



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
Portland POR CINZAS DA LAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Nome do autor:

Nilto Valentim

Supervisor:

Prof. Doutor Afonso Daniel Macheca, Eng.º

Co-Supervisor:

MSc. Rodrigues Salvador Manjate, Eng.º

Maputo, Setembro de 2025



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
Portland POR CINZAS DA LAMA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Nome do autor:

Nilto Valentim

Supervisor:

(Prof. Doutor Afonso Daniel Macheca, Eng.º)

Co-Supervisor:

MSc. Rodrigues Salvador Manjate, Eng.º

Maputo, Setembro 2025

TERMO DE ENTREGA DO RELATORIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante **Nilto Valentim** entregou no dia ____/____/20____ as ____
cópias do relatório do seu trabalho de Licenciatura intitulado: **Avaliação da
possibilidade de substituição parcial do cimento *Portland* por lamas da estação de
tratamento de água.**

Maputo, ____ de ____ de 20____

O Chefe de Secretaria

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Eu, Nilto Valentim, declaro por minha honra que o presente trabalho foi realizado inteiramente por mim, no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, no âmbito da conclusão do curso de Licenciatura em Engenharia Química.

Maputo, _____ de _____ de 20____

Dedicatória

Dedico este trabalho, primeiro a Deus, por ser essencial na minha vida e autor do meu destino, ao meu pai Valentim Mário e a minha mãe Joana Amina de Sousa que com muito carinho e apoio não mediaram nenhum tipo de apoio para que eu pudesse conquistar o que tenho hoje, aos meus irmãos e amigos por estes sempre semearem a coragem e força para vencer os obstáculos.

Agradecimento

Agradeço a Deus que tem tomado conta de mim desde a minha existência, pela força que tem me proporcionado para enfrentar os desafios ao longo da minha jornada.

Aos meus pais Valentim Mário e Joana Amina de Sousa, agradeço por sempre estarem do meu lado sempre que eu preciso, nos bons e maus momentos.

Aos meus irmãos Dinarte Buana, Zaira Valentim, Shelcia Buana, Cleide Valentim, Angelelita Buana, Valeria Valentim e Ivalda Valentim por sempre terem demonstrado confiança e me motivado para o término desta etapa.

Meu especial agradecimento vai para o meu supervisor Prof. Doutor Afonso Daniel Macheca, pela sua orientação para o desenvolvimento do trabalho, pela confiança, disponibilidade e apoio.

Ao meu co-supervisor MSc. Rodrigues Salvador Manjate, Eng.º, por ter providenciado condições para o desenvolvimento dos ensaios essenciais do meu trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Engenharia de Moçambique, em especial o Engenheiro José Alberto Tsambo, Engenheiro Eleutério Vicente Manjane e o senhor Tomás Francisco Macuácu pelo acolhimento e apoio na realização de ensaios mecânicos.

A toda equipe do laboratório do Departamento de Engenharia Química, por ter dado o apoio em todos os ensaios que precisei fazer nestas instalações

Aos meus amigos e colegas que sempre apoiaram durante esta etapa.

Resumo

A gestão adequada dos resíduos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) é um desafio ambiental crescente, devido ao seu descarte inadequado em corpos hídricos. E por outro lado, a crescente preocupação ambiental e a busca por soluções sustentáveis na indústria de cimento têm impulsionado a pesquisa sobre a utilização de resíduos provenientes nas industriais como substitutos parciais do cimento *Portland*. Entre esses resíduos, destaca-se a lama proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA), que, após processos de secagem, moagem e calcinação, apresenta características químicas e físicas que podem conferir propriedades pozolânicas ao material. Este estudo teve como objectivo avaliar a possibilidade de substituição parcial do cimento *Portland* por cinzas obtidas após a calcinação da Lama de Estação de Tratamento de Água (LETA). Para o efeito, foram colectadas amostras de lamas na Estação de Tratamento de Água de Umbeluzi (ETAU), localizada no distrito de Boane, província de Maputo. A lama foi submetida aos processos de secagem, calcinação a 1000 °C, moagem, e posteriormente a uma série de testes experimentais para caracterizar suas propriedades físico-químicas, e avaliar seu potencial como material substituinte do cimento. As percentagens do substituinte consideradas neste estudo foram 7%, 10% e 20%, dentre estas as indentificadas como mais ideais foram de 7% e 10% da lama calcinada, pois não comprometeram significativamente o desempenho mecânico da argamassa, apresentando valores medidos de resistência compatíveis com os exigidos por norma. Portanto, conclui-se que o uso da lama em estudo, pode ser usada após a calcinação como substituinte parcial do cimento *Portland*, consequentemente contribuir para a redução do impacto ambiental associado à disposição inadequada da lama e a redução do uso da matéria-prima na indústria cimenteira, tornando assim este processo mais economicamente viável e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: lama de ETA, substituição parcial, argamassa, resistência mecânica.

Abstract

The proper management of waste generated in Water Treatment Plants (WTPs) is an increasing environmental challenge due to the improper disposal of these residues into water bodies. On the other hand, growing environmental concerns and the pursuit of sustainable solutions in the cement industry have driven research on the use of industrial by-products as partial substitutes for Portland cement. Among these residues, the sludge from Water Treatment Plants stands out. After undergoing drying, grinding, and calcination processes, it exhibits chemical and physical characteristics that may confer pozzolanic properties to the material. This study aimed to evaluate the possibility of partially replacing Portland cement with ash obtained from the calcination of Water Treatment Plant Sludge (WTPS). For this purpose, sludge samples were collected from the Umbeluzi Water Treatment Plant (WTPU), located in Boane district, Maputo province. The sludge was subjected to drying, calcination at 1000 °C, grinding, and subsequently a series of experimental tests to characterize its physicochemical properties and assess its potential as a cement replacement material. The replacement percentages considered in this study were 7%, 10%, and 20%. Among these, the most suitable proportions were found to be 7% and 10% of calcined sludge, as they did not significantly compromise the mechanical performance of the mortar, presenting strength values consistent with the standard's requirements. Therefore, it is concluded that the sludge analyzed in this study can be used, after calcination, as a partial substitute for Portland cement, thereby contributing to reducing the environmental impact associated with the improper disposal of sludge and minimizing the consumption of raw materials in the cement industry, making the process more economical and sustainable.

Keywords: water treatment plant sludge, partial replacement, mortar, mechanical strength.

Índice

Dedicatória	i
-------------------	---

Agradecimento	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	viii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Problematização.....	2
1.3. Justificativa.....	2
1.4. Objectivos do Trabalho.....	3
1.4.1. Objectivo Geral	3
1.4.2. Objectivos Específicos	3
1.5. Metodologia.....	3
2. Revisão bibliográfica	4
2.1. Etapas do Processo de Tratamento de Água nas ETA's	5
2.1.1. Coagulação-floculação.....	5
2.1.2. Sedimentação ou decantação.....	6
2.1.3. Filtração	6
2.1.4. Desinfecção	6
2.2. Lamas Produzidas nas Estações de Tratamento de Água	7
2.2.1. Caracterização da Lama	7
2.2.2. Tratamento da lama	8
2.2.3. Estimativa da quantidade da lama produzida	9
2.2.4. Possíveis Aplicações da Lama das ETAs	10
2.3. Cimento e a sua Caracterização	16
2.4. Material pozolânico	17
3. Caso de Estudo: Estação de Tratamento de Umbeluzi (Boane – Maputo)	19
3.1. Distrito de Boane.....	19
3.2. Estação de Tratamento de Água de Umbeluzi.....	19
3.3. Processo de tratamento de Água na ETAU	21
4. Parte Experimental	23
4.1. Fluxograma geral do processo experimental	23
4.2. Materiais e Métodos	24

4.2.1. Caracterização da lama	24
4.2.1.1. Análise do teor de humidade.....	24
4.2.1.2. Análise do pH das lamaz.....	25
4.2.1.3. Determinação do teor da matéria orgânica	25
4.2.2. Tratamento Térmico	28
4.2.2.1. Secagem da lama	28
4.2.2.2. Moagem das lamaz secas	28
4.2.2.3. Calcinação do material moído.....	28
4.2.3. Procedimento para preparação da argamassa e fabricação dos provetes	29
4.2.4.1. Resistência à flexão	31
4.2.4.2. Resistência à compressão	32
4.2.4.3. Ensaio de consistência normal.....	32
5. Resultados e Discussões	34
5.1. Determinação da humidade da lama.....	34
5.2. Determinação do pH	34
5.3. Determinação de matéria orgânica	35
5.4. Determinação do tamanho de partículas.....	36
5.5. Caracterização da mistura do cimento e a cinza.....	36
4.6. Determinação da Consistência da Lama.....	37
4.7. Propriedades físicas.....	38
4.7.1. Resistência à Flexão.....	38
5.7.2. Resistência à Compressão	40
5.8. Determinação da percentagem ideal de substituição da lama	42
6. Conclusões.....	43
7. Recomendações.....	45
8. Referências Bibliografia.....	46
9. Anexos.....	53

Lista de figuras

Figura 1: Representação esquemática das etapas de tratamento de água (Fonte: Bensitel, et al., 2023, p. 2).....	7
Figura 2: Correlação da turbidez vs. TSS (Fonte: Ahmad, et. al., 2017, p. 5).....	10
Figura 3: Localização geográfica da área de estudo (auxílio da ferramenta QGIS 3.32.3 e Google Earth 10.66.0.2)	20
Figura 4: (a) Grades de retenção e (b) Pré-cloração.....	21
Figura 5: Etapa de Sedimentação	22
Figura 6: Etapa de filtração.....	22
Figura 7: Fluxograma de actividades experimentais	23
Figura 8: Determinação de humidade	24
Figura 9: Determinação de pH.....	25
Figura 10: Perfil de temperatura para análise de matéria orgânica	27
Figura 11: Amostras de lama na mufla para determinação da matéria orgânica	27
Figura 12: Relação entre tensão de roptura e a razão Água e Cimento (A/C) (Fonte:citado por Popatlal, 2023)	30
Figura 13: Valores médios relativos a humidade da lama	34
Figura 14: Teor de matéria orgânica da lama em estudo.....	35
Figura 15: Curva de distribuição de tamanho das partículas da areia para os ensaios.....	36
Figura 16: Absorção de água em provetes com 2 e 28 dias de idade	37
Figura 17: Tendência da resistência à flexão dos provetes em função da percentagem do substituinte (2 e 28 dias de idade).....	39
Figura 18: Tendência da resistência à compressão dos provetes em função da percentagem do substituinte (2 e 28 dias de idade)	41

Lista de tabelas

Tabela 1: Possíveis aplicações para as lamas das ETAs (Fonte: Silva, 2017)	11
Tabela 2: Condições para o tratamento térmico da lama (Fonte: Silva, 2017):	28
Tabela 3: Distribuição da quantidade do material para produção de argamassa nas fracção consideradas	30
Tabela 4: Valores relativos ao pH da lama em estudo.	35
Tabela 5: Resultados de ensaios de consistência normal	38
Tabela 6: Valor médio da resistência à flexão.....	40
Tabela 7: Valor médio da resistência à compressão.....	41

1. Introdução

1.1. Contextualização

A água é um recurso essencial para o desenvolvimento sustentável. Até 2015, os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas estabeleceram que todas as pessoas deveriam ter acesso à água potável até 2030 (Bexell, 2021). No entanto, nos últimos anos, tem-se observado um aumento acentuado na procura por água e na poluição dos corpos hídricos, o que exige a expansão das indústrias de tratamento de água para atender a essas demandas (ONU, 2019).

O processo de tratamento da água para consumo normalmente envolve etapas como coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (Ahmad, Amad, & Alam, 2017). Durante esse processo, são usados alguns produtos químicos que conferem propriedades aos resíduos gerados. Além disso, no processo de produção de água potável nas ETA's, são gerados diversos tipos de resíduos, sendo que o mais predominante é a lama. A lama da Estação de Tratamento de Água (LETA) é concentrada em duas etapas: na sedimentação e, posteriormente, na filtração (Ramirez, 2015). A disposição inadequada da LETA, em solos e/ou corpos hídricos, pode causar a contaminação desses ambientes e, conseqüentemente, gerar impactos ambientais (Alexandre e Luz, 2020).

Por outro lado, a necessidade de produção de cimento tem aumentado consideravelmente, visto que ele é o material de construção mais utilizado há décadas. Para a sua produção, são necessários calcário, argila e gesso como matérias-primas essenciais. Durante o processo de fabrico, grandes quantidades de dióxido de carbono são emitidas para atmosfera, provenientes da calcinação do calcário (Sampaio, 2017). Diante desses dois cenários, observa-se que o descarte inadequado da LETA, assim como o processo de produção do cimento, contribuem consideravelmente para a poluição do meio ambiente. No entanto, estudos sobre o uso de materiais alternativos como substitutos parciais do cimento na produção do cimento composto continuam sendo desenvolvidos, tomando como proveito a propriedade pozolânica que alguns desses materiais podem conferir ao cimento composto. Observa-se que os estudos nesse campo têm apresentado resultados promissores.

O presente trabalho tem como objectivo principal avaliar a possibilidade da substituição parcial do cimento *portland* de Calcário (tipo II) por LETA para produção do cimento composto. Visto que este material pode promover actividades pozolânicas ao cimento.

1.2. Problematização

Apesar dos avanços no acesso à água e na expansão das Estações de Tratamento de Água (ETAs), a crescente geração de resíduos, em especial a lama de ETA (LETA), representa um desafio ambiental significativo devido ao seu descarte inadequado, por falta de melhores alternativas para o descarte deste resíduo. Simultaneamente, a indústria de cimento enfrenta críticas, pelo seu elevado impacto ambiental, sobretudo pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂) resultantes da produção do cimento *Portland*. Diante desta necessidade de soluções sustentáveis tanto para o tratamento adequado da lama quanto a redução da pegada ambiental da indústria de cimento, torna-se evidente a necessidade de investigar alternativas viáveis para o aproveitamento da lama proveniente das Estações de Tratamento de Água, visando sua valorização e a redução dos impactos associados à sua disposição inadequada. O presente trabalho visa avaliar a possibilidade de uso das cinzas da lama da ETA de Umbeluzi como substituinte parcial do cimento Portland.

1.3. Justificativa

Durante o processo de tratamento da água para consumo, diversos subprodutos são gerados, entre os quais se destaca a lama, um resíduo que pode causar sérios impactos ambientais e sociais. Esses impactos estão principalmente relacionados à presença significativa de metais, como alumínio e ferro, bem como à quantidade produzida. Em Moçambique, uma das práticas adotadas para a disposição desse resíduo consiste em seu depósito a céu aberto; em outros casos, a lama é devolvida diretamente aos corpos hídricos, como rios. Ambas as práticas representam riscos ambientais consideráveis e implicam em custos económicos significativos para as instituições gestoras. Perante este contexto, torna-se imperativo investigar alternativas viáveis para a reutilização benéfica da lama gerada pelas Estações de Tratamento de Água, com o duplo objetivo de valorizar este resíduo como recurso secundário e mitigar os impactos ambientais associados à sua disposição inadequada.

