



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
M O N D L A N E

**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Trabalho de Licenciatura**

**Alternativa de síntese de geopolímeros a partir de lama de estação de  
tratamento de água e cinza de carvão mineral**

**Autora**

Ébe Da Silva Boaventura

**Supervisor:**

Prof. Doutor António José Cumbane, Eng<sup>o</sup>

**Co-supervisor:**

Mestre Rodrigues Manjate, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Dezembro de 2024



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Trabalho de Licenciatura**

**Alternativa de síntese de geopolímeros a partir de lama de estação de  
tratamento de água e cinzas de carvão mineral**

**Autora**

Ébe Da Silva Boaventura

**Supervisor:**

Prof. Doutor António José Cumbane, Eng<sup>o</sup>

**Co-supervisor:**

Mestre Rodrigues Manjate, Eng<sup>o</sup>

Maputo, Dezembro de 2024

## TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que a estudante finalista \_\_\_\_\_ entregou no dia

\_\_\_/\_\_\_/2024 as 4 cópias do trabalho de licenciatura com a referência

\_\_\_\_\_, intitulado: **Alternativa de síntese de geopolímeros a partir de lama de estação de tratamento de água e cinzas de carvão mineral,**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2024

**Chefe da Secretaria**

\_\_\_\_\_

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Ébe Da Silva Boaventura, declaro por minha honra que este trabalho de licenciatura é de minha autoria, não foi aceite em nenhuma instituição de ensino como trabalho de culminação de curso, as experiências realizadas, o planeamento estatístico de ensaios laboratoriais, a interpretação e discussão dos resultados experimentais, foram por mim efectuadas.

Estudo de outros autores, foram usados no trabalho e devidamente citados de acordo com as Normas para apresentação de relatório de trabalho de licenciatura patente na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

---

(Ébe Da Silva Boaventura)

Data: \_\_/\_\_/2024

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus, meu companheiro fiel em todas as batalhas, os meus heróis, meus pais, Boaventura Nhacuongue e Monaliza Zango Nhacuongue e aos meus irmãos, Ayla, Ibenicio, Irónica, Queid e Yurgan.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha gratidão vai a Deus, que me sustentou e me capacitou nesta longa jornada, a certeza de que Ele cuida dos seus foi o combustível para esta caminhada.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Universidade Eduardo Mondlane pela transmissão de conhecimento. Em especial ao Prof. Dr. António Cumbane, Eng<sup>o</sup> e ao Mestre Rodrigues Manjate, Eng<sup>o</sup>, meus supervisores, pela supervisão, direcção, acompanhamento e disponibilidade para responder as minhas dificuldades.

À Direcção do Laboratório de Engenharia de Moçambique, por disponibilizar o seu laboratório para a realização dos ensaios laboratoriais. Ao Eng<sup>o</sup> Eleutério Monjane pela assistência ao longo da fase laboratorial. A Sra. Amélia, Sr. Macuacua e ao Micas pela ajuda, não teria sido menos trabalhoso sem a ajuda deles.

Aos meus pais, os que mais acreditaram em mim, investiram na minha formação, demonstraram amor e não cessaram de interceder em oração pela minha vida. Aos meus irmãos por me terem apoiado e incentivado a continuar nesta batalha.

Aos meus colegas da turma pelos momentos que juntos passamos, onde não faltou apoio e que certamente construímos um laço forte, que levarei para a vida, Dream Team, The six, Inódio (em memória), Raposo.

As meus amigos e intercessores da minha vida: Lile, Bendita, Fátima, Jorge e Nilzo. Não se faz esta caminhada sem amigos.

A todos que plantaram em minha vida e contribuíram para esta realização, em especial ao prof Edson Cossa (em memória).

“Pois eu estou certo de que Deus, que começou esse bom trabalho na vida de vocês,  
vai continuá-lo até que ele esteja completo no Dia de Cristo Jesus.”

-Filipenses 1:6

## RESUMO

A produção de cimento *Portland* é uma das actividades industriais mais intensivas em emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo significativamente para mudanças climáticas. Além disso, o processo de fabricação de cimento consome grandes quantidades de energia e recursos naturais. Nesse contexto, surge a necessidade de alternativas mais sustentáveis para a construção civil. Os geopolímeros, materiais cimentícios de baixo impacto ambiental, apresentam-se como uma solução promissora. O presente trabalho tem como objectivo apresentar alternativa de síntese de geopolímeros a partir de matérias-primas residuais, como lama de estação de tratamento de água (LETA) e cinza de carvão mineral. A activação química dos precursores foi realizada utilizando uma solução alcalina composta de NaOH e silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), com razão molar 2:1. Foram feitas variações na concentração de NaOH (8M e 10M), na temperatura de calcinação da lama (não calcinada, calcinada a 700°C e 800°C), e na composição do precursor (com 0%,20% e 40% de cinza). As propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros produzidos foram avaliadas, incluindo absorção de água, densidade, porosidade, resistência à flexão e à compressão. A formulação que apresentou os melhores resultados foi obtida com 10M de NaOH, lama calcinada a 700°C, sem substituição com cinza, atingindo uma resistência a compressão de 12.63MPa aos 28 dias de cura. Adicionalmente provetes geopoliméricos e de cimento *Portland* foram submetidos a altas temperaturas (300 e 800°C), onde os geopolímeros demonstraram um excelente desempenho (16MPa). Enquanto os provetes de cimento *Portland* sofreram uma queda de 48% na resistência após o aquecimento, os geopoliméricos, por outro lado, apresentaram um aumento notável de 28% em sua resistência, evidenciando sua superioridade em ambientes de alta temperatura.

**Palavras Chaves:** Cimento *Portland*, Alternativas sustentáveis, Geopolímeros, Lama de estação de tratamento de água(LETA), Cinza de carvão mineral, Resistência à compressão.

## ABSTRACT

The production of Portland cement is one of the most CO<sub>2</sub>-intensive industrial activities, significantly contributing to climate change. Additionally, the cement manufacturing process consumes large amounts of energy and natural resources. In this context, there is a growing need for more sustainable alternatives for the construction industry. Geopolymers, low environment impact cementitious materials, present a promising solution. This work aims to investigate the production and characterization of geopolymers from residual raw materials, such as water treatment plant sludge (LETA) and coal fly ash. The chemical activation of these precursors was carried out using an alkaline solution composed of NaOH and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). Variations in the NaOH concentration (8M and 10M), sludge calcination temperature (uncalcined, calcined at 700°C and 800°C), and precursor composition (0%, 20 and 40% ash) were tested. The physical and mechanical properties of the produced geopolymers were evaluated, including water absorption, density, porosity, flexural strength, and compressive strength. The formulation that showed the best results was obtained with 10M NaOH, sludge calcined at 700°C, without ash substitution, reaching a compressive strength of 12.63MPa after 28 days of curing. Additionally, geopolymer and Portland cement specimens were subjected to high temperatures (300 and 800°C), where the geopolymers demonstrated excellent performance (16 MPa). While Portland cement specimens experienced a 48% reduction in strength after heating, the geopolymers, on the other hand, exhibited a remarkable 28% increase in strength, highlighting their superiority in high-temperature environments.

**Keywords:** Portland cement, Sustainable alternatives, Geopolymers, Water treatment plant sludge (LETA), Coal fly ash, Compressive Strength.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos.....	2
1.1.1. Geral.....	2
1.1.2. Específicos.....	2
1.2. Justificativa.....	2
CAPÍTULO II : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Geopolímeros.....	5
2.1.1. Breve historial dos geopolímeros.....	5
2.1.2. Estrutura dos geopolímeros.....	6
2.1.3. Geopolimerização.....	6
2.1.4. Factores que afectam o grau de polimerização e a resistência dos geopolímeros.....	8
2.1.5. Principais propriedades dos geopolímeros.....	11
2.1.6. Aplicação dos geopolímeros.....	12
2.2. Tratamento de água.....	14
2.2.1. Lama da estação de tratamento de água.....	15
2.3. Cinzas de carvão mineral.....	16
2.4. Cimento Portland.....	18
2.4.1. Propriedades do cimento <i>Portland</i> .....	19
CAPÍTULO III : PARTE EXPERIMENTAL .....	20
3.1. Materiais percursores.....	20
3.1.1. Lama de Estação de tratamento de água (LETA).....	20
3.1.2. Cinza pesada.....	23
3.3. Preparação da solução activadora.....	24
3.3. Caracterização da matéria-prima .....	25

3.3.1. Fluorescência de Raios-X (FRX).....	25
3.4. Planeamento estatístico de ensaios.....	25
3.4.1. Influência da calcinação e da substituição da LETA pelas cinzas.....	25
3.4.2. Influência da concentração e do tempo de cura.....	26
3.4.3. Influência da temperatura na resistência dos geopolímeros.....	26
3.5. Produção de argamassa geopolimérica.....	27
3.5.1. Composição da argamassa.....	27
3.6. Ensaio de caracterização.....	33
3.6.1. Determinação das propriedades físicas das argamassas endurecidas.....	33
3.6.2. Determinação das propriedades e mecânicas das argamassas endurecidas.....	34
CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1. Caracterização da matéria-prima.....	36
4.1.2. Fluorescência de Raios X(FRX).....	36
4.2. Propriedades físicas dos provetes .....	39
4.2.1. Densidade aparente.....	39
4.2.2. Absorção de água.....	41
4.2.3. Porosidade.....	44
4.3. Propriedades mecânicas de argamassas endurecidas .....	47
4.3.1. Influência da temperatura de calcinação da LETA e da substituição da lama pela cinza.....	47
4.3.2. Influência da concentração e do tempo de cura.....	50
4.3.3. Influência da temperatura na resistência dos geopolímeros.....	52
CAPÍTULO V : CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	54
5.1. Conclusões.....	54
5.2. Recomendações .....	55

Referências bibliográficas .....56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura tridimensional dos geopolímeros, Davidovits, J. (2002). .....	6
Figura 2: Esquema de geopolimerização, (Zhuang, 2016), (adaptado).....	8
Figura 3: Aplicação dos materiais geopoliméricos (Davidovits,2002).(Adaptado). .....	14
Figura 4:Amostra de cimento Portland. Fonte: Autor.....	18
Figura 5: Lama de estação de tratamento de água .....	20
Figura 6:Fluxograma de tratamento de lama de estação de tratamento de água .....	20
Figura 7: Estufa usada para secagem .....	21
Figura 8: Moinho de bolas (A) e bolas do moinho(B).....	21
Figura 9: Mufla usada na calcinação .....	22
Figura 10: Lama não calcinada (A), lama calcinada a 700°C (B) e lama calcinada e 800°C. .....	22
Figura 11: Fluxograma de processo de preparação da cinza.....	23
Figura 12: Peneiro com amostra de cinza. ....	24
Figura 13:Areia usada na preparação de corpos de prova.....	24
Figura 14:Diferentes formulações de argamassa geopolimérica.....	27
Figura 15: Equipamentos e algumas etapas de preparação de provetes:(1) Misturadora , (2) Compactador, (3) preenchimento do molde com argamassa e (4) molde com argamassa. .....	31
Figura 16: Equipamentos usados para cura dos provetes: Estufa; Câmara de estufa. ....	32
Figura 17:Provetes antes de desmoldar e devidamente identificados depois de desmoldar. .....	32
Figura 18: Prensa hidráulica usada nos ensaios de resistência a flexão e compressão, com os provetes para os ensaios. ....	35
Figura 19: Curva de distribuição granulométrica da areia .....	36
Figura 20: Composição química da lama de estação de tratamento de água. ....	37
Figura 21: Composição química da cinza pesada de carvão mineral.....	38
Figura 22: Densidade dos corpos de prova com variação da concentração de NaOH.....	39
Figura 23:Densidade dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.....	40

Figura 24: Densidade dos corpos de prova variando a composição do precursor. ....	41
Figura 25: Absorção de água dos corpos de prova com variação da concentração de NaOH. .....	42
Figura 26: Absorção de água dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.....	43
Figura 27: Absorção de água dos corpos de prova com variação da composição do precursor. ....	44
Figura 28: Porosidade dos corpos de prova variando a concentração de NaOH. ....	45
Figura 29: Porosidade dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.....	46
Figura 30: Porosidade dos corpos de prova variando a composição do precursor. ....	47
Figura 31: Influência da temperatura de calcinação na resistência dos geopolímeros.....	48
Figura 32: Influência da substituição da lama pela cinza.....	50
Figura 33: Influência da concentração e do tempo de cura. ....	50
Figura 34: Influência da temperatura na resistência a compressão .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de LETA segundo alguns autores .....	16
Tabela 2: Composição química da cinza segundo alguns autores. ....	17
Tabela 3: Composição da solução activadora .....	25
Tabela 4: Planeamento para a análise da influência da temperatura de composição do precursor na resistência dos geopolímeros. ....	26
Tabela 5: Planeamento para a análise da influência da concentração do NaOH e do tempo de cura na resistência dos geopolímeros. ....	26
Tabela 6: Planeamento para a análise da influência da temperatura na resistência dos geopolímeros. ....	26
Tabela 7: Formulações de argamassas geopoliméricas de LETA. ....	27
Tabela 8: Composição de provetes a base de LETA variando a concentração. ....	28
Tabela 9: Composição de provetes de LETA variando a temperatura de calcinação. ....	28
Tabela 10: Composição de provetes a base de LETA e cinza. ....	29
Tabela 11: Composição de argamassa de cimento. ....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolos/ Sigla	Significado	Unidade
2CaO-SiO <sub>2</sub>	Silicato dicálcico	-
3CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminato tricálcico	-
3CaO-SiO <sub>2</sub>	Silicato tricálcico	-
4CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferroaluminato tetracálcico	-
<i>AbH<sub>2</sub>O</i>	Absorção de água	%
a.C	antes de Cristo	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio	-
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio	-
CaO	Óxido de cálcio	-
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	-
$\varepsilon$	Porosidade total	%
$\rho$	Densidade aparente	g/cm <sup>3</sup>
ETA	Estação de tratamento de água	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro (III)	-
FRX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X	-
H <sub>2</sub> O	Água	-
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio	-
LEM	Laboratório de Engenharia de Moçambique	-
LETA	Lama de estação de tratamento de água	-
MgO	Óxido de magnésio	-
<i>m<sub>h</sub></i>	Massa do provete húmido	G
MnO	Óxido de manganês	-
<i>m<sub>s</sub></i>	Massa do provete seco	G
NaOH	Hidróxido de sódio	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Silicato de sódio	-
PC8L	Proвете a base de lama com 10mol/l de concentração de hidróxido de sódio	-

PC10L	Provete a base de lama com 8mol/l de concentração de hidróxido de sódio	-
PCP	Provete a base de cimento Portland	-
P.F	Perda de Fogo	-
PL	Provete a base de lama	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de difósforo	-
PT0L	Provete a base de lama não calcinada	-
PT7C/L20	Provete a base de lama calcinada a 700°C e substituição com cinza a 20%	-
PT7C/L40	Provete a base de lama calcinada a 700°C e substituição com cinza a 40%	-
PT7L	Provete a base de lama a temperatura de 700°C	-
PT8L	Provete a base de lama a temperatura de 800°C	-
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício	-
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre	-
Si-O-Al	Polissialato (PS)	-
Si-O-Al-O-Si-O	Polissialato-siloxo (PSS)	-
Si-O-Al-O-Si-O-Si-O	Polissialato-disiloxo (PSDS)	-
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio	-
V <sub>pr</sub>	Volume do provete	cm <sup>3</sup>

## CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos gerados por várias indústrias tem sido um agravante nas questões ambientais, contribuindo para a degradação do meio ambiente e representando um perigo para a saúde pública quando feita de forma inadequada. Entre os resíduos gerados por diversas indústrias, está a lama de estação de tratamento de água (LETA), um subproduto do processo de tratamento de água. Durante este processo, no qual a água é tratada para torná-la potável, são utilizados processos químicos e físicos que geram esse resíduo conhecido como lama. A lama é formada pela concentração de todas as impurezas contidas na água bruta, juntamente com os produtos químicos utilizados, removidos por sedimentação e filtração nos decantadores durante a purificação da água. A lama contém uma alta concentração de substâncias prejudiciais ao meio ambiente. Este subproduto é considerado resíduo e geralmente é enviado para aterros sanitários ou outros locais destinados à disposição final de resíduos sólidos. Nos locais de disposição final, a lama pode causar graves impactos ambientais e sociais, principalmente devido à sua quantidade e concentração em metais como alumínio e ferro. Além desses impactos, a disposição também acarreta custos económicos para as empresas responsáveis pela gestão dos sistemas de produção de água.

Por outro lado, a indústria de cimento também desempenha um papel significativo nas questões ambientais, especialmente devido ao alto impacto de seu processo produtivo. O processo industrial de produção do cimento Portland envolve a aplicação de altas temperaturas para a produção do clínquer, que é o principal componente intermediário do ciclo produtivo. Isso demanda uma grande quantidade de energia e resulta na emissão de gases de efeito estufa. De acordo com Davidovits (2013), a produção de uma tonelada de cimento Portland gera 0.95 toneladas de dióxido de carbono.

Uma alternativa actualmente em estudo para o desenvolvimento de tecnologias visando o aproveitamento de resíduos industriais e a redução das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de cimento Portland é a produção de materiais geopoliméricos.

O presente estudo visa desenvolver geopolímeros à base de lama de estação de tratamento de água e cinzas pesadas de carvão mineral como alternativa para o aproveitamento de resíduos industriais e substituição do cimento *Portland*.

## **1.1. Objectivos**

### **1.1.1. Geral**

Sintetizar geopolímeros usando como percussores a lama de estação de tratamento de água e cinza de carvão mineral.

### **1.1.2. Específicos**

Com vista ao alcance do objectivo geral definiram-se os seguintes objectivos específicos:

- Caracterizar os percursos, lama de estação de tratamento de água e cinzas de carvão mineral;
- Analisar o efeito da temperatura de calcinação da lama de estação de tratamento de água (LETA) nas propriedades do geopolímero;
- Analisar diferentes composições do precursor (Lama + Cinzas) na produção de geopolímeros;
- Explicar o efeito da concentração de NaOH, tempo de cura e temperatura na resistência dos geopolímeros;
- Determinar as propriedades dos geopolímeros produzidos.

## **1.2. Justificativa**

A indústria de produção de cimento tem sido reconhecida como uma importante fonte de emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo significativamente para o aquecimento global, principalmente devido à etapa de clinquerização, que consome considerável energia térmica (Sobral, 2015). Paralelamente, o rápido crescimento da população urbana implica em uma maior demanda por produtos, bens e serviços, levando a uma expansão industrial e, conseqüentemente, ao aumento na geração de resíduos. Observa-se, particularmente no sector de tratamento de água, um aumento no número de empresas públicas e privadas, resultando em um incremento no volume de resíduos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). No entanto, muitas vezes, a disposição final desses resíduos não é adequada.

Ademais, é importante considerar que a queima de carvão mineral em usinas térmicas também contribui significativamente para a geração de resíduos. As cinzas residuais deste sector constituem um resíduo que, quando mal destinado, pode representar perigo para o ambiente e para a saúde humana. Particularmente as cinzas pesadas da queima de carvão mineral têm poucas alternativas de aproveitamento.

Nesse contexto, a busca por alternativas tecnológicas para o aproveitamento desses resíduos pode trazer benefícios significativos, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, para a sociedade (Rodrigues, 2016). Desenvolver uma tecnologia alternativa para a reciclagem desses resíduos de forma ambientalmente correta é fundamental não apenas para as empresas geradoras, mas também para o meio ambiente e a sociedade em geral.

Neste cenário, os geopolímeros surgem como uma das alternativas mais promissoras para substituir o cimento. Além de possuírem propriedades mecânicas próximas às do cimento, os geopolímeros emitem menos gases poluentes durante sua produção e podem ser fabricados, em sua maioria, a partir de resíduos de outros processos industriais.

### **1.3. Metodologia**

Este trabalho foi dividido em duas fases principais: a revisão bibliográfica e a fase experimental. O objectivo foi estudar a viabilidade de geopolímeros produzidos com lama de estação de tratamento de água e cinzas de carvão mineral, com foco em suas propriedades mecânicas, físicas e composição química.

**Revisão Bibliográfica:** Foi realizada uma pesquisa em fontes académicas para compilar informações sobre a produção e propriedades de geopolímeros. A revisão incluiu artigos científicos, teses e normas técnicas, concentrando-se no uso de resíduos como precursores geopoliméricos.

**Parte Experimental:** Na fase experimental, foram caracterizadas as amostras realizando a análise química da matéria-prima, com o objectivo de identificar os componentes que a constituem, facilitando a escolha do método adequado para a optimização dos parâmetros de controle. De seguida foram produzidos os geopolímeros a partir de lama de estação de

tratamento de água e cinza de carvão mineral com diferentes formulações. Foram realizados ensaios mecânicos de resistência a compressão e a flexão e, físicos de absorção de água, densidade e porosidade.

