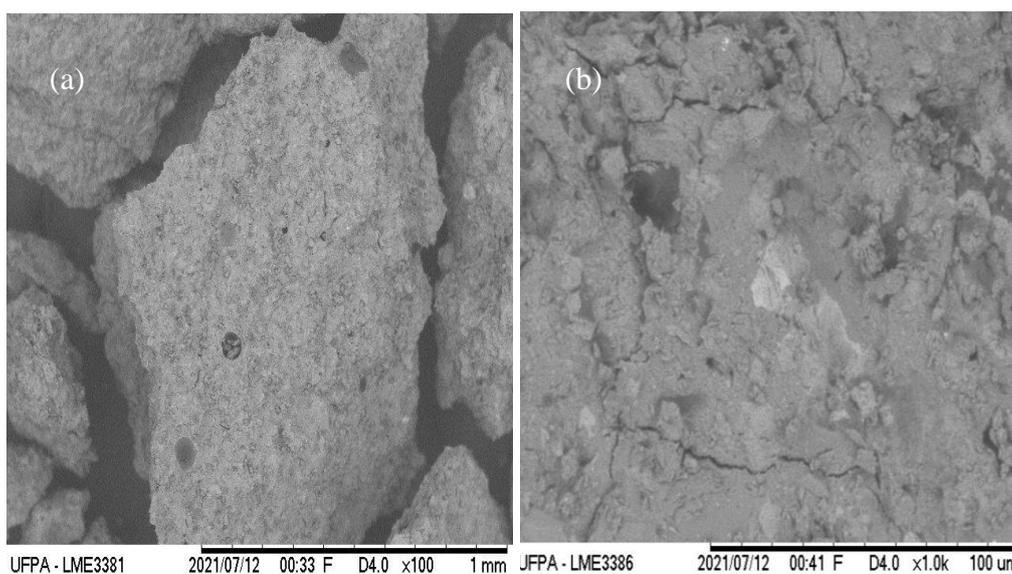


Figura 4.12 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra A4, com (a) ampliação de 100X e (b) ampliação de 1.0KX.

As análises de composição qualitativa e semiquantitativa para o geopolímero A4 realizadas por EDS estão apresentadas na Figura 4.13 que é composta por uma microestrutura da fratura do corpo de prova a média dos pontos de análise, um espectro e a Tabela de composição da média dos pontos analisados.

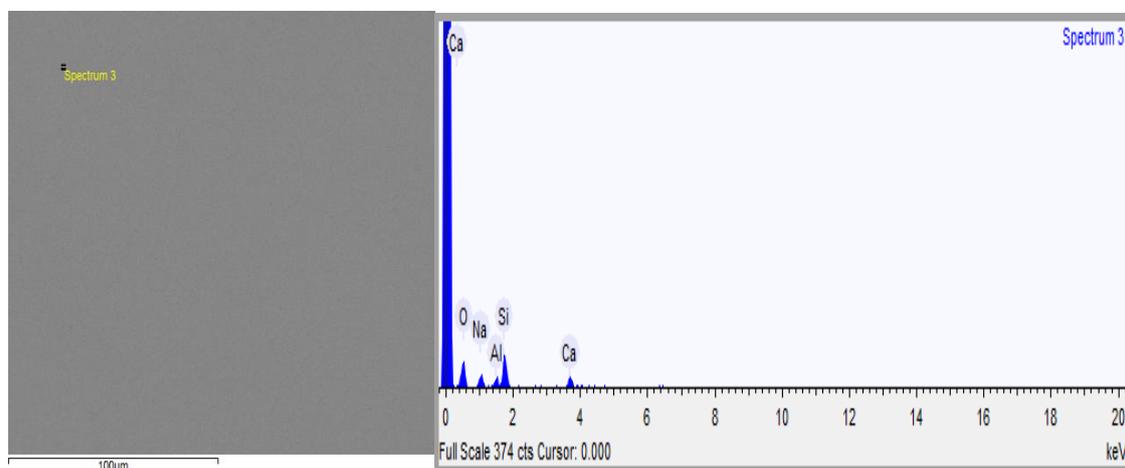


Figura 4.13 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A4 no ponto 3.

Tabela 4.6 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra A4 no ponto 3.

<b>Summary results</b>			
Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	52,595	4.909	63.914
Aluminum	5.940	1.490	4.539
Silicon	30.695	2.665	14.982
Sodium	8.661	2.209	9.820
Calcium	37.626	2.129	6.745

#### 4.4.2.2 - Geopolímeros a base de caulim ferrítico

A micrografia da apresentada na Figura 4.14 apresenta o aspecto fratural do geopolímero obtido com caulim ferrítico, para a amostra C3, que apresentou o melhor resultado de resistência a compressão.

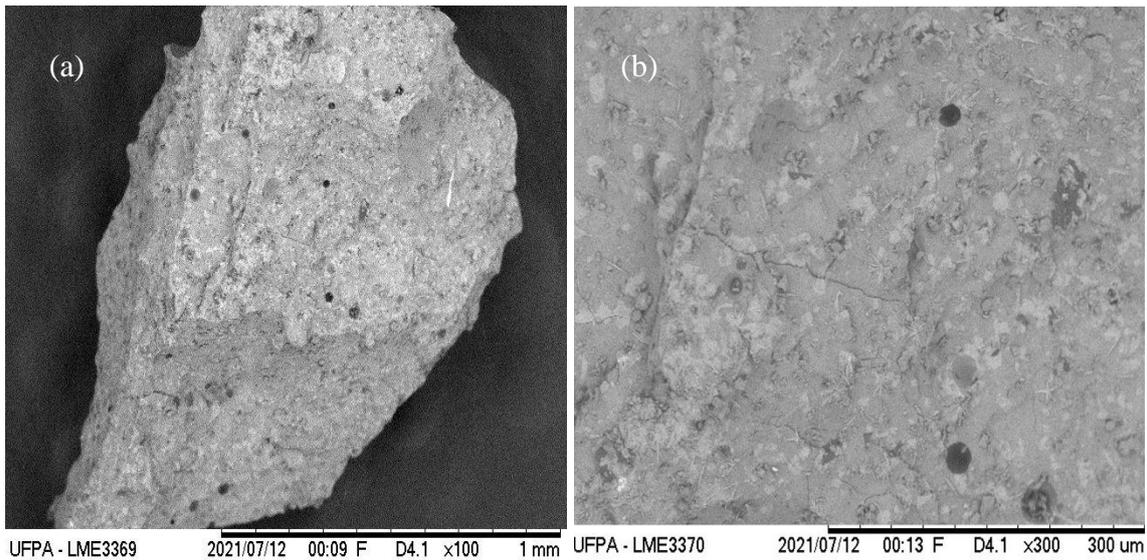


Figura 4.14 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra C3, com ampliação (a) de 100X e (b) de 300X.

Observa-se que a amostra apresenta microtrincas. O geopolímero C3 apresenta uma morfologia mais densa e homogênea, quando comparado aos geopolímeros A3 e A4. Devido a isso, verificou-se no ensaio de resistência a compressão, que a resistência foi muito maior.

As análises de composição qualitativa e semiquantitativa para o geopolímero C3 realizadas por EDS estão apresentadas na Figura 4.15 que é composta por uma microestrutura da fratura do corpo de prova apresentando a média dos pontos de análise, um espectro e a Tabela de composição da média dos pontos analisados.

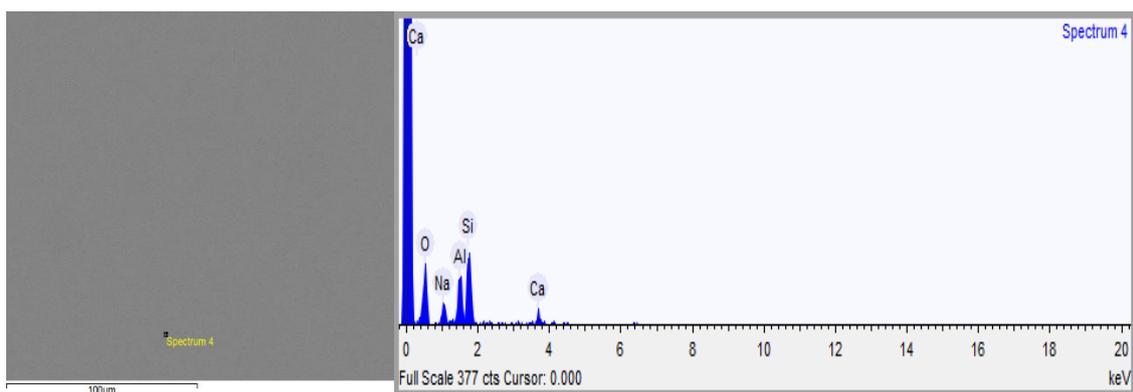


Figura 4.15 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C3 no ponto 4

Tabela 4.7 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C3 no ponto 4.

<b>Summary results</b>			
Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	53.332	1.935	65.956
Aluminum	11.395	0.973	9.143
Silicon	23.505	1.369	17.276
Sodium	8.295	0.963	7.626
Calcium	14.571	0.771	2.255

A micrografia da apresentada na Figura 4.16 apresenta o aspecto fratural do geopolímero obtido com caulim ferrítico, para a amostra C4, que apresentou o melhor resultado de resistência a compressão.

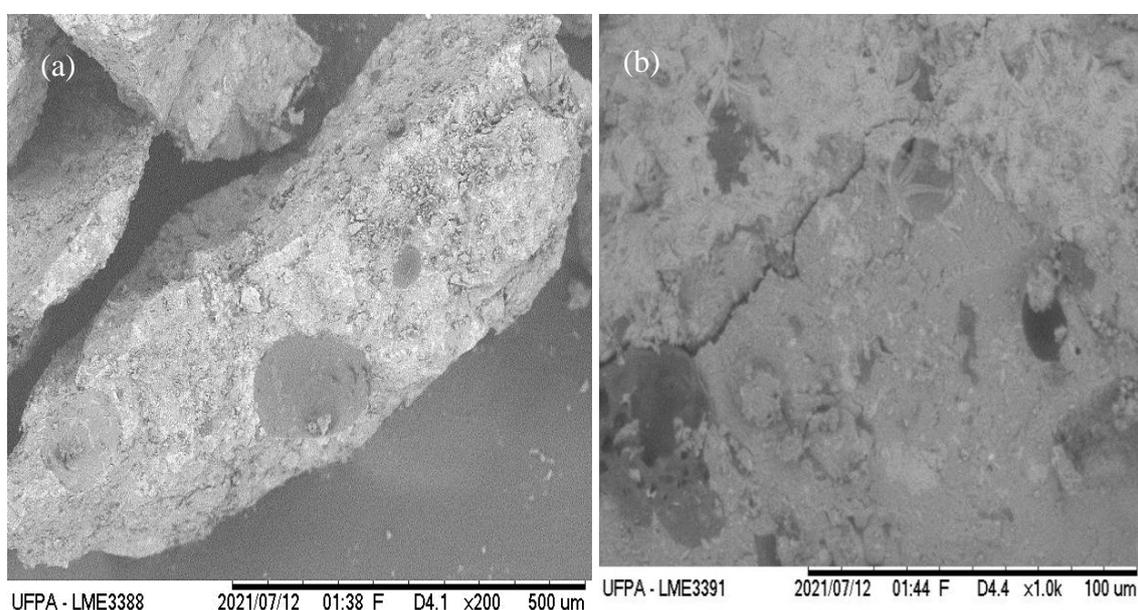


Figura 4.16 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra C4, com ampliação (a) 200X e (b) de 1.0 KX.

Os poros que aparecem nas amostras são típicos de geopolímeros sintetizados com cinzas volantes, pois as cinzas possuem em sua microestrutura algumas partículas ocas que reagem parcialmente ao serem ativadas formando poros na matriz geopolimérica. Os poros precisam ser controlados, pois, é através deles que a água penetra na estrutura, e a entrada da água seja por capilaridade, absorção ou sorvidade é deletéria para a durabilidade do material (OLIVIA *et al.*, 2008). As amostras a base de caulim, apresentaram uma maior homogeneidade na sua superfície, e uma estrutura mais densa, isso reflete proporcionalmente na resistência mecânica do corpo de prova. Com isso, verifica-se que a reação de geopolimerização, ocorreu de forma mais efetiva.