1.4. Objectivos do Trabalho

1.4.1. Objectivo Geral

Avaliar a possibilidade de uso das cinzas da lama de ETA's como substituinte parcial do cimento *Portland*.

1.4.2. Objectivos Específicos

- ❖ Realizar análise química da LETA, por meio dos parâmetros: teor de humidade, pH e de matéria orgânica
- ❖ Determinar as propriedades físicas e mecânicas da cinza da lama das ETA's, como: resistência à compressão, resistência à flexão e consistência normal;
- ❖ Determinar a percentagem ideal de substituição da lama das ETAs calcinadas no cimento, de forma a preservar as propriedades do material e a sua resistência.

1.5. Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho recorreu-se a pesquisas bibliográficas (livros, artigos, teses de licenciatura e mestrado) relacionadas com a temática. Estas pesquisas permitiram criar uma base sólida de sustentação conceitual sobre o assunto de forma a redigir a fundamentação teórica e servir de base para análise e discussão dos resultados.

Etapas para aplicação do estudo:

- Colecta de amostras de lama na ETAU;
- Realização de ensaios preliminares da amostra (lama) que constituiu na medição do pH, humidade e matéria orgânica;
- Tratamentos térmico da lama e moagem;
- Preparação dos provetes e a realização dos ensaios que incluiu a medição da resistência à flexão e à compressão
- Tratamento e discussão dos resultados

2. Revisão bibliográfica

A água é um recurso fundamental para o desenvolvimento sustentável, a procura por este precioso líquido para o consumo tem aumentado de forma acentuada a nível mundial, o que leva a necessidade de implementação de unidades de tratamento da água para o consumo humano suprimindo assim esta necessidade, estas unidades são denominadas por Estação de Tratamento de Água (ETA), com o objectivo principal a otimização do processo de remoção de componentes particulados, a alteração da cor aparente e garantir a produção de água segura sob o ponto de vista microbiológico e químico que deve atender os requisitos regulamentares de qualidade (Barreto, *et al.*, 1999).

De entre vários tipos de estações de tratamento de água existentes (o tratamento com simples desinfecção, tratamento simplificado, tratamento tradicional ou completo e o tratamento avançado), o sistema mais utilizado é o tradicional ou completo. Este consiste essencialmente na remoção de partículas finas em suspensão e em solução presentes no afluente a ser tratado, por meio dos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Durante o tratamento são adicionados produtos químicos específicos para promover a desestabilização das partículas a remover, permitindo que estas aglomerem formando partículas com tamanho relativamente maior (os flocos) e de fácil remoção (Barreto, *et al.*, 1999).

Evidentemente durante o processo de tratamento da água é inevitável a produção de subprodutos indesejados, e o resíduo com maior predominância nestas unidades é a lama, um subproduto com um nível de toxicidade considerável para o homem tanto para a biodiversidade uma vez que este é considerado não biodegradável, devido a presença de metais na sua composição. O que torna a necessidade de um tratamento prévio antes do seu descarte (Barreto, *et al.*, 1999; Alexandre e Luz, 2020).

Na maioria das vezes a água subterrânea é usada como recurso principal para o sistema de distribuição, o que faz desta a matéria-prima das ETA's. As águas superficiais comparadas com as águas subterrâneas requerem um tratamento um pouco mais exigente para adequar ao consumo, este facto é devido a exposição às fontes de poluição naturais e antropogénicas. Independentemente da origem natural da água para o tratamento, as principais operações unitárias aplicadas nas estações de tratamento de água são: a coagulação-floculação, sedimentação ou decantação, filtração e

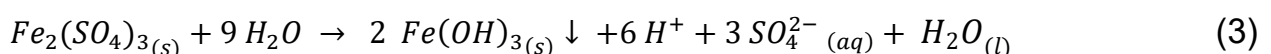
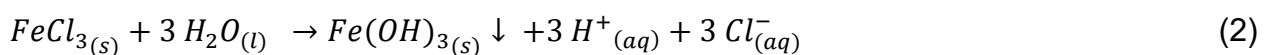
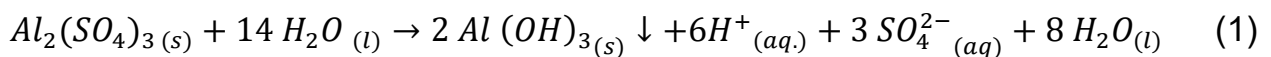
desinfecção. Como também considera-se ter o mesmo tratamento químico, com variedade nos reagentes usados para este fim (Sheng, 2023; Constantino, 2009).

2.1. Etapas do Processo de Tratamento de Água nas ETA's

2.1.1. Coagulação-floculação

A coagulação e a floculação são processos químico-físicos usados para agregarem coloides e partículas dissolvidas em flocos maiores, que podem ser facilmente sedimentados por gravidade e em seguida removidos. Portanto, enquanto a coagulação consiste na desestabilização de coloides ou partículas, a floculação consiste na agregação e neutralização. Portanto, após a captação da água, é misturada com alguns agentes químicos (coagulantes e floculantes) de entre eles os mais aplicados são os sais de alumínio, tais como: Sulfato de Alumínio, Policlorosulfato de Alumínio, entre outros. Formando assim os flocos, partículas com um tamanho relativamente maior e de fácil remoção (Ferreira, 2003; Licskó, 1997).

Uma vez que nesta etapa consiste na interação química entre o agente coagulantes adicionado e a matéria prima (água). As equações das reações químicas aproximadas e predominantes entre os agentes coagulantes mais aplicados e água são:



No entanto, dependendo do tipo de agente coagulante utilizado, teremos uma composição química específica do precipitado, para as equações acima levantadas, teremos a precipitação de hidróxido de alumínio se for utilizado o sal de alumínio, por outro lado, teremos precipitado de hidróxido de ferro se forem utilizados sais de ferro (Qrenawi e Raban, 2021).

2.1.2. Sedimentação ou decantação

Esta etapa permite a separação da fase sólida (lama) e a fase líquida (água), por meio da força de gravidade (Garcia, 2011). Após a formação de flocos, a mistura é introduzida nos decantadores, que representam grandes tanques projectados com o objectivo de acumular os flocos no fundo, permitindo assim baixa concentração de sólidos próximo a superfície do tanque. Este processo promove assim a clarificação da água sem adição de agentes químicos, o que torna comparativamente menos custoso, porém, é mais demorado (Sampaio, 2017).

2.1.3. Filtração

Esta é a etapa posterior à decantação, como é de se esperar que na etapa de decantação não serão removidos completamente os flocos, o que torna necessário filtrar o efluente, de modo a remover essas partículas remanescentes. A medida em que vai ocorrendo o a filtração, os filtros gradualmente vão perdendo sua eficiência devido o efeito de colmatação, que consiste no bloqueio dos interstícios dos filtros por onde a água pode passar, havendo por isso a necessidade de lavar os filtros. A água de lavagem dos filtros na maioria das vezes tem o mesmo destino da lama produzida na etapa de decantação, a água proveniente da lavagem dos tanques com reagentes químicos (Barreto, et al., 1999).

2.1.4. Desinfecção

Após a filtração, a etapa subsequente é a desinfecção, responsável pela eliminação de microrganismos indesejáveis para o Ser Humano contidos na água, esta etapa consiste na adição de agentes químicos (desinfetantes) na água, em condições e parâmetros favoráveis para que sejam destruídos os microrganismos patogênicos. Como parte dos parâmetros levados em conta para garantir uma boa eficiência na acção do desinfetante, estão: características químicas (especialmente o pH), características físicas e tempo de contacto. Os processos de desinfecção podem ser físicos, com aplicação de radiações (UV) sobre o efluente a ser tratado; processo químico, que usam agentes alcalinos, tensoativos ou oxidantes, com maior destaque nesta categoria o cloro na forma de solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) (Garcias, 2011).

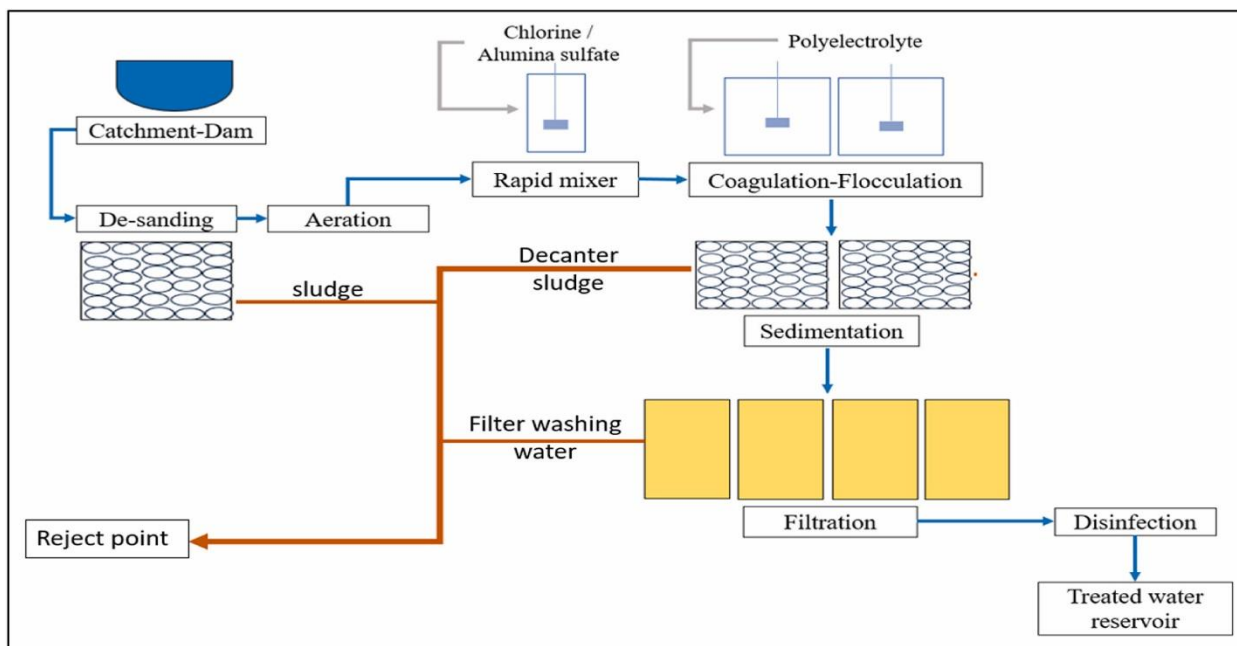


Figura 1: Representação esquemática das etapas de tratamento de água (Fonte: Bensitel, et al., 2023, p. 2)

2.2. Lamas Produzidas nas Estações de Tratamento de Água

2.2.1. Caracterização da Lama

Os sistemas de tratamento de água de abastecimento apresentam similaridade com qualquer unidade de processamento, onde a matéria-prima é submetida à várias etapas para se obter o produto desejado. Durante o tratamento da água bruta, em cada etapa são gerados resíduos (consideravelmente a lama), cujas características dependem de vários factores, como mudanças sazonais na qualidade da água a ser tratada, o processo de tratamento aplicado, os produtos químicos aplicados, a condição de operação, o *layout* da estação, entre outros. A lama gerada é caracterizada por possuir mais de 95% de umidade, o que demanda um tratamento adicional desta lama para sua desidratação, este processo é aplicado principalmente para reduzir o volume das lamas (Barreto, et al., 1999 e Ahmad e Alam, 2017).

A composição química da lama esta directamente associada com os reagentes usados durante o processo de tratamento. O SiO_2 , componente mais predominante da lama, proveniente principalmente da água bruta, seguidamente destacam-se os óxidos de alumínio e ferro (Al_2O_3 e Fe_2O_3), suas proporções estão relacionadas ao tipo de coagulante usado durante o tratamento (Ahmad, et al., 2016).

Geralmente a lama das ETA's é denominada "lama de álumen", quando estas são produzidas em ETA's que utilizam agentes coagulantes à base de alumínio durante o

processo de tratamento, o teor de alumínio varia entre as diferentes ETA's, porém, estima-se que em média 16% (em peso) da composição química deste material é do alumínio (Muisa, *et al.*, 2020).

Segundo Hackbart 2015, durante a análise da composição mineralógica da lama por Difração de Raio-X, detectou a presença de alguns minérios, predominantemente Quartzo (SiO_2), Caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] e Dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], e entre outros.

2.2.2. Tratamento da lama

Para uma disposição apropriada e reaproveitamento, afim de minimizar os impactos ambientais da lama proveniente das estações de tratamento de água, torna-se necessário um tratamento prévio desta. Esta etapa do processo de tratamento de água consiste essencialmente em concentrar o máximo que possível os sólidos, uma vez que a lama proveniente das diferentes etapas (coagulação/floculação, sedimentação e filtração) tem um índice de humidade muito elevado, e por outro lado esta etapa reduzira o custo de transporte da lama uma vez que reduzira o seu volume (Richter, 2021; Oliveira, 2016).

A etapa de tratamento da lama é desenvolvida em dois modos: (1) Por meio da filtração, que consiste na separação solido-líquido em que a suspensão submete-se a uma membrana porosa e a fase sólida é retida e a líquida passa através do meio ou membrana; por outro lado tem-se o (2) modo gravitacional, termo genérico para separação onde a suspensão é submetida a um campo de forças (gravitacional e centrífuga), esta separação é ocorre devido a diferença de densidade das duas fases, na separação por meio da força gravitacional os sólidos sedimentam na base do tanque quando deixado em repouso, por outro lado na centrifugação ocorre uma sedimentação acelerada decorrente de uma grande força centrífuga (Richter, 2021).

2.2.3. Estimativa da quantidade da lama produzida

Para estimar a quantidade de lama produzida em uma ETA, é uma tarefa complexa por esta não apresentar um método concreto para predizer com precisão alguns parâmetros como, o aumento do nível de turbidez da água a ser tratada e a dose do agente coagulante utilizado. Dos resíduos produzidos nas ETA's convencionais, podem corresponder a 3 a 5% do volume da água a ser tratada. Durante o tratamento da água, nota-se a relação existente entre a quantidade da lama produzida e o método de tratamento utilizado (Qrenawi e Raban, 2021; Ahmad, Ahmad e Alam, 2017).

Para uma estimativa precisa da LETA, empregam-se formulas empíricas, dentre elas destaca-se a fórmula abaixo (1). Esta fórmula considera as reacções químicas dos agentes coagulantes durante o processo de coagulação e a relação empírica da turbidez e a quantidade de sólidos suspensos. Esta fórmula é usada para estimar a quantidade da lama produzida anualmente nas ETAs nos quais os sólidos suspensos são removidos usando PACl (Poly-Aluminum chloride) como agentes coagulantes (Ahmad, Ahmad e Alam, 2017)

$$S = Q (0.8Al + TSS + A) \dots\dots\dots(4)$$

Onde:

S – Lama produzida (kg/dia)

Q – Caudal de entrada (MLD)

MLD – Milhoes de litros por dia

Al – Dose de PACl com 10.38% de Al_2O_3 (mg/L)

TSS – Total de Sólidos Suspensos presente na água (mg/L)

A – Produto químico adicional, como polímero, argila ou carbono activado (mg/L)

A variável TSS esta relacionada com a turbidez da água a ser tratada e uma constante b .

$$TSS \left(\frac{mg}{L} \right) = b * Turbidty (NTU) \dots\dots\dots(5)$$

Onde:

b – Constante que varia entre 0.7-2.2, este valor pode depender da fonte da matéria prima na mesma da mesma ETA.