O estudo combina uma abordagem teórica, através da revisão bibliográfica, com uma prática, através da realização de ensaios laboratoriais

## **CAPÍTULO II : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Geopolímeros**

O termo geopolímero foi oficializado pelo professor Joseph Davidovits na década de 1970, e desde então, os geopolímeros, polissialatos ou polímeros inorgânicos são os termos usados para denominar uma nova classe de material cimentício obtida por meio da reacção de geopolimerização de materiais naturais de origem geológica que possui alumino silicato, no qual é indispensável a activação alcalina (Davidovits,2013).

São compostos sintetizados pela reacção entre alumino silicatos e uma concentração de solução hidróxido alcalina e/ou uma solução álcali-silicato, desde que tenham uma estrutura tridimensional amorfa (Davidovits, 2015). Os geopolímeros são extremamente versáteis e possuem uma ampla gama de aplicações potenciais, que incluem materiais refratários, pedras decorativas, isolantes térmicos, telhas cerâmicas, materiais para uso médico, pastas, argamassas, concretos, compósitos para recuperação e reforço de infraestruturas, materiais de alta tecnologia utilizados em interiores de aeronaves e automóveis, sistemas de resinas avançadas, materiais para imobilização de contaminantes tóxicos e radioativos, além de algumas aplicações no campo das artes (Davidovits, 2015).

#### **2.1.1. Breve historial dos geopolímeros**

Entre os anos de 1970 e 1973 a França sofreu com a ocorrência de alguns incêndios no país. Tal facto levou os pesquisadores à percepção de que havia a necessidade de se desenvolver materiais de construção resistentes ao fogo (Davidovits, 1991).

Davidovits estudou algumas amostras de cimentos antigos, por apresentarem pouco desgaste e alterações químicas, mesmo sendo expostos a ambientes físicos e agressivos por longos períodos de tempo. Entre as amostras estudadas havia fragmentos de algumas Pirâmides do Egito e algumas amostras de Jericó que foram identificadas como sendo de 7000 a.C. Davidovits (1994) atesta através de estudos químicos e mineralógicos que os blocos das pirâmides do Egito não são de pedra calcária natural, mas sim de um aglomerante feito da mistura de calcário de Gizé com hidróxido de sódio, produzido no local pela mistura de cal, carbonato de sódio e água.

### 2.1.2. Estrutura dos geopolímeros

Para a designação química de geopolímeros à base de silico-aluminatos, Davidovits (2002), sugeriu Polissialato.

A estrutura proposta do geopolímero categoriza-os em três formas básicas, dependendo de suas razões sílica/alumina (Si:Al), a saber, poli (sialato), poli (sialato-siloxo) e poli (sialato-disiloxo), como exibida na Figura 1.

A fórmula empírica dos polissialatos é dado por:



Onde M é um cátion ( $Na^+$ ,  $K^+$  ou  $Ca^{2+}$ ), elemento alcalino e n é o grau de polimerização. O símbolo (-) indica a presença de uma ligação, z é 1,2 ou 3 e w é o grau de hidratação. Quando z é igual a 1 o nome é polissialato (PS), z igual a 2, polissialato-siloxo (PSS), e z igual a 3, polissialato-disiloxo (PSDS). (Davidovits,1991 e 2002).

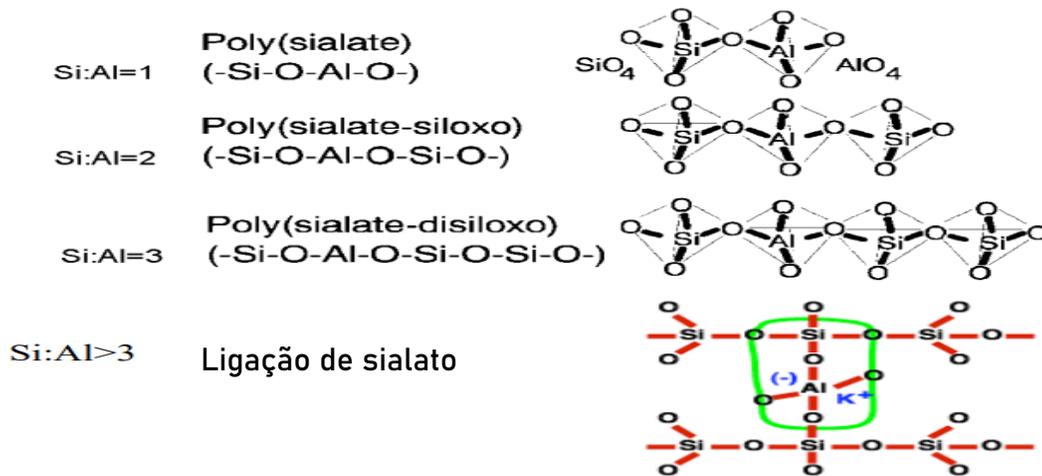


Figura 1: Estrutura tridimensional dos geopolímeros, Davidovits, J. (2002).

### 2.1.3. Geopolimerização

A geopolimerização é um processo exotérmico que ocorre entre aluminosilicatos e um ativador químico altamente alcalino em meio aquoso. Esta reação se baseia na química da ativação alcalina de materiais inorgânicos (Khale,2007).

A Figura 2 representa o esquema de geopolimerização, a primeira etapa consiste na dissolução de um alumino silicato em uma solução alcalina. Quando o material precursor entra em contacto com a solução activadora, a dissolução tanto dos compostos de alumínio quanto dos de silício inicia. Há a quebra de ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si por meio da hidrólise alcalina. A dissolução depende principalmente da concentração da solução activadora e do metal alcalino na solução (Xu, 2002).

Depois que ocorre a dissolução do alumino silicato, é criada uma solução supersaturada de alumino silicatos e, então, os complexos de alumínio e silício se difundem em uma fase de gel.

A formação do gel ocorre simultaneamente com a dissolução e a difusão. O gel é formado a partir da policondensação dos oligômeros, liberando a água consumida durante a dissolução. Temperatura, pH e o cátion presentes na solução alcalina são os três principais factores que afectam esta fase. Uma alta temperatura, um alto pH (ou alta concentração da solução activadora) e um cátion de metal alcalino com um tamanho atômico maior, estimulam a fase de condensação e promovem uma completa geopolimerização (Xu, 2002; Duxson *et al.*, 2007).

Quando o gel se solidifica, as partículas de alumino silicatos ligam-se umas às outras, pois o mesmo actua como um aglomerante. Assim, obtém-se uma rede tridimensional de estrutura silico-aluminato.

Um dos benefícios de materiais geopoliméricos está relacionado a sua fabricação. Se comparado ao do cimento *Portland*, o processo produtivo de certos tipos de geopolímeros, consome 3,5 vezes menos energia e emite de 5 a 6 vezes menos CO<sub>2</sub>, o que torna estes materiais exemplos perfeitos de Química Verde e Desenvolvimento Sustentável (Davidovits, 2005).



Figura 2: Esquema de geopolimerização, (Zhuang, 2016), (adaptado).

#### 2.1.4. Factores que afectam o grau de polimerização geopolímeros

Estrutura de Polissialato

5

Para que a geopolimerização ocorra, o resultado final depende de várias variáveis e fatores que envolvem todo o processo, os quais determinam a formação da estrutura e a resistência dos materiais. Entre esses fatores, estão:

- Natureza do precursor, fonte de aluminosilicato;
- Concentração da solução activadora;
- Quantidade de água;
- Temperatura, pressão e tempo de cura.

Entretanto, inseridas nestas variáveis podem existir outras que precisam ser avaliadas para melhorar os resultados, como quantidade de material amorfo e de cristalinidade; tamanho de partículas; quantidade de metal pesado inserido na matéria-prima, principalmente no caso de utilização de resíduos industriais. E ainda, há a possibilidade de mistura entre duas fontes de aluminosilicatos que se torna outra variável e precisa ser ajustada dependendo das matérias-primas utilizadas.

#### **2.1.4.1. Natureza do precursor e concentração da solução activadora**

Os materiais geopoliméricos são sintetizados a partir de fontes de alumínio silicatos, tais como argilas calcinadas, metacaulina, cinzas derivadas do processo de combustão de carvão em termoelétricas (cinzas volantes) ou escórias metalúrgicas residuais da siderurgia do ferro e do aço, juntamente com um ativador alcalino. A microestrutura e as propriedades dos geopolímeros dependem em grande parte da composição química das matérias-primas utilizadas, tanto da parte sólida como dos activadores (Xu,2003).

O tempo para que ocorra a formação da fase gel vai depender das condições de processamento das matérias-primas, composição do activador e das condições de síntese (Duxson, 2007).

De acordo com Barbosa (2000) a escolha do tipo de catião de metal alcalino utilizado durante a síntese de geopolímeros depende de muitos factores, o mais importante é o tipo de materiais de origem, e da aplicação prevista dos geopolímeros produzidos. Um aspecto importante que deve ser analisado na solução activadora é a sua concentração molar. Para Konmitsas et al., (2007) o excesso de activador pode formar carbonato de sódio em contacto com o ar, causando eflorescência na matriz geopolimérica.

Foi comprovado que o líquido alcalino contendo silicatos solúveis aumenta a taxa de reacção em comparação com soluções alcalinas que continham apenas hidróxido (Hardjito D. &., 2005).

O activador ideal é aquele que está na concentração suficiente para que ocorra balanceamento das cargas de  $Si^{4+}$  e  $Al^{3+}$  nos tetraedros (a carga negativa sobre o grupo  $AlO^{4-}$  é responsável pelo balanceamento da carga  $Na^+$  e/ou  $K^+$ ). O excesso de activador pode formar carbonato de sódio em contacto com o ar (Konmitsa et al.,2007).

#### **2.1.4.2. Tamanho de partículas do material sólido**

O tamanho de partículas é um factor que influencia a resistência final do geopolímero produzido. Se as partículas forem grandes, como a reacção de geopolimerização é um processo relativamente rápido, ao receberem a solução activadora imediatamente inicia a dissolução da fase amorfa, precipitação e posteriormente reorganização de uma nova estrutura inorgânica, em seguida o endurecimento. Com o endurecimento na interface entre

as partículas, o líquido da solução não consegue penetrar nas partículas menores que estão inseridas dentro das partículas maiores, deixando assim as mesmas aprisionadas e sem reagirem, participando da reacção apenas como um “*filler*”. Assim o material perde resistência, pois parte da matéria-prima disponível não irá participar da reacção (Konmitsa *et al.*, 2007).

#### **2.1.4.3. Propriedades amorfas dos materiais sólidos**

Os materiais que passam por tratamento térmico, dependendo da cinética de calcinação envolvida para cada tipo, podem adquirir propriedades amorfas ou semicristalinas em sua estrutura. Esse fator permite que os materiais geopoliméricos apresentem maior reatividade durante o processo de produção. Além disso, os materiais submetidos a tratamento térmico possuem um grau de polimerização superior em comparação aos materiais não calcinados (Palomo *et al.*, 1999).

#### **2.1.4.4. Influência da quantidade de água**

A água, em uma mistura geopolimérica, portanto, não desempenha nenhum papel nas reacções químicas, apenas fornece fluidez à mistura durante o seu manuseio (Hardjito, 2005). Ou seja, o papel da água na geopolimerização é ser o meio no qual o activador químico e o material aluminossilicato entram em contacto. Desta forma, torna-se importante controlar a quantidade de água de forma que seu excesso ou falta não causem efeitos negativos ao material.

A água, quando utilizada em quantidades pequenas, pode favorecer os estágios de policondensação e endurecimento da mistura devido ao aumento do poder de activação. Isso ocorre porque os silicatos e aluminatos presentes na reacção se dissolvem mais rapidamente, acelerando a geopolimerização e favorecendo o grau de polimerização e a formação de oligômeros. Porém, deve-se atentar para o facto de que, se a quantidade de água for muito pequena, o efeito pode ser negativo, pois esta age como meio de transporte para que o reagente atinja todas as regiões do sólido. Se a água estiver em quantidades muito pequenas, algumas partes do sistema não receberão o activador e isso irá diminuir o grau de polimerização e enfraquecer o material (Giannopoulou e Panias, 2007).

Por outro lado, quando o teor de água é elevado, existe a tendência de formação de cristais maiores, diminuindo a área de superfície específica, levando a diminuição na resistência do material sintetizado (Olivia *et al.*, 2008). A resistência à compressão é um dos factores mais afectados pela variação da água no sistema.

Com base nestas afirmações, pode-se dizer que existe uma faixa entre os dois extremos onde estaria a quantidade ideal de água, porém, as misturas geopoliméricas têm como característica a baixa trabalhabilidade.

#### **2.1.4.5. Temperatura, pressão e tempo de cura**

A temperatura de cura é outro factor importante para ser analisado no processo de geopolimerização. Para Hardjito (2007), a cura acelerada aumenta a resistência mecânica, isso porque a energia necessária para dissolução de cinzas é um processo endotérmico. O aumento da temperatura pode acelerar a velocidade da reacção, resultando em maior força compressiva (Hardjito,2005). Apesar disso, um aumento elevado da temperatura contribui para que as amostras sofram rápida perda de humidade que é um factor importante para ocorrer maior polimerização.

O tempo de cura no processo de geopolimerização é também um factor que influencia nas propriedades dos geopolímeros. Segundo Davidovits (1991), ganha cerca de 70% da sua resistência nas primeiras 3-4h de cura.

### **2.1.5. Principais propriedades dos geopolímeros**

#### **2.1.5.1. Resistência a compressão**

Os geopolímeros podem ser vistos como rocha feita pelo homem, esta breve descrição ilustra uma das principais características dos geopolímeros, a sua resistência à compressão. Os ligantes obtidos por activação alcalina tem a capacidade de obter resistências à compressão elevadas para períodos de cura breves (Davidovits,1994).

Santa (2012) desenvolveu um estudo de geopolímeros produzidos com base em cinzas pesadas e metacaulina onde obteve valores de resistência à compressão acima de 22MPa.

Rossetto (2017) num estudo sobre a substituição parcial de metacaulina por lama de estação de tratamento de água adquiriu valores de resistência à compressão acima de 50MPa.

Num estudo detalhado de geopolímeros de cinzas volantes, Palomo *et al.*, (1999) produziu geopolímeros de cinzas volantes com activadores, hidróxido de sódio e silicato de sódio e obteve valores de resistência a compressão acima de 60MPa.

#### **2.1.5.2. Resistência térmica**

Os ensaios térmicos das argamassas de cimento e geopolímeros mostram que as argamassas geopoliméricas têm melhores desempenhos, comparativamente às argamassas de cimento *Portland*, com maiores resistências térmicas e menores condutibilidades térmicas.

Geopolímeros podem manter suas propriedades mecânicas e estruturais em temperaturas elevadas, geralmente acima de 600°C, e em alguns casos, até 1200°C (Davidovits,2008).

#### **2.1.5.3. Ataque químico**

O ataque químico pode ser caracterizado pela deterioração dos materiais cimentícios, decorrentes da acção de substâncias químicas. Tais danos podem se originar internamente, como na reacção álcali-sílica (RAS) e, é mais comum, ser oriundos de factores externos, mediante presença de ácidos, sulfatos, cloretos e gás carbónico (Ramos, 2022).

As matrizes estruturais desenvolvidas pelos geopolímeros capacitam os mesmos com uma resistência aos ataques de ácidos superior à resistência do cimento *Portland* (Chindaprasirt,2007).

#### **2.1.6. Aplicação dos geopolímeros**

Segundo Pinto (2004), o desenvolvimento dos materiais geopoliméricos se orienta por duas grandes linhas de actuação. Uma linha está dirigida a obtenção de materiais de baixo custo para a utilização em grandes quantidades. Nesta linha as matérias-primas podem ser o metacaulim, escórias granuladas e cinzas volante ou qualquer alumino-silicatos que possuam razão atómica de Si/Al que varie de 1 a 3. A segunda linha de actuação utiliza materiais mais sofisticados, mais caros, onde a razão atómica entre Si/Al pode chegar até

35, como ilustra a Figura 3. Nesta linha de actuação, o material básico é o matacaulim que sofrerá alterações no teor de sílica.

Nos últimos anos, os geopolímeros têm se mostrado uma alternativa ambiental e economicamente sustentável para a absorção de resíduos, tais como, cinzas volantes (Cesari, 2015), cinzas de casca de arroz (Apolonio, 2017), lama vermelha (Sousa, 2018) entre outros.

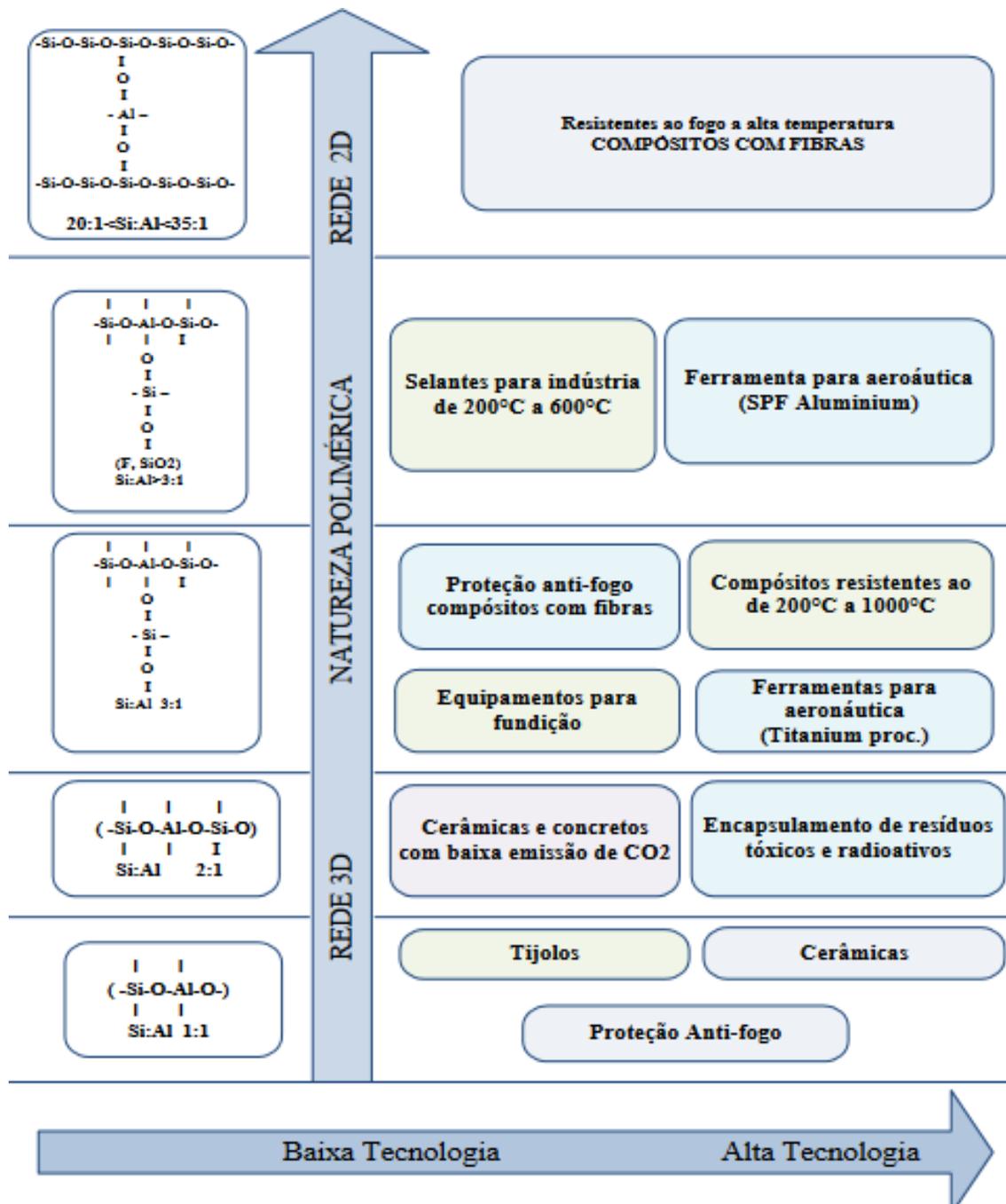


Figura 3: Aplicação dos materiais geopoliméricos (Davidovits,2002).(Adaptado).

## 2.2. Tratamento de água

As captações de água superficiais (rios, lagos) ou subterrâneas dependem das infiltrações e natureza dos terrenos, dos reservatórios e albufeiras independentemente das condições climáticas e dos caudais de captação (Juanico,1998).

O processo de tratamento de água é feito em unidades designadas Estações de Tratamento de Água. Segundo Tsutiya (2006), define estação de tratamento de água (ETA) como um conjunto de unidades destinada a tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade. Isso significa que a qualidade físico-química e microbiológica da água está em conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos por agências reguladoras (Filho, 2017).

Segundo Filho (2017) e Juanico (1998), as principais operações aplicadas para o tratamento de águas para consumo humano são: coagulação, floculação, sedimentação gravitacional, filtração e desinfecção.