As análises de composição qualitativa e semiquantitativa para o geopolímero C4 realizadas por EDS estão apresentadas na Figura 4.17 que é composta por uma microestrutura da fratura do corpo de prova apresentando a média dos pontos de análise, um espectro e a Tabela de composição da média dos pontos analisados.

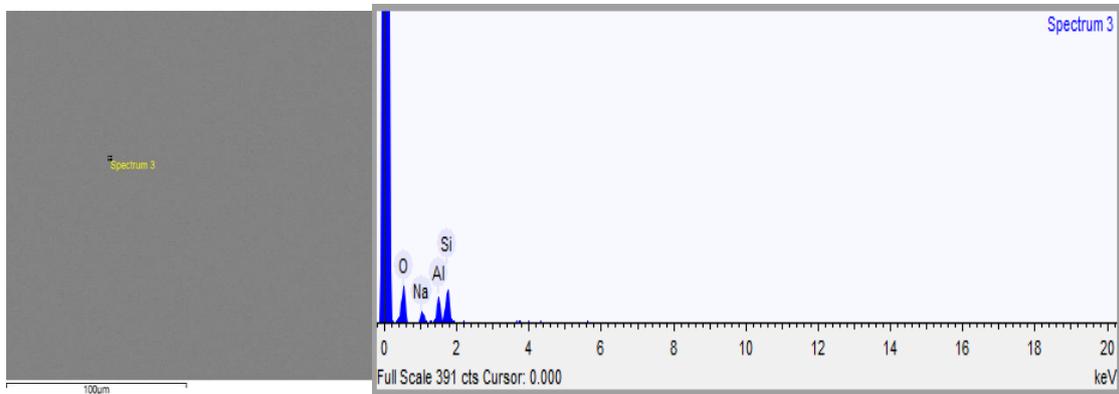


Figura 4.17 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C4 no ponto 3.

Tabela 4.8 - Espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da amostra C4 no ponto 3.

<b>Summary results</b>			
Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Oxygen	56.502	2.699	68.321
Aluminum	13.166	1.458	9.172
Silicon	22.688	1.907	15.103
Sodium	7.711	1.373	7.403
Bromine	20.477	3.149	5.617

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

Os geopolímeros a base de Argila do Rio Guamá e Caulim ferrítico, com adição de cinza volante – Classe C, apresentou-se como alternativa da utilização de resíduos industriais, altamente poluentes, e de um mineral natural, classificado como “fraco”, nesse material com propriedades cimentantes, que pode ser utilizado como um substituto do cimento Portland, em concretos e como preenchimento de vazios de concretagem.

A utilização da argila, do Rio Guamá, caulim ferruginoso e da cinza volante classe – C é tecnologicamente viável, por apresentarem valores consideráveis de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A utilização das matérias-primas de base, caracterizou a coloração dos materiais sintetizados, marrom avermelhado para o geopolímero elaborado com argila, e levemente rosado para o geopolímero com caulim ferruginoso, e a adição de cinza volante também variou a coloração, conforme a concentração adicionada, em tons escuros.

As diferentes concentrações de Argila/Cinza volante e Caulim ferrítico/Cinza volante, interferiram, onde, alguns corpos de provas apresentaram melhor resistência à compressão. As amostras A3 (80 % argila e 20 % C.V) e C3 (80 % de caulim ferrítico e 20 % C.V), apresentaram os melhores resultados para a resistência à compressão, 13,19 Mpa e 31,22 Mpa, respectivamente.

O desenvolvimento dos geopolímeros a base de Argila, do rio Guamá, e Caulim ferrítico apresentaram valores adequados aos padrões da normativa do cimento Portland.

A pesquisa apresenta uma alternativa às indústrias do setor da construção civil e agrega valor a um mineral de qualidade e aos resíduos da indústria, cujo aproveitamento gera impacto positivo no meio ambiente, pela redução considerável do seu descarte.

## 5.2 - SUGESTÕES

As sugestões para trabalhos futuro é investigar mais a fundo, temperaturas de calcinações, para ambas as matérias de bases, estudar outras razões molares, reduzir ainda mais a granulometria da argila do Rio Guamá, para tentar minimizar a incidência de poros nos corpos de prova, com isso, tentar aumentar a resistência a compressão. Também é de grande importância investigar a questão da eflorescência nos geopolímeros a base de argila do Rio Guamá, investigando outras molaridades do hidróxido de sódio (NaOH), para que não interfira negativamente na sua resistência e na estética. Além de avaliar a zona de transição nos geopolímeros de argila, nas condições propostas neste trabalho e em outras condições.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAININC. (2019). **Setor da construção civil avança com novos materiais e projetos sustentáveis.** Disponível em: <<https://www.abrainc.org.br/mercado-imobiliario/2019/01/17/setor-da-construcao-civil-avanca-com-novos-materiais-e-projetos-sustentaveis/>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019, às 10h.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para a economia de baixo carbono: caderno 3: nota técnica cimento.** São Paulo, 2012.

AGENDA 21. (1992) **Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos.** Cap.21. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2007.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash, Prog. Energy Combust. Sci. **36**, 2010, 327–363.

ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Adb Elmoaty M. Abd Elmoaty; SALEM, Hazem A. Effect of Cement Addition, Solution Resting Time and Curing Characteristics on Fly Ash Based Geopolymer Concrete Performance. **Construction and Building Materials**. v. 123, n. 19, p. 581-593, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816311424>>. Acesso em 25 de agosto de 2016, às 13h45min.

ALONSO, S., PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. **Materials Letters**, v. 47, p. 55–62, 2001.

ALUJAS, A.; FERNANDEZ, R.; QUINTANA, R.; SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA, F. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 108, p. 94–101, fev 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>>. Acesso em: 03 de agosto de 2017, às 15h.

ALMENARES, R. S.; VIZCAÍNO, L. M.; DAMAS, S.; MATHIEU, A.; ALUJAS, A.; MARTIRENA, F. Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 6, p. 225–232, mar 2017.