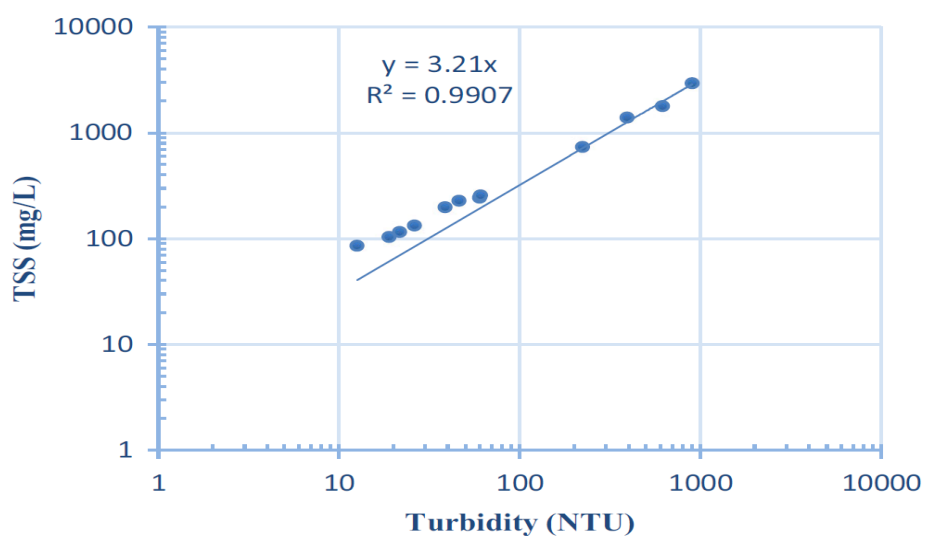


Figura 2: Correlação da turbidez vs. TSS (Fontes: Ahmad, et. al., 2017, p. 5; Metcalf & Eddy, et. al., 2014, p. 85)

2.2.4. Possíveis Aplicações da Lama das ETAs

Segundo Sampaio, 2017, o estudo sobre os possíveis meios de reaproveitamento da lama produzida nas ETAs, vem sendo de grande interesse no ramo acadêmico, empresarial e governamental, daí à necessidade de publicação de pesquisas com vista às potenciais aplicações deste resíduo. Resumidamente, na tabela 1 temos referenciados alguns exemplos de potenciais utilização da lama.

Tabela 1: Possíveis aplicações para as lamas das ETAs (Fonte: Silva, 2017; Viana, 2019)

Utilização	Descrição	Vantagem	Desvantagem	Casos reais
Agricultura	Aplicação em pastos, terrenos de cultivo, florestas, parques públicos, viveiros de plantas, estradas, circuito de golfe, relvados e jardins e jardins domésticos.	- Lamas de amaciamento têm boa capacidade de remediação de solos ácidos (80 – 103% ECC) - As LETAs podem, em alguns casos melhorar as características de agregação, estrutura, porosidade, condutividade hidráulica e capacidade de retenção de água.	- Lamas de coagulação ficam apenas pelos 10-20% ECC, não mostrando potencial de remediação de solos ácidos. - As bases presentes nas lamas favorecem a fixação do fósforo, tornando este nutriente menos disponível para as plantas, consequentemente limitando o seu desenvolvimento. - Riscos de acumulação de metais e consequente lixiviação para os meios receptores.	Países que aplicam: E.U.A., França, Holanda, as lamas produzidas

Indústria Cimenteira	Aplicação como matéria-prima na produção de cimento	• As LETAs possuem características muito idênticas à matéria-prima convencionalmente utilizada para produção de cimento (Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO e SiO_2) • Bom poder calorífico na sinterização • Para percentagens de mistura de lama entre 4 a 7% esta pode proporcionar melhorias na força compressiva do cimento • Não se verifica a lixiviação quando os metais pesados são incorporados no clínquer durante 28 dias de cura.	• Percentagem de substituição baixa para as lamas analisadas pelos autores • A presença de cloro nas LETAs pode promover a corrosão do aço das estruturas (apesar da presença de hidróxidos atenuar este processo) • Aumento de tempo de secagem.	-
Produtos de cerâmica	Fabrico de tijolos e telhas ou peças de arte como vasos, potes, porcelanas tendo como base a cozedura de argila	• Uma aplicação entre 5% e 20% de lamas, dependendo do caso, não mostram efeitos adversos e por vezes melhoram as características do produto	• Aplicação de percentagem superiores de lama requerem maior temperatura de cozedura em relação à matéria-prima original.	

		• Lamas férricas têm o potencial de reduzir os gastos energéticos (óxidos de ferro como condutores) e por darem uma coloração mais rica ao produto final (efeito de óxidos de ferro). • A presença de matéria orgânica na LETA pode promover a redução de consumo energético na cozedura.	• É necessário dar atenção à força compressiva e ao encolhimento do produto final. • Redução progressiva de força mecânica e de tração e resistência ao congelamento com o aumento da percentagem de lama.	Portugal, as lamas da ETA de Lever, desde Janeiro de 2006
--	--	--	---	---

Lagoas de macrófitas	Aplicação ao substrato de lagoas de macrófitas	• O tratamento de água residual através de lagoas de macrófitas ainda carece de boas capacidades de remoção de nutrientes. Com a aplicação de LETA, a remoção de CBO5, CQO e SST não é comprometida, observando-se a remoção de fosforo total e azoto total entre 75-99% e 11-80% respectivamente. • Capacidade para adsorver outros poluentes. • O tratamento de água por este meio é considerado em casos em que a remoção de nutrientes é fundamental.	• A remoção de azoto total com este substrato ainda é insatisfatória, devido a fraca capacidade de desnitrificação do meio. • Remoção mais significativas de azoto total requerem o arranjo da lagoa. • Ainda carece de investigação.	-
-----------------------------	--	---	---	---

Para o presente trabalho interessa o reaproveitamento da lama das ETA's como substituinte parcial de cimento na produção cimento composto (cimento e cinzas), a substituição terá que ser durante a produção do próprio cimento, no entanto, a lama será uma das matérias-primas.

Ramirez, *et al.*, 2017, concluíram que a substituição da lama *in natura* proveniente das ETA's tem um potencial aproveitamento na indústria de construção como material prima na produção de artigos de cimento, materiais cerâmicos e agregados leves, neste estudo, as quantidades recomendáveis para substituição por este material foram 4% e 7% (em peso), pois estes apresentaram resultados satisfatórios, de forma conclusiva, o estudo recomenda uma substituição máxima de 5% para produção de betão não aplicável para estruturas.

Punmatharith, *et al.*, 2010, concluíram que é viável e eficiente o uso da cinza da lama das ETAs como matéria-prima durante a produção de *clinker*, isso devido a composição, por outro a cinza reduz o teor de cal livre, que reduz a capacidade de agregação dos elementos no betão ou argamassa, no entanto o incremento desta lama, promove a combustibilidade do *clinker*, reduzindo assim o teor da cal livre.

De acordo com Sampaio, 2017, a substituição parcial da cinza da lama no cimento, mostra ter valor que não está de acordo com o tratamento que lhe é destinado actualmente, pois poderá ser uma alternativa das melhores alternativas de gestão deste resíduo e virá promover a sustentabilidade ambiental na indústria cimenteira.

2.3. Cimento e a sua Caracterização

O cimento é amplamente reconhecido como o material de maior relevância para o desenvolvimento de infraestruturas a nível mundial (Bhagath, Singh e Subramaniam, 2019). A sua produção, contudo, implica um elevado consumo de recursos naturais, como calcário, areia, argila e escória de ferro. Para a obtenção de 1 tonelada de clínquer, estima-se a necessidade de cerca de 1,7 toneladas de matérias-primas minerais (Yen, Tseng e Lin, 2011). No entanto, de acordo com Gao et al. (2015), a quantidade de insumos pode ser ainda superior, sendo requeridas aproximadamente 2,48 toneladas de calcário, 4,6 toneladas de argila e 3,41 toneladas de escória de ferro para produzir a mesma quantidade de clínquer. Além disso, durante a etapa de moagem, são consumidos 63,31%, 74,12% e 78,89%, respectivamente, destes materiais.

As principais matérias-primas para a produção do cimento são: calcário (75-80%), argila (20-25%) e conta com alguns aditivos necessários, como: gesso, minério de ferro e argila, e por vezes dependendo do tipo de cimento que se pretende produzir. O fabrico do cimento compreende as seguintes etapas: Pré-homogeneização, produção de farinha, Pré-calцинаção/Pré-aquecimento, Produção de clínquer e moagem do cimento. A pré-homogeneização, é utilizada para minimizar as variações das propriedades da matéria-prima após ter sido extraída das minas, etapa consiste na redução do tamanho das partículas da matéria-prima para 50 µm. Seguidamente o material é submetido ao pré-aquecimento em torres de ciclone, por onde ocorre a pré-calцинаção que promove a remoção do CO₂, e para tornar as reações químicas no forno mais rápidas e eficientes, este processo ocorre no intervalo de temperatura entre 400 a 900 °C. De seguida, o material é submetido à calcinação, para redução de vários óxidos e grandes quantidades de CO₂ são libertos, este processo ocorre em um forno rotativo (0.5 a 4 rpm) e temperatura entre 1400-1500 °C para produção do *clinker*. Posteriormente o *clinker* é submetido ao arrefecimento e misturado com alguns aditivos, dependendo da qualidade de cimento que se pretende produzir (Lima, 2011; Cochez, Nijs, Simbolotti, Tosato, 2010).

A produção de cimento é indispensável para o desenvolvimento da sociedade; contudo, as actividades associadas à sua fabricação geram impactos negativos significativos no ambiente, no clima e na saúde dos seres vivos (Mohamad, et al, 2022).

A indústria de produção de cimento contribui fundamentalmente no desenvolvimento económico mundial, porém, o seu processo produtivo consome grandes quantidades de combustíveis e eletricidade. O sector de indústria cimenteira é responsável por contribuir em cerca de 5-7% de todas emissões de CO₂ (Arujo, 2020). Aproximadamente 50% de todo dióxido de carbono produzido durante a fabricação de cimento provem do processo de calcinação do calcário, a outra parte tem origem da queima do combustível necessário para o processo de pré-aquecimento antes da calcinação da matéria-prima (≈ 40%) (Atsonios, et al., 2015; Benhelal e Rafiei, 2012; Mikulcic, et al., 2016; Uson, 2013).

2.4. Material pozolânico

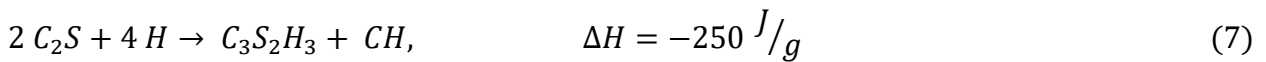
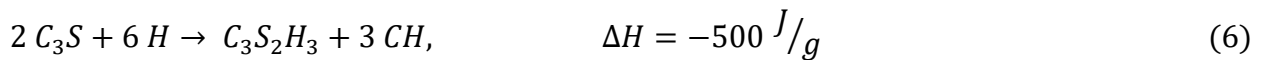
Nos últimos anos estudos relacionados a meios alternativos para redução dos custos de fabrico do cimento *Portland* veem sendo desenvolvidos, como luz verde neste campo, é a descoberta dos materiais pozolânicos e escória granulada de alto forno, que são usados como aditivos do cimento devido as suas características favoráveis, estes materiais contribuem consideravelmente na alteração da qualidade do cimento quando parcialmente substituídos.

Segundo Massazza 1998, citado por Santos, 2023, os materiais pozolânicos são um tipo de material inorgânico, que pode ser sintético ou natural e é essencialmente constituído por estruturas silicosas ou silico-aluminosas, quando finamente moído e submetido em contacto com água e hidróxido de cálcio apresenta propriedades aglomerantes.

Para a obtenção do material pozolânico, o material a ser activado é submetido ao tratamento térmico/calcinação. A temperatura através da qual o material é activado varia entre 500° C a 1300° C. Durante este processo, devido as altas temperaturas ocorre a roptura da cadeia polimérica, promovendo a transformação da estrutura do material, a formação de óxidos dos metais em na forma de iões e a eliminação de toda matéria orgânica. Como consequência da elevação da temperatura ocorre um rearranjo na matriz cristalina do material no aumento do tamanho dos cristais, influenciado pelo mecanismo de coalescimento dos cristais menores (Costa, *et al.*, 2014; Schulze e Rickert, 2019)

A composição química da lama após submetida ao tratamento térmico quando comparada com a do cimento é semelhante, nota-se que alguns dos principais componentes químicos do cimento *Portland* também são encontrados na lama das ETA's activadas. O teor de SiO₂ é semelhante em ambos os materiais, porém, o Al₂O₃ e o Fe₂O₃ o seu teor é mais acentuado na cinza da LETA (Alexandre e Luiz, 2020).

A principal composição química do cimento é: Silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O C_3S , é o componente responsável pela resistência inicial e pelo aumento da resistência final da pasta, apresenta uma rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor. O C_2S , é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas da pasta, caracterizado por contribuir na liberação de energia relativamente menor e que a sua hidratação é lenta. A hidratação dos dois (C_3A C_2S) produz o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH) (Barroso, 2011; Silva, 2024). Abaixo estão representadas as reacções de hidratação dos dois componentes e os valores de entalpia:



Se o material pozolânico for adicionado no cimento, durante a etapa de hidratação a sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3), presentes neste material, reagem com o hidróxido de cálcio (CH) liberto na hidratação do cimento, formando: C-S-H e C-A-H, de acordo com a equação da reacção abaixo:



Os factores que influenciam as reacções entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio pode ser: o conteúdo da pozolana, teor de SiO_2 activa, natureza das fases activas da pozolana, taxa de reacção, área superficial da pozolana, temperatura da mistura e a relação de sólidos por água (Barroso, 2011; Silva, 2024)

3. Caso de Estudo: Estação de Tratamento de Umbeluzi (Boane – Maputo)

3.1. Distrito de Boane

O distrito de Boane localiza-se na província de Maputo, no extremo sul de Moçambique, entre as coordenadas 26°02'39" S e 32°19'42" L, ocupando uma área de aproximadamente 815 km². Situa-se a sudeste da cidade de Maputo, fazendo fronteira a norte com o distrito de Moamba e a nordeste com a cidade da Matola. É limitado a Sul e a Este pelo distrito de Namaacha, e a Oeste pela cidade da Matola e distrito de Matutuine (Mauaie, 2015).