### **2.2.1. Lama da estação de tratamento de água**

No processo de produção de água potável, que é uma das etapas da indústria da água, ocorre a geração de resíduos em decorrência das impurezas presentes na água bruta e da utilização de produtos químicos (Cordeiro *et al.*, 2013). O lodo ou lama é um dos resíduos.

O volume, propriedades e características da lama dependem da fonte e tipo de água bruta, taxa de produção de água sendo tratada, nível de contaminação da fonte de tratamento de água, tipo de coagulante adicionado e a dosagem aplicada durante o tratamento de água e as condições de operação da planta (Anjithan, 2016; Crittenden *et al.*, 2012; USEPA, 2011 apud Rabah & Qtenawi, 2021).

O lodo, contem material orgânico dissolvido, inorgânico e algas removidas da água. Os sólidos inorgânicos são derivados dos produtos químicos coagulantes e da argila e sedimentos removidos da água bruta. O PH e os sólidos dissolvidos na porção líquida do lodo são aproximadamente os mesmo da água que esta sendo tratada. Em uma análise química completa de uma lama de alumínio, conforme relatado por Schimitt e Hall (1975), um total de 72 elementos foi detectado.

Os elementos mais abundantes encontrados foram (em ordem decrescente de predominância por peso) silício, alumínio, ferro, titânio, cálcio, potássio, magnésio e manganês (Crittenden, 2012) como apresentado na Tabela 1. A LETA é composta quimicamente, em sua maioria, por sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Rodrigues, 2016; Agra, 2022).

Devido a disponibilidade, acessibilidade e composição química rica em sílica e alumina, tornam a LETA tecnicamente compatível para desenvolver materiais de construção civil, como matrizes cimentícias, geopolímeros, blocos refractários, entre outros. (De Jesus, 2018). Rossetto (2017), concentrou sua pesquisa em analisar as características físicas, químicas e mecânicas de argamassas com a presença de lama de estações de tratamento de água, como fonte de alumino silicatos em substituição parcial do metacaulim, como também, utilizando o lodo como forma de adição.

De Oliveira (2020), afirma em seu estudo que os teores de óxidos de sílica (SiO<sub>2</sub>), ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que formam a LETA apresentam características semelhantes aos precursores de materiais geopoliméricos.

Tabela 1: Composição química de LETA segundo alguns autores

Autores	Composição (%)									
	SO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Dahhou,M, et al,2018.	33.08	48.94	4.46	4.67	0.7	0.17	2.53	0.36	0.24	0.21
Pozzobon,J.C, et al,2010.	24.1	31.6	18.6	-	-	2.8	-	2.2	-	-
De Jesus,2018	44.87	38.52	11.95	0.33	-	-	1.29	0.77	-	0.98
Monjane, E,2018	25.6	30.05	13.77	0.95	1.29	0.01	0.08	-	-	-

Fonte: Adaptado

### 2.3. Cinzas de carvão mineral

A queima de carvão mineral em usinas térmicas gera dois resíduos sólidos: cinza pesada (ou de fundo) e cinza leve (ou volante).

As cinzas volantes são materiais sílico-aluminosos, que resultam da combustão do carvão pulverizado. De modo geral, essas cinzas são materiais pozolânicos por apresentarem potencial de reação com a cal em presença de água, originando compostos hidratados com propriedades aglomerantes (Pinto,1971). A cinza leve, constituída por partículas de dimensões inferiores a 0,15 mm, é arrastada pelos gases da combustão e acumulada para

posterior comercialização. As cinzas volantes estão sendo pesquisadas há algum tempo e elas têm-se demonstrado excelente fonte de aluminossilicato para sofrer activação alcalina e posteriormente geopolimerização, devido ao facto de possuírem em sua estrutura material amorfo e tamanho de partículas adequado ao processo. É importante destacar que, na maioria dos casos, as cinzas volantes são adequadas para serem ativadas.

As cinzas leves já há muito tempo possuem destino, são resíduos aproveitados há muito tempo como aditivo ao Cimento *Portland* Pozolânico pelas indústrias de cimento e betão (Almeida e Gomes,2021), por isso há pouco passivo decorrente deste resíduo.

Durante a combustão, o carvão mineral gera também cinzas pesadas ou cinzas de fundo, as quais ficam depositadas no fundo das caldeiras e são transportadas até as bacias de sedimentação. As cinzas pesadas são fontes ricas de sílica e alumina, substratos essenciais para produção de materiais geopoliméricos. No entanto, as mesmas ainda não são bem aceitas para adição no cimento convencional, por serem mais porosas e exigirem mais água na mistura. As cinzas pesadas se diferem das cinzas volantes mesmo sendo geradas pela mesma fonte (queima do carvão mineral), pois em termos de características e propriedades elas possuem grandes fragmentos e poucas partículas finas e também menor fase vítrea (Sathonsaowaphak et al., 2009). Na cinza pesada, as partículas são maiores e irregulares, com poros e cavidades; porém após processadas em tamanho de partículas adequado, as cinzas pesadas se transformam em material pozolânico, com alta reactividade para ser utilizado como subproduto na produção de geopolímeros (Chindaprasirt P. e., 2009). A composição segundo alguns autores é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da cinza segundo alguns autores.

Autores	Composição (%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF
Chindaprasirt, P(2009)	38.8	21.3	12.1	16.5	1.7	2.4	2.5	0.8	-	-	2.9
Magul,J(2023)	57.82	36.8	1.03	1.0	-	-	1.04	1.8	-	-	-
Santa,2012	59.8	22.6	4.5	1.3	0.5	-	2.3	1.1	-	0.22	6.6

Fonte: Adaptado

## 2.4. Cimento Portland



Figura 4: Amostra de cimento Portland. Fonte: Autor

O Cimento *Portland* (Figura 4) é um material pulverulento constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (Petrucci, 1970).

A produção do cimento *Portland* compreende três principais etapas a destacar, preparação de matéria-prima, clínquerização e moagem e adições.

A fase de preparação da matéria-prima é a etapa inicial do processo produtivo, que envolve a britagem do calcário com o objetivo de reduzir o tamanho dos grãos a um tamanho menor ou igual a 25 mm. Em seguida, o material britado é pré-homogeneizado para minimizar os efeitos das variações na composição química da matéria-prima. Por fim, a matéria-prima (argila e areia) é enviada para o moinho, onde é moída em proporções pré-determinadas. Nesse processo, ocorre o início da mistura íntima e a secagem, resultando em um pó fino conhecido como cru (Coutinho, 2006; Lima, 2011).

A segunda fase é a fase de clínquerização. É nesta fase onde é produzido o clínquer, principal componente presente na composição do cimento Portland. A clínquerização ocorre através da queima a alta temperatura da mistura de minerais, desta forma ocorre transformação dos minerais em materiais que tem propriedades hidráulicas. A queima do cru dá-se num forno até aproximadamente 1450°C. (Calister, 2012; Lima, 2011). É nesta fase onde ocorre a maior emissão de CO<sub>2</sub>, devido a decomposição térmica do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Andrew, 2018).

Os principais constituintes de clínquer são silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Por fim o clínquer é miúdo juntamente com gesso e outros aditivos, previamente doseados, em proporções segundo as normas de definição e regulamentação do produto desejado.

#### **2.4.1. Propriedades do cimento *Portland***

##### **2.4.1.1. Resistência mecânica**

A resistência está relacionada à tensão necessária para provocar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de cimento pode suportar. Na compressão o corpo-de-prova é considerado rompido, mesmo não havendo sinais visíveis de fractura externa. No entanto, as fissuras internas terão atingido um estado avançado de tal que o corpo-de-prova não suporte uma carga maior (Mehta, 2008). A resistência à tracção na flexão e à compressão axial determinada segundo a NP EN 196-1 (2017).

##### **2.4.1.2. Resistência térmica**

A resistência térmica do cimento *Portland* refere-se à sua capacidade de resistir à degradação quando exposto a altas temperaturas.

O comportamento do cimento Portland ao ser submetido a diferentes faixas de temperatura varia dependendo da magnitude do calor. A seguir, estão os efeitos típicos observados em várias faixas de temperatura (Neville, 2011):

100°C : Estável com perda mínima de resistência.

100°C - 300°C: Desidratação com leve queda na resistência.

300°C - 500°C: Perda significativa de resistência.

500°C - 800°C: Transformações mineralógicas e fragilização.

800°C - 1000°C: Desintegração e colapso da estrutura.

1000°C: Sinterização e fusão parcial, resistência praticamente nula.

## CAPÍTULO III : PARTE EXPERIMENTAL

No presente capítulo serão apresentados os materiais utilizados para a preparação das argamassas, os métodos e equipamentos empregues e os ensaios realizados as argamassas no estado endurecido, bem como etapas e ordem de desenvolvimento do trabalho.

### 3.1. Materiais percursores

#### 3.1.1. Lama de Estação de tratamento de água (LETA)

A lama (Figura 5), uma das fontes de alumino silicato usada no presente trabalho foi fornecida pela Estação de tratamento de água, Sábiè, localizada no distrito de Moamba, Província de Maputo. Foi feito o beneficiamento da lama seguindo algumas operações unitárias, como ilustra a figura Figura 6.



Figura 5: Lama de estação de tratamento de água

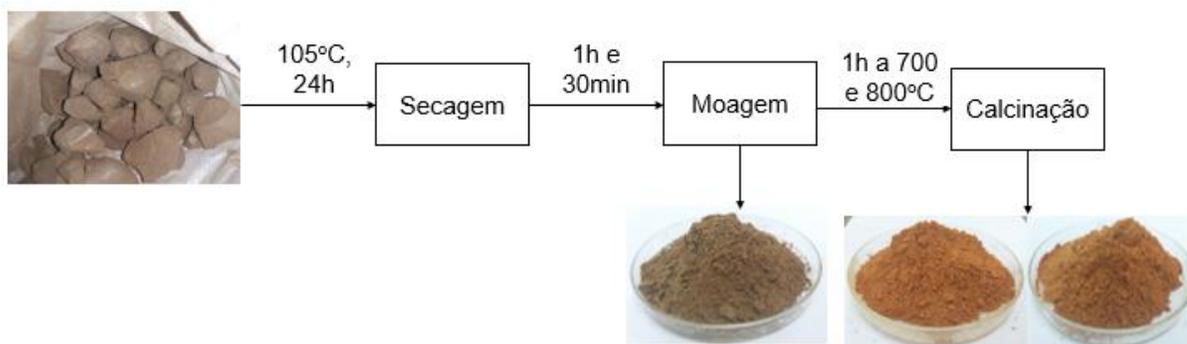


Figura 6: Fluxograma de tratamento de lama de estação de tratamento de água

- Secagem

Para garantir a eliminação da humidade que prejudicasse as etapas subsequentes procedeu-se a secagem da amostra de LETA por 24h a 105°C, numa estufa de marca Scientific (Figura 7).



Figura 7: Estufa usada para secagem

- Moagem

Este procedimento foi realizado visando obter partículas com granulometria adequada à finalidade desejada, cujos efeitos nas propriedades do produto final fossem os melhores possíveis.

A moagem foi realizada por 1h e 30min num moinho representado na Figura 8. Após moagem a LETA foi peneirada com ajuda de um peneiro com abertura de 0.075mm. Toda a LETA que não passou pelo crivo foi novamente peneirada até que adquirisse a granulometria desejada.

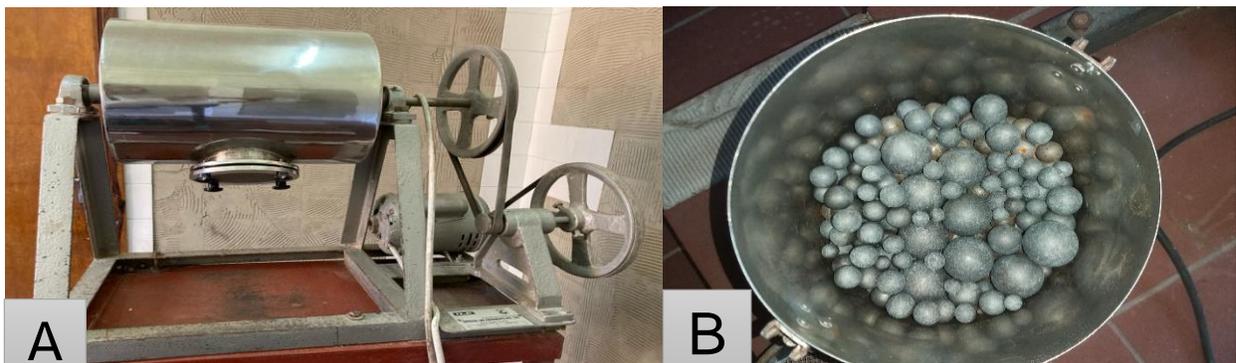


Figura 8: Moinho de bolas (A) e bolas do moinho(B)

- Calcinação

No presente trabalho a calcinação tinha por objectivo remover componentes indesejáveis tais como água e matéria orgânica e transformar a estrutura cristalina em amorfa para permitir maior reactividade da LETA no processo de geopolimerização.

A calcinação foi feita na mufla de marca TermoLab (Figura 9), durante 6 horas, sendo 2 horas de aquecimento, 1 hora de calcinação (700 e 800°C) e 3 horas de arrefecimento até a temperaturas ambiente (De Jesus, 2018).



Figura 9: Mufla usada na calcinação



Figura 10: Lama não calcinada (A), lama calcinada a 700°C (B) e lama calcinada e 800°C.

### 3.1.2. Cinza pesada

Outra fonte de alumino silicato usada neste trabalho foram as cinzas pesadas da queima de carvão mineral, fornecidas pela fábrica CDM, localizada na cidade de Maputo, bairro de Jardim. Na Figura 11 estão detalhados os métodos de preparação da amostra.

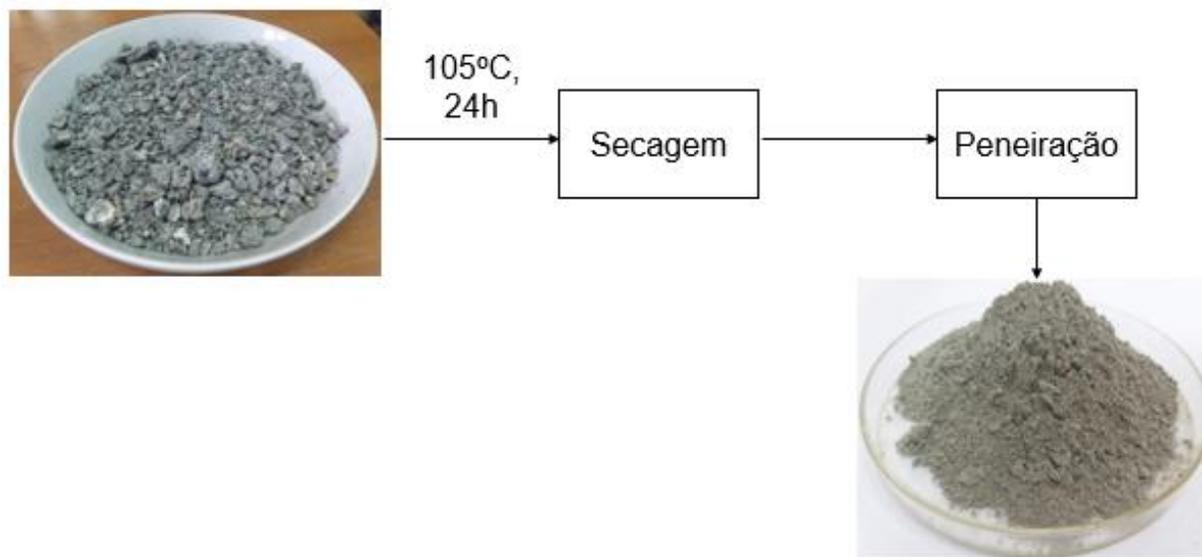


Figura 11: Fluxograma de processo de preparação da cinza

- Secagem

A cinza de carvão mineral, inicialmente, foi submetida a secagem para reduzir o teor de humidade de modo a não comprometer as operações subsequentes. A secagem foi feita na estufa (Figura 7) a 105°C por 24h.

- Peneiração

Seguiu-se com a peneiração das cinzas de modo a obter partículas com diâmetro menor que 0,075mm, não foi necessário moer a cinza pois ela possuía quantidade suficiente de partículas com tamanho desejado para o estudo em causa.



Figura 12: Peneiro com amostra de cinza.

### 3.2. Areia

O agregado utilizado na formulação dos traços para a produção dos provetes de argamassa, areia, foi adquirido em um estaleiro. Em seguida, foi seco para reduzir a umidade e fez se a caracterização granulométrica.



Figura 13: Areia usada na preparação de corpos de prova.

### 3.3. Preparação da solução activadora

Para realização dos ensaios foram preparadas duas soluções activadoras a base de NaOH e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , uma com 8M de concentração de NaOH e outra com 10M e a razão molar da mistura para as duas soluções foi de 1:2, como apresenta a Tabela 3.

Para preparar a solução primeiro pesou-se o NaOH com o auxílio de uma balança centesimal e um vidro de relógio e, de seguida, com o auxílio de uma espátula introduziu-se o NaOH num copo de vidro Becker de 300ml e adicionou-se água até perfazer o volume

de 100ml, agitou-se a mistura até que o NaOH se dissolvesse por completo. Após a dissolução completa do NaOH, mediu-se 200ml de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> com auxílio de uma proveta e adicionou-se à solução previamente preparada.

Tabela 3: Composição da solução activadora

Reagentes	Solução 1	Solução 2
NaOH (g)	32	40
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ml)	200	200
H <sub>2</sub> O (ml)	100	100

### 3.3. Caracterização da matéria-prima

#### 3.3.1. Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raios x é uma técnica analítica aplicada para identificar e quantificar os elementos presentes em diversos materiais.

A caracterização química da matéria-prima foi feita usando o método de espectrometria de fluorescência de Raios-X (FRX) que foi realizado no Laboratório do Departamento de Química da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

### 3.4. Planeamento estatístico de ensaios

#### 3.4.1. Influência da calcinação e da substituição da LETA pelas cinzas

O planeamento foi produzido com o objectivo de avaliar a influência da temperatura de calcinação e da composição do precursor na resistência dos geopolímeros. Recorreu-se ao planeamento factorial aninhado, onde variou-se a temperatura de calcinação da LETA, e numa determinada temperatura variou-se a composição do precursor, substituindo a lama pela cinza, conforme a Tabela 4.

Os ensaios serão feitos em triplicata, no total serão feitos 15 ensaios.

Tabela 4: Planeamento para a análise da influência da temperatura de composição do precursor na resistência dos geopolímeros.

Ensaio	Temperatura (°c)	Substituição (l por c) (%)
1	0	0
2	700	0
3	700	20
4	700	40
5	800	0

### 3.4.2. Influência da concentração e do tempo de cura

O plano de ensaios foi feito com o objectivo de avaliar a influência da concentração da solução do hidróxido de sódio (NaOH) e do tempo de cura na resistência mecânica dos provetes geopoliméricos. Recorreu-se ao plano factorial de dois níveis ( $2^2$ ) e dois factores, conforme ilustra a Tabela 5.

Os ensaios foram feitos em triplicado, totalizando 12.

Tabela 5: Planeamento para a análise da influência da concentração do NaOH e do tempo de cura na resistência dos geopolímeros.

Experimentos	[NaOH], mol/l	Tempo de cura (dias)
1	8	7
2	10	28
3	8	28
4	10	7

### 3.4.3. Influência da temperatura na resistência dos geopolímeros

O planeamento foi produzido com o objectivo de avaliar a influência da temperatura na resistência dos geopolímeros. Recorreu-se ao plano factorial de dois níveis e um factor. Avaliou-se o factor temperatura em dois níveis ( $2^1$ ), conforme a Tabela 6.

Os ensaios serão feitos em triplicado, totalizando 6.

Tabela 6: Planeamento para a análise da influência da temperatura na resistência dos geopolímeros.

Experimentos	Temperatura (°c)
1	300
2	800

### 3.5. Produção de argamassa geopolimérica

#### 3.5.1. Composição da argamassa

As argamassas geopoliméricas foram preparadas no Laboratório de Engenharia de Moçambique, especificamente, no laboratório de cimentos e ligantes. Foram feitas algumas formulações para se obter a formulação que confere maior trabalhabilidade a pasta. As formulações usadas no presente trabalho encontram-se abaixo (Tabela 7). Estas formulações testadas tiveram como ponto de partida as composições estabelecidas pela norma portuguesa, NP EN 196-1 2017.



Figura 14:Diferentes formulações de argamassa geopolimérica.

Tabela 7:Formulações de argamassas geopolimericas de LETA.

Componentes	1ª formulação	2ª formulação	3ª formulação
Areia (g)	150	150	150
Solução (ml)	33	38	43
LETA (g)	50	50	50

A formulação que deu a melhor trabalhabilidade e menor absorção de água foi a segunda (Tabela 7), assim a partir desta definiu-se as composições das argamassas.