ALVES, J. E. D. Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera atinge novo recorde em maio de 2019. in **EcoDebate**, ISSN 2446-9394, 12/06/2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of Concrete Practice**. 1996. Use of Fly Ash in Concrete: ACI 232.2R, Farmington Hills.

ARAUJO, A. L. P.; NOGUEIRA, I. L.; SILVA, M. G. C.; BARROS, M. A. S. D. Tratamento térmico em argila Bentonita para uso na remoção de zinco em leito fixo. VI **Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico**, 6, 2012, Atibaia, SP. Anais. 2012.

ARIOZ, E.; ARIOS, O.; KOCKAR, O.M. Leaching of F-type fly Ash Based Geopolymers. **Procedia Engineering**, 42, 1114–1120, 2012.

ASOKAN, P.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R. Coal combustion residues - Environmental implications and recycling potentials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 43, p. 239–262, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. 6 ed. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1978, **C 618**: **Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. Philadelphia.

AZEREDO MELO, L. G. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. 2010. Disponível em: <[http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/Lis\\_Guimaraes\\_de\\_Azeredo\\_Melo.pdf](http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/Lis_Guimaraes_de_Azeredo_Melo.pdf)> [capturado 15 outubro, 2013]. Acesso em: 03 de abril de 2017, 10h.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K. (2017). Influência da Composição Química das Soluções Alcalinas Ativadoras na Produção de Geopolímeros a Base de Cinza Volante. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 12, n. 1 (2017) 39–46 ISSN 1809-8797.

AZEVEDO, A. G. de S. *et al* (2018). Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica** **64** (2018) 388-396.

AZEVEDO, A. M. **Síntese e caracterização química, física e mecânica de geopolímero utilizando caulim da Amazônia desidroxilizado.** Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

BAKHAREV, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 1224– 1232, 2005.

BALDUINO, A. P. Z. **Estudo da Caracterização e composição de argilas de uso cosmético.** Dissertação - Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. Jataí, 2016.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S.; POLLAMANN, H.; COSTA, M. L.; **Eur. J. Mineral.** 2005, 17, 10.

BARGA, C. M. C. **Estudo da influência das cinzas de bagaço da cana-de-açúcar como carga na matriz de argila no processo de sinterização visando um novo produto para o ramo construtivo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Civil. Presidente Prudente, 22 de novembro de 2018.

BASTOS, I. M. (2011). **Contribuição para o conhecimento sobre o efeito de material pozolânico no fabrico de betões.** Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Departamento de Engenharia Geotécnica.

BBC. (2019). **Cop-25: Brasil tenta bloquear acordo, mas discussões terminam em compromisso por metas mais rigorosas.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-50800984>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019.

BEZERRA, I. M. T.; COSTA, D. L.; VITORINO, J. P. M.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.2 (2013) 101 –105 ISSN 1809-8797.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais.** Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BIGNOZZI, M. C.; MANZI, S.; NATALI, M. E.; RICKARD, W. D.; VAN RIESSEN, A. **Constr. Build. Mater.** **69** (2014) 262.

BIGNO, I. C. **Cimento geopolimérico à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. 280 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; 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.

BORGES, P. H. R., BANTHIA, N., ALCAMAND, H. A., VASCONCELOS, W. L., NUNES, E. H. M. **Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag álcali-activated mortars**. Federal Centre for Tech, Education of Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, 2016.

BRANCO, P. M. **Minerais Argilosos**. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). São Paulo - 18 agosto 2014.

BRASIL. Ministério de Estado dos Negócios do Trabalho, Indústria e Comércio. Especificações de cimento Portland comum e os métodos de ensino para as provas de cimento e controle de concreto. **DECRETO-LEI Nº 278, DE 16 DE FEVEREIRO DE 1938**

BUCHWALD, A., *et al.* Stabilised foam clay material with high performance thermal insulation properties. in CFI. **Ceramic forum international**. 2004. Göller.

BUCHWALD, A. *et al.* Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s. **Materials and Structures**, 22 out. 2013.

BRITO, W. S. *et al.* (2019) Desenvolvimento de geopolímeros a partir da ativação alcalina de cinza volante. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 2576-2581, mar. 2019

CAMPOS, L. M. P. **Estudo da aplicação de argilas nanoestruturadas em resinas restauradoras fotoativadas, utilizadas em odontologia**. 2012. Tese – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CARVALHO, W. (2009). **Os benefícios da argila para cada tipo de pele**. Disponível em: <<http://wanielucia.blogspot.com.br/2009/02/os-beneficios-da-argila-para-cadatipo.html>>. Acesso em: 01 de novembro de 2016.

CARNEIRO, B. S.; ANGÉLICA, R. S.; SCHELLER, T.; de CASTRO, E. A. S.; NEVES, R. F. Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. **Cerâmica**, vol. 49 nº.312 - São Paulo Oct./Dec. 2003.

CBCS. “**Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**”. Versão 1. novembro, 2014. Disponível em: <encurtador.com.br/bfIIK>. Acesso em: 03 de dezembro de 2019, às 17h.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. S.; SANTOS; H. S. Special clays: what they are, characterization and properties. **Quím. Nova** vol.30 no.1 São Paulo Jan./Feb. 2007.

COSTA, V. Eflorescências, como defeitos de produção. **Revista Tempo Técnico**, ed. 10, p. 4-6. São Paulo, 2013.

COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Estudo da adição de alumina em corpos geopoliméricos a base de metacaulim. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.2 (2013) 96 –100 ISSN 1809-8797.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. (2005) **Alkali activation of flyashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products**. *Fuel*. 84: 2048-2054.

CUNHA, M. J. F. **Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos**. Tese de Mestrado. Universidade do Minho Escola de Engenharia. Portugal - outubro, 2013.

DASSEKPO, J. B. M.; ZHA, X.; ZHAN, J. Synthesis reaction and compressive strength behavior of loess-fly ash based geopolymers for the development of sustainable green materials. **Construction and Build Materials**. v. 141, p. 491–500, 2017.