3.2. Estação de Tratamento de Água de Umbeluzi

A Estação de Tratamento de Água de Umbeluzi existe desde 1989, cujo objectivo é abastecer água para o consumo as cidades municipais de Maputo, Matola e município do distrito de Boane. Esta infraestrutura está localizada a 35 km da cidade de Maputo. O sistema de Umbeluzi, a água é captada a jusante da barragem dos Pequenos Libombos e cuja a capacidade diária produzida é de 240 000 m³./dia. É uma estação do tipo convencional composta por três unidades de tratamento (ETA1, ETA2, ETA3), dentro de um perímetro de vedação, ocupando uma área de 196.204,2 m², construídas em épocas diferentes, estes apresentam o mesmo sistema operacional: Pré-cloração, decantação e filtração, neutralização e desinfecção. Após a água ser tratada, posteriormente elevada através de um sistema elevatório situado imediatamente a jusante da ETA e transportada ao longo de um sistema adutor com mais de 80 Km (República Moçambique, 2005; AdRM, 2024; Mauaie, 2015).

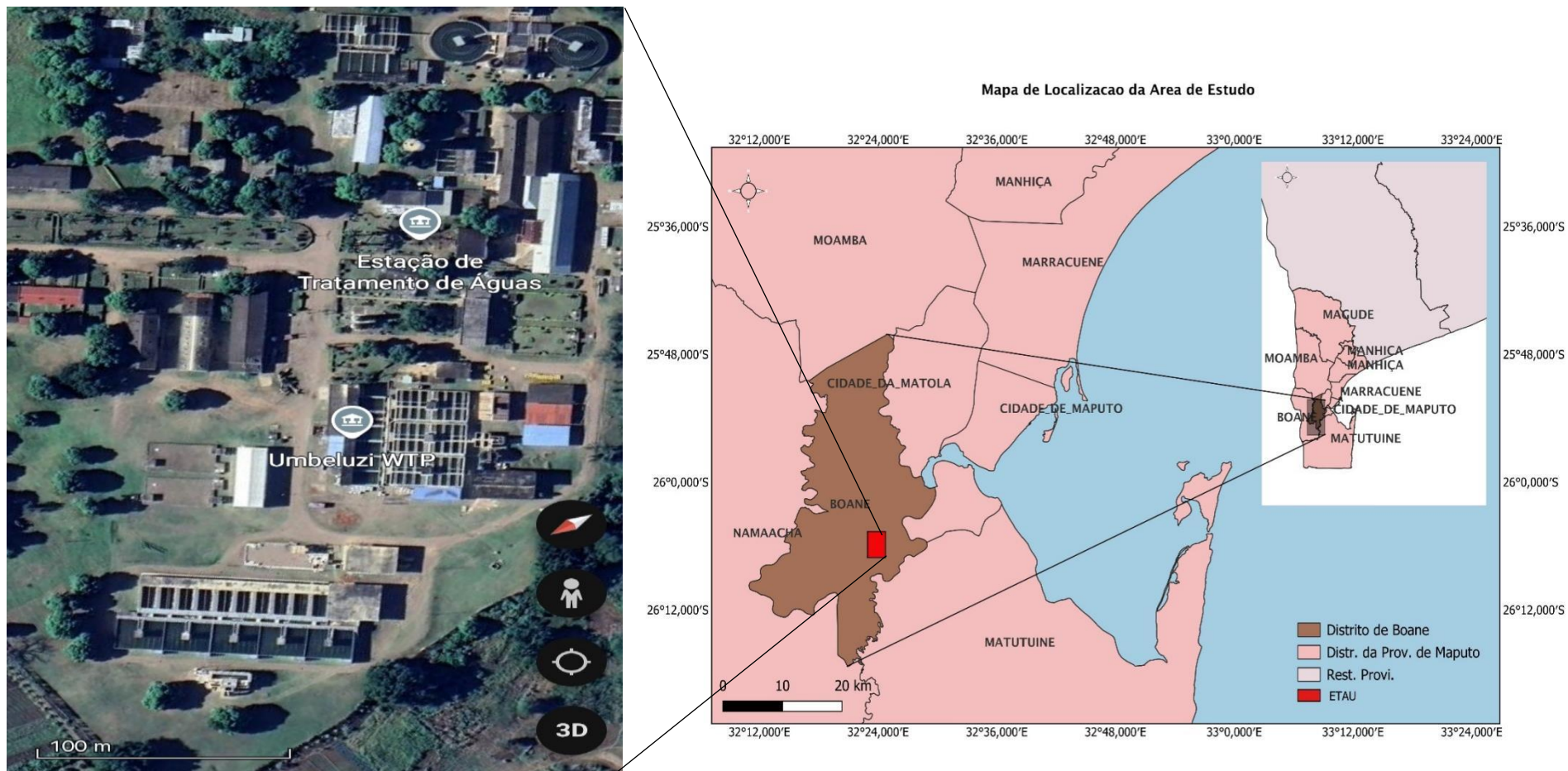


Figura 3: Localização geográfica da área de estudo (auxílio da ferramenta QGIS 3.32.3 e Google Earth 10.66.0.2)

3.3. Processo de tratamento de Água na ETAU

A estação de Umbeluzi é composta por três unidades de tratamento associadas, a ETA1, ETA2 e a ETA3. Estas unidades têm como capacidade diária de 72 M m³, 72 M m³ e 96 M m³, respectivamente e todas elas apresentam o mesmo método operacional.

Captação e Pré-cloração

A água para o tratamento é captada do rio Umbeluzi através de bombas submersíveis, antes a água é submetida à um processo que consiste na remoção de sólidos de maior dimensão e este processo chama-se gradagem (Figura 5: a). De seguida a água é misturada com uma solução saturada de cloro (Figura 5: b), para o tratamento microbiológico da água, esta etapa conhecida por pré-cloração.



Figura 4: (a) Grades de retenção e (b) Pré-cloração

Coagulação e floculação

Esta etapa ocorre em uma câmara de mistura, na qual primeiramente são preparadas soluções de sais na proporção correspondente, e de seguida a solução é misturada com a água a ser tratada, antes da adição é verificado o pH da água à tratar e ajustado se necessário para o pH ótimo de floculação. A ETAU usa predominantemente dois tipos de agentes coagulantes, o Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) e Sulfato de Ferro ($Fe_2(SO_4)_3$). Em função das propriedades da água a ser tratada, e usado um polímero (*Neoflocon*) para reforçar o processo de coagulação e floculação ou ate mesmo como agente principal de coagulação.

Sedimentação

A sedimentação é a etapa em que as partículas sólidas formados durante o processo de floculação depositam-se no fundo do sedimentador, enquanto na parte da superfície a água é continuamente direcionada para os filtros.



Figura 5: Etapa de Sedimentação

Filtração e Pós-cloração

Após a etapa de sedimentação, a água é direcionada para os filtros, onde as partículas remanescentes na água que não sedimentaram são retidas. Estes filtros são constituídos por um leito filtrante feito de areia, a acopladas a um sistema de lavagem independente. De seguida a água é submetida a etapa de pós -cloração, para compensar as possíveis perdas na etapa de pré-cloração.



Figura 6: Etapa de filtração

4. Parte Experimental

4.1. Fluxograma geral do processo experimental

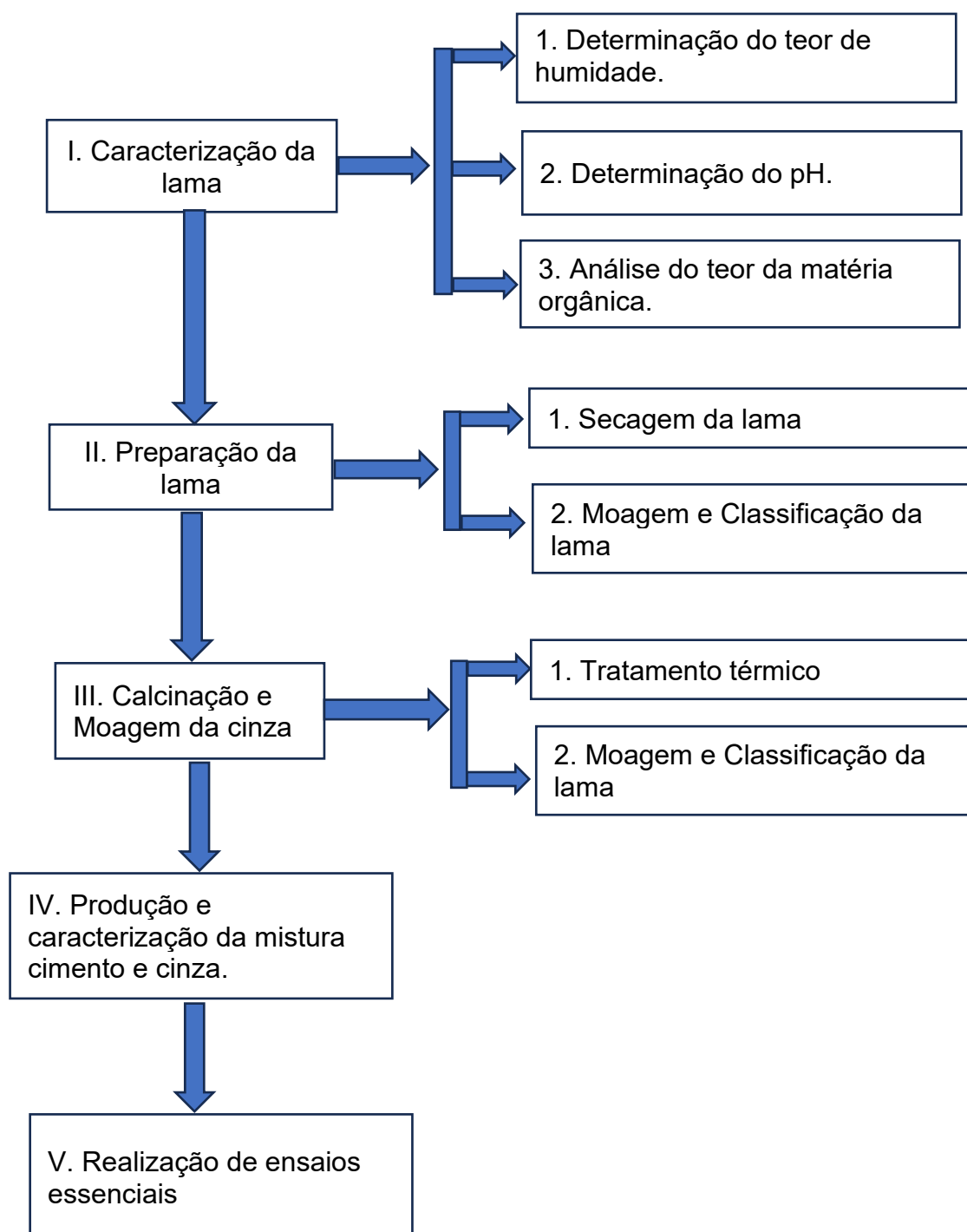


Figura 7: Fluxograma de actividades experimentais

4.2. Materiais e Métodos

4.2.1. Caracterização da lama

4.2.1.1. Análise do teor de humidade

Equipamentos e materiais:

Analizador de humidade

5 laminas de alumínio

Espátulas

Balança analítica

Procedimento

1. Ligar o analisador de humidade
2. Limpar os recipientes de pesagem, para evitar qual quer contaminação.
3. Pesar uma amostra de 1 g da lama e introduzir no analisador de humidade
4. Fazer a leitura da percentagem da humidade removida no painel do equipamento.
5. Repetir o experimento em 5 amostras.



Figura 8: Determinação de humidade

4.2.1.2. Análise do pH das lamas

Material e Equipamentos

pHmetro

10 tubos plásticos de 50 mL;

Balança analítica;

Procedimento

1. Pesar 4 g da amostra a analisar e introduzir no copo plástico;
2. Adicionar 20 mL de água destilada;
3. Agitar a mistura com o bastão, para garantir a homogeneização durante 2 min e deixar repousar a mistura por 60 min no mínimo.
6. Após verificar a sedimentação dos sólidos, medir o pH do líquido sobrenadante próximo à superfície, sem tocar na superfície.

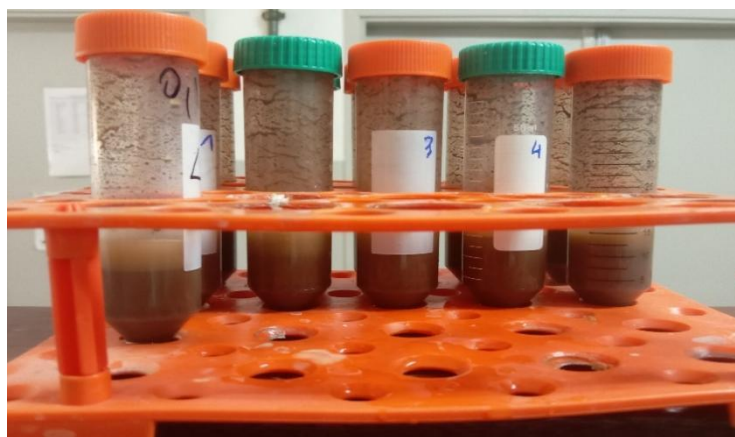


Figura 9: Determinação de pH

4.2.1.3. Determinação do teor da matéria orgânica

Vários métodos para determinação da matéria orgânico de uma amostra de solo são aplicados, neste trabalho usaremos o método explicado por Brower, Z., e Von, E., 1998.

Material e Equipamentos

Mufla

Estufa

6 Cadinhos de porcelana, com capacidade de 100 mL

Balança analítica

Pinça metálica

Espátula

Papel de alumínio

Dessecador contendo sílica-gel

Luvas

Procedimento

1. Fazer cortes em formato retangulares do papel de alumínio para cada cadinho;
2. Pesar os cadinhos juntamente com o papel de alumínio;
3. Pesar 4 g da lama para cada cadinho e colocar na estufa à 105 °C e manter por 24 horas;
5. Introduzir os cadinhos na mufla;
6. Aumentar a temperatura da mufla até 550 °C, como é ilustrado na figura 10, a amostra deve ser mantida a esta temperatura por 4 horas;
7. Após o arrefecimento até a temperatura manuseável retirar os cadinhos da mufla, e introduzir no dessecador;
8. Manter os cadinhos no dessecador até a temperatura ambiente, e de seguida fazer as pesagens.
9. Finalmente, determinar a massa perdida em cada cadinho através da fórmula:

$$\% M.O = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100$$

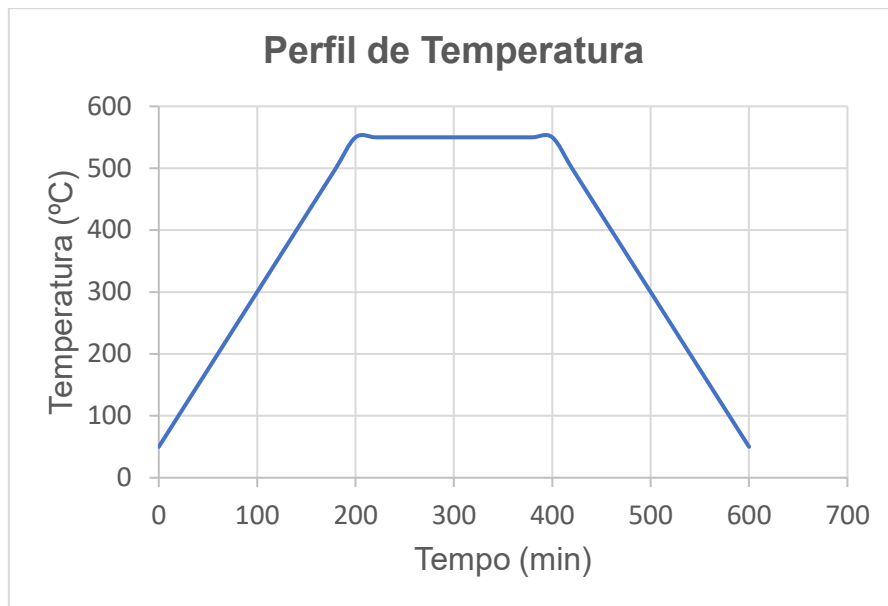


Figura 10: Perfil de temperatura para análise de matéria orgânica



Figura 11: Amostras de lama na mufla para determinação da matéria orgânica

4.2.2. Tratamento Térmico

4.2.2.1. Secagem da lama

Material e Equipamentos

Estufa

Bandejas de alumínio

Procedimentos

1. Ligar a estufa para atingir a temperatura de 105 - 110 °C;
2. Colocar uma camada de lama nas bandejas, destorroar a lama com ajuda uma espátula e colocar as bandejas na estufa, por 24 horas no mínimo, garantido que toda água evapore;
3. Deixar esfriar os recipientes até a temperatura ambiente;
4. Armazenar as amostras secas em sacos plásticos, evitando que a amostra de solo absorva humidade;

4.2.2.2. Moagem das lamas secas

Material e Equipamentos

Moinho de martelo

Saco de coleta do material moído

Moinho de discos

Saco plástico

Procedimentos

1. Após ter sido seca a amostra, introduzir o material a moer no moinho de martelo;
2. A amostra moída deve posteriormente ser moída no moinho de disco, para transformar o material em pó;
3. Armazenar o material moído, de modo a minimizar o contacto com a humidade do ar.

4.2.2.3. Calcinação do material moído

Após realização de vários experimentos e pesquisas na literatura, Sampaio, 2017, concluiu que o perfil de temperatura que melhor define as etapas para a calcinação da lama deve ser de acordo com os dados na tabela abaixo:

Tabela 2: Condições para o tratamento térmico da lama (Fonte: Silva, 2017):

Massa inicial (g)	Primeira Etapa		Segunda Etapa	
	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
50	800	1	1000	4

Material e Equipamento

Cadinhos de porcelana ou metálicos

Balança analítica

Mufla

Procedimento

1. Pesar os cadinhos vazios;
2. Pesar 50g de lama moída em cada cadinho e de seguida, tirar uma foto dos cadinhos com a lama, para fácil identificação das correspondentes massas registradas;
4. Retirar e pesar os cadinhos contendo a cinza e pesá-las, e por subtração da massa dos cadinhos obtemos a massa da cinza.

4.2.3. Procedimento para preparação da argamassa e fabricação dos provetes

Materiais e Equipamentos

Água destilada ou desionizada

Areia mista (fina, media e grossa)

Cimento de Calcário do tipo II (Dugongo)

Espátula de borracha ou plástico

Balança

Misturador

Compactador

Moldes de provetes prismáticos (40 mm x 40 mm e 160 mm)

Cronómetro

Câmara de humidade

Peneiros (2, 1.7, 1.8, 0.6 & 0.3 mm)

Procedimentos

Preparação da argamassa

Após ter sido reunido todos insumos necessários para a realização do ensaio, procedeu-se com a preparação da argamassa: De acordo com a NP EN 196-1 2017, a composição recomendada dos constituintes da argamassa é: 1:3 (Cimento, areia, em massa) e a razão Água / Cimento (A/C) igual a 0.5. Este último factor pode ser ilustrada a sua influência à resistência na figura 12 (Scheifer & Callejas, 2021).

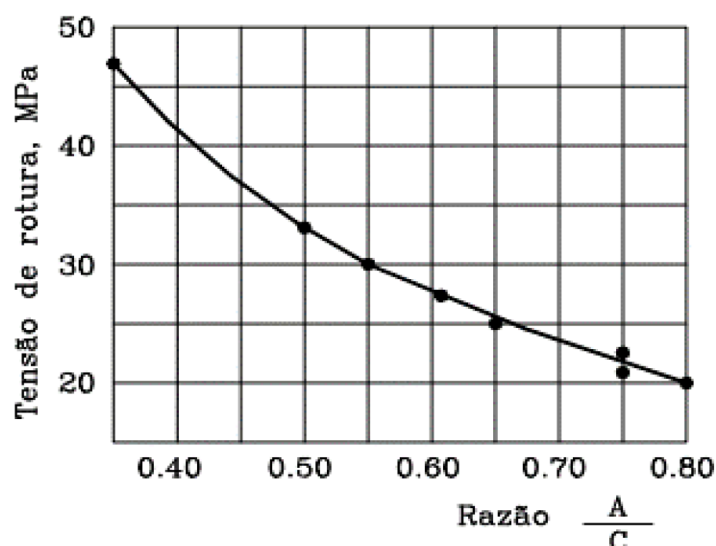


Figura 12: Relação entre tensão de ruptura e a razão Água e Cimento (A/C) (Fonte: citado por Popatlal, 2023)

1. A primeira etapa consiste na produção do cimento composto onde misturou-se o cimento *Portland* com a cinza às percentagens correspondentes definidas para o estudo (7, 10 e 20%, em massa).
2. De seguida determinou-se a distribuição do tamanho de partículas da areia utilizada para os ensaios. Onde foi pesou-se uma quantidade específica de areia e por vibração as partículas foram retidas no peneiro específico dependendo do tamanho da partícula, os resultados estão indicados na tabela 3, nos anexos.
3. De seguida foi preparada a argamassa com a composição estimada na tabela abaixo.

Tabela 3: Distribuição da quantidade do material para produção de argamassa nas fracção consideradas

Misturas	Cimento (g)	Cinza (%)	Cinza (g)	Areia (g)	Água (g)
Mref.	450	0	0,000	1350	225
M1	418,500	7	31,500	1350	225
M2	405,000	10	45,000	1350	225
M3	360,000	20	90,000	1350	225
Total	1633,500	-	166,500	5400	900

4. De seguida, pesou-se as quantidades de cada material com o auxílio da balança;
5. Deitou-se o cimento e a água no recipiente de mistura e imediatamente o misturador foi acionado à velocidade lenta (140 rpm) por 30 s, de seguida a areia foi adicionada regularmente em menos de 30 s, de seguida o misturador foi acionado na velocidade

rápida (285 rpm) por 30 s. Deve-se garantir sempre, que a mistura esteja no centro do recipiente, caso contrário terá que se parar por no máximo 90 s para o recolocar a massa aderente.

Preparação dos provetes

1. Os provetes foram moldados imediatamente após a preparação da argamassa. Com o molde firmemente afixado na mesa do compactador e devidamente lubrificados com óleo lubrificante.
2. Durante o enchimento do molde, a argamassa foi uniformemente distribuída na primeira e segunda camada.
3. Retirar com precaução o molde da mesa do compactador, e a prolonga. Com o auxílio da régua metálica plana retirar o excesso de argamassa. De seguida foram colocados na câmara de humidade.
4. A desmoldagem dos provetes foi feita com o auxílio de martelo de borracha, 24 h depois do fabrico, isto porque a idade para o ensaio é superior que 24 h.
5. Após a desmoldagem os provetes foram referenciados consoante a idade para o ensaio e conservados na água (à 20 °C) na horizontal sobre as grelhas em um recipiente apropriados, até o dia do ensaio.

4.2.4. Ensaio com provetes

4.2.4.1. Resistência à flexão

Para a determinação da resistência a flexão, de acordo com a NP EN 196-1 2017, recomenda o uso do método de carga, em três pontos com o auxílio da máquina de ensaio de resistência a flexão

O método consiste em colocar o provete no equipamento de flexão, com face lateral de moldagem sobre o cilindro de apoio e o eixo longitudinal deve estar perpendicularmente aos apoios. Aplicar a carga verticalmente por meio do cilindro de carga sobre a face lateral oposta e aumenta uniformemente à velocidade de (50 ± 10) N/s, até à roptura.

Calcular a resistência à flexão R_f , em MPa pela fórmula:

$$R_f = \frac{1.5 * F_f * l}{b^3}$$

Onde:

R_f é a resistência a flexão em MPa;

b é o lado da secção quadrada do prisma, em mm

F_f é a carga aplicada ao centro do prisma na roptura, kN

l é a distância entre os apoios, mm

4.2.4.2. Resistência à compressão

A realização do ensaio de resistência à compressão, seguiu a instrução descrita pela NP EN 196-1 2017, onde:

Após a obtenção do prisma rompido, durante o ensaio de resistência à flexão, usam-se as duas metades para o ensaio de compressão.

O ensaio fora realizado sobre as faces laterais de moldagem dos semi-prismas com a ajuda de um equipamento específico. Durante todo ensaio, a aplicação da carga sobre o provete deve obedecer um aumento uniforme de $(2\,400 \pm 200)$ N/s até a roptura.

A resistência a compressão é dada por:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, em MPa

F_c é a carga máxima na roptura, em N

1600 representa o valor da área dos pratos ou das placas auxiliares 1600 mm²

4.2.4.3. Ensaio de consistência normal

Para proceder este ensaio foi utilizado o aparelho de Vicat manual, um molde de Vicat feito de material de borracha é destinado para conter a pasta durante o ensaio, este molde deve ser adequadamente lubrificado e estar munido de uma placa de vidro na base maior que o molde.

Fez-se a pesagem de 500 g da amostra de cimento, com as composições substituinte e uma quantidade de água de 120 g. Preparou-se a panela de mistura para proceder a amassadura.

Com todos materiais prontos, colocou-se a água na panela e de seguida a amostra de cimento, esta operação não deve ultrapassar 10 s. De seguida pôs-se o misturador a funcionar com a velocidade lenta, ao fim de 90 s parou-se o misturador por 30 s, durante os quais foi necessário repor no centro a pasta aderente nas paredes do recipiente de mistura. Voltou-se a colocar o misturador em funcionamento, e depois de 90 s, o recipiente foi retirado e a amostra foi colocada no molde com o auxílio de uma colher de borracha e uma régua metálica para nivelar a camada da pasta no molde para o ensaio. Para terminar ajustou-se a sonda do aparelho de Vicat manua, fazendo descer esta até a placa de base de base que vai ser utilizada e ajustando a marca ao zero da escala. Levantou a sonda até a posição de espera. Colocou-se o molde e a placa de base, logo

após o alisamento da pasta. De seguida soltou-se as partes moveis da sonda rapidamente, permitindo que a sonda penetre verticalmente na pasta.

5. Resultados e Discussões

5.1. Determinação da humidade da lama

Os resultados aferidos do teor de humidade da lama estão representados no gráfico da figura 13.

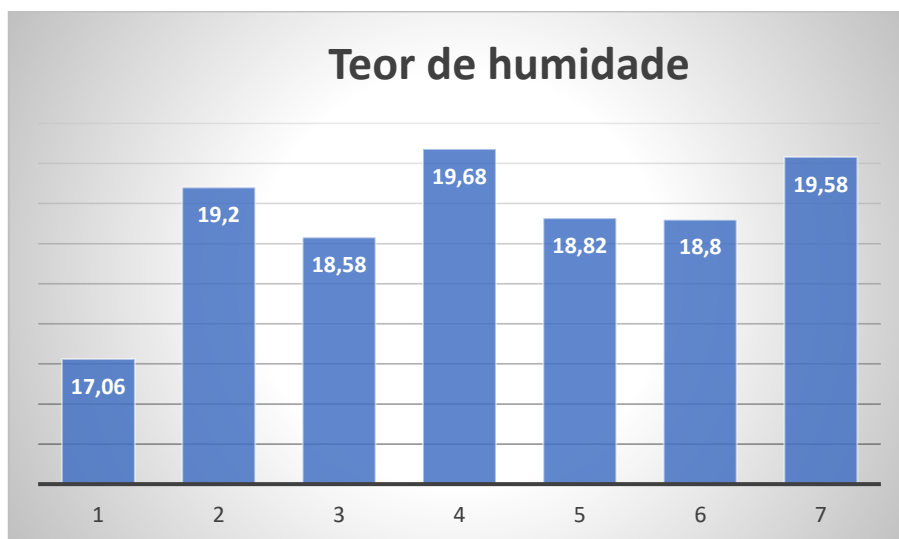


Figura 13: Valores médios relativos a humidade da lama

De acordo com os resultados descritos no gráfico da figura 13, o valor médio da humidade obtido foi de 18,817 %, um resultado provável, considerando o tempo em que a lama ficou depositada na vala de decantação, aproximadamente 14 dias.

Este resultado é um indicativo satisfatório pois minimiza a energia necessária para remover a humidade contida na lama em comparação com os resultados obtidos por outras referências. Por outro lado, com este valor pode estimar-se a energia necessária para a remoção da humidade para o tempo de deposição da lama específico.

5.2. Determinação do pH

A tabela 4 transcreve os valores obtidos na análise de pH da amostra de lama, o valor médio de pH foi de 5,41, este resultado deve-se ao facto de usar-se o cloro como desinfecção da água durante o tratamento, uma vez que o cloro em contacto com a água gera uma solução acida, ácido hipocloroso (HClO). Segundo Sampaio, 2017, no seu estudo sobre estudo de viabilidade técnica da lama das ETAs obteve um valor medio de pH 5,16. Os resultados são aproximados, o que possivelmente indica que as ETAs onde foram extraídas as amostras usam produtos químicos semelhantes.

Tabela 4: Valores relativos ao pH da lama em estudo.

	Ensaio										Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
pH	5,46	5,44	5,43	5,37	5,47	5,46	5,41	5,35	5,4	5,32	5,411
Amostra de lama (g)	4,9987	5,0002	5,0001	4,9997	5,0004	5,002	4,9996	4,9998	5,0001	5,0002	5,0001

5.3. Determinação de matéria orgânica

A análise da matéria orgânica da lama em estudo forneceu os resultados conforme ilustrados na figura 14, a baixo indicada. De acordo com os resultados obtidos, nota-se uma boa aproximação, o que indica boa precisão dos resultados obtidos com um desvio padrão de 0.0004 g para a massa inicial. O valor médio obtido em percentagem da matéria orgânica da lama foi de 26.6428%, um resultado consideravelmente menor comparado com o de Sampaio, 2017 (48,8%). Este diferencial pode estar associado às condições das fontes da água para o tratamento e as etapas de tratamento.

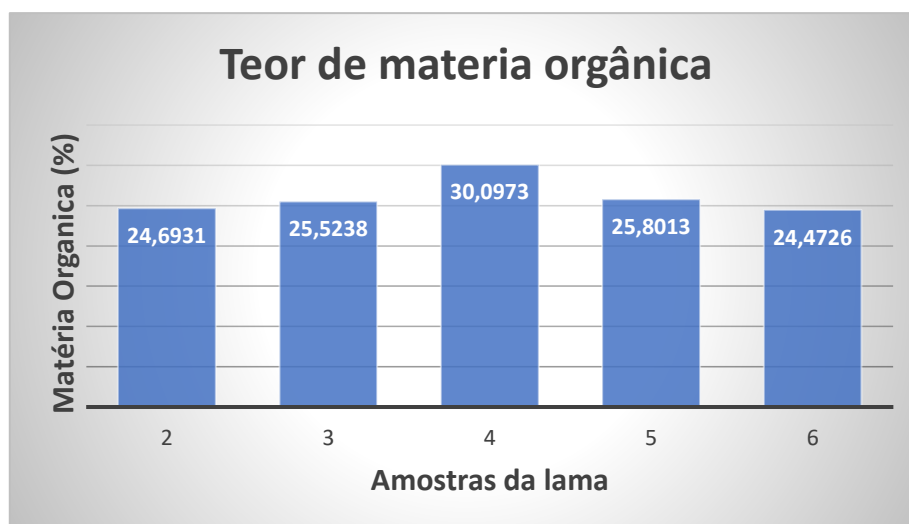


Figura 14: Teor de matéria orgânica da lama em estudo

5.4. Determinação do tamanho de partículas

Após a realização dos ensaios para determinação do tamanho de partícula, a distribuição do tamanho de partículas da areia utilizada para o estudo foi obtida segundo a descrição gráfica abaixo indicado:

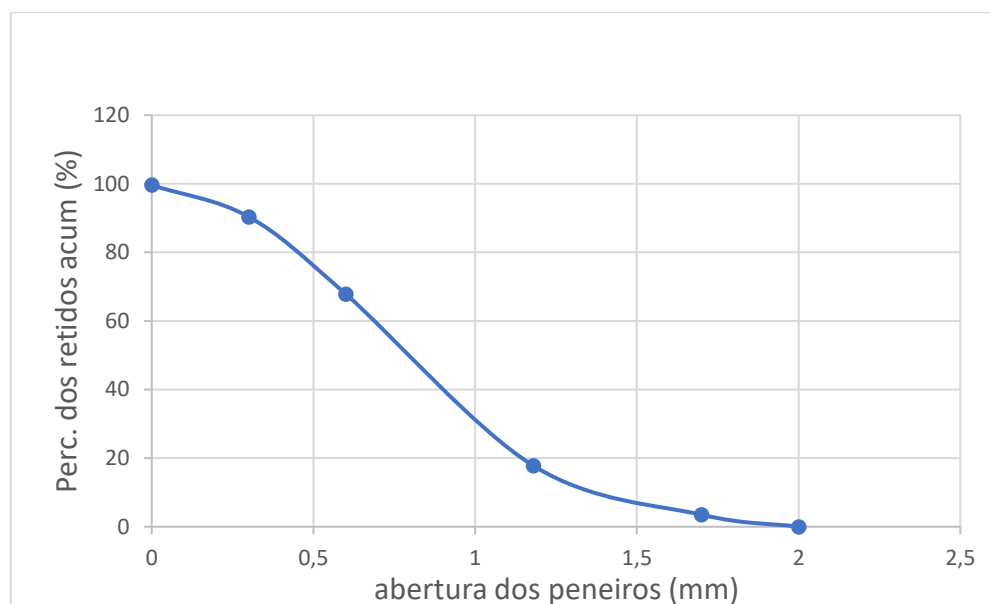


Figura 15: Curva de distribuição de tamanho das partículas da areia para os ensaios

5.5. Caracterização da mistura do cimento e a cinza

A adição de cinzas de lama ao cimento provocou uma alteração na coloração do material resultante (provetes) comparada com os de referência, sendo essa mudança mais perceptível quanto maior a percentagem de cinza substituída. No entanto, observou-se que o aspecto visual do cimento permanece praticamente inalterado quando a substituição varia entre 7% e 10%. Ramirez et al. (2017) observaram a mesma alteração na coloração durante a confecção dos provetes, este facto pode estar intrinsecamente associado com a composição química das cinzas da lama o que confere os provetes uma coloração castanha, sendo que a amostra de referência toma uma cor cinzenta (vide na figura 20 nos anexos).

Quanto à absorção de água dos provetes, os dados apresentados nas figura 16 indicam que a incorporação da lama ao cimento contribui para a redução da absorção hídrica no cimento composto. Especialmente, a média de absorção na substituição de 7% foi de 1,267 g de água, comparada a 1,500 g da amostra de referência com 2 dias de idade.

Já, aos 28 dias, a amostra com substituição de 7% apresentou absorção média de 5,833 g, inferior aos 6,567 g da amostra de referência.

Estes resultados sugerem que o cimento mantém as suas propriedades sem favorecer a proliferação de microrganismos na argamassa, com a substituição parcial com a lama.

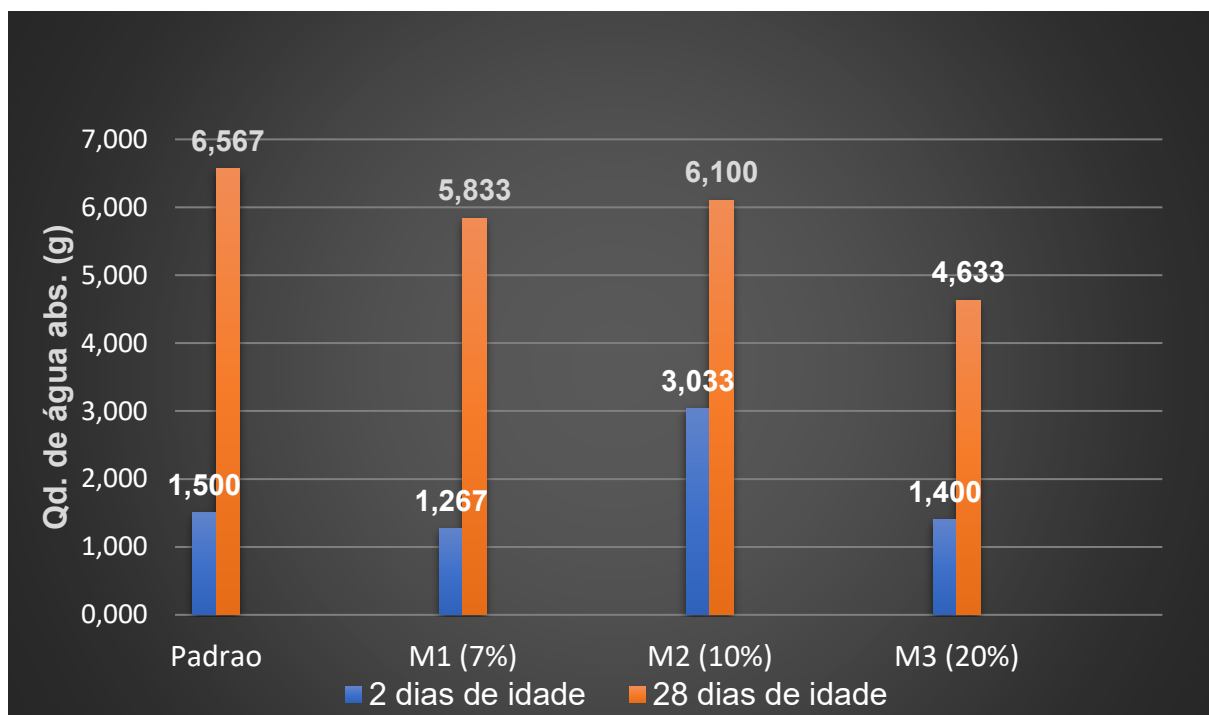


Figura 16: Absorção de água em provetes com 2 e 28 dias de idade

4.6. Determinação da Consistência da Lama

O ensaio da consistência normal tem como objectivo determinar a quantidade de água necessária para que uma pasta de cimento atinja uma consistência padrão, conforme a norma define (EN 196-3). Esse parâmetro é fundamental para o controle de qualidade do cimento, pois influencia directamente ao tempo de pega, a resistência mecânica e a durabilidade do cimento.

A tabela 5, mostra os resultados do ensaio de consistência normal obtidos em amostras de com substituinte e a amostra de referência. Fazendo a análise dos resultados obtidos, verifica-se um aumento da água necessária para alcançar a consistência estabelecida por norma (4 mm), este facto pode ser influenciado devido a influencia das misturas na

matriz do cimento permitindo maior absorção de água para alcançar a consistência desejada.

Importa referir que este ensaio é essencial para a realização dos ensaios subsequentes, como resistência mecânica, sejam realizados em condições comparáveis e confiáveis. Além disso, este parâmetro fornece uma base importante para a formulação de argamassas.

Tabela 5: Resultados de ensaios de consistência normal

Amostras	Quant. de água (g)	Consistência (mm)
Ref.	142,200	7
7%	153,800	6
10%	158,600	6
20%	160,000	5

4.7. Propriedades físicas

4.7.1. Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados com objectivo de avaliar ao comportamento mecânico da argamassada em diferentes idades (2 e 28).

A tabela 6 apresenta os valores médios obtidos da resistência à flexão da argamassa aos 2 e 28 dias de idade. Os resultados indicam que a argamassa da amostra de 10% apresentou uma resistência à flexão ligeiramente superior aos 2 dias de idade (1,400 MPa) em comparação com a amostra de referência (1,3380 MPa). Este resultado pode estar relacionado com a granulometria do material substituinte que pode ter contribuído para um melhor empacotamento das partículas, promovendo maior coesão na matriz da argamassa mesmo no início do estágio de hidratação. Por outro lado, estes resultados podem indicar uma activação precoce de reações pozolânicas ou a presença de partículas finas com o efeito de preenchimento.

Já, aos 28 dias de idade, observa-se uma diferença pouco significativa entre a resistência da amostra de referência e a de 10% de substituição (vede na figura 17). Este resultado sugere que adição em 10% do material substituinte não compromete o desempenho da argamassa ao longo do tempo. Porém, demonstra um desempenho que

mantem a estabilidade mecânica do cimento, reforçando a viabilidade técnica do uso da LETA como substituinte parcial do cimento).

Importa salientar que a resistência à flexão está fortemente associada à integridade estrutural da matriz do cimento e à qualidade da ligação entre os constituintes da argamassa. Assim, o ligeiro aumento observado em algumas idades pode indicar uma microestrutura bem desenvolvida, favorecida pela interação entre o cimento e o material substituinte.

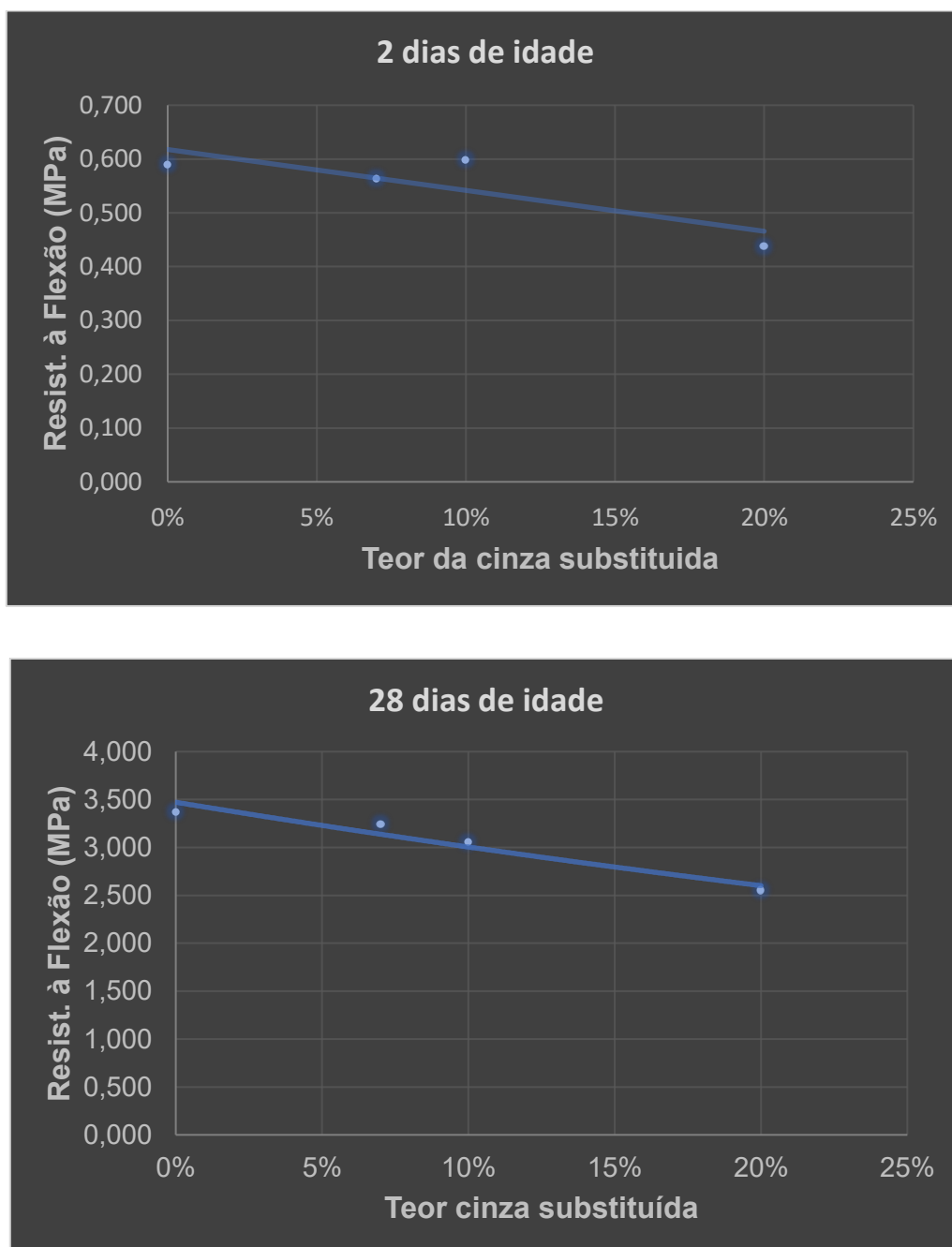


Figura 17: Tendência da resistência à flexão dos provetes em função da percentagem do substituinte (2 e 28 dias de idade)

Tabela 6: Valor médio da resistência à flexão

Amostras	Valor médio (MPa)	
	Idade 2 dias	Idade 28 dias
Ref.	1,380	7,900
7%	1,320	7,605
10%	1,400	7,157
20%	1,207	5,977

5.7.2. Resistência à Compressão

Os resultados do ensaio a resistência à compressão da argamassa foram analisados com base nos parâmetros normativos e comparados com aos estabelecidos por norma e entre as diferentes composições testadas. Estes ensaios foram realizados aos 2 e 28 dias de idade dos provetes, permitindo a observação do ganho evolutivo da resistência ao longo do tempo.