A Tabela 8 apresenta as composições das argamassas preparadas para analisar a influência da concentração molar do NaOH.

Tabela 8: Composição de provetes a base de LETA variando a concentração.

Componentes	[NaOH]	Massa (g)	Traço	nr provetes	$m_{NaOH}$ , (g)	$m_{Na_2SiO_3}$	Ident.pv
LETA	8	450	1:3:0.76	3	36.5	228ml	PC8L
Areia		1350					
Activador		342					
LETA	10	450	1:3:0.76	3	45.6	228ml	P1C0L
Areia		1350					
Activador		342					

Na Tabela 9 apresentam-se as composições das argamassas compostas pelas LETAs calcinadas a 700°C, 800°C e não calcinada. Observa-se que foi necessário ajustar a quantidade da solução activadora para adquirir melhor trabalhabilidade de acordo com a necessidade da pasta.

Tabela 9: Composição de provetes de LETA variando a temperatura de calcinação.

Componentes	[NaOH]	Massa (g)	Traço	nr provetes	$m_{NaOH}$ , (g)	$m_{Na_2SiO_3}$	ident.pv
LETA	10	450	1:3:0.88	3	32	264.7ml	PT0L
Areia		1350					
Activador		397					
LETA	10	450	1:3:0.86	3	32	258ml	PT7L
Areia		1350					
Activador		387					
LETA	10	450	1:3:0.76	3	32	228ml	PT8L
Areia		1350					
Activador		342					

A Tabela 10 descreve a composição das argamassas geopoliméricas a base da LETA e cinzas com o objectivo de analisar a influência da substituição da lama pela cinza de carvão mineral.

Tabela 10: Composição de provetes a base de LETA e cinza.

Componentes	[NaOH]	Sub.L/C (%)	Massa(g)	Nr provetes	$m_{NaOH}$ (g)	$m_{Na_2SiO_3}$	Ident.Pv
LETA			405				
Cinza			45				
Areia	10	10	1350	3	45.6	228ml	PT7L/C10
Activador			342				
LETA			360				
Cinza			90				
Areia	10	20	1350	3	45.6	228ml	PT7L/C20
Activador			342				

As argamassas de cimento foram produzidas de acordo com a norma NP EN 196-1 2017, como ilustra a Tabela 11.

Tabela 11: Composição de argamassa de cimento.

Componentes	Massa (g)	Traço	nr provetes	Ident.pv
Cimento	450			
Areia	1350	1:3:0.5	12	PCP
Água	225			

### 3.5.2. Preparação da argamassa

Para a preparação da argamassa geopolimérica, primeiro pesou-se as quantidades de areia e cinza com auxílio de uma balança e a solução com o auxílio de uma proveta. De seguida adicionou-se a solução de NaOH e  $Na_2SiO_3$  e a cinza no recipiente da misturadora, accionou-se a misturadora de marca ELE, ref: C92C12 e deixou-se a funcionar por 60s. Findo dos quais, retirou-se parcialmente o recipiente da misturadora e adicionou-se uma metade da areia pesada e misturou-se por 60s. Após 60s, retirou-se novamente o recipiente da misturadora e colocou-se a outra parte da areia e misturou-se por 60s. Seguiu-se o processo de moldagem.

Para a preparação de argamassa de cimento, primeiro pesou-se o cimento, areia e água. Deitou-se água e cimento no recipiente em 10s, pôs-se imediatamente em funcionamento o misturador, após 30s, introduziu-se regularmente a areia durante 30s e continuou a amassadura por mais 30s. Parou-se a mistura por 90s. Durante os primeiros 30s retirou-se o recipiente do misturador e por meio de uma espátula de borracha retirou-se toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente e colocou-se no meio deste. Em seguida, continuou a amassadura na velocidade rápida durante 60s. O cimento usado foi da marca *Dugongo*, Cimento *Portland* de calcário tipo II B/L 32,5 N.

### **3.5.2.1. Moldagem dos provetes**

A moldagem dos provetes consistiu primeiro em untar os moldes com óleo, de seguida foi fixado juntamente com a sua prolonga ao compactador da marca ELE, No 39-0035/80 (

Figura 15-2). Introduziu-se a primeira camada em cada compartimento do molde (40x40x160) mm e estendeu-se a camada uniformemente utilizando a espátula maior, mantendo-a verticalmente, com os seus bordos em contacto com a parte superior da prolonga, fazendo-a passar uma vez para trás e outra para frente, ao longo do compartimento do molde, em seguida, compactou-se a primeira camada com 60 pancadas do compactador.

Terminada a primeira compactação, adicionou-se a segunda camada assegurando um excesso de mesma, nivelou-se com espátula pequena e compactou-se com 60 pancadas.

Após a segunda compactação, o molde foi removido da mesa do compactador, seguido da retirada da prolonga. O excesso de argamassa foi retirado com a ajuda de uma régua metálica plana, mantendo-a quase vertical, mas inclinada na direção do nivelamento.



Figura 15: Equipamentos e algumas etapas de preparação de provetes:(1) Misturadora , (2) Compactador, (3) preenchimento do molde com argamassa e (4) molde com argamassa.

### 3.5.2.2. Cura dos provetes

Depois de desmoldados, condicionou-se os provetes geopoliméricos na estufa de marca Genlab (Figura 16) a 65°C por 24h como em Cesari(2015). Para os provetes feitos a base de cimento Portland, colocou-se sobre o molde uma placa de vidro apoiada por pedaços de borracha posicionados nas extremidades do molde e de seguida, colocou-se o molde na Câmara húmida de marca Controls, modelo 65-L0013/D, durante 24h a temperatura de  $(20 \pm 1)$  °C.



Figura 16: Equipamentos usados para cura dos provetes: Estufa; Câmara de estufa.

### 3.5.2.3. Desmoldagem dos provetes

Findas 24h, retiraram-se os moldes da estufa e da camara de cura e desmoldou-se os provetes com auxílio de um martelo de borracha, dando algumas pancadas suaves nos vértices do molde de modo a libertar com facilidade os provetes, em seguida, identificaram-se os provetes (Figura 17).



Figura 17: Provetes antes de desmoldar e devidamente identificados depois de desmoldar.

### 3.6. Ensaio de caracterização

#### 3.6.1. Determinação das propriedades físicas das argamassas endurecidas

##### Absorção de água, densidade aparente e porosidade total

Para a determinação das propriedades, absorção de água, densidade aparente e porosidade total foram utilizados corpos de prova com 28 dias de cura. O ensaio consistiu em secar os provetes a 105°C por 24h numa estufa, de seguida foi registada a massa dos provetes secos ( $m_s$ ), foram então imersos em água por 72h para garantir a saturação completa dos poros, de seguida foram retirados os provetes e secos superficialmente com um pano húmido para remover a água em excesso da superfície e mediu-se a massa do provete húmido ( $m_h$ ). Foi também registado o volume dos corpos de prova com recurso a um paquímetro.

Com base nas medições realizadas foi possível obter as propriedades físicas com as seguintes equações:

$$Ab = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_s}{V_{pr}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{m_h - m_s}{v_{pr}} \times 100\% \quad (4)$$

Onde:

$Ab$ - Absorção de água (%)

$\rho$ -Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$\varepsilon$ -Porosidade total (%)

$m_h$ -Massa do provete húmido (g)

$m_s$ -Massa do provete seco (g)

$v_{pr}$ -Volume do provete(cm<sup>3</sup>)

### 3.6.2. Determinação das propriedades e mecânicas das argamassas endurecidas

#### 3.6.2.1. Resistência à flexão e compressão

Determinou-se a resistência à compressão e a flexão dos provetes prismáticos com recurso a prensa hidráulica de marca Controls, Ref C9C12 (Figura 18). Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na norma NP EN 196-1 2017.

Para o cálculo da resistência a compressão e resistência a flexão, aplicou-se as equações 4 e 5, respectivamente:

$$R_C = \frac{F_C}{1600} \quad (5)$$

Onde:

$R_C$ -Resistência a compressão (MPa)

$F_C$ -Carga máxima na roptura (N)

1600- A área dos pratos ou das placas auxiliares (40 mm x 40 mm) (mm<sup>2</sup>)

$$R_f = \frac{1.5 * F_f * l}{b^3} \quad (6)$$

Onde:

$R_f$ -Resistência à flexão

$F_f$ -Carga aplicada ao centro do prisma na ruptura

l-Distância entre os apoios (mm)

b-Lado da secção quadrada do prisma (mm)



Figura 18: Prensa hidráulica usada nos ensaios de resistência a flexão e compressão, com os provetes para os ensaios.

### 3.6.2.2. Resistência mecânica após calcinação

A análise da resistência a altas temperaturas dos provetes foi feita ao sétimo dia de cura. Os provetes geopoliméricos foram submetidos a dois níveis de cura (300 e 800°C) por uma hora numa mufla (Figura 9) e posteriormente foram submetidos aos ensaios de resistência a flexão e a compressão. Os provetes de cimento Portland também foram aquecidos em dois níveis de temperatura (300 e 800°C) por uma hora e por fim fez-se o ensaio da determinação das propriedades mecânicas (resistência a compressão e a flexão). Para comparação, foram também analisados provetes que não foram submetidos a altas temperaturas como parâmetro de resistência inicial.

## CAPÍTULO IV : RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados, a interpretação e discussão dos mesmos.

### 4.1. Caracterização da matéria-prima

#### 4.1.1. Distribuição granulométrica da areia

A areia foi classificada granulometricamente, conforme ilustrado na Figura 19. Observa-se que a areia apresenta uma distribuição granulométrica relativamente uniforme, com maior concentração de partículas na faixa de 0,60 mm.

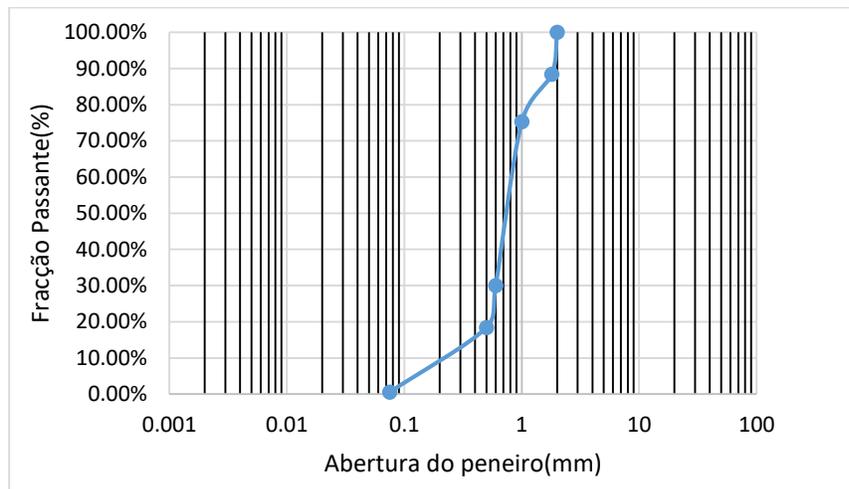


Figura 19: Curva de distribuição granulométrica da areia

#### 4.1.2. Fluorescência de Raios X(FRX)

Pelo método de FRX foi possível identificar e quantificar os óxidos presentes nas amostras de LETA calcinada e não calcinada (Figura 20). Os resultados indicam a presença maioritária de óxidos de alumínio e de silício, factor importante para se considerar um material precursor na reacção de geopolimerização.

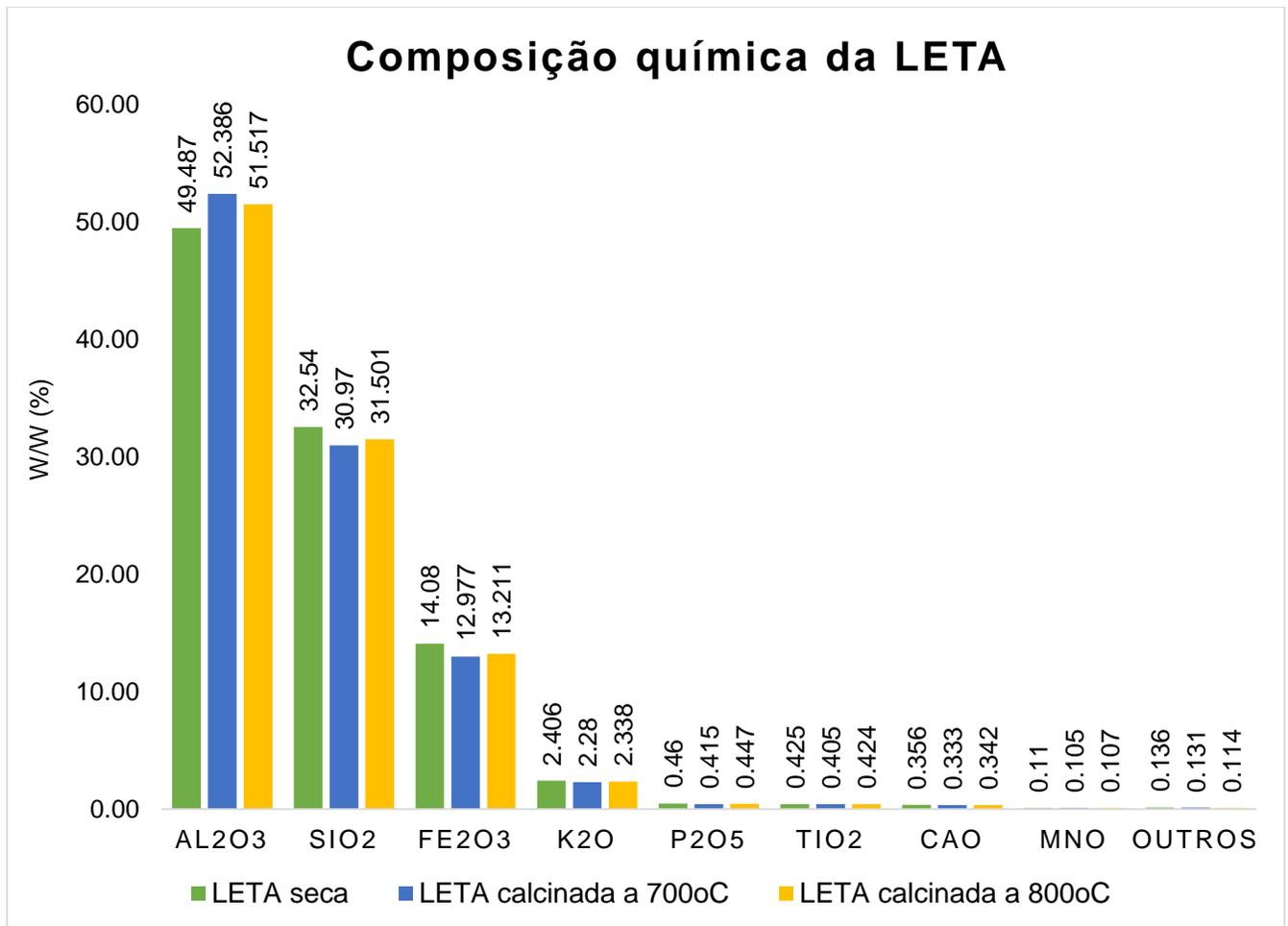


Figura 20: Composição química da lama de estação de tratamento de água.

Para a LETA seca assim como a calcinada, o somatório das quantidades percentuais de SiO<sub>2</sub> e de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representou mais do que 70% da composição do lodo, e permitiu concluir que pode ser um potencial precursor geopolimérico. A alta concentração desses óxidos é essencial para a estrutura geopolimérica, já que Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> desempenham funções fundamentais na criação da matriz tridimensional que caracteriza esses materiais (Zhuang, 2016).

No entanto um factor limitante observado é a razão molar Si/Al ser inferior a 1 nas amostras analisadas. Em condições ideais de geopolimerização, uma razão Si/Al próxima (Dos Santos, 2016) ou superior a 1 (De Jesus, 2018) é geralmente preferida. Essa razão inferior pode influenciar negativamente a eficácia do processo de geopolimerização, resultando num material com menor desenvolvimento de propriedades mecânicas, como a resistência

à compressão. É possível a reactividade dos precursores necessite de optimizações adicionais, como ajustes na composição da solução activadora para aumentar a razão Si/Al e, conseqüentemente, melhorar o desempenho dos geopolímeros a partir das lamas, assim como suplemento de aluminossilicato para aumentar a razão Si/Al na matriz. A cinza de carvão mineral foi a escolha de material suplemento.

No trabalho foi analisada a cinza pesada de carvão mineral, que apresentou os resultados ilustrados na Figura 21.

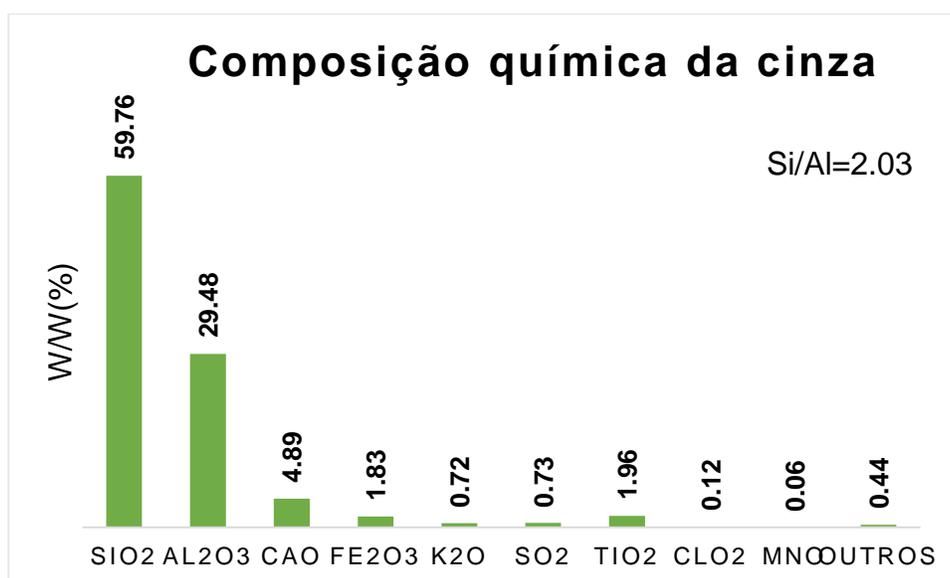


Figura 21: Composição química da cinza pesada de carvão mineral.

Os resultados da análise FRX da cinza pesada de carvão mineral revelaram uma composição significativa de sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxidos de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o que reforça o potencial da cinza como precursor na produção de geopolímeros (Sathonsaowaphak *et al.*,2009). A sílica apresentou um teor elevado de 59.76%, seguido por uma concentração de alumina de 29.48%. Os altos teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são essenciais para o processo de geopolymerização, sendo que a formação da estrutura tridimensional característica dos geopolímeros depende da dissolução desses compostos em soluções alcalinas e posterior polimerização.

A razão Si/Al da cinza é de 2.03. Razão adequada para o desenvolvimento de geopolímeros com boas propriedades mecânicas e térmicas (Davidovits,2015).

## 4.2. Propriedades físicas dos provetes

### 4.2.1. Densidade aparente

As Figuras (22, 23 e 24), ilustram os resultados de densidades aparentes dos provetes geopoliméricos de lama e da cinza, com diferentes concentrações da solução activadora e temperaturas de calcinação, e provetes de cimento Portland de referência.

Observando as figuras (22,23 e 24), é possível constatar que os provetes geopoliméricos são menos densos do que os provetes de cimento Portland (PCP). A densidade dos provetes de cimento Portland ( PCP) está próxima de 2.19,obtidas por (Magul, 2023).

O aumento da concentração do activador proporcionou o aumento da densidade dos provetes, nota-se que os provetes com concentração molar do activador de 8 (PC8L) apresentaram densidade de  $1.99\text{g/cm}^3$  e os provetes com 10M apresentaram densidade de  $2.00\text{g/cm}^3$ . Segundo Ferreira (2013), ocorre devido a maior disponibilidade de moléculas, quando aumenta a concentração de hidróxido de sódio. Maior teor de activador pode melhorar a eficiência da reacção entre os alumino silicatos e a solução activadora e, permitir a formação completa de uma matriz geopolimérica mais densa.

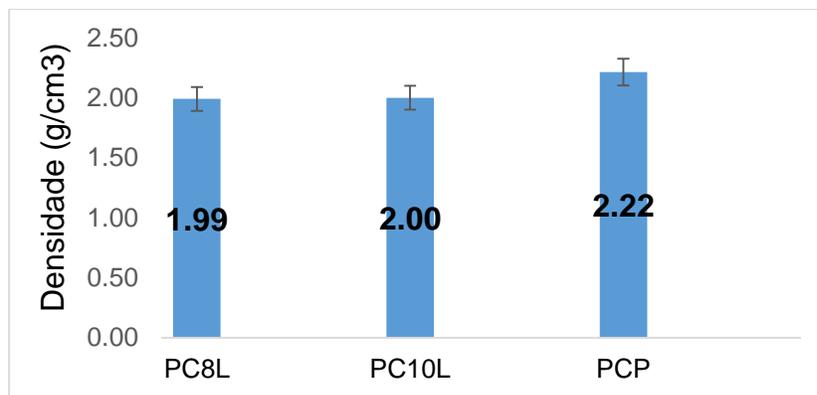


Figura 22: Densidade dos corpos de prova com variação da concentração de NaOH.

Legenda:

PC8L-provete de lama com concentração de NaOH de 8M.

PC10L-provete de lama com concentração de NaOH de 10M.

PCP-provete de cimento *Portland*.

Na análise da influência da temperatura de calcinação da LETA (Figura 23), o provete mais denso foi o provete com lama calcinada a 700°C, com 2.06g/cm<sup>3</sup>. Nas densidades, nota-se a influência da temperatura de calcinação da lama pois os provetes de lama não calcinada resultaram em menor densidade, 1,89g/cm<sup>3</sup>, o que sugere que a lama pode ter impurezas não foram removidas, resultando assim numa estrutura mais porosa e menos compacta quando a mistura foi curada.

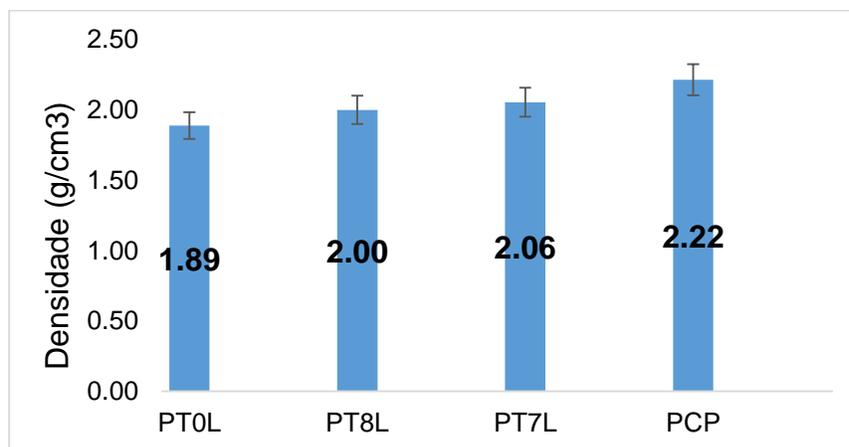


Figura 23:Densidade dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.

Legenda:

PT0C/L-provete de lama não calcinada.

PT7C/L-provete de lama calcinada a 700°C.

PT8C/L-provete de lama calcinada a 800°C.

PCP-provete de cimento *Portland*.

A Figura 24, ilustra os resultados da substituição da lama pela cinza e sua influência na densidade dos geopolímeros. Constatou-se que o aumento da substituição da lama pela cinza reduziu a densidade dos provetes ligeiramente. A diminuição na densidade aparente pode estar relacionada à natureza e à formação da matriz geopolimérica. A menor reactividade potencial da cinza, associada à sua possível falta de propriedades amorfas, pode influenciar a estrutura final dos geopolímeros. Menor reactividade pode estar a contribuir para a formação de uma matriz menos densa e homogênea.

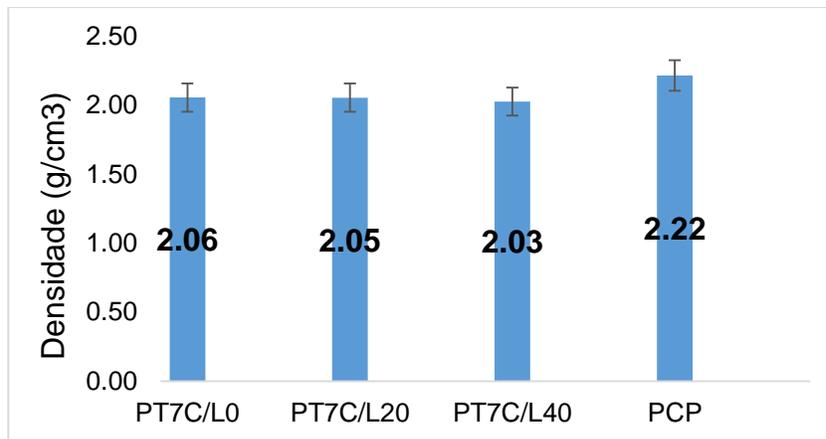


Figura 24: Densidade dos corpos de prova variando a composição do precursor.

Legenda:

PT7C/L0-provete de lama calcinada a 700°C sem substituição de lama por cinza.

PT7C/L20-provete de lama calcinada a 700°C com substituição de lama por cinza a 20%.

PTC/L40-provete de lama calcinada a 800°C com substituição de lama por cinza a 40%.

PCP-provete de cimento *Portland*.

#### 4.2.2. Absorção de água

As figuras (25, 26 e 27) ilustram os resultados da absorção de água dos corpos de prova geopoliméricos de lama e cinza, com diferentes concentrações da solução activadora, diferentes temperaturas de calcinação da lama e provetes de cimento *Portland*.

Analisando as figuras (25, 26 e 27), nota-se que os provetes de cimento *Portland* (PCP), apresentaram menor absorção de água, o que sugere que o cimento *Portland* é altamente eficiente em preencher poros reduzindo a absorção de água.

Com o aumento da concentração do activador observa-se (Figura 25) diminuição do factor absorção de água dos provetes geopoliméricos podendo estar associado ao facto de maior concentração permitir formação de uma matriz mais densa e menos porosa, reduzindo o espaço disponível para que água seja absorvida.

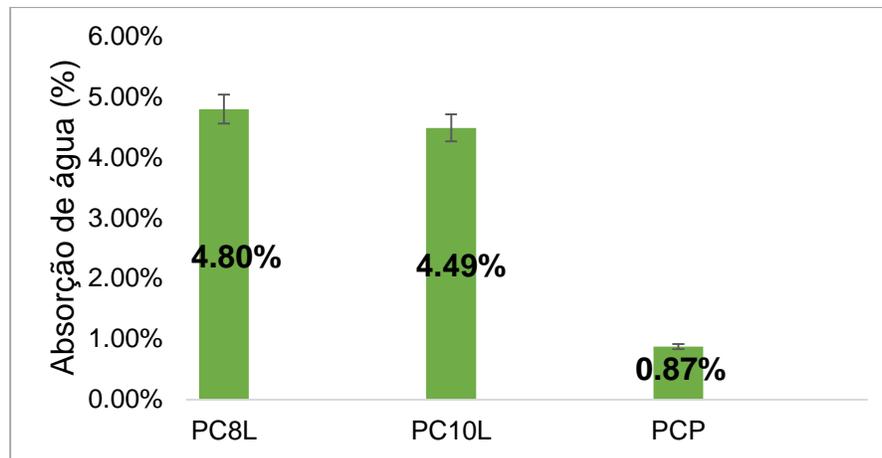


Figura 25: Absorção de água dos corpos de prova com variação da concentração de NaOH.

Legenda:

PC8L-provete de lama com concentração de NaOH de 8M.

PC10L-provete de lama com concentração de NaOH de 10M.

PCP-provete de cimento *Portland*.

Analisando a temperatura de calcinação, observou-se (Figura 26) que os provetes com lama calcinada a 800°C (PT7L) apresentaram uma menor absorção de água, de 4,49%, enquanto os provetes com lama não calcinada (PT0L) tiveram uma absorção de água maior, de 5,75%. Esse resultado sugere que a calcinação contribui para uma menor absorção de água. Conforme explicado por Zampieri (1993), o tratamento térmico aumenta a reatividade e promove a formação de uma matriz mais densa e menos porosa.

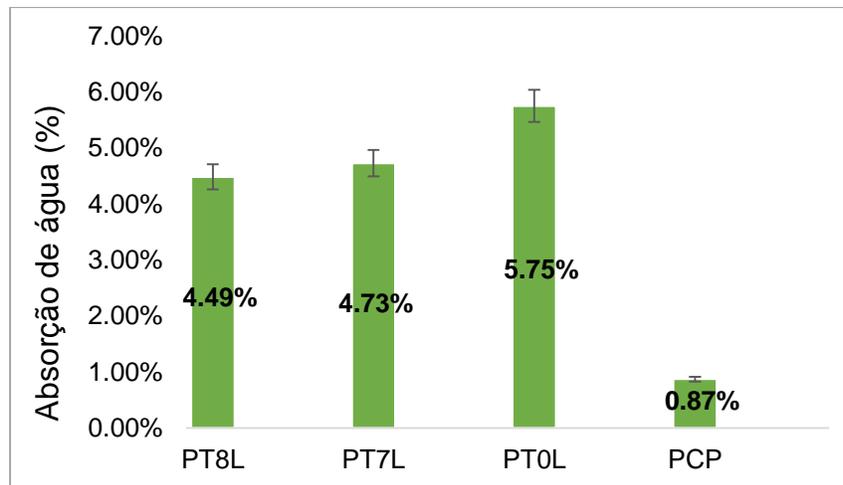


Figura 26: Absorção de água dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.

Legenda:

PT0C/L-provete de lama não calcinada.

PT7C/L-provete de lama calcinada a 700°C.

PT8C/L-provete de lama calcinada a 800°C.

PCP-provete de cimento *Portland*.

A Figura 27, ilustra os resultados da absorção de água dos corpos de prova a medida que a LETA era substituída pela cinza de carvão mineral. Observou-se que o aumento da substituição parcial da lama pela cinza proporcionou aumento da absorção de água dos provetes geopoliméricos. O resultado sugere que a adição de cinza à matriz possibilitou a formação de poros nos geopolímeros produzidos, o que pode ser sustentado pelo estudo feito por Santa (2012), observando que as partículas de cinza eram irregulares, com porosidade nas cavidades e pequenas rachaduras que caracterizam a cinza com certo grau de porosidade. Acredita-se que a cinza pesada devido ao facto de ser um material mais poroso, forma pontos de nucleação mais isolados e, retém mais água na estrutura (Sathonsaowaphak *et al.*,2009).

A amostra que apresentou melhores resultados foi a amostra sem substituição de lama pela cinza pesada de carvão mineral (PT7C/L0).

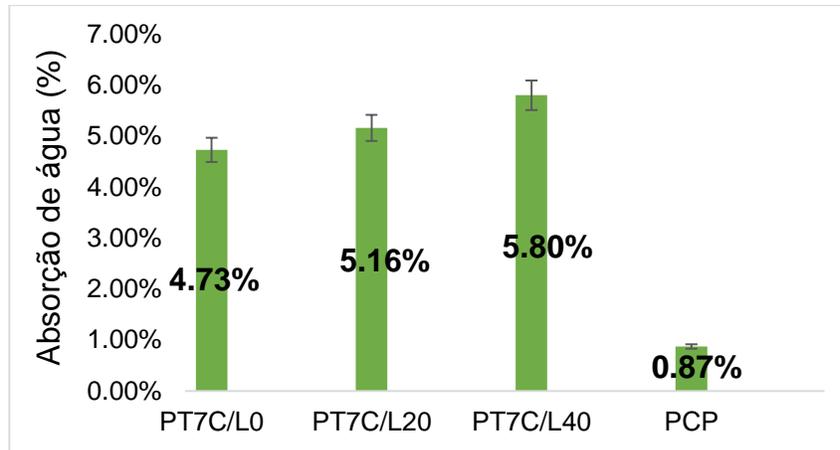


Figura 27: Absorção de água dos corpos de prova com variação da composição do precursor.

Legenda:

PT7C/L0-provete de lama calcinada a 700°C sem substituição de lama por cinza.

PT7C/L20-provete de lama calcinada a 700°C com substituição de lama por cinza a 20%.

PTC/L40-provete de lama calcinada a 800°C com substituição de lama por cinza a 40%.

PCP-provete de cimento *Portland*.

#### 4.2.3. Porosidade

As figuras (28, 29 e 30), ilustram os resultados da porosidade dos corpos de prova geopoliméricos de lama e cinza, com diferentes concentrações da solução activadora, diferentes temperaturas de calcinação da lama e provetes de cimento Portland.

Analisando as figuras, nota-se que os provetes de cimento Portland (PCP), apresentaram menor porosidade.

O aumento da concentração da solução activadora proporcionou a diminuição da porosidade, o que sugere que a maior concentração de activador pode ter permitido com que os poros ou espaços vazios na matriz fossem preenchidos de forma mais eficaz, diminuindo a porosidade.

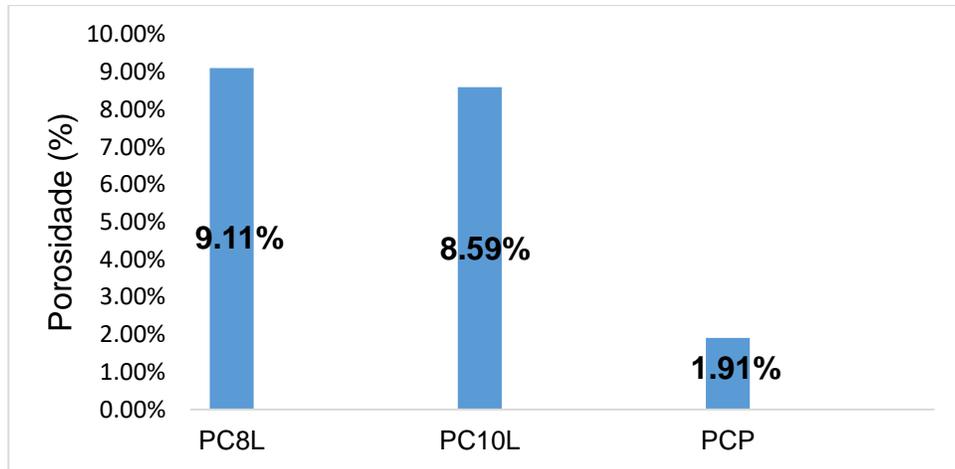


Figura 28: Porosidade dos corpos de prova variando a concentração de NaOH.

Legenda:

PC8L-provete de lama com concentração de NaOH de 8M.

PC10L-provete de lama com concentração de NaOH de 10M.

PCP-provete de cimento *Portland*.

Observando o factor temperatura de calcinação da lama, constata-se que a porosidade diminui com o aumento da temperatura de calcinação, o provete com lama não calcinada (PT0L) apresentou maior porosidade, de 10.28%, o com lama calcinada a 700°C (PT7L) apresentou uma porosidade de 9.29% e o com lama calcinada a 800°C (PT8L) apresentou menor porosidade, de 8.59%, o que sugere que a calcinação tornou a matriz geopolimérica menos porosa. A elevação da temperatura de calcinação promoveu a formação de uma matriz mais compacta.

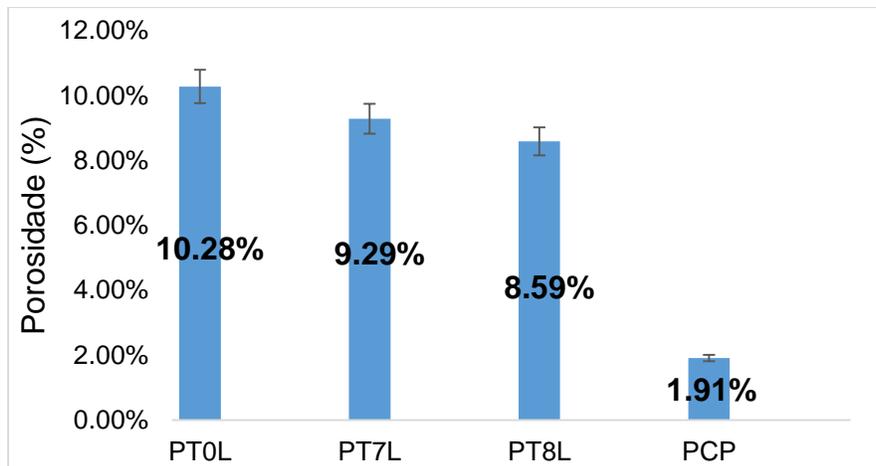


Figura 29: Porosidade dos corpos de prova com variação da temperatura de calcinação da LETA.

Legenda:

PT0C/L-provete de lama não calcinada.

PT7C/L-provete de lama calcinada a 700°C.

PT8C/L-provete de lama calcinada a 800°C.

PCP-provete de cimento *Portland*.

A Figura 30, ilustra os resultados da influência da substituição da lama pela cinza. Os resultados apontaram que a substituição parcial de lama de estação de tratamento de água por cinza pesada de carvão mineral afectou significativamente a trabalhabilidade e porosidade.

À medida que aumentava a substituição da lama por cinza pesada de carvão mineral, a trabalhabilidade dos geopolímeros diminuía. Foi evidenciada pela necessidade de mais solução para conseguir misturar a composição. O resultado sugere que a cinza tem propriedades diferentes de absorção de água em comparação com a lama.

À medida que a proporção de cinza pesada aumentou (com substituição de 20% e 40%), verificou-se uma tendência de aumento da porosidade dos provetes. O fenómeno observado pode estar relacionado a maior porosidade das partículas de cinza de carvão mineral, como afirma (Chindaprasir, 2009), a cinza pesada é mais porosa. O aumento da porosidade pode comprometer a resistência mecânica do material (Zhang et al, 2014).

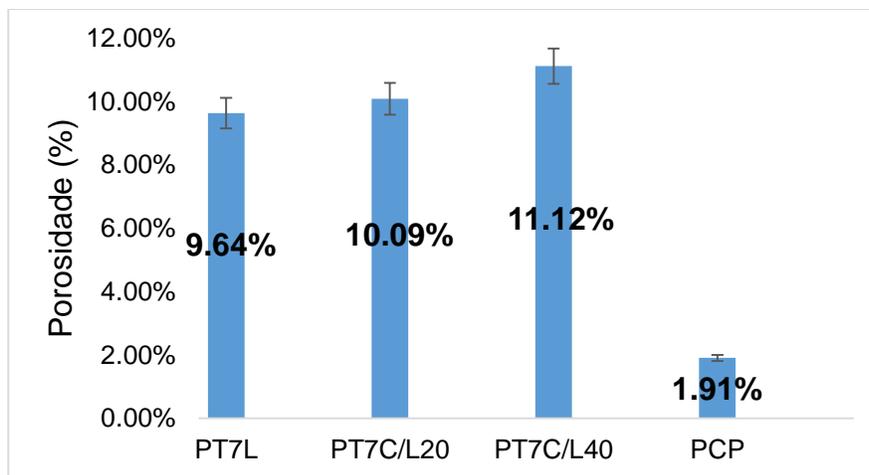


Figura 30: Porosidade dos corpos de prova variando a composição do precursor.

Legenda:

PT7C/L0-provete de lama calcinada a 700°C sem substituição de lama por cinza.

PT7C/L20-provete de lama calcinada a 700°C com substituição de lama por cinza a 20%.

PTC/L40-provete de lama calcinada a 800°C com substituição de lama por cinza a 40%.

PCP-provete de cimento *Portland*.

### 4.3. Propriedades mecânicas de argamassas endurecidas

#### 4.3.1. Influência da temperatura de calcinação da LETA e da substituição da lama pela cinza

Foi feito o ensaio de resistência de provetes geopoliméricos com LETA não calcinada designados PT0 e calcinada a temperaturas de 700 e 800°C, designados PT7 e PT8, respectivamente (Figura 31).

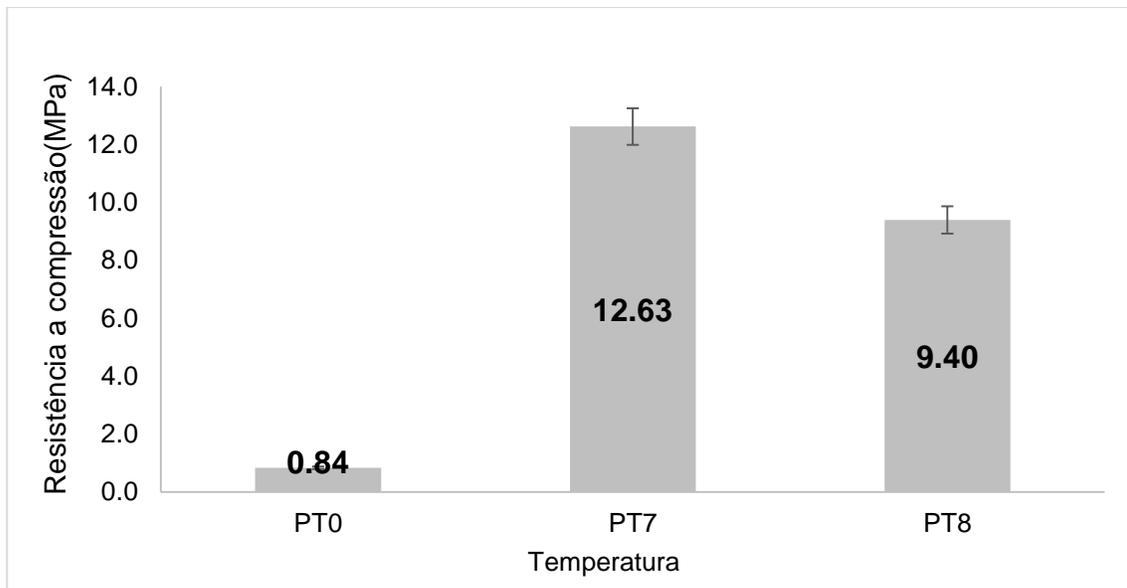


Figura 31: Influência da temperatura de calcinação na resistência dos geopolímeros.

Legenda:

PT0-provete de lama não calcinada.

PT7-provete de lama calcinada a 700°C.

PT8-provete de lama calcinada a 800°C.

Constatou-se que a resistência para os provetes com a lama não calcinada foi menor, de 0.8MPa, sugerindo que a reacção de geopomerização não ocorreu. Os provetes com maior resistência à compressão foram os produzidos com a lama calcinada a 700°C, atingindo 12.6 MPa. Sugere-se que a temperatura de 700°C favoreceu a formação de propriedades amorfas ou semicristalinas em sua estrutura, factor que elevou a reactividade dos provetes geopoliméricos durante o processo de produção.

Os provetes a base de lama calcinada a 800°C obtiveram resistência intermediária, indicando que essa temperatura, causou um certo grau de cristalização, diminuindo a reactividade do material, pois esta quando comparada a de 700°C apresentou menor resistência.

A calcinação da lama potencializou a reacção de geopolimerização como afirmado antes por Palomo *et al.*, (1999), que os materiais que passaram por tratamento térmico possuem maior

grau de polimerização em comparação aos materiais não calcinados. Assim como para Xu (2002), pode ser explicado pelo facto de a calcinação activar materiais alterando sua estrutura cristalina para amorfa com subsequente armazenamento de energia extra.

O maior resultado de resistência à compressão dos provetes produzidos, 12,6MPa, coloca-os na classificação sendo Farinha (1993), como tijolos de classe B, por possuírem resistência maior que 12MPa.

A Figura 32, apresenta os resultados da resistência à compressão quando há substituição da LETA pela cinza de carvão mineral. Observou-se que a resistência à compressão dos provetes reduziu com a incorporação da cinza de carvão mineral, este resultado pode ser associado a baixa reactividade da cinza, apesar dela possuir uma razão Si/Al favorável, esta pode ter mais fases cristalinas na sua estrutura e menos fases amorfas, comprometendo a resistência dos geopolímeros. Durante a queima do carvão mineral, parte da cinza pesada resultante é cristalizada, ficando apenas com uma parcela de material amorfo, Van Deventer et al. (2007) em sua pesquisa constatou que a estrutura dos materiais sintetizados com cinza continha maior número de partículas que não haviam reagido.

Outro factor é a porosidade do material, o aumento da porosidade do geopolímero com a substituição de lama, comprometeu a resistência à compressão.

Ademais, a diminuição da trabalhabilidade da mistura implicou no aumento da solução, levando a formação de microfissuras e enfraquecendo a matriz geopolimérica.

Estes factores combinados podem explicar a tendência de diminuição da resistência à compressão quando a lama é substituída por cinza.

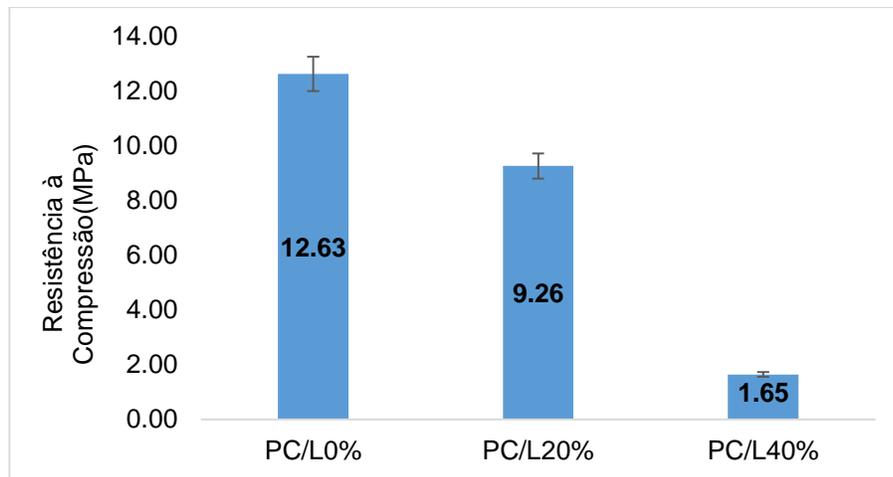


Figura 32: Influência da substituição da lama pela cinza.

Legenda:

PT7C/L0-provete de lama calcinada a 700°C sem substituição de lama por cinza.

PT7C/L20-provete de lama calcinada a 700°C com substituição de lama por cinza a 20%.

PTC/L40-provete de lama calcinada a 800°C com substituição de lama por cinza a 40%.

#### 4.3.2. Influência da concentração e do tempo de cura

A Figura 33 apresenta a variação do tempo de cura e da concentração da solução activadora em função da resistência à compressão dos provetes geopoliméricos e do cimento *Portland*.

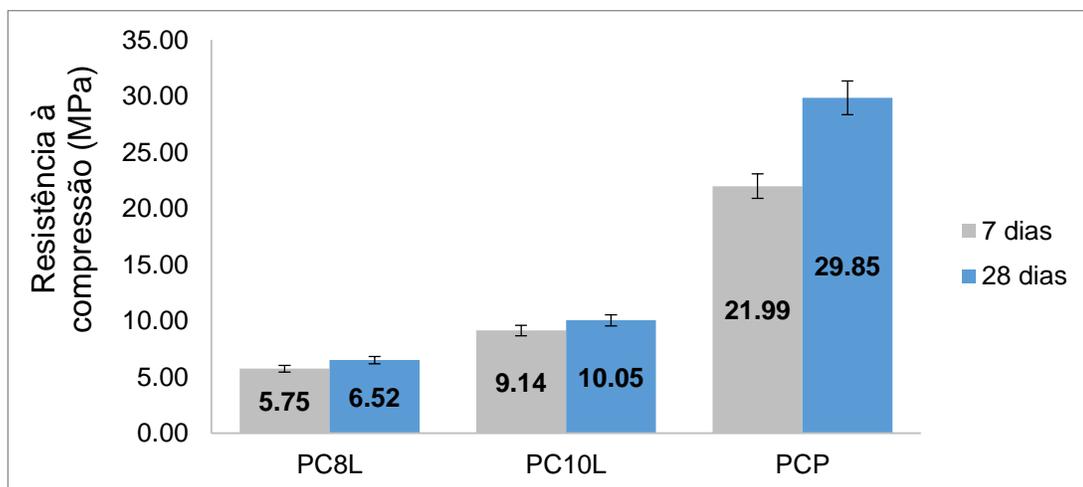


Figura 33: Influência da concentração e do tempo de cura.

Legenda:

PC8L-provete de lama com concentração de NaOH de 8M.

PC10L-provete de lama com concentração de NaOH de 10M.

PCP-provete de cimento *Portland*.

Analisando o gráfico da Figura 33 , constata-se que o aumento da concentração da solução activadora, assim como o aumento do tempo de cura influenciam no aumento da resistência dos geopolímeros, como observado por (Apolonio, 2017).

A resistência dos geopolímeros foi maior com uma concentração de 10M de NaOH e aos 28 dias de cura. Esse resultado pode ser explicado pelo facto de que o aumento da concentração da solução alcalina promove uma activação mais eficiente das fases amorfas da LETA, resultando em uma estrutura mais densa do geopolímero, o que aumenta a resistência. Quantidades maiores de iões hidroxila facilitam a dissociação de diferentes espécies de silicato e aluminato, promovendo assim uma polimerização adicional (Konmitsa,2007). No entanto, a resistência aos 28 dias é apenas um pouco maior que aos 7 dias, indicando que a mesma foi desenvolvida aos primeiros dias. Além disso o prolongamento do tempo de cura também contribui para o aumento da resistência.

Os provetes geopoliméricos (PC8L, PC10L) apresentaram menor resistência em comparação com os provetes de cimento Portland (PCP), facto justificado pela maior porosidade dos provetes geopoliméricos, comparados aos provetes a base de cimento *Portland*.

### 4.3.3. Influência da temperatura na resistência dos geopolímeros

#### 4.3.3.1. Resistência à compressão

A Figura 34, ilustra os resultados da resistência a compressão de provetes geopoliméricos e de cimento quando submetidos a diferentes temperaturas.

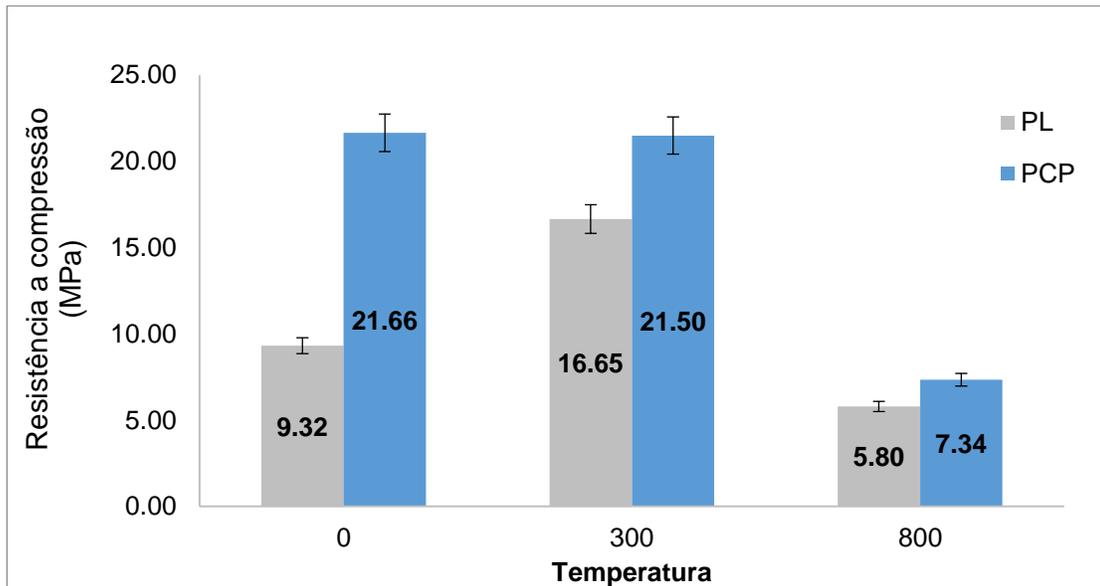


Figura 34: Influência da temperatura na resistência a compressão

Analisando os resultados, foi possível verificar que os provetes de lama (PL) apresentaram maior resistência à compressão a uma temperatura de 300°C em comparação com a temperatura de 800°C e com a condição inicial (antes do aquecimento). O que indica que o geopolímero passou por uma fase de endurecimento adicional ou por uma reorganização da estrutura interna, o que resultou em um aumento de resistência de 78%. Observou-se ainda que o interior dos corpos de prova geopoliméricos mantinha umidade residual. Sugere-se que o aquecimento a 300°C possibilitou a perda dessa água residual, completando assim o processo de cura, como é relatado por Provis (2009), que a esta faixa de temperatura ocorre a desidratação da água livre. Por outro lado, um comportamento diferente foi observado nos provetes de cimento Portland. Apresentaram maior resistência antes do aquecimento em comparação com a resistência após serem submetidos a temperaturas de 300°C e 800°C.

A maior redução de resistência foi verificada a 800°C tanto para os provetes geopoliméricos quanto para os de cimento Portland, com uma diminuição de 37% e 66%, respectivamente. Para os provetes geopoliméricos, essa redução pode ser explicada pela despolimerização das cadeias de aluminossilicatos e pela possível formação de microfissuras que enfraqueceram a matriz do material. No caso dos provetes de cimento *Portland*, a temperatura de 800°C resultou em uma diminuição de 66% na resistência, o que pode ser atribuído à decomposição das fases de hidratação do cimento, como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

Embora a resistência do cimento Portland tenha sido maior a 800°C, os provetes geopoliméricos ainda podem ser competitivos em relação aos de cimento, considerando o nível de redução da resistência relativa à resistência inicial. Como previsto por Neville (2011), as argamassas de cimento Portland apresentaram uma leve redução de resistência a 300°C e uma redução mais acentuada a 800°C.

Além disso verifica-se que o geopolímero não arde, não liberta fumos e não se degrada da mesma forma que acontece nos concretos de cimento Portland, pois apesar de perder alguma água de constituição, reduz de forma ligeira a capacidade mecânica (em temperatura de 800°C) inferior a 40%. Verificou-se para os provetes de cimento *Portland* nos primeiros minutos de aquecimento uma quebra, o que não foi visto nos provetes geopoliméricos, como relatado por Pinto (2006).

## CAPÍTULO V : CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

Dos objectivos pretendidos, foi possível concluir que:

- A temperatura de calcinação influencia nas propriedades dos geopolímeros, com destaque na resistência à compressão. A lama não calcinada produziu um geopolímero com resistência à compressão muito baixa, de 0.84MPa e a calcinada a 700°C uma resistência maior, de 12.63MPa. A calcinação proporcionou o aumento da resistência.
- O aumento da concentração de NaOH na solução activadora assim como o tempo de cura proporcionam o aumento da resistência a compressão dos geopolímeros.
- A substituição parcial da lama de estação de tratamento de água por cinza pesada de carvão mineral não mostrou ser eficiente, pois observou-se influência negativa nas propriedades dos geopolímeros, como a resistência mecânica, porosidade, densidade e absorção de água.
- A resistência mecânica dos provetes geopoliméricos foi inferior à dos provetes à base de cimento Portland, indicando que os geopolímeros produzidos podem não serem adequado para substituírem em todos os casos o cimento *Portland*.
- Os geopolímeros produzidos a partir de LETA mostraram um desempenho promissor, especialmente em condições de alta temperatura. Após calcinação a 300°C os geopolímeros aumentaram a sua resistência em 78% e provetes de cimento Portland diminuíram em 0.8%, a 800°C ambos (geopolímero e cimento Portland) reduziram a resistência à compressão em 37% e 66%, respectivamente. Sugerindo que os geopolímeros detêm potencial para aplicações específicas onde a resistência mecânica a altas temperaturas é necessária.
- As características dos geopolímeros apontam para a sua aplicação na produção, por exemplo, de blocos de argamassa, em termos de absorção de água menor do que 15% e resistências maiores que 4MPa.

## 5.2. Recomendações

Esta pesquisa teve como objectivo avaliar as propriedades dos geopolímeros produzidos a base de LETA, tanto calcinada quanto não calcinada, além das cinzas pesadas de carvão mineral. No entanto, as propriedades dos geopolímeros desenvolvidos foram analisados apenas como parâmetros iniciais, fornecendo uma base preliminar para a avaliação da sua aplicabilidade. Dessa forma, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

- Investigar a adição de argila como fonte de silício e elevar a razão Si/Al;
- Efectuar a caracterização mineralógica da cinza e da lama para avaliar a cristalização dos geopolímeros;
- Variar a concentração de NaOH na relação entre silicato e solução alcalina para as argamassas com substituição de lama por cinza;
- Analisar os efeitos de diferentes temperaturas de cura em idades mais avançadas dos geopolímeros;
- Avaliar a reactividade química da argamassa à exposição de ácidos e de sulfatos;
- Avaliar a resistividade térmica do material produzido para valores acima de 800°C.

## BIBLIOGRAFIA

### Referências bibliográficas

- Almeida, p., & gomes, c. (agosto de 2021). Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento portland. *Ibero-american journal of environmental sciences*, 12, p. 12.
- Andrew, m. (2018). Global emissions from cement production. *earth system science data*. 10, pp. 195-217. Obtido de <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Apolonio, p. (2017). Produção de geopolímeros usando cinza de arroz como fonte complementar de sílica. Dissertação de mestrado, universidade federal de pernambuco, caruaru.
- Barbosa, v. E. (may de 2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International journal of inorganic materials* 2, pp. 309-317.
- Calister, w., & rithwisch, d. (2012). *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução* (9 ed.). Rio de janeiro, brasil: Itc.
- Cesari, f. (2015). Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. Dissertação de mestrado, universidade federal de santa catarina, florianópolis.
- Chang, r. (1994). *Química* (11a ed.). Lisboa: ed.mcgraw-hill.
- Chindaprasirt, p. E. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste management*, 29, pp. 539-543.
- Chindaprasirt, p., chareerat, p., & sirivatnanon, v. (2007). Workability and strenght of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement & concrete composites*, 29, pp. 224-229.
- Cordeiro, s., barroso, m., & acho, I. (2013). Resíduos de estações de tratamento de água e a iso 24512. (2, ed.) *Desafio de saneamento brasileiro*, pp. 115-122.

- Coutinho, j. (2006). Materiais de construção 2-1a parte. Universidade do porto, departamento d engenharia civil.
- Crittenden, j. (2012). Water treatment:principle and design. (3, ed.)
- Davidivits, j. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. Journal of thermal analysis, 37, pp. 1633-1656.
- Davidivits, j. (2002). 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer.
- Davidivits, j. (2008). Geopolymer chemistry and applications (5 ed.). Institut géopolymêre.
- Davidovits, j. (1994). Properties of geopolymer cements. Alkaline cements and concrets, pp. 131-149.
- Davidovits, j. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly(sialate) erminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry, pp. 9-15.
- Davidovits, j. (2013). Geopolymer cement:a review. Institut geopolymer, pp. 1-11.
- Davidovits, j. (2014). Alkali activated materials are not geopolymers. Obtido de <https://youtu.be/3qguchtds?si=ckuj-o10gcdapwqo>
- Davidovits, j. (2015). Geopolymer chemistry and aplications. (4, ed.) Institut geopolymer, p. 620.
- De jesus, a. (2018). Utilização de lodo de estação de tratamento de água para a produção de geopolímeros. Relatório de mestrado, universidade federal de amazonas, manaus.
- Duxson, p. E. (2007). Geopolymer technology: the current of the art. Advances in geopolymer science & technology. Springer science+business.
- Farinha, j. &. (1993). Tabelas tecnicas. 446.
- Filho, s. (2017). Tratamento de água: concepção, projecto e operação de estações de tratamento de água. (1, ed.) Rio de janeiro: elsevier.

- Giannopoulou, i., & panias, d. (2007). Structure, design and applications of geopolymeric materials. 1-8.
- Hardjito, d. &. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Curtin university of technology perth, faculty of engineering, australia .
- Hardjito, d. (2007). The use of fly ash to reduce the. 1 st engineering conference on energy & environment.
- Juanico, f. (1998). Instalações industriais: síntese de actividades de ante-projecto, projecto, licenciamento e fiscalização da construção de uma unidade industrial. Escola superior de ciências e tecnologia: universiadade católica portuguesa , cascais.
- Khale, d., & chaudhary, r. (2007). Mechanism of geopolmerization and factors influencing its development: a review. (3, ed.) 42, 729-746.
- Konmitsa, k. &. (2007). Geopolymerisatio: a review and prospects for the minerals industry. Minerals engineering , pp. 1261-1277.
- Magul, j. (2023). Aproveitamento de resíduos industriais, cinzas de carvão mineral e lama vermelha, para produção de geopolímeros. Universidade eduardo mondlane, maputo.
- Majid, b. (2009). Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. Materials technology, 24, 79-87.
- Mehta, p. &. (2008). Concreto: microestrutura, propriedades e materiais (3a ed.). São paulo: ibracon.
- Monjane, e. (2018). Caracterização físico-química e tecnológica da argila. Monografia, maputo.
- Neves, a. (2024). Tipos de cimento portland cp: não erre na escolha! Obtido em 27 de junho de 2024, de <https://www.blok.com.br/blog/tipos-de-cimento-portland-cp>

- Neville, a. (2011). Properties of concrete (5a edição ed.). England: pearson.
- Olívia, m., sarker, p., & nikraz, h. (2008). Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete. Conference on constitution and building technol international, a46, pp. 517-530.
- Palomo, a., varela, m., & grutzeck. (1999). Alkali-activated fly ashes.cement of the future. Cement and concrete research, 29, pp. 1323–1329.
- Petrucci, e. (1970). Concreto de cimento portland. São paulo: globo.
- Provis, j. &. (2009). Geopolymers: structures processing properties and industrial applications. Woodhead publishing.
- Rabah, f. &. (2021). Sludge management in water treatment plants. Literature review.int.j. Environment and wast management, 27, pp. 93-125.
- Ramos, g. (2022). Estudo da durabilidade de cimento geopolimérico composto com resíduo do polimento de placas de porcelanato e submetido ao ataque ácido e sulfato. Dissertação de doutoramento, florianópolis.
- Rodrigues, l. (2016). Preparação e caracterização de piso cerâmico vitrificado incorporado com residuo de estação de tratamento de água. Tese de doutoramento, universidade estadual do norte fluminense darcy ribeiro, rio de janeiro, brasil.
- Rossetto, m. (2017). Desenvolvimento de geopolímeros com incorporação de lodo de estação de tratamento de água. Universidade federal de santa catarina. Joinville.
- Santa, r. (2012). Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima de carvão mineral e matacaulim sintetizado a partir de residuo da industria de papel. Universidade do estado de santa catarina. Joinvellesc.
- Santos, g. (2016). Argamassa geopolimérica a base de lodo de estação de tratamento de agua calcinado. Dissertação de mestrado, universidade federal do amazonas , manaus, brasil.

- Sathonsaowaphaka, a., chindaprasirt, p., & pimraksa, k. (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer. *Journal of hazardous materials*, 168, 44-50.
- Sobral, p. (2015). Estudo do efeito de incorporação de aditivos nas propriedades reológicas e de desempenho do cimento. Dissertação de mestrado, universidade de coimbra:faculdade de ciências e tecnologia de universidade de coimbra , portugal.
- Sousa, j. E. (2018). Influência da concentração de naoh na síntese de geopolímeros a base de lama vermelha a temperatura ambiente. Xxii congresso brasileiro de engenharia química, p. 4.
- Tsutiya, m. (2006). Abastecimento de água. Escola politécnica da universidade de são paulo, departamento de engenharia hidráulica e sanitária, são paulo.
- Van devender, j. E. (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. A139, pp. 506-513.
- Xu, h. E. (2002). The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. *Colloids and surfaces a : physicochem engineer aspects*, 216, pp. 27-44.
- Zampieri, v. (1993). Cimento portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas:fabricação,hidratação e desempenho mecânico. Tese de doutoramento, universidade de são paulo, são paulo.
- Zhang, z., provis, l., reid, a., & wang, h. (2014). *Construção e materiais de construção*. 56, pp. 113-127. Obtido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>
- Zhuang, x. E. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal o clearer production*, 125, 253-267.

## Bibliografia consultada

- Barroso, M. (2009). Desenvolvimento de compósitos com matriz de geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Paraíba.
- Davidovits, J. (2014). Alkali activated materials are not geopolymers. Obtido de <https://youtu.be/3QGUCHtDs?si=CkuJ-O10gcdapwQo>.
- Duxson, P.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; Mallicoat, S. W.; Kriven, W. M.; Van Deventer, J. S. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 269, n. 1, p. 47-58, 2005.
- Lemougna, P *et al.* Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. *Ceramics International*, v. 42, p.15142 –15159, 2016.
- Lima, D. (2011). Processo produtivo de cimento Portland. Monografia, Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte-Brasil.
- Pinto, A. (2004). Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia.
- Pinto, S. (1971). Estabilização de areia com aditivo de cal e cinza volante. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Obtido em 19 de Junho de 2024, de <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2286/1/000124129.pdf>.
- Silveira, G. (2020). Desenvolvimento e caracterização de materiais geopoliméricos de uma fase á base de lama vermelha e vidro moído. Dissertação de Mestrado, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto.
- Tsamba, A. (2012). Elaboração de relatório científico.
- Vassalo, A. (2013). Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado. Dissertação. Dissertação de Mestrado em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais- Escola de Engenharia.

Vaz, L. (2011). Estudo do efeito de adjuvantes em geopolímeros obtidos de resíduos de minas. Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior.



# **ANEXOS**

## Anexo 1: Caracterização do material

Resultados de análise quantitativa e qualitativa da LETA não calcinada

Sample : Cumbane-Leta -nao calcinada  
 Operator:  
 Comment : Oxidos  
 Group : Oxidos  
 Date : 2024-05-06 08:58:41

	RhLb1	2.84	1.6806	
	ArKa	2.96	2.8861	
	ArKb	3.16	0.2659	
	K Ka	3.32	3.1204	
	K Kb	3.59	0.2328	
	CaKa	3.70	3.7675	QF
	CaKb	4.02	0.5390	
-----				
Zn-As, Pb	CuKa	8.06	0.0908	
	ZnKa	8.64	0.1768	QF
	IrLa	9.26	0.0371	QF
	ZnKb	9.58	0.0259	
	AsKa	10.54	0.9364	
	IrLb1	10.70	0.0204	
	BrKa	11.92	0.6861	QF
	FeKaSUM	12.84	0.0936	

PrintNextPage  
 Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
-----				
Cr-Fe	CrKa	5.40	0.9291	QF
	V Kb	5.42	0.0412	
	MnKa	5.90	4.1979	QF
	CrKb	5.94	0.1394	
	FeKa	6.40	692.0789	QF
	MnKb	6.50	0.6328	
-----				
S-K	ArKa	2.96	0.6648	QF
	K Ka	3.32	1.1848	QF
	K Kb	3.59	0.1854	
	CaKa	3.70	1.7718	

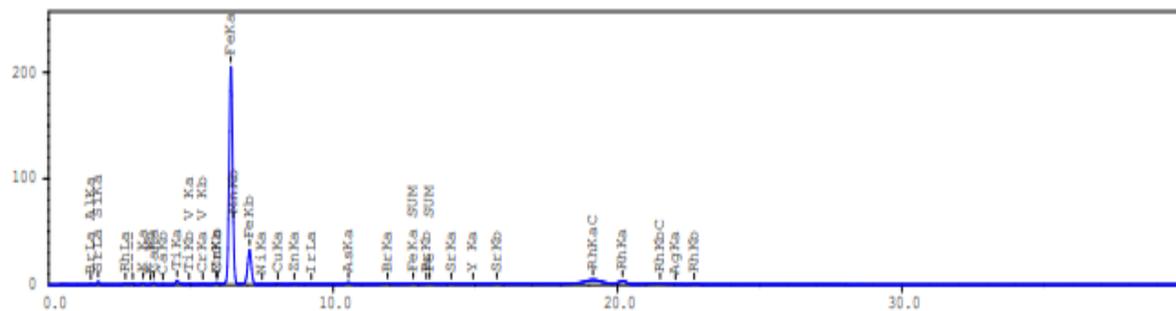
Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
-----					
Al2O3	49.487 %	[ 1.005]	Quan-FP	AlKa	1.1768
SiO2	32.540 %	[ 0.303]	Quan-FP	SiKa	6.0776
Fe2O3	14.080 %	[ 0.026]	Quan-FP	FeKa	692.0789
K2O	2.406 %	[ 0.041]	Quan-FP	K Ka	1.1848
P2O5	0.460 %	[ 0.052]	Quan-FP	P Ka	0.1104
TiO2	0.425 %	[ 0.005]	Quan-FP	TiKa	21.9044
CaO	0.356 %	[ 0.004]	Quan-FP	CaKa	3.7675
MnO	0.110 %	[ 0.002]	Quan-FP	MnKa	4.1979
V2O5	0.038 %	[ 0.003]	Quan-FP	V Ka	2.2050
Cr2O3	0.034 %	[ 0.003]	Quan-FP	CrKa	0.9291
SO3	0.015 %	[ 0.002]	Quan-FP	S Ka	0.1403
CuO	0.011 %	[ 0.001]	Quan-FP	CuKa	4.3320
Ag2O	0.010 %	[ 0.001]	Quan-FP	AgKa	2.3260
ZnO	0.007 %	[ 0.000]	Quan-FP	ZnKa	0.1768
Br	0.006 %	[ 0.000]	Quan-FP	BrKa	0.6861
NiO	0.005 %	[ 0.001]	Quan-FP	NiKa	1.4344
SrO	0.004 %	[ 0.000]	Quan-FP	SrKa	4.1445
Ir2O3	0.003 %	[ 0.000]	Quan-FP	IrLa	0.0371
Y2O3	0.003 %	[ 0.000]	Quan-FP	Y Ka	2.6260

Sample : Cumbane-Leta -nao calcinada Group : Oxidos  
 Operator: Comment : Oxidos

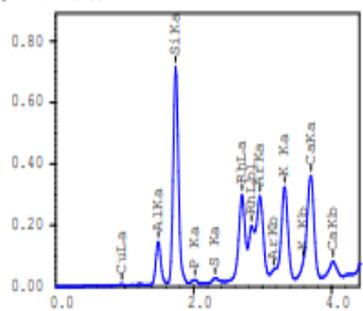
Date : 2024-05-06 08:58:41  
 01/01

[cps/uA] Al-U



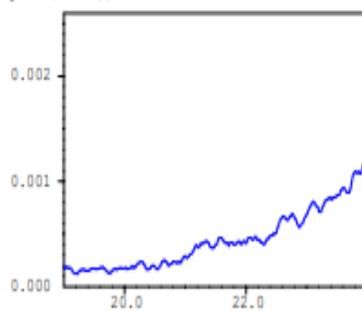
[keV]

[cps/uA] Na-Sc



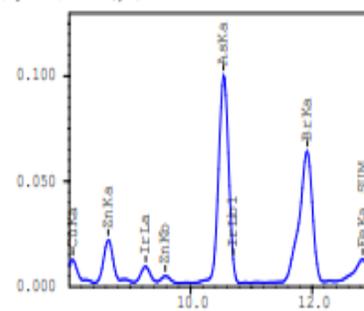
[keV]

[cps/uA] Rh-Cd



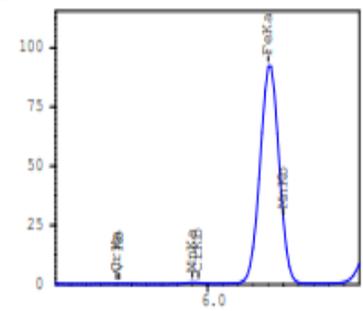
[keV]

[cps/uA] Zn-As, Pb



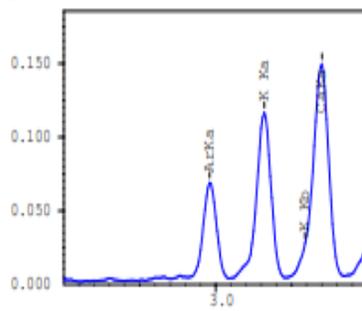
[keV]

[cps/uA] Cr-Fe



[keV]

[cps/uA] S-K



[keV]

# Resultados de análise quantitativa e qualitativa da LETA calcinada a 700°C

Sample : Cumbana-Leta - 700  
 Operator:  
 Comment : Oxidos  
 Group : Oxidos  
 Date : 2024-05-06 08:26:29

	ArKb	3.16	0.2157	
	K Ka	3.32	3.3291	
	K Kb	3.59	0.3180	
	CaKa	3.70	3.9427	QF
	CaKb	4.02	0.5580	
-----				
Zn-Aa, Pb	CuKa	8.06	0.0964	
	ZnKa	8.64	0.1844	QF
	Ir-La	9.26	0.0376	QF
	ZnKb	9.58	0.0277	
	AsKa	10.54	0.9966	
	Ir-Lb1	10.70	0.0207	
	AsKb	11.74	0.1950	QF
	FeKaSUM	12.82	0.1182	

PrintNextPage  
 Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
-----				
Cr-Fe	CrKa	5.42	1.2251	QF
	V Kb	5.42	0.0119	
	MnKa	5.92	4.4973	QF
	CrKb	5.94	0.1838	
	FeKa	6.40	720.0916	QF
	MnKb	6.50	0.6863	
-----				
S-K	ArKa	2.96	0.6082	QF
	K Ka	3.32	1.2506	QF
	K Kb	3.59	0.1989	
	CaKa	3.69	1.9080	

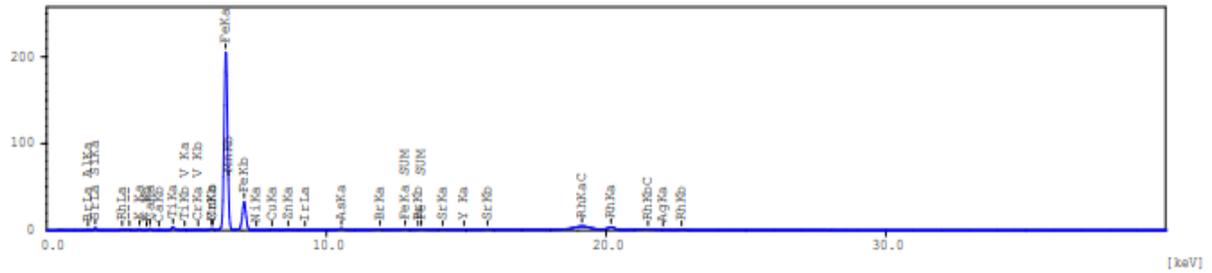
## Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Al2O3	52.386 %	[ 0.992]	Quan-PP	AlKa	1.4098
SiO2	30.970 %	[ 0.282]	Quan-PP	SiKa	6.3580
Fe2O3	12.977 %	[ 0.023]	Quan-PP	FeKa	720.0916
K2O	2.280 %	[ 0.038]	Quan-PP	K Ka	1.2506
P2O5	0.415 %	[ 0.046]	Quan-PP	P Ka	0.1110
TiO2	0.405 %	[ 0.005]	Quan-PP	TiKa	23.3466
CaO	0.333 %	[ 0.004]	Quan-PP	CaKa	3.9427
MnO	0.105 %	[ 0.002]	Quan-PP	MnKa	4.4973
Cr2O3	0.041 %	[ 0.002]	Quan-PP	CrKa	1.2251
V2O5	0.031 %	[ 0.003]	Quan-PP	V Ka	1.9780
As2O3	0.016 %	[ 0.000]	Quan-PP	AsKb	0.1950
SO3	0.014 %	[ 0.001]	Quan-PP	S Ka	0.1478
CuO	0.010 %	[ 0.000]	Quan-PP	CuKa	4.3698
ZnO	0.006 %	[ 0.000]	Quan-PP	ZnKa	0.1844
NiO	0.004 %	[ 0.000]	Quan-PP	NiKa	1.3828
SrO	0.004 %	[ 0.000]	Quan-PP	SrKa	4.6416
Ir2O3	0.003 %	[ 0.000]	Quan-PP	Ir-La	0.0376
Y2O3	0.002 %	[ 0.000]	Quan-PP	Y Ka	2.8634

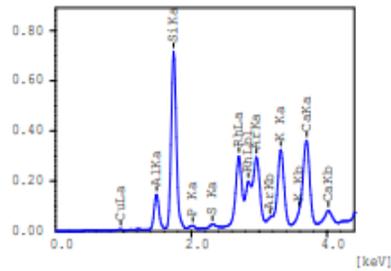
Sample : Cumbane-Leta -nao calcinada Group : Oxidos  
Operator : Comment : Oxidos

Date : 2024-05-06 08:58:41  
01/01

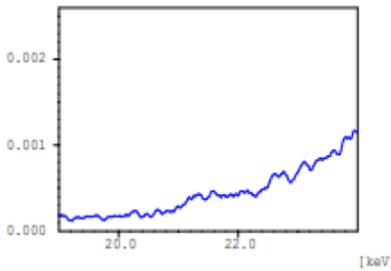
[cps/uA] Al-U



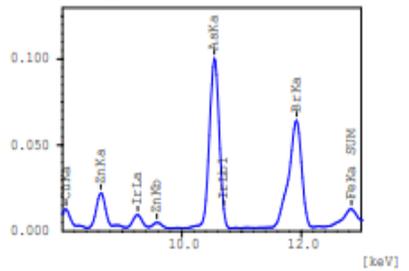
[cps/uA] Na-Sc



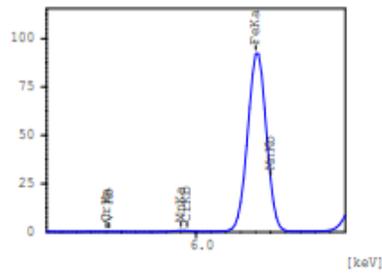
[cps/uA] Rh-Cd



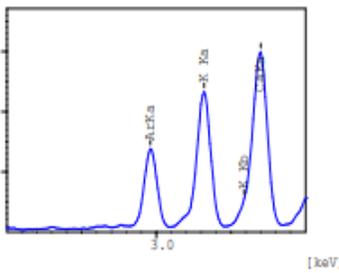
[cps/uA] Zn-As, Pb



[cps/uA] Cr-Fe



[cps/uA] S-K



# Resultados de análise quantitativa e qualitativa da LETA calcinada a 800°C

Sample : Cumbane-Leta - 800  
 Operator:  
 Comment : Oxidos  
 Group : Oxidos  
 Date : 2024-05-06 08:42:37

	K Kb	3.59	0.3633	
	CaKa	3.70	4.0259	QF
	CaKb	4.01	0.5753	
-----				
Zn-As, Pb	CuKa	8.06	0.1010	
	ZnKa	8.64	0.1822	QF
	CuKb	8.92	0.0088	
	IrLa	9.26	0.0719	QF
	ZnKb	9.60	0.0282	
	AsKa	10.54	0.9945	
	IrLb1	10.70	0.0395	
	AsKb	11.74	0.1898	QF
	FeKaSUM	12.82	0.1152	
-----				
Cr-Fe	CrKa	5.42	0.9453	QF
	V Kb	5.42	0.0379	
	MnKa	5.90	4.5679	QF
	CrKb	5.94	0.1357	
	FeKa	6.40	728.1147	QF
	MnKb	6.50	0.7053	

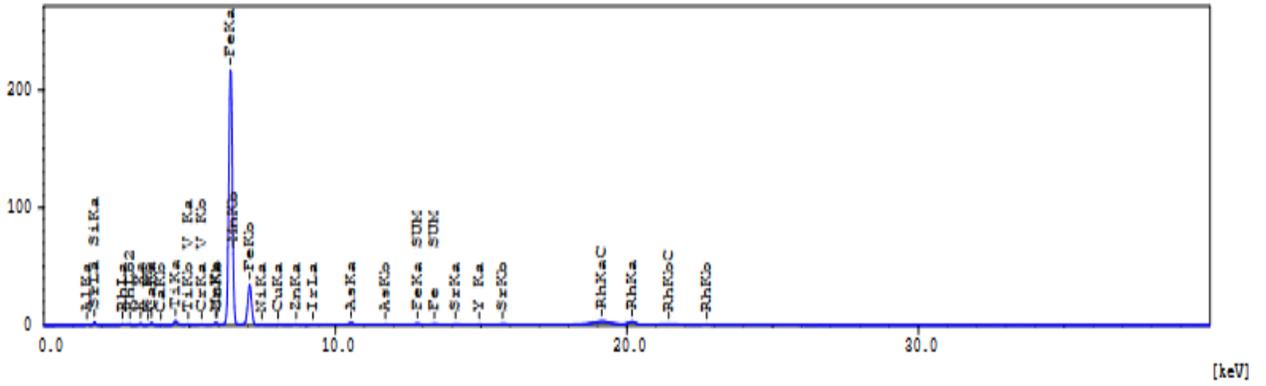
PrintNextPage  
Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
S-K	ArKa	2.96	0.6576	QF
	K Ka	3.32	1.2781	QF
	K Kb	3.59	0.2010	
	CaKa	3.70	1.9326	

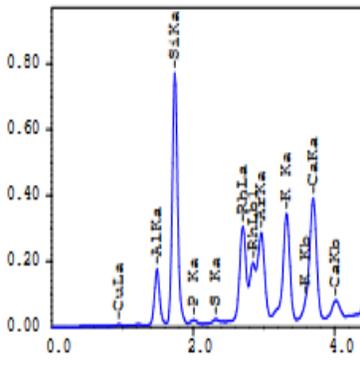
## Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Al2O3	51.517 %	[ 0.968]	Quan-FP	AlKa	1.3771
SiO2	31.501 %	[ 0.283]	Quan-FP	SiKa	6.4771
Fe2O3	13.211 %	[ 0.023]	Quan-FP	FeKa	728.1147
K2O	2.338 %	[ 0.039]	Quan-FP	K Ka	1.2781
P2O5	0.447 %	[ 0.047]	Quan-FP	P Ka	0.1192
TiO2	0.424 %	[ 0.005]	Quan-FP	TiKa	24.2969
CaO	0.342 %	[ 0.004]	Quan-FP	CaKa	4.0259
MnO	0.107 %	[ 0.002]	Quan-FP	MnKa	4.5679
Cr2O3	0.032 %	[ 0.002]	Quan-FP	CrKa	0.9453
V2O5	0.025 %	[ 0.003]	Quan-FP	V Ka	1.6193
As2O3	0.015 %	[ 0.000]	Quan-FP	AsKb	0.1898
CuO	0.010 %	[ 0.000]	Quan-FP	CuKa	4.3805
SO3	0.010 %	[ 0.001]	Quan-FP	S Ka	0.1003
ZnO	0.006 %	[ 0.000]	Quan-FP	ZnKa	0.1822
Ir2O3	0.005 %	[ 0.000]	Quan-FP	IrLa	0.0719
NiO	0.004 %	[ 0.000]	Quan-FP	NiKa	1.4524
S=O	0.004 %	[ 0.000]	Quan-FP	S=Ka	4.7008
Y2O3	0.003 %	[ 0.000]	Quan-FP	Y Ka	2.9702