DAVIDOVITS, J. Química macromolecular do metacaulim MK-750. **Geo-pol – geopolymer system**. 1977.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer* '88. 1 (1988) **49**.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers and geopolymeric materials. **Journal of Thermal Analysis**, v.35, p.429-441, 1989.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+ Business Media BV, Formerly Kluwer Academic Publishers BV, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991. Citado na página 6.

DAVIDOVITS, J. “**Properties of Geopolymer Cements**,” in First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 1994, pp. 131–149.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer Institute. 02100 Saint-Quentin, France, 1994.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; DAVIDOVITS, N. **U.S. Patent N° 5,342,595**: Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained. 1994.

DAVIDOVITS, J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. in **Geopolymer**. 1999.

DAVIDOVITS, J. Geopolímero para principiantes. **Geo-Pol – Geopolymer System**. 2004.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry e Application. 2. ed. Saint-Quentin: Institute Geopolymere; **Polymers and Geopolymers**. 2008; p. 9.

DAVIDOVITS, J. Application of Ca-based Geopolymer With Blast Furnace Slag, a Review. **Geopolymer Institute**. 2 nd International Slag Valorisation Symposium. Saint-Quentin, França, 2011.

DEB, P. S.; NATH, P.; SARKER, P.K. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. **Materials and Design**, 62, 32–39, 2014.

DIAS, R. L. **Proposta de estudo sobre a substituição parcial do feldspato pelo resíduo conchas de marisco (calcinado) em massa cerâmica para porcelana dentária**. 2015. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A.; WEIL, M.; MATER, J. *Sci.* **42** (2006) 3033-3043.

DONDI, M.; IGLESIAS, C.; DOMINGUEZ, E.; GUARINI, G.; RAIMONDO, M. *Appl. Clay Sci.* **40** (2008) 143.

DORNELLES, A. S. (2018) **Produção e caracterização de cimentos alternativos do tipo geopolímero a partir de argilas do Rio Grande do Sul**. Salão UFRGS 2018: SIC - XXX SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS - Campus do Vale – UFRGS, 2018.

DOYLE, A. M. *et al.* Biodiesel production by esterification of oleic acid over zeolite Y prepared from kaolin. **Renewable Energy**, v. 97, p. 19–23, 2016.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J.S.J.; MATER, J. *Sci.* **42**, 9 (2006) 2917.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; & LUKEY, G.C.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2007). Geopolymer Technology: the current state of the art. **Journal Materials Science** (V42 ed.).

DUXSON, P., *et al.*, **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007. 292(1): p. 8-20.

ELIMBI, A.; TCHAKOUTE, K.; NJOPWOUO, D. Effects of calcination temperature of kaolinite. **Construction and Building Materials**, v.25, p.2805– 2812, 2011.

FAN, F.; LIU, Z.; XU, G.; PENG, H.; CAI, C. S. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 66-81, 2018.

FARIA, R. A. de. **BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO CAULIM DA REGIÃO DE PRADO (BA)**. Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A. M.; PALOMO, A.; LOPEZHOMBRADOS, C. *ACI Mater. J.* **103** (2006) 106.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; PASTOR, J.Y.; MARTIN, A. New Cementitious Materials Based on AlkaliActivated Fly Ash: Performance at High Temperatures. **Journal of the American Ceramic Society**, 91, 3308–3314, 2008.

FERREIRA, C. F. **Produção do espaço urbano e degradação ambiental: Um estudo sobre a várzea do igarapé do Tucunduba**. Dissertação de Mestrado (BELÉM - PA), São Paulo, 1995.

FERREIRA, F. G. V. (2018). **Especificação Técnica do Produto – hidróxido de sódio**. Disponível em: <<http://api.neoncomercial.com.br/api/Produto/produtoEspecificacaoTecnica?codProduto=1905>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 19h.

FOGAÇA, J. R. V. (2019). **Hidróxido de sódio**. Disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/quimica-inorganica/hidroxido-sodio.htm>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 19h20min.

FROENER, M. S. **Valorização de cinza de fundo por meio da síntese de ligantes geopoliméricos: otimização de traços em pastas e avaliação dos sistemas em argamassas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

GASTEIGER, H. A., FREDERIK, W. J., STREISE, R. C., Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 31, p. 1183–1990, 1992.

GEOPOLYMER-INSTITUTE, G. (1996). From ancient concret to geopolymers, Adaptado de Arts e Métiers Magazine n° 180, Set 1993. **Saint-Quentin: Geopolymer Institute**. Disponível em: <<http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/10-from-ancientconcretes-to-geopolymers-2>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.

GEO-POL: CIMENTO GEOPOLIMÉRICO – **Origem do Cimento Geopolimérico** - Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/>>. Acesso em: 26 de março de 2020, às 10h50min.

GEWEHR, U. **Aplicabilidade e eficiência de dois métodos de saneamento de paredes degradadas por umidade e sais a partir de uma revisão bibliográfica e de um estudo de caso**. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GOOGLE MAPS. **[Rio Guamá]**. (2019). Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-1.5489607,-47.97926,73805m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019, às 12h50min.

GÖRHAN, G.; KÜRKLÜ, G. Compos. Part B Eng. **58** (2014) 371.

GÖRÜR, E.B.; KARAHAN, O.; BILIM, C.; ILKENTAPAR, S.; LUGA, E. *Constr. Build. Mater.* **96** (2015) 673.

GOTAQUÍMICA, produtos químicos LTA. (2017). **Silicato de sódio alcalino**. Disponível em: <<https://gotaquimica.com.br/produto-quimico/silicato-de-sodio-alcalino/silicato-de-sodio-alcalino/>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 13h45min.

HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymers based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, p. 103. 2005.

HELMY, A. I. I. **Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar**. Civil Engineering Department, The British University in Egypt, Cairo, Egypt, 2016.

IBGE (2019). **Custos da construção civil encerram 2018 com alta de 4,41%**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/23559-custos-da-construcao-civil-encerram-2018-com-alta-de-4-41>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019, às 17h45min.

IBRAM, **Instituto Brasileiro de Mineração**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001452.pdf>>. Acesso em 20 de agosto de 2019, às 10h10min.

ILKENTAPAR, S. *et al.* Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of álcali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 363–369, 2017.

IndiaMARTE. (2019). **Fly Ash Powder**. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/dry-fly-ash-powder-13677935348.html>>. Acesso em: 03 de janeiro de 2020, às 11h50min.

JAVADIAN, H. *et al.* Study of the adsorption of Cd (II) from aqueous solution using zeolite-based geopolymer, synthesized from coal fly ash; kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Arabian Journal of Chemistry*, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 837–849, 2015.

JUNCKES, R. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Florianópolis – SC, 2015.

KIM, E. H. **Understanding Effect of Si/Al Ratio and Calcium Hydroxide on Chemical Composition, Nanostructure and Compressive Strength for Metakaolin Geopolymers**. (Doctoral thesis), University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Minerals Eng. **20** (2007) 1261-1277.

KOMNITSAS, K. A. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. **Procedia Engineering**, 21, 1023–1032, 2011.

KUMAR, S. **Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization**. CSIR–National Metallurgical Laboratory, India, 2012.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, 42, 729–746, 2007.

LAURSEN, M; SANTANA1, L. N. L.; MENEZES, R. R. Characterization of Brazilian Northeastern plastic clays. **Cerâmica** **65** (2019) 578-584.

LEE, W. K. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions Colloids and Surfaces A: **Physicochemical and Engineering Aspects**, 211, 2002.

LIMA, F. T; SILVA F. J.; THAUMATURGO, C. (2005) Xanes na borda-k do Si do sistema caulim-metaculim-geopolímero. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**. 24(2): 90-92.

LIVI, C. N. (2013) **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Florianópolis, SC, 2013.

LONGHI, M. A. **Alcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. 184.

LOPEZ, R. F. (2009). **Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries**. Lusane: Dissertação apresentada na Escola Politécnica de Lausanne na obtenção do grau de Doutor em Ciências, 153p.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C. Caulim. In: **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. (Ed.). CETEM/MCT. Rio de Janeiro: 2005. p. 231-262.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. 867p.

MACCARINI, H. S. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MARQUES, F. M. **A importância da seleção dos materiais de construção para a sustentabilidade ambiental do edifício**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) Universidade Federal do Rio de Janeiro, PROARQ, Rio de Janeiro, 2007.

MARQUES, J. I.; LABRINCHA, J. A.; SEABRA, M. P. **Geopolimerização de cinzas e dregs da indústria de pasta de papel**. "Inovação na Construção Sustentável", Atas do Congresso CINCOS 2014, Ed. Plataforma para a Construção Sustentável, Curia-Portugal, pp. 29-36, (2014)

MÁRTIRES R. A. C., 2009. **Sumário Mineral, Caulim**. Série estatísticas e economia mineral, DNPM.

MEMON, F. A.; NURUDDIN, M. F.; DEMIE, S.; SHAFIQ, N. Effect of curing conditions on strength of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. **Engineering and Technology**, v. 80, p. 860-863, 2011.

MENDES, H. (2013). **A construção civil e seu impacto no meio ambiente**. Disponível em: < <https://greendomus.com.br/a-construcao-civil-e-seu-impacto-no-meio-ambiente/>> Acesso em: 13 de dezembro de 2019, às 14h35min.

MORAES, S. B.; BOTAN, R.; LONA, L. M. F. Síntese e caracterização de nanocompósitos de poliestireno/hidroxissal lamelar. **Quim. Nova**, Vol. 37, No. 1, 18-21, 2014.

MURRAY, H.H. **Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays**, Elsevier (2007).

NAZAR, N. Graute pode ser usado para aumentar a resistência de paredes. **Revista digital**, 2018. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/graute-pode-ser-usado-para-aumentar-a-resistencia-de-paredes/15422>>. Acesso em: 12 de agosto de 2021, às 16h30min.

OLIVEIRA, F. P. (2010). **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em Arvorezinha, RS, utilizando WEPP**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

OLIVEIRA, L. C. A.; FABRIS, J. D.; PEREIRA, M. C. (2013). Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: Uma revisão. **Química Nova**, Rio de Janeiro (36)123-130p.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete**. ICCBT 2008 - A - (46) – pp517-530

OSORIO, P. D. L. (2006) **Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão geopolimérico** - Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Portugal, 228 p.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. *Constr. Build. Mater.* **22** (2008) 1315-1322.

PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DÍAZ, F. R. V. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. **Cerâmica**. v. 54, p. 213 – 226, 2008.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1323-1329, 1999.

PAN, Z.; FENG, K. N.; GONG, K.; ZOU, B.; KORAYEM, A. H.; SANJAYAN, J.; WENHUI, D.; COLLINS F. Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers. **Journal of materials science**, v. 48, n. 8, p. 3128-3137, 2013.

PEDROTI, Leonardo Gonçalves. **Desenvolvimento de massa cerâmica com o uso de resíduo de granito para a obtenção de blocos cerâmico**. 2011. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Estadual do

Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011. Disponível em: <<http://uenf.br>>. Acesso em: 25 de agosto de 2016, às 18h30min.

PINHEIRO, J.R.B. **Notas de Aula: Estabilização de solos**: Santa Maria: UFSM, 2003. 138p.

PINHEIRO, A.; COELHO, D.; SANTOS, J.; ROCHA JUNIOR, C.A.; SOUSA, J.A. **Síntese de material zeolítico a partir de caulim duro ou Flint: Adsorção de vapor d'água**. 56º congresso brasileiro de química. Belém-pa, novembro de 2016.

PINTO, A. T. (2002), Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina (Geopolímerização), **Construção Magazine** nº 3, ISSN 1645-1767, pp 16-22.

PINHO, U. (2014). **Rio Guamá: Projeto promove inclusão produtiva sustentável**. Disponível em: <<http://www.sudam.gov.br/index.php/ultimas-noticias/717-rio-guama-projeto-promove-inclusao-produtiva-sustentavel>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019, às 12h10min.

PINTO, A. T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. 2004. 400 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

PINTO, A. T. (2006) **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Universidade de trás-montes e alto douro - Vila Real, 2006.

PINTO, A. T. *et al*, (2019) Resíduos da Construção Civil: matéria prima verde a ser investigada (PINTO *et al*, 2019). **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 1339-1351, feb. 2019.

POINTER. (2018). **Quais são as principais causas da eflorescência?**. Disponível em: <<https://pointer.com.br/blog/eflorescencia/>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 18h.

PORTANTIOLO, C. S. (2013). **Ficha técnica: silicato de sódio alcalino**. Disponível em: <[https://www.quimidrol.com.br/media/blfa\\_files/Silicato\\_de\\_Sodio\\_Alcalino\\_2.pdf](https://www.quimidrol.com.br/media/blfa_files/Silicato_de_Sodio_Alcalino_2.pdf)>. Acesso em: 24 de dezembro de 2019, às 16h50min.

POZO-FLY. **Fly ash (Pozolana)**. Disponível em: <<http://www.pozofly.com.br/produto>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2019, às 13h25miin.

PUGLIESI, N.; BATTAGIN, A. F.; CRUZ, F. R. Cimento: diferentes tipos e aplicações. **Revista digital**, 2018. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/11959>>. Acesso em: 12 de agosto de 2021, às 15h.

PRADO FILHO, H. R. (2019). **O transporte rodoviário e o recebimento de hidróxido de sódio**. Disponível em: <<https://revistaadnormas.com.br/2019/09/10/o-transporte-rodoviario-e-o-recebimento-de-hidroxido-de-sodio/>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 12h55min.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results, **Chem.Mater.** **17** (2005) 3075–3085.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**, Elsevier (2009).

PROVIS, J.L.; BERNAL, S.A. **Rev. Mater. Res.** **44** (2014) 299.

RANGAN, B. V., Wallah S.E. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties**. Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006.

REED, J. S. **Principles of Ceramic Processing**. New York: John Wiley & Sons Inc., 2° ed., 1995.

RIBEIRO, I. J. C.; BARBOSA, G. E.; SILVA, O.; ARAÚJO, D. T. R.; LUCENA, A. D. Implantação de métodos de tratamento para combater as eflorescências. **Revista Principia**, n. 38, p. 43-53. João Pessoa, 2018.

ROCHA JUNIOR, C. A. F; Angélica, R. S; Neves, R F.; **Cerâmica** **61** (2015) 259-268.

RODRIGUES, M. G. F. *et al.* Caracterização da argila bentonítica para utilização na remoção de chumbo de efluentes sintéticos. **Cerâmica** **50** (2004) 190-196.

RODRIGUES, A. W.; BRASILEIRO, M. I.; ARAÚJO, W. D.; ARAÚJO, E. M.; NEVES, G. A.; MELO, T. J. A. Development of polypropylene/brazilian bentonite clay nanocomposites: I treatment of clay and the influence of the compatibilizers on the mechanical properties. **Polímeros** vol.17 no.3 São Carlos July/Sept. 2007.

ROSSI, F. Tipos e Características de Cimentos.

ROY, D. Alkali-activated cements—opportunities and challenges, *Cem.Conc. Res.* **29**, 1999, 249–254.

SABAI, A. (2017). **Problemas causados pela lixiviação do concreto**. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/os-problemas-causados-pela-lixiviacao-do-concreto/>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 14h50min.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.

SAJWAN, K. S. *et al.* **Coal Combustion Byproducts and Environmental Issues**. p. 256, 2006.

SALIH, M. A.; ABANG, A. A. A.; FARZADNIA, N. Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste. **Construction & Building Materials**. 2014; 65: 592-603.

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**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SANTOS, P. S. (1975). **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras**. 1a ed. vol. 1. São Paulo: Edgard Blücher, Universidade de São Paulo, 340 p.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, Volume 2 Ed. V.1, Edgard Blücher LTDA, 1989.

SANTOS, P. S.. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, Volume 2 Ed. V.2, Edgard Blücher LTDA, 1992.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, vol. 01, 1992.

SANTOS, C. V. P.; SILVA, A. R.; GUIMARÃES FILHO, M. A. S.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A. A. Índice de Plasticidade e Análise Racional de Argilas de Marabá

(PA) para Avaliação das Zonas de Extrusão. **Cerâmica Industrial**, 17 (2) Março/Abril, 2012.

SANTOS, C. P.; OLIVEIRA, H. A.; OLIVEIRA, R. M. P. B.; MACEDO, Z. S. Characterization of calcareous clay used in the production of ceramic tiles in Sergipe State – Brazil. **Cerâmica** **62** (2016) 147-156.

SANTOS, F. A. **Estudo da variação da relação SIO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2017.

SANTOS, D.S.C.; MESQUITA, R.C. **Desempenho dos ativadores alcalinos para produção de geopolímeros com solo laterítico em São Luís – MA**. 59º Congresso Brasileiro de Química. João Pessoa / PB 5 a 8 de Novembro de 2019.

SCHACKOW, A. **Efeito das características pozolânicas de rejeitos de tijolos nas propriedades de argamassas**. Tese (doutorado). Universidade do estado de Santa Catarina, 2015.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 41, n. 7, p. 642–650, 2011.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO À PEQUENA E MÉDIA EMPRESA–SEBRAE. Setor de Cerâmica Vermelha - Projeto: Conservação de Energia nas Pequenas e Médias Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Relatório Final**. Conservação de Energia: Estudos Setoriais. Aspectos Econômicos e Tecnológicos. 1997.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. [s.l], v. 2, n. 8, p. 55-67. Jul. 2013.

SILVA, N. I. Warpechowski da *et al.* **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico**. **Cerâmica**, Dez. 1999, vol.45, no.296, p.184-187. ISSN 0366-6913.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista espaço da Sophia**, v. 8, p. 1-13, 2007. Disponível em: <<http://www.registro.unesp.br/sites/museu/basededados/arquivos/00000429.pdf>>. Acesso em: 06 de março de 2018, às 12h.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Brasília: IPEA, 2012.

SILVA, A. M.; PEREIRA, C. E.; COSTA, F. O.; SOUSA, B. V. **Influência da concentração de hidróxido de sódio na síntese de geopolímero usando a escória como precursor**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis – SC, out. 2014

SILVA, A. M.; PEREIRA, C. E.; COSTA, F. O.; SOUSA, B. V. **Síntese de materiais geopoliméricos usando como ativador alcalino KOH**. I CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS / III WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO - Campina Grande-PB, maio 2015.