Com base nos resultados apresentados na tabela 7 e nos resultados ilustrados na figura 18, observa-se que, aos 2 dias de idade, a amostra com até 20% do substituinte do cimento apresentou desempenho de resistência à compressão de 11,605 MPa, o valor superior ao exigido por norma 10 MPa, embora ainda inferior ao da amostra de referência, que atingiu 17,405 MPa. Este comportamento indica que, mesmo em estágio iniciais da argamassa, a substituição parcial do cimento por lamas não compromete de forma significativa o desenvolvimento da resistência da argamassa.

Aos 28 dias, a amostra com 10% de substituinte atingiu uma resistência à compressão superior do valor mínimo estabelecido pela norma (42 MPa), embora ainda inferior à resistência da amostra de referência, que foi de 46,742 MPa. Este resultado sugere que o material substituinte contribui positivamente para o desempenho ou da acção como material de preenchimento, o que favoreceu uma matriz mais densa e coesa.

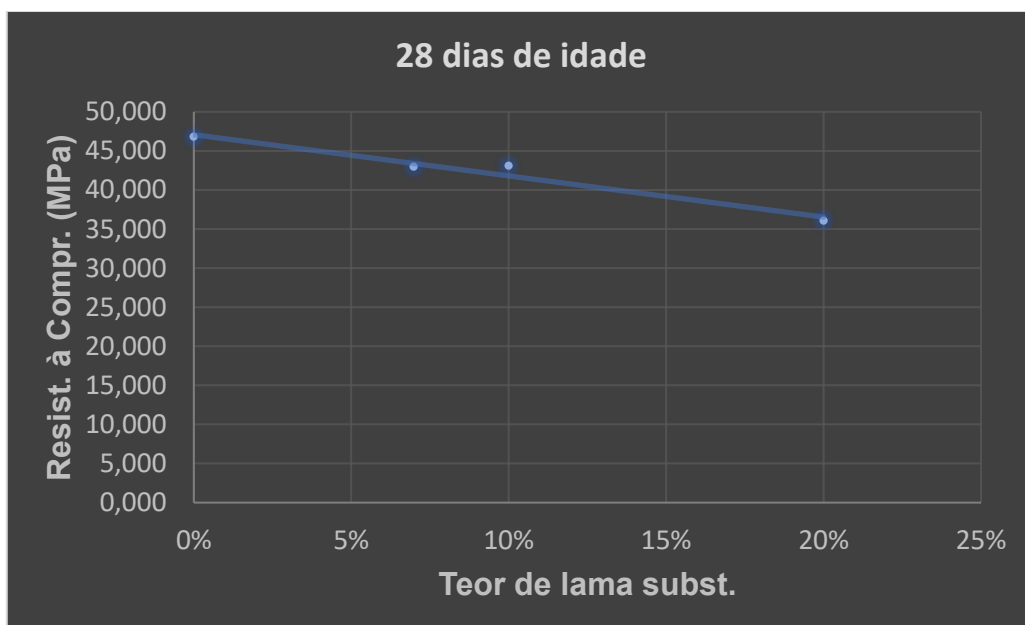
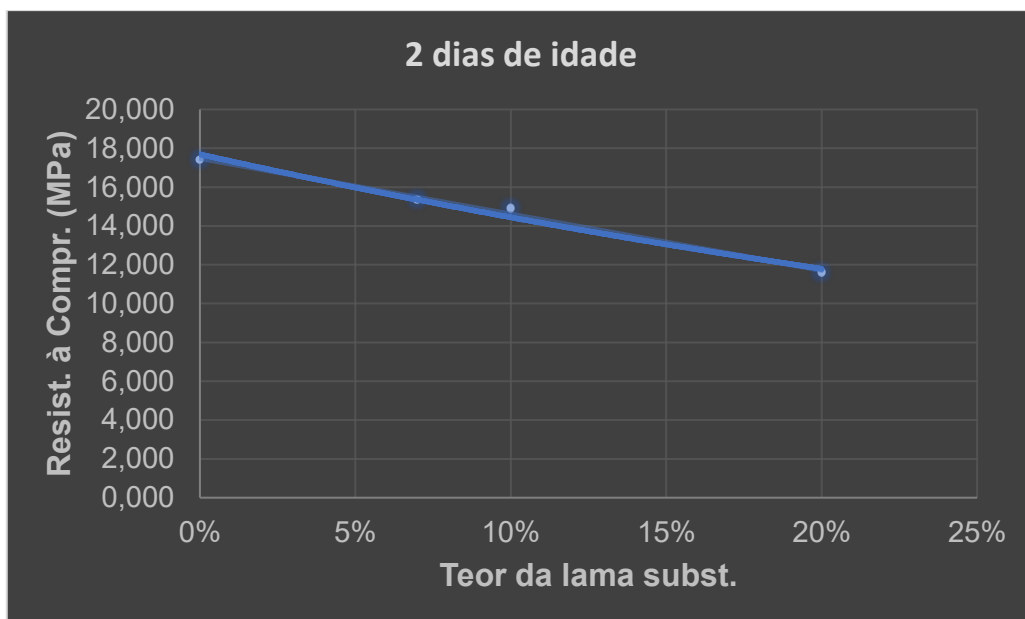


Figura 18: Tendência da resistência à compressão dos provetes em função da percentagem do substituinte (2 e 28 dias de idade)

Tabela 7: Valor médio da resistência à compressão.

Amostras	Valor medio (MPa)	
	Idade:2 dias	Idade 28 dias
Ref.	17,405	46,742
7%	15,352	42,930
10%	14,908	43,062
20%	11,605	36,067

5.8. Determinação da percentagem ideal de substituição da lama

Com os resultados obtidos da resistência a compressão (vide a figura 18: 28 dias de idade), verificou-se que a medida que o substituinte é adicionado, nas percentagens estabelecidas por sua vez diminui gradualmente a sua resistência à flexão e a compressão, este resultado deve-se ao facto de se ter uma redução dos elementos contidos no cimento que proporcionam a resistência mecânica, uma vez que a matriz da mistura toma uma nova composição, mantendo a resistência da argamassa ao longo do tempo. Este facto pode estar relacionado a influencia que este material tem sobre o a matriz do cimento.

Neste estudo, a percentagem considerada ideal para a substituição parcial do cimento por cinzas da lama de Estações de Tratamento de Água foi de 10%. Este resultado difere das conclusões de Alexandre e Luz (2020), que identificaram a fração de 20% como a mais adequada nos seus ensaios. Por outro lado, os estudos desenvolvidos por Sampaio (2017) e por Ramirez et al. (2017), que abordaram a mesma temática, apontaram para uma percentagem ideal de substituição significativamente inferior, fixando-se nos 5%. As discrepâncias entre os valores encontrados podem estar associadas a diversos fatores experimentais, nomeadamente: o tipo de cimento utilizado, a granulometria da areia, bem como as características físico-químicas específicas da lama empregue em cada investigação. Estes elementos influenciam diretamente o desempenho mecânico das misturas e, consequentemente, a eficácia da substituição proposta.

6. Conclusões

A caracterização da lama da Estação de Tratamento de Água (ETA) possibilitou a identificação de parâmetros relevantes para avaliar o seu potencial como material substituinte do cimento. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a lama analisada apresenta um teor de humidade adequado, 18,18%, o que favorece a realização dos ensaios posteriores. Este índice de humidade é um factor importante pois influencia directamente na quantidade energética necessária para o processo de secagem da amostra de lama. Ressalta-se, ainda, que a coleta da amostra deve idealmente ser 14 dias após a sua geração, período no qual a lama atingiu a sua condição mais estável e representativa para fins de caracterização e uso.

A determinação do pH da LETA revelou uma caracterização essencial para a avaliação de seu comportamento químico e sua viabilidade de reaproveitamento. O valor de pH obtido neste estudo foi de 5,4, um resultado que indica uma amostra acida de lama devido ao baixas quantidades de compostos alcalinos com vista a neutralizar a água. Este resultado por sua vez indica que após a substituição da lama não permitirá a proliferação de microrganismos ao longo do tempo na argamassa produzida.

A determinação da matéria orgânica contida na lama em estudo apresenta um moderado teor de matéria orgânica (26,64%). Este teor indica processamento favorável da lama, sendo necessário temperaturas relativamente menores para o seu tratamento térmico, e favorece a aplicação directa após a secagem e moagem, reduzindo os custos energéticos e impactos ambientais. Em teores elevados de matéria orgânica podem exigir etapas adicionais de tratamento da lama afim de reduzir a emissão de compostos voláteis e garantir a compatibilidade com o material cimentício. Portanto, conclui-se que este resíduo apresenta uma viabilidade técnica no uso deste como material substituinte do cimento.

O resultado obtido da absorção de água dos provetes foi satisfatório indicando uma estabilidade boa estabilidade em manter a integridade do material, reduz a possibilidade de saturação dos provetes com idades mais avançadas.

De acordo do ensaio a resistência à flexão indicam que a substituição parcial do cimento por 10% da LETA é tecnicamente viável, não prejudicando a resistência à flexão da argamassa e podendo, inclusive, contribuir positivamente para o seu desempenho mecânico inicial. Portanto, estes dados são relevantes para o desenvolvimento de

argamassas mais sustentáveis, com menor impacto ambiental, sem comprometer as propriedades estruturais.

O ensaio de resistência à compressão permitiu avaliar o desempenho mecânico da argamassa ao longo do tempo, fornecendo dados essenciais para avaliar a viabilidade técnica de uso da lama como material substituto do cimento. Com base nos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão da argamassa, conclui-se que os resultados são satisfatórios o que considera a possibilidade de usar-se a lama de estação de tratamento de água como substituinte parcial do cimento.

Os resultados obtidos da resistência à compressão indicam que a quantidade ideal do material substituinte (a lama) pode estar entre 10% a 13%, pois neste intervalo fornece resultados satisfatórios para a resistência a compressão dentro do estabelecido por norma.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a adição das cinzas da lama no cimento *Portland* 42.5 N contribui para o aumento do volume do cimento composto produzido. No entanto, tende a reduzir a sua resistência mecânica. Ainda assim, essa alteração reclassifica o cimento do tipo 42.5 N para 32.5 N, mantendo-se dentro dos limites normativos e sendo, portanto, tecnicamente aplicável para determinadas finalidades na construção civil.

7. Recomendações

1. Avaliar a possibilidade de uso da lama sem o tratamento prévio da amostra de lama (*in natura*);
2. Estudar a viabilidade da produção do cimento com a adição da lama seca e moída com o *clínquer*;
3. Determinar os a composição mineralógica da cinza utilizada;
4. Fazer um estudo comparativo com as lamas provenientes de outras ETAs de Moçambique;
5. Determinar o índice de pozolanicidade e a pozolanicidade da lama utilizada;
6. Analisar os impactos ambientais do uso da cinza da lama das ETA's como substituto parcial do cimento, comparando a produção do cimento convencional com a utilização de materiais alternativos.
7. Avaliar a viabilidade de aplicação prática do cimento composto por pozolana (cinza da lama das ETA's) em diferentes obras de construção, considerando a performance do material em condições reais de uso.

8. Referências Bibliografia

1. AdRM. (2024). *AdRM*. Obtido em 25 de Outubro de 2024, de <https://www.adrmm.co.mz/infraestruturas/>
2. Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. &. (2016). Characterization of water treatment plant"s sludge and its disposal options. pp. 950-955.
3. Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2017). Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. *Environ Monit Assess*, vol. 189(453), 1-10. doi:10.1007/s10661-017-6166-1
4. Alexandre, E., & Luiz, C. A. (2020). Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA). *Revista Materia*, vol. 25(n. 01), 1-9. doi:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0912>
5. Arujo, G. J. (2020). O Co-processamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagens competitiva. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v.08(n.57), 51-61.
6. Atsonios, K., Grammelis, P., Antiohos, S. K., Nikolopoulos, N., & Kakaras, E. (2015). Integration of calcium looping technology in existing cement plant for CO₂ capture: Process modeling and technical considerations. *Fuel*, v. 153, p. 210-223.
7. Barreto, E., Sousa, A. G., Carvalho, E. H., Cordiro, J. S., Patrizzi, L. J., Bernardo, L. D., . . . Reali, M. A. (1999). *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de lodos de Estações de Tratamento De Água*. Rio de Janeiro: PROSAB-Rede Corporativa de Pesquisas.
8. Barros, T. R. (2011). *Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas*. Projecto de Dissertação para o título de Mestre, RJ. Obtido de <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/Tha%C3%ADs-Ribeiro-Barroso.pdf>
9. Benhelal, E., & Rafiei, A. (2012). Overview Process Modeling Software: Utilizing alternative Fuels in Cement Plant for Air pollution Reduction. *Energy Science and Technology*, v. 4(n. 1), p. 10-18.

10. Bensitel, N., Haboubi, K., & al., e. (2023). Potential reuse of sludge from a potable water treatment plant in Al Hoceima city in northem Marocco. *Water Cycle*, v. 4, p. 154-162. Obtido de <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.07.002>
11. Bexell, K. J. (March de 2021). Localizing the Sustainable Development Goals: The case of Tanzania. *Development Policy Review*, vol. 39, 181+196. doi:<https://doi.org/10.1111/dpr.12497>
12. Bhagath Singh, G. P., & Subramaniam, K. V. (1 de December de 2019). Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. *Journal of Cleaner Production*, v.239(n. 118024). Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261932894X>
13. Cetesb. (1977). Técnicas de Abastecimento e Tratamnto de Água. 2v. il, 2^a ed. rev. São Paulo, Brasil.
14. CHAO, I. R. (Novembro de 2006). *Remoção de Fosforo de Efluente de Estações de Tratamento Biologico de esgotos utilizando lodo de Estação de Tratamento de Água*. Dissertação (Mestrado), Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, Depart. de Engenharia Hidráulica e Sanitária.
15. Cochez, E., Nijs, W., Tosato, G., & Simbolotti, G. (June de 2010). Cement Production. *IEA ETSAP-Tecnology Brief*.
16. Constantino, A. F. (2009). Redução do Gasto Operacional em Estação de Tratamento de Água Utilizando o PAC. *Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Maringá*.
17. Cornwell, D. A. (1987). Water treatment plant waste management. *Denver Enviromental Engineering & Technology, Inc., AWWA Resarch Foundation*.
18. Costa, M., Lira, H., Ribeiro, P., & Freitas, N. (2014). Avaliação do efeito da temperatura de calcinação nas características estruturais e morfológicas de aluminas sintetizadas pelo metodo Pechini. *Revista Matéria*, v. 19(n.º 2), p. 171-182.
19. Direcção Provincial das Obras Públicas, H. e. (30 de Novembro de 2019). *Governo da Provincia de Maputo*. Obtido em 05 de Maio de 2024, de <https://www.pmaputo.gov.mz/por/Informacao/Noticias-da-Provincia/Inaugurada-Estacao-de-Tratamento-de-Agua-Compacta-de-Corrumana>

20. Fontana, A. O. (2004). *Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador como Solução para a Redução de Volume de lodo de Decantadores e Reuso de Água de Lavagem de Filtro-Estudo de caso ETA Cardoso*. São Carlos, São Paulo: UNSCar.
21. Gao, T., & al., e. (2015). Analysis of Material Flow and Consumption in Cement Production Process. *Journal of Cleaner Production*, p. 1-28. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.054
22. Garcias, S. S. (2011). *Caracterização de argamassa auto-compactáveis com adição de provenientes de uma ETA*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior.
23. Hackbart, F. M. (2015). *Material Para Construção Civil a Partir de Lodo de Estação de Tratamento de Água, Lama de Polimento de Mármore e Resíduo de Produção de Cal*. Dissertação de mestrado., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Engenharia Civil, Curitiba.
24. He, Z. h., Wang, B., Shic, J. Y., Rong, H., Tao, H. Y., & Han, A. S. (20 de May de 2024). Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials. *Science of The Total Environment*, vol. 926. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171513
25. Licskó, I. (1997). Realistic coagulation mechanisms in the use of aluminium and iron (III) salts. *Water Science Technology*, v. 40(n. 4/5), p. 103-111.
26. Lima, A. B. (2011). *O Processo Produtivo do Cimento Portland*. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Dep. Engenharia de Recursos Minerais, Belo Horizonte.
27. Mauaie, R. F. (2015). *Estudo da possibilidade da reutilização da água de lavagem de filtros da estação de tratamento de água do Umbeluzi com uso de coagulantes (Moringa e Quiabo)*. Relatório de Estágio para Licenciatura, Maputo.
28. Metcalf, L., Eddy, H. P., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

29. Mikulcic, H., Klemes, J. J., Vujanovic, M., Urbantec, K., & Duic, N. (2016). Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, v. 136, 119-132.
30. Moçambique, República. (2005). *Perfil Do Distrito de Boane (Provincia de Maputo)*. Ministerio da Administracao Estatal. Obtido de <http://www.govnet.gov.mz/>
31. Mohamad, N., Muthusamy, K., Embong, R., Kusbianoro, A., & Hashim, M. H. (2022). Enviromental Impact of cement Production and Solutions: A review. *materials today: proceeding*, v. 48, 741-746. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
32. N. Muisa, I. N. (2020). Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater. *Jornal of Water Process Engineering*, vol. 35(101187). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187>
33. Oliveira, I. Y. (2016). *Gerenciamento do lodo de Estação de Tratamnto de água em Mato Grosso Do Sul: Uma Análise Crítica*. Dissertação de mestrado em Eficiencia Energética e Sustentabilidade, Fundação Universidade Federal de Mato Grosso Do Sul, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Brasil.
34. ONU. (2019). *Centro Regional de Informação para Europa Ocidental*. Obtido de Web site da ONU: <https://unric.org/pt/objetivo-6-agua-potavel-e-saneamento-2/>
35. Popatlal, R. M. (2023). *Controlo de Qualidade do Betão e Blocos*. Relatório de Estágio Profissional, Maputo.
36. Punmatharith, T., Rachakornkij, M., Imyim, A., & Wecharatana, M. (2010). Co-processing of Grinding Sludge as Alternative Raw Material in Portland Cement Clinker Production. *Journal of Applied Sciences*, vol. 10(n. 15), 1525-1535.
37. Qrenawi, L. I., & Raban, F. K. (Janeiro de 2021). Sluge management in water treatment plants: literature review. *International Journal of Environment and Wate Management*, Vol. 27(No. 1), pp. 93-125. doi:10.1504/IJEWM.2021.11190
38. Ramirez, K. G. (2015). *“Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concreto*. UTFPR. Brasil: PPGTAMB.

39. Ramirez, K. G., Possan, E., Dezen, B. G., & Colombo, M. (2017). Potential uses of waste sludge in concrete production. *Management of Environment Quality: An International Journal*, Vol. 28, pp. 821-838. doi:<https://doi/10.1108/MEQ-09-2015-0178>
40. Richter, C. A. (2021). *Tratamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água*. Brasil: Editora Blucher, 2021.
41. Sampaio, D. J. (2017). *Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Lama de ETA para Substituição parcial de Cimento na Produção de Betão*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
42. Santos, C. D. (2023). *Avaliação de resíduo da indústria de cerâmica vermelha no vale do Açu/RN como material pozolânico em pastas de cimento para poços petrolíferos*. Dissertação de licenciatura, Mossoró.
43. Saron, A., & al, e. (2001). Quantificação de Lodos de Estações de Tratamento de Água. 21.º Congresso da Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental- Anais-Rio de Janeiro. RJ.
44. Scheifer, D. M., & Callejas, I. J. (2021). Caracterização física e mecânica de blocos de concreto com a incorporação de areia de resíduo de construção civil. *Revista toda materia*, v. 26(n. 04), 1-15. doi:10.1590/S1517-707620210004.1387
45. Schulze, M. S., & Rickert, J. (2019). Suitability of Natural Calcined Clays as Supplementary Cementitious Material. *Cement and Concrete Composites*, v. 95, p. 92-97.
46. Sheng, D. P. (2023). Assessment and Optimization of Coagulation Process in Water Treatment Plant: A Review. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 79-100.
47. Silva, D. C. (2017). *Valorização de Lama de ETA na operação de decantação primária assistida em ETAR*. Dissertação, Universidade Nova de Lisboa-Faculdade de Ciência e Tecnologia. Obtido de https://run.unl.pt/bitstream/10362/30786/1/Silva_2017.pdf
48. Silva, R. G. (2024). *Análise do potencial da sílica ativa como adição para concretos de alto desempenho submetidos a meios agressivos*, [Universidade Federal de

Minas Gerais]. <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/6d0d529d-fdbb-402b-a1a6-fa459500f7cf/content>

49. Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Texeira, W. G. (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo* (3.ed ed., Vol. II). Brasil: Editores Tecnicos.
50. Uson, A. A., Lopez-Sabiron, A. M., Ferreira, G., & Sastresa, E. L. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 242-260.
51. Viana, R. R. (2019). Valorização de lamas de ETA com carvão ativado na operação de decantação primária assistida em ETAR [Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa]. https://run.unl.pt/bitstream/10362/76563/1/Viana_2019.pdf
52. Yen, C. L., Tseng, D. H., & Lin, T. T. (2011). Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. v. 84, pp. 220-226. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653511004553?via%3Dihub>

9. Anexos

Tabela 8: Distribuição de temperatura para determinação do perfil de temperaturas na determinação da matéria orgânica

Tempo (min)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
Temperatura (°C)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550

400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
550	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50

Tabela 9: Tabela distribuição de temperatura para calcinação da lama

tempo (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
Temperatura (c)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	800	800	800	800	800	800	800	860	920	980

230	250	300	350	400	450	470	500	505	510	515	520	525	530	535	540	545	550	555	560	565	570	575	580	585	590
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	550	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50

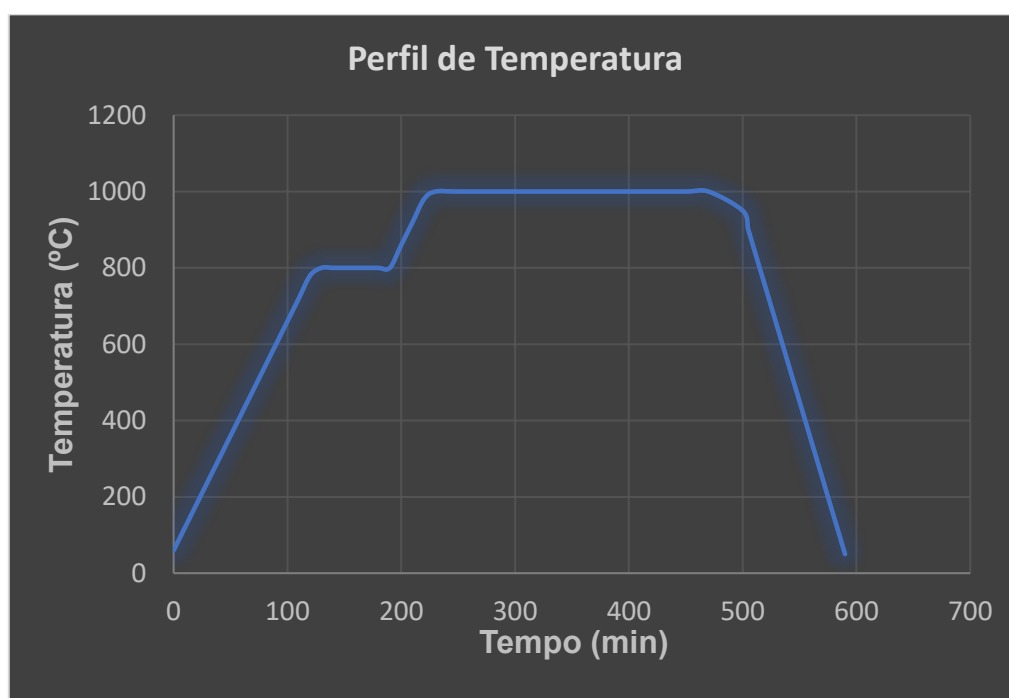


Figura 19: Perfil de temperatura para a calcinação da lama

Anexo 10: Distribuição granulométrica por peneiro (massa total 600 g)

Peneiros (mm)	Massa Media retida (g)	Porcentagem (%)	Perc. Acum (%)
2	0,000	0,000	0,000
1,7	21,000	3,50	3,500
1,18	85,750	14,291	17,791
0,6	300,375	50,062	67,853
0,3	135,000	22,502	90,353
0	55,625	9,275	99,625

Tabela 11: Determinação da matéria orgânica.

Ensaio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Teor da matéria orgânica (%)
2	4,0003	3,0125	24,6931
3	3,9994	2,9786	25,5238
4	3,9997	2,7959	30,0973
5	3,9998	2,9678	25,8013
6	4,0004	3,0214	24,4726
Média	4,0000	2,9343	26,6428
Desv. Padrão	0,0004	0,0885	-

Tabela 12: Determinação do teor de humidade da amostra

Ensaio	Amostra da Lama (g)	Teor de Humidade (%)
1	0,999	17,060
2	1,000	19,200
3	1,000	18,580
4	1,000	19,680
5	0,999	18,820
6	1,000	18,800
7	1,001	19,580
Média	0,9998	18,817
Desv. Padrão	0,0007	0,877

Tabela 13: Determinação do teor de absorção da água nos provetes com 2 dias de idade.

Referencia dos provetes		Peso (g)		Absorção (g)	Media (g)
Tipo	N.º de provete	Inicial	final		
Padrão	P1	576,000	577,500	1,500	1,500
	P2	571,300	573,000	1,700	
	P3	570,400	571,700	1,300	
M1 (7%)	P4	564,700	566,000	1,300	1,267
	P5	570,700	572,000	1,300	
	P6	567,600	568,800	1,200	
M2 (10%)	P7	574,200	577,300	3,100	3,033
	P8	574,700	577,800	3,100	
	P9	575,200	578,100	2,900	
M3 (20%)	P10	563,700	565,000	1,300	1,400
	P11	565,300	566,500	1,200	
	P12	568,300	570,000	1,700	

Tabela 14: Determinação do teor de absorção da água nos provetes com 2 dias de idade.

Referencia dos provetes		Peso (g)		Absorção (g)	Media (g)
Tipo	N.º de provete	Inicial	final		
Padrão	P1	575,500	582,400	6,900	6,567
	P2	576,000	582,200	6,200	
	P3	567,100	573,700	6,600	
M1 (7%)	P4	563,700	570,000	6,300	5,833
	P5	573,000	578,900	5,900	
	P6	570,600	575,900	5,300	
M2 (10%)	P7	568,900	575,000	6,100	6,100
	P8	562,700	568,900	6,200	
	P9	567,100	573,100	6,000	
M3 (20%)	P10	560,400	565,200	4,800	4,633
	P11	552,600	557,100	4,500	
	P12	557,300	561,900	4,600	

Tabela 15: Resultados de resistência à flexão de provetes com 2 e 28 dias de idade**2 dias de idade**

Referencia dos provetes		Ff (kN)	Rc (g)	Media da Rf (Mpa)
Tipo	N.º de provete			
Pedrao	P1	0,637	1,490	0,590
	P2	0,534	1,250	
	P3	0,599	1,400	
M1 (7%)	P4	0,583	1,370	0,563
	P5	0,602	1,410	
	P6	0,505	1,180	
M2 (10%)	P7	0,710	1,660	0,599
	P8	0,543	1,270	
	P9	0,543	1,270	
M3 (20%)	P10	0,499	1,170	0,438
	P11	0,364	0,850	
	P12	0,45	1,600	

28 dias de idade

Referencia dos provetes		Ff (kN)	Rc (g)	Media da Rf (Mpa)
Tipo	N.º de provete			
Pedrao	P1	3,279	7,690	3,371
	P2	3,563	8,350	
	P3	3,270	7,660	
M1 (7%)	P4	3,123	7,320	3,244
	P5	3,430	8,040	
	P6	3,178	7,455	
M2 (10%)	P7	3,090	7,240	3,053
	P8	2,968	6,960	
	P9	3,100	7,270	
M3 (20%)	P10	2,131	4,990	2,551
	P11	2,674	6,270	
	P12	2,847	6,670	

Tabela 16: Resultados da resistência à compressão de provetes com 2 e 28 dias de idade

2 dias de idade

Referencia dos provetes		Ff (kN)	Rc (MPa)	Media da Rc (MPa)
Tipo	N.º de provete			
Padrão	P1	28,356	17,720	17,405
	P1	27,590	17,240	
	P2	27,085	16,930	
	P2	27,141	16,930	
	P3	28,141	17,590	
	P3	28,824	18,020	
M1 (7%)	P4	25,141	15,710	15,352
	P4	25,639	16,020	
	P5	23,074	14,420	
	P5	24,639	15,400	
	P6	24,354	15,220	
	P6	24,542	15,340	
M2 (10%)	P7	24,099	15,060	14,908
	P7	23,765	14,850	
	P8	23,276	14,550	
	P8	24,174	15,110	
	P9	24,499	15,310	
	P9	23,316	14,570	
M3 (20%)	P10	19,163	11,980	11,605
	P10	18,645	11,650	
	P11	18,311	11,440	
	P11	18,258	11,410	
	P12	18,346	11,470	
	P12	18,690	11,680	

28 dias de idade

Referencia dos provetes		Ff (kN)	Rc (MPa)	Media da Rc (MPa)
Tipo	N.º de provete			
Padrão	P1	75,845	47,400	46,742
	P1	78,641	49,150	
	P2	73,598	46,000	
	P2	74,250	46,410	
	P3	70,699	44,190	
	P3	75,674	47,300	
M1 (7%)	P4	69,978	43,740	42,930
	P4	67,933	42,460	
	P5	68,516	42,820	
	P5	71,290	44,560	
	P6	66,591	41,620	
	P6	67,809	42,380	
M2 (10%)	P7	69,130	43,210	43,062
	P7	68,370	42,730	
	P8	69,903	43,690	
	P8	67,607	42,250	
	P9	69,614	43,510	
	P9	68,773	42,980	
M3 (20%)	P10	57,955	36,220	36,067
	P10	57,543	35,960	
	P11	57,259	35,790	
	P11	56,542	35,340	
	P12	60,052	37,530	
	P12	56,899	35,560	



Figura 20 :Comparacao da cor dos provetes em função do material substituinte.