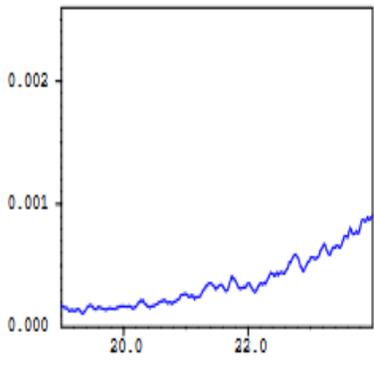
[cps/uÅ] Al-U



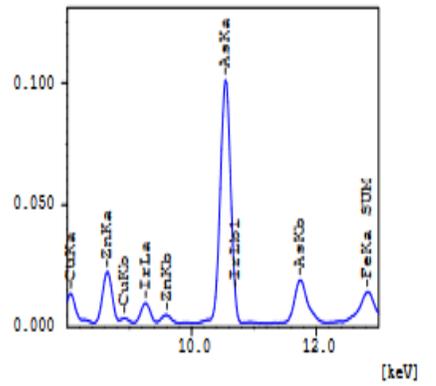
[cps/uÅ] Na-3c



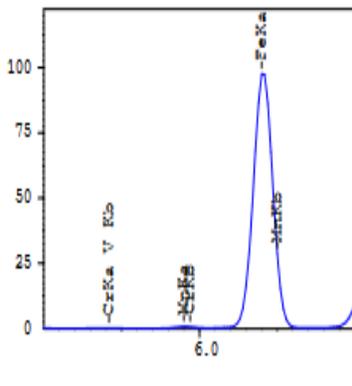
[cps/uÅ] Rh-Cd



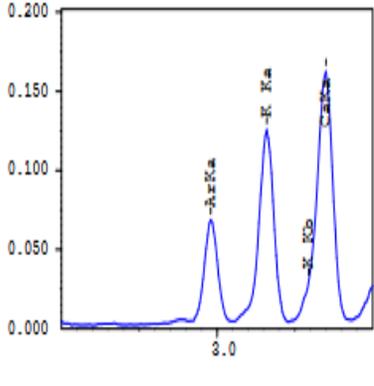
[cps/uÅ] Zn-Ac, Pb



[cps/uÅ] Cr-Fe



[cps/uÅ] S-R



Act  
 Got

# Resultados de análise quantitativa e qualitativa da cinza

Sample : EBE-ENG-cinzas de carvão mineral  
 Operator:  
 Comment : Quickseasy Air-Metal  
 Group : detail  
 Date : 2024-08-21 08:28:51

## Measurement Condition

Instrument: EDX-7000 Atmosphere: Air Collimator: 10 (mm)

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Al-U	Rh 50	40-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 20	30
Na-Sc	Rh 15	430-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 20	29
Rh-Cd	Rh 50	998-Auto #1		0 - 40	19.50-23.50	Live- 60	10
Zn-As,Pb	Rh 50	498-Auto #4		0 - 40	8.50-13.00	Live- 60	30
Cr-Fe	Rh 50	58-Auto #3		0 - 40	5.20- 6.60	Live- 60	30
S-K	Rh 15	780-Auto #2		0 - 20	2.10- 3.40	Live- 60	30

## Qualitative Result

Element: Al, Sr, Si, S, Rh, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Ga, Y, Zr,  
 Nb, Ar, Ba, Th, Rb, I, Cs, La, Ce, Nd, Zn, Hg, Pb, Br, Sn, Cl

PrintNextPage  
Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Al-U	AlKa	1.48	2.7925	
	SrLa	1.74	1.4052	
	SiKa	1.74	17.6777	
	S Ka	2.32	0.6574	
	RhLa	2.70	5.2040	
	----	2.96	5.3876	
	K Ka	3.32	4.0844	
	K Kb	3.58	0.5718	
	CaKa	3.70	52.1596	
	CaKb	4.02	8.0762	
	TiKa	4.52	41.7551	QF
	TiKb	4.94	5.8457	
	V Ka	4.94	2.9471	QF
	CrKa	5.42	2.5478	
	V Kb	5.42	0.4126	
	MnKa	5.90	3.6364	
	CrKb	5.94	0.3822	
	FeKa	6.42	140.9354	
	MnKb	6.50	0.5455	
	FeKb	7.06	23.0134	
	NiKa	7.50	3.6679	QF
	CuKa	8.06	4.7891	QF
	GaKa	9.26	2.6405	
	SrKa	14.16	58.6492	QF
	Y Ka	14.94	9.9320	QF
	SrKb	15.76	10.3336	
	ZrKa	15.76	44.4523	QF
Y Kb	16.68	1.6175		
NbKa	16.68	1.9898	QF	
ZrKb	17.66	7.2394		
RhKaC	19.18	40.3686		
RhKa	20.20	33.6623		
RhKbC	21.46	7.5770		
RhKb	22.74	5.4124		

Na-Sc	AlKa	1.49	1.3965	QF
	SiKa	1.74	9.2031	QF
	CaKaESC	1.98	0.1589	
	S Ka	2.31	0.3724	
	RhLa	2.70	2.5485	
	RhLb1	2.84	1.3877	
	ArKa	2.96	2.5301	
	ArKb	3.17	0.1991	
	K Ka	3.32	1.5618	

Sample : EBE-ENG-cinzas de carvão mineral  
 Operator:  
 Comment : Quickseasy Air-Metal  
 Group : detail  
 Date : 2024-08-21 08:28:51

K Kb	3.59	0.0294	
CaKa	3.70	17.6561	QF
CaKb	4.02	2.5568	
TiKa	4.51	13.0653	
TiKb	4.94	2.3930	
CrKa	5.42	0.5756	
MnKa	5.89	0.7209	
CrKb	5.95	0.0863	
FeKa	6.40	22.2045	
MnKb	6.49	0.1081	
FeKb	7.06	3.7211	
NiKa	7.46	0.5308	

-----  
 PrintNextPage  
 Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Zn-Aa, Pb	CuKa	8.06	0.0894	
	ZnKa	8.66	0.0300	QF
	GaKa	9.26	0.1292	QF
	HgLa	9.88	0.0215	QF
	GaKb	10.28	0.0194	
	PbLa	10.56	0.0295	
	BrKa	11.92	0.0371	QF
	ThLa	12.98	0.1515	QF
Cr-Fe	V Kb	5.44	0.1545	
	CrKa	5.44	0.5440	QF
	MnKa	5.90	1.1909	QF
	CrKb	5.94	0.0801	
	FeKa	6.42	59.0646	QF
	MnKb	6.50	0.1786	
S-K	S Ka	2.31	0.0384	QF
	ClKa	2.62	0.0161	QF
	TiKaESC	2.77	0.0413	
	ArKa	2.96	0.5943	QF
	K Ka	3.32	0.5794	QF
	K Kb	3.59	0.0911	
	CaKa	3.70	8.3930	

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Si	597649.2 ppm	[6343.31]	Quan-FP	SiKa	9.2031
Al	294831.9 ppm	[7818.52]	Quan-FP	AlKa	1.3965
Ca	48917.91 ppm	[372.287]	Quan-FP	CaKa	17.6561
Ti	19604.39 ppm	[321.403]	Quan-FP	TiKa	41.7551
Fe	18278.81 ppm	[120.918]	Quan-FP	FeKa	59.0646
S	7340.842 ppm	[707.029]	Quan-FP	S Ka	0.0384
K	7159.611 ppm	[119.169]	Quan-FP	K Ka	0.5794
Cl	1224.304 ppm	[263.241]	Quan-FP	ClKa	0.0161
Sr	1183.653 ppm	[14.411]	Quan-FP	SrKa	58.6492
V	963.106 ppm	[120.836]	Quan-FP	V Ka	2.9471
Zr	775.605 ppm	[ 9.536]	Quan-FP	ZrKa	44.4523
Mn	568.755 ppm	[34.176]	Quan-FP	MnKa	1.1909
Ce	408.268 ppm	[46.317]	Quan-FP	CeKa	0.5440
Cu	354.870 ppm	[28.877]	Quan-FP	CuKa	4.7891
Ni	317.784 ppm	[29.551]	Quan-FP	NiKa	3.6679
Y	186.486 ppm	[11.022]	Quan-FP	Y Ka	9.9320
Ga	102.550 ppm	[ 4.377]	Quan-FP	GaKa	0.1292
Nb	34.691 ppm	[ 8.972]	Quan-FP	NbKa	1.9898
Th	34.300 ppm	[ 2.044]	Quan-FP	ThLa	0.1515
Zn	33.966 ppm	[ 5.058]	Quan-FP	ZnKa	0.0300
Hg	19.514 ppm	[ 3.844]	Quan-FP	HgLa	0.0215

Sample : EBE-ENG-cinza de carvão mineral  
 Operator:  
 Comment : Quickseasy Air-Metal  
 Group : detail  
 Date : 2024-08-21 08:28:51

Br 9.477 ppm [ 1.299] Quan-FP BrKa 0.0371

## Análise granulométrica

Tabela A1-1: Resultados da caracterização granulométrica da areia

Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida(%)	Fracção cumulativa(%)	Fracção passante(%)
2.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1.80	110	11.58	11.58	88.42
1.00	125	13.16	24.74	75.26
0.60	430	45.26	70.00	30.00
0.50	110	11.58	81.58	18.42
0.08	170	17.89	99.47	0.53
Base	5.00	0.53	100.00	0.00

## Anexo 2: Propriedades mecânicas das argamassas endurecidas

### Ensaio de compressão (NP EM 196-1:2017)

Tabela A2-1: Resultados da influência da temperatura de calcinação da LETA na resistência a compressão dos geopolímeros aos 28 dias

Temperatura (°C)	Provete	Força(KN)	Resistência à compressão(MPa)	Resistência Média(MPa)
Não calcinada	PT0C/L0:1	0.13	9.32	0.84
	PT0C/L0:2	0.14	9.48	
	PT0C/L0:3	0.13	9.40	
800°C	PT8C/L0:1	14.91	9.32	9.40
	PT8C/L0:2	15.16	9.48	
	PT8C/L0:3	14.88	9.40	
700°C	PT7C/L0:1	20.25	9.32	12.63
	PT7C/L0:2	20.15	9.48	
	PT7C/L0:3	20.20	9.40	

**PT0C/L0**-provete de lama não calcinada sem substituição com cinza.

**PT7C/L0**-provete de lama calcinada a 700°C sem substituição com cinza.

**PT8C/L0**-provete de lama calcinada a 800°C sem substituição com cinza.

Tabela A2-2: Resultados da influência substituição da lama pela cinza na resistência a compressão dos geopolímeros aos 28 dias.

Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência à compressão(MPa)	Resistência Média(MPa)
Idade:28 dias	PT7C/L0:1	20.25	12.66	12.62
	PT7C/L0:2	20.15	12.60	
	PT7C/L0:3	20.20	12.62	
Idade:28 dias	PT7C/L20:1	14.88	9.30	9.26
	PT7C/L20:2	14.86	9.22	
	PT7C/L20:3	14.92	9.26	
	PT7C/L40:1	2.63	1.65	1.64

Idade:28 dias	PT7C/L40:2	2.63	1.64	
	PT7C/L:40:3	2.63	1.64	

PT7C/L20-provete de lama calcinada a 700°C com substituição de lama por cinza a 20%.

PTC/L40-provete de lama calcinada a 800°C com substituição de lama por cinza a 40%.

Tabela A2-3: Resultados de influencia da concentração e do tempo de cura na resistência a compressão dos geopolímeros.

Ensaio	Provete	Força Compressão(KN)	Resistência (MPa)	Resistência Média(MPa)
Idade:28 dias	PC8L:1	10.53	6.59	6.52
	PC8L:2	10.31	6.44	
	PC8L:3	10.42	6.52	
Idade:28 dias	PC10L:1	16.15	10.10	10.05
	PC10L:2	15.99	10.00	
	PC10L:3	16.07	10.05	
Idade:7 dias	PC8L:1	9.50	5.94	5.74
	PC8L:2	8.86	5.54	
	PC8L:3	9.18	5.74	
Idade:7 dias	PC10L:1	14.84	9.28	9.14
	PC10L:2	14.42	9.01	
	PC10L:3	14.63	9.14	

PC8L-provete de lama com concentração de NaOH de 8M.

PC10L-provete de lama com concentração de NaOH de 10M.

Tabela A2-4: Resultados da influência do tempo de cura na resistência a compressão dos provetes do cimento Portland.

Ensaio	Provete	Força compressão (KN)	Resistência compressão(MPa)	Resistência Média(MPa)
Idade:7 dias	P7CP:1	34.64	21.65	21.99
	P7CP:2	35.19	21.99	
	P7CP:3	36.13	22.58	

Idade:28 dias	P28CP:1	47.77	29.85	29.85
	P28CP:2	44.10	29.06	
	P28CP:3	46.49	30.63	

P7CP: provetes de cimento Portland aos 7 dias.

P28CP: provetes de cimento Portland aos 28 dias.

Tabela A2-5: Resistência à compressão dos provetes geopoliméricos após calcinação.

Temperatura (°C)	Ensaio	Provete	Força Compressão (KN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
300	Idade:7 dias	PLT3:1	10.53	16.73	16.65
		PLT3:2	10.31	16.57	
		PLT3:3	10.42	16.65	
800	Idade:7 dias	PLT8:1	8.59	5.37	5.80
		PLT8:2	9.96	6.22	
		PLT8:3	9.28	5.80	

PLT3-provete de cimento Portland após calcinação a 300 °C.

PLT8-provete de cimento Portland após calcinação a 800 °C.

Tabela A2-6: Resistência à compressão dos provetes de cimento Portland após calcinação.

Temperatura (°C)	Ensaio	Provete	Força compressão (KN)	Resistência compressão (MPa)	Resistência Média(MPa)
300	Idade:7 dias	PCPT3:1	34.18	21.36	21.50
		PCPT3:2	34.60	21.62	
		PCPT3:3	34.39	21.50	
800	Idade:7 dias	PCPT8:1	11.48	7.17	7.34
		PCPT8:2	12.02	7.51	
		PCPT8:3	11.75	7.34	

PCPT3-provete de cimento Portland após calcinação a 300 °C.

PCPT8-provete de cimento Portland após calcinação a 800 °C.

### Ensaio de flexão (NP EM 196-1:2017)

Tabela A2-7: Resultados da influência da temperatura de calcinação da LETA na resistência a flexão dos geopolímeros aos 28 dias.

Temperatura (°C)	Provete	Força(KN)	Resistência à flexão(MPa)	Resistência Média(MPa)
Não calcinada	PT0C/L0:1	0.05	0.13	0.11
	PT0C/L0:2	0.04	0.10	
	PT0C/L0:3	0.05	0.12	
800	PT8C/L0:1	0.34	0.80	0.80
	PT8C/L0:2	0.34	0.80	
	PT8C/L0:3	0.34	0.80	
700	PT7C/L0:1	0.37	0.87	0.93
	PT7C/L0:2	0.42	0.98	
	PT7C/L0:3	0.39	0.93	

Tabela A2-8: Resultados da influência substituição da lama pela cinza na resistência à flexão dos geopolímeros.

Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência à flexão(MPa)	Resistência Média(MPa)
Idade:28 dias	PT7C/L0:1	0.372	0.87	0.926
	PT7C/L0:2	0.42	0.98	
	PT7C/L0:3	0.39	0.93	
Idade:28 dias	PT7C/L20:1	0.16	0.43	0.44
	PT7C/L20:2	0.19	0.45	
	PT7C/L20:3	0.18	0.44	
Idade:28 dias	PT7C/L40:1	0.49	0.12	0.17
	PT7C/L40:2	0.93	0.22	
	PT7C/L40:3	0.71	0.17	

Tabela A2-9: Resultados de influência da concentração e do tempo de cura na resistência à flexão dos geopolímeros.

Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência Média (MPa)
Idade:28 dias	PC8L:1	0.26	0.61	0.59
	PC8L:2	0.24	0.57	
	PC8L:3	0.25	0.59	
Idade:28 dias	PC10L:1	0.41	0.97	0.84
	PC10L:2	0.31	0.72	
	PC10L:3	0.36	0.84	
Idade:7 dias	PC8L:1	0.17	0.40	0.42
	PC8L:2	0.19	0.45	
	PC8L:3	0.18	0.42	
Idade:7 dias	PC10L:1	0.28	0.65	0.6
	PC10L:2	0.23	0.55	
	PC10L:3	0.26	0.6	

Tabela A2-10: Resultados da influência do tempo de cura na resistência a flexão dos provetes do cimento Portland.

Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência Média (MPa)
Idade:7 dias	P7CP:1	0.98	2.30	3.42
	P7CP:2	2.33	5.45	
	P7CP:3	1.07	2.50	
Idade:28 dias	P28CP:1	2.91	6.82	6.85
	P28CP:2	2.93	6.88	
	P28CP:3	2.92	6.85	

Tabela A2-11: Resistência à flexão dos provetes geopoliméricos após calcinação.

Temperatura (°C)	Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência Média (MPa)
------------------	--------	---------	------------	----------------------------	-------------------------

300	Idade:7 dias	P7L:1	0.33	0.76	0.91
		P7L:2	0.45	1.06	
		P7L:3	0.39	0.91	
800	Idade:7 dias	P28L:1	0.17	0.40	0.45
		P28L:2	0.19	0.44	
		P28L:3	0.21	0.50	

Tabela A2-12: Resistência à flexão provetes de cimento Portland após calcinação.

Temperatura (°C)	Ensaio	Provete	Força (KN)	Resistência compressão (MPa)	Resistência Média (MPa)
300	Idade:7 dias	PCPT3:1	0.51	1.38	1.38
		PCPT3:2	0.59	1.38	
		PCPT3:3	0.55	1.38	
800	Idade:7 dias	PCPT8:1	0.09	0.21	0.21
		PCPT8:2	0.10	0.22	
		PCPT8:3	0.09	0.21	

### Anexo 3: Propriedades físicas das argamassas endurecidas

Tabela A3-1: Absorção de água dos provetes

Provete	$m_h(g)$	$m_s(h)$	AbH <sub>2</sub> O(%)	AbH <sub>2</sub> O média (%)
PC8L	545	520	0.05	4.80%
	545	525	0.04	
	550	520	0.06	
PT8L	545	520	0.05	4.49%
	545	520	0.05	
	540	520	0.04	
PT7L	555	530	0.05	4.73%
	550	525	0.05	
	555	530	0.05	
PT0L	490	465	0.05	5.75%
	485	460	0.05	
	495	465	0.06	
PT7C/L20	545	520	0.05	5.16%
	540	515	0.05	
	545	515	0.06	
PT7C/L40	515	485	0.06	5.80%
	515	490	0.05	
	520	490	0.06	
PCP	580	575	0.01	0.87%
	575	575	0.00	
	580	570	0.02	

Tabela A3-2: Densidade aparente dos provetes

Provete	$m_h(g)$	$V_{pr}(cm^3)$	$\rho(\frac{g}{cm^3})$	$\bar{\rho}(\frac{g}{cm^3})$
PC8L	545	274.5	1.99	1.99

	545	274.5	1.99	
	550	274.5	2.00	
PT8L	545	271.49	2.01	2.00
	545	271.49	2.01	
	540	271.49	1.99	
PT7L	555	269.16	2.06	2.06
	550	269.16	2.04	
	555	269.16	2.06	
PT0L	490	259.32	1.89	1.89
	485	259.32	1.87	
	495	259.32	1.91	
PT7C/L20	545	264.4	2.06	2.05
	540	264.4	2.04	
	545	264.4	2.06	
PT7C/L40	515	254.86	2.02	2.03
	515	254.86	2.02	
	520	254.86	2.04	
PCP	580	261.7	2.22	2.22
	575	261.7	2.20	
	580	261.7	2.22	

Tabela A3-3: Porosidade dos provetes

Provete	$m_h(g)$	$m_s(h)$	$v_{pr}(cm^3)$	$\varepsilon$	$\bar{\varepsilon}$
PC8L	545	520	274.50	0.09	9.11%
	545	525	274.50	0.07	
	550	520	274.50	0.11	
PT8L	545	520	271.49	0.09	8.59%
	545	520	271.49	0.09	
	540	520	271.49	0.07	
PT7L	555	530	269.16	0.09	9.29%
	550	525	269.16	0.09	
	555	530	269.16	0.09	
PT0L	490	465	259.32	0.10	10.28%
	485	460	259.32	0.10	
	495	465	259.32	0.12	

PT7C/L20	545	520	264.40	0.09	10.09%
	540	515	264.40	0.09	
	545	515	264.40	0.11	
PT7C/L40	515	485	254.86	0.12	11.12%
	515	490	254.86	0.10	
	520	490	254.86	0.12	
PCP	580	575	261.70	0.02	1.91%
	575	575	261.70	0.00	
	580	570	261.70	0.04	