SILVA, D. F. Viabilidade da utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como substituinte parcial do cimento Portland. **Revista Científica Univiçosa** - Volume 9- n. 1 - Viçosa-MG - JAN/DEZ 2017.

SILVA, G. J. B. (2016). Geopolímeros na construção: aglomerantes sustentáveis. Disponível em: <<https://blogreciclos.wordpress.com/2016/05/02/geopolimeros-aplicados-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2019, às 17h55min.

SIMINERAL, **Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará**. Disponível em: <<http://simineral.org.br/mineracao/?id=5>>. Acesso em 20 de agosto de 2012, às 14h20min.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2010**. 2011. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/snicrelatorio2010-11\\_web.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/snicrelatorio2010-11_web.pdf)>. Acesso em: 21 de janeiro de 2013, às 13h04min.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, SNIC; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, ABCP. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: Relatório de Referência – Emissão de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produtos Mineraias (Parte I) – Produção do cimento, Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: <[https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil\\_mcti\\_cimento.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_cimento.pdf)>. Acesso em 22 de abril de 2013, às 12h46min.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78–90, 2015.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. Reuse of ash coal in the formulation of mortars. *Cerâmica* **58** (2012) 275-279.

SIYAL, A. A. *et al.* A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes. *Journal of environmental management*, Elsevier, 2018.

SHI, C.; KRIVENKO, P.; ROY, D. **Alkali-activated Cement and Concrets**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 2006.

SUNG, G. *et al.* The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction & Building Materials*, v. 47, n. 2013, p. 409-418, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>>. Acesso em: 06 de janeiro de 2019, às 19h.

THAKUR, R. N.; GHOSH, S. Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4, 68–74, 2009.

THYEN TSAI, A. L. **A inovação e a importância das construções sustentáveis**. In: Boletim de Inovação e Sustentabilidade. v. 1, p. 5-45, 1 semestre. São Paulo: Puc, 2013.

UNEP, United Nations Environment Programme. **Energia**. 20 de novembro de 2019. Disponível em: <[encurtador.com.br/eiVY7](http://encurtador.com.br/eiVY7)>. Acesso em: 03 de dezembro de 2019, às 20h.

TIRONI, A.; CASTELLANO, C. C.; BONAVETTI, V.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Blended Cements Elaborated with Kaolinitic Calcined Clays. *Procedia Materials Science*, [S. l.], v. 8, p. 211–217, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.066>>. Acesso em: 11 de outubro de 2017, às 15h35min.

TONIOLO, N.; BOCCACCINI, A. R. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, v. 43, n. 17, p. 14545–14551, 2017.

TOPÇU, İ. B.; TOPRAK, M. U.; UYGUNOĞLU, T. Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production*, v. 81, p. 211–217, out. 2014.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 125-130, 2013.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. (1997) The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications. **Minerals Engineering**. 10: 659-669.

VAN JAARSVELD, J.; VAN DEVENTER, J.; LUKEY, G. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinitebased geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, v.89, p.63–73, 2002.

VEJA. (2019). **Temperatura da Terra em 2018 foi a quarta mais alta em 140 anos**. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/mundo/temperatura-da-terra-em-2018-foi-a-quarta-mais-alta-em-140-anos/>> Acesso em: 13 de dezembro de 2019, às 16h.

VERDUCH. A. G.; SOLANA, V. S. Formação de eflorescências na superfície dos tijolos. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 38-46, set./out. 2000.

VICENTINI, A. H. (2018) **Caracterização de um novo aglomerante originado da combustão da mistura de argila e biomassa**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia –UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Ilha Solteira, 2018.

VIERA, C. M. F.; DE HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. **Cerâmica** **46**, 297 (2000) 14.

VIEIRA, C. M. F., MONTEIRO, S. N. Effect of the particle size of the grog on the properties of bricks. In: **TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)**, 249–254. 2009.

VIEIRA, A. R. **Estudo sobre as reações pozolânicas de argilas calcinadas: contributo para o desenvolvimento de geomateriais**. Dissertação de Doutoramento na área Científica de Engenharia Geológica. Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Portugal, 2013.

VISA. Argilas: **O** que são, suas propriedades e classificações. Comunicações técnicas, 2001. Disponível em: <<http://www.visaconsultores.com/pdf/VISAcom09.pdf>>. Acesso 01 de novembro de 2016, às 14h52min.

WANDERLEY, G. V. (2018) **Produção de material para enchimento leve de elementos das edificações a partir da mistura de geopolímero com argila expandida**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

WANG, SHAO-DONG, AND KAREN L SCRIVENER. 1995. "Hydration products of alkali activated slag cement" **25** (3): 561–71.

WANG, K., SHAH, S. P., & MISHULOVICH, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. **Cement and Concrete Research**, 34(2), 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.003>.

WANG, A.; SUN, D.; HU, P.; REN, X. Experimental research on preparing geopolymeric cement with metakaolin activated by alkali activators. **J Hefei Univ. Tech.** v.31, p.617–621, 2008.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K. Dissolution processes, hydrolysis and condensations reactions during geopolymer synthesis: Part I - Low Si/Al ration systems. **Journal of Materials Science**, [s.I], v. 42, n. 9, p. 2997-3006, 9 de janeiro de 2007, à 11h.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050**. Paris, 2010.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.S.J. Factors affecting the geopolymerisation of alkali-feldspars. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 19, n.4, p. 209-214, 2002.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2003) The Effect of Alkali Metals on the Formation of Geopolymeric Gels from Alkali-Feldspars. **Colloids and Surfaces A**, 216, 27-44.

YAO, X., *et al.*, Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 2009. **493**(1): p. 49-54.

YAN, B.; DUAN, P.; REN, D. Mechanical strengt, surface abrasion resistance and microstructure of fly ash-metakaolin-sepiolite geopolymer composites. **Ceramics international**, v. 43, p. 1052-1060, 2017.

ZHANG, Z. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide. **Thermochimica Acta**, v. 539, p. 23-33, 2012.

ZHANG, Z. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. **Thermochimica Acta**, v. 565, p. 163-171, 2013.