



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação das Potencialidades das Cinzas de *Phragmites australis*,
Eichhornia azurea e *Pistia stratiotes* na Substituição Parcial do
Cimento em Argamassas**

Autor: Adélio Joaquim Cònsula

Maputo, Novembro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação das Potencialidades das Cinzas de *Phragmites australis*,
Eichhornia azurea e *Pistia stratiotes* na Substituição Parcial do
Cimento em Argamassas**

Autor: Adélio Joaquim Cònsula

Supervisores: Prof. Doutor Arão Manhique

Professor Doutor Carvalho Madivate

Maputo, Novembro de 2024

Dedicatória

Aos meus pais Joaquim Pinho Cônsula (em memória) e Alzira Brijal pelos valiosos ensinamentos da vida, à minha esposa Lurdina Moiane cuja presença foi essencial para a conclusão deste trabalho, aos meus filhos Benisse Cônsula e Cleisen Cônsula pela manutenção da minha boa disposição.

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida, e por permitir-me ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho;

Aos meus supervisores Prof. Doutor Arão Manhique e Professor Doutor Carvalho Madivate, que de forma incansável estiveram empenhados nas orientações e sugestões para a concretização desta pesquisa;

Ao Prof. Doutor Alcides Siteo, que de forma indirecta participou na realização desta pesquisa;

Aos professores do curso de Mestrado em Química e Processamento de Recursos Locais, pelos ensinamentos que permitiram-me apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Ao Instituto de Bolsas de Estudo (IBE) e Universidade Rovuma, pelo apoio financeiro e paciência na espera dos resultados da pesquisa;

Ao Laboratório de Análise de Solos e Plantas do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), Centro Zonal Nordeste – Nampula, em especial ao Dr. Lourenço Fijamo, pelo acolhimento na fase de preparação das amostras;

Ao Laboratório de Solos da Administração Nacional de Estradas, pela permissão da realização dos ensaios de resistência à compressão, e em especial ao Sr. Faife, pelo companheirismo durante a moldagem dos provetes e a medição das resistências.

Aos estudantes de licenciatura em Ensino de Química da Universidade Rovuma - Nampula, Fernando Evaristo Fernando e Hélio António Colete, pelo apoio prestados durante as actividades laboratoriais;

Aos meus sobrinhos Carlos Cônsula e Henriques Massa, ao Sr. Luizinho, que tornaram possível a colecta, transporte, secagem e queima à temperatura não controlada das amostras;

À toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Declaração Sob Compromisso de Honra

Declaro que esta dissertação nunca foi apresentada para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ele constitui o resultado do meu labor individual. Esta dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Química e Processamento de Recursos Locais, da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Novembro de 2024

O autor

(Adélio Joaquim Cônsula)

Resumo

As indústrias cimenteiras para além de consumirem grande quantidade de energia, são responsáveis por cerca de 8% do global das emissões de CO₂ na atmosfera devido a decomposição de calcário, uma das principais matérias-primas para o fabrico de cimento cuja sua mineração também contribui na degradação do meio ambiente. Uma das formas de minimizar os problemas ambientais causados no processo de produção do cimento é o uso de cinzas de resíduos agrícolas capazes de substituírem parcialmente o cimento devido as suas propriedades pozolânicas. A pesquisa teve como objectivo geral avaliar as potencialidades das cinzas de *Phragmites australis* (PA), *Eichhornia azurea* (EA) e *Pistia stratiotes* (PS) na substituição parcial do cimento em argamassas. De forma específica foi feita a optimização do processo de produção das cinzas pelo uso do teste de *Chaplle*; determinou-se a actividade pozolânica das cinzas por meio dos testes de *Chapelle* e *Frattini*, resistência mecânica dos materiais e Índice de Actividade Pozolânica (IAP), e por fim fez-se a correlação dos resultados de determinações de resistência, resultados dos ensaios de determinação da actividade pozolânica e parâmetros usados na caracterização das cinzas. Os resultados indicaram que as condições óptimas de produção das cinzas de PA, EA e PS são, respectivamente, 500° C durante 3 horas, 600° C durante 2 horas e 600° C durante 4 horas; no teste de *Chapelle* registou-se um consumo de 1220,028; 49,372 e 151,020 mg de cal por grama de cinzas de PA, EA e PS, respectivamente; no teste de *Frattini* os resultados situaram-se acima da curva de solubilidade de cal para as cinzas de EA e PS, e abaixo da curva para as cinzas de PA; nos ensaios de resistência, as argamassas preparadas substituindo 25% de cimento pelas cinzas, após 28 dias de cura, registaram uma resistência a compressão de 47,9; 25,0; 28,1 e 46,9 MPa para cinzas de PA, EA, PS e argamassa de control, respectivamente, e IAP de 102,1% para PA, 53,3% para EA e 59,9% para PS. Portanto, concluiu-se que somente cinzas de PA são pozolanas, pois, tem uma capacidade de consumir uma quantidade de cal superior a 660 mg no teste de *Chapelle*, o resultado no teste de *Frattini* encontra-se abaixo da curva de solubilidade de cal e o IAP das argamassas é superior a 75%. Com isso, recomenda-se aos futuros pesquisadores a realizarem uma análise mais detalhada da granulometria pós-calcinação e verificar a influência do tempo e da temperatura na fase amorfa das cinzas; ensaios com diferentes percentuais de substituição (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%) para oferecer uma visão mais abrangente da viabilidade de substituição parcial do cimento, assim como expandir a correlação com testes termogravimétricos (TGA) ou análise de difração de raios-X (DRX) para verificar a formação de produtos hidratados e a redução de portlandita.

Palavras-chave: Cinzas de PA; Cinzas de EA; Cinzas de PS; Índice de Actividade Pozolânica; Teste Frattini; Teste Chapelle.

Abstract

The cement industries, in addition to consuming a large amount of energy, are responsible for around 8% of global CO₂ emissions into the atmosphere due to the decomposition of limestone, one of the main raw materials for the manufacture of cement whose mining also contributes to the degradation of the environment. One of the ways to minimize the environmental problems caused in the cement production process is the use of ash from agricultural waste capable of partially replacing cement due to its pozzolanic properties. The research had the general objective of evaluating the potential of *Phragmites australis* (PA), *Eichhornia azurea* (EA) and *Pistia stratiotes* (PS) ash in partially replacing cement in mortars. Specifically, the ash production process was optimized using the Chapelle test; the pozzolanic activity of the ash was determined using the Chapelle and Frattini tests, mechanical resistance of the materials and the Pozzolanic Activity Index (IAP), and finally the results of resistance determinations were correlated with the results of the determination tests. of pozzolanic activity and parameters used in the characterization of ash. The results indicated that the optimal conditions for producing PA, EA and PS ash are, respectively, 500° C for 3 hours, 600° C for 2 hours and 600° C for 4 hours; in the Chapelle test a consumption of 1220.028 was recorded; 49,372 and 151,020 mg of lime per gram of PA, EA and PS ash, respectively; in the Frattini test, the results were above the lime solubility curve for EA and PS ash, and below the curve for PA ash; in resistance tests, the mortars prepared by replacing 25% of cement with ash, after 28 days of curing, recorded a compressive strength of 47.9; 25.0; 28.1 and 46.9 MPa for PA, EA, PS and control mortar ash, respectively, and IAP of 102.1% for PA, 53.3% for EA and 59.9% for PS. Therefore, it was concluded that only PA ash are pozzolans, as it has the capacity to consume a quantity of lime greater than 660 mg in the Chapelle test, the result in the Frattini test is below the lime solubility curve and the IAP of mortars is greater than 75%. Therefore, it is recommended that future researchers carry out a more detailed analysis of the post-calcination granulometry and verify the influence of time and temperature on the amorphous phase of the ash; tests with different replacement percentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25%) to offer a more comprehensive view of the feasibility of partial cement replacement, as well as expanding the correlation with thermogravimetric tests (TGA) or X-ray diffraction (XRD) analysis to verify the formation of hydrated products and the reduction of portlandite.

Keywords: *PA ash; EA ash; PS ash; Pozzolanic Activity Index; Frattini test; Chapelle test.*

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema Simplificado de Produção de Cimento	6
Figura 2: <i>Phragmites Australis</i>	2 3
Figura 3: <i>Pistia Stratiotes</i>	2 4
Figura 4: <i>Eichhornia Azurea</i>	2 5
Figura 5: Secagem das amostras à temperatura ambiente, (a)- <i>Phragmites australis</i> , (b) – <i>Pistia Stratiotes</i> e (c) – <i>Eichhornia azurea</i>	2 6
Figura 6: Produção das cinzas, a)- pré-incineração das amostras à temperatura não controlada; b)- calcinação das cinzas à temperatura controlada; c) cinzas moídas e passadas por um crivo de 106 µm de abertura.	2 7
Figura 7: Ensaio de resistência à compressão.	2 8
Figura 8: Teste de Frattini – a) antes da titulação, b) primeira titulação, c) segunda titulação	3 0
Figura 9: Teste Chapelle – antes (a) e depois (b) da titulação	3 1
Figura 10: Teor de CaO consumido pelas cinzas de: a) EA; b) PS, e c) PA, em função da temperatura e tempo de queima.	3 2
Figura 11: Resistência à compressão das argamassas com 25% de cinzas, aos 7, 14 e 28 dias de cura.	3 4
Figura 12: Índice de Actividade Pozolânica das argamassas com 28 dias de cura.	3 5
Figura 13: Teste Frattini para amostras com 8 dias de cura a 40° C	3 6
Figura 14: Quantidade de CaO consumida por 1g de cada amostra.	3 7
Figura 15: Correlação entre os resultados de IAP e teste Frattini.	3 8
Figura 16: Correlação entre os resultados de IAP e teste <i>Chapelle</i>	3 9
Figura 17: Correlação entre os resultados de teste <i>Chapelle</i> e teste <i>Frattini</i>	3 9
Figura 1D: Provetes a serem submetidos a cura	J
Figura 2D: Reagentes usados para o teste de <i>Frattini</i>	J
Figura 3D: Preparação das amostras para o Teste de <i>Frattini</i>	K
Figura 4D: Teste <i>Chapelle</i> – a) amostras inseridas no banho-maria; b) banho-maria durante 16 horas à 90 °C	K

Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição aproximada do Cimento Portland	7
Tabela 2: Pozolanas em misturas de Cimento	1 9
Tabela 3: Preparação das argamassas.	2 8
Tabela 4: Condições ótimas para a produção de cinzas de PA, EA e PS com elevada actividade pozolânica.	3 3
Tabela 5: Composição química das cinzas em estudo por XRF.	3 3
Tabela 6: Resultados de teste <i>Frattini</i> após 8 dias.	3 7
Tabela 1A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Phragmites australis</i> à 400°C	A
Tabela 2A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Phragmites australis</i> à 450°C	A
Tabela 3A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Phragmites australis</i> à 500°C	B
Tabela 4A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Eichhornia azurea</i> à 500°C	B
Tabela 5A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Pistia Stratiotes</i> à 500°C	C
Tabela 6A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Phragmites australis</i> à 600°C	C
Tabela 7A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Eichhornia azurea</i> à 600°C	D
Tabela 8A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Pistia Stratiotes</i> à 600°C	D
Tabela 9A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Phragmites australis</i> à 700°C	E
Tabela 10A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Eichhornia azurea</i> à 700°C	E
Tabela 11A: Optimização e teste <i>Chapelle</i> para <i>Pistia Stratiotes</i> à 700°C	F
Tabela 1B: Resultados de Resistência à Compressão	G
Tabela 1C: Resultados da Titulação com HCl 0.1 M no Teste de <i>Frattini</i>	H
Tabela 2C: Resultados da Titulação com EDTA 0.03 M no Teste de <i>Frattini</i>	H
Tabela 3C: Resultados do Teste de <i>Frattini</i> usando as médias de [OH-] e [CaO]	I

Lista de Equações

1. Equação da reacção de hidratação de alite.....	8
2. Equação da reacção de hidratação de belite.....	8
3. Equação da reacção de hidratação de celite.....	8
4. Equação da reacção de hidratação de ferrite.....	8
5. Equação da reacção de hidratação de celite na presença de etringite.....	8
6. Equação da reacção de hidratação de ferrite na presença de etringite.....	8
7. Equação geral da reacção pozolânica.....	1 0
8. Equação da reacção de desidroxilação de caulinite.....	1 5
9. Equação de uma reacção pozolânica.....	2 0
10. Equação para determinação do Índice de Actividade Pozolânica.....	2 8
11. Equação para determinação da concentração dos iões hidroxila no teste de Frattini.....	2 9
12. Equação para determinação da concentração de cal no teste de Frattini.....	2 9
13. Equação para obtenção da curva de solubilidade de cal	3 0
14. Equação para determinação da massa de cal consumida no teste de Chapelle.....	3 0

Lista de Siglas, Abreviaturas e Acrónimos

APS – Borra Activada de Papel (*Activated Paper Sludge*)

BFS – Escória de Alto Forno (*Blast Furnace Slag*)

CDW – Resíduo de Construção e Demolição (*Construction and Demolition Waste*)

CEA – Cinzas de *Eichhornia Azurea*

CPA – Cinzas de *Phragmites Australis*

CPS – Cinzas de *Pistia Stratiotes*

CW – Resíduo Cerâmico (*Ceramic Waste*)

DRX – Difrakção de Raios X

EA – *Eichhornia Azurea*

EDTA – Ácido Etilenodiamino Tetra-acético (*Ethylenediamine tetraacetic acid*)

FA – Cinza Volante (*Fly Ash*)

IAP – Índice de Actividade Pozolânica

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MEV – Microscopia Electrónica de Varredura

MK - Metacaulino

MPa - Megapascal

PA – *Phragmite Australis*

PS – *Pistia Stratiotes*

RHA – Cinza de Casca de Arroz (*Rice Husk Ash*)

SCBA – Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (*Sugarcane Bagasse Ash*)

SF – Silica Activa (*Silica Fume*)

TD – Terra Diatomícea

TG - Termogravimetria

TGA – Análise Termogravimétrica (*Thermogravimetric Analysis*)

WA – Cinza de Madeira (*Wood Ash*)

WWA – Resíduos de Cinza de Madeira (*Wood Waste Ash*)

Índice

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Declaração Sob Compromisso de Honra	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Equações	ix
Lista de Siglas, Abreviaturas e Acrónimos	x
Índice	xii
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos	2
1.1.1. Objectivo Geral	2
1.1.2. Objectivos Específicos	2
1.2. Justificativa	3
CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Cimento Portland	5
2.1.1. Composição química do cimento Portland	6
2.1.2. Hidratação do Cimento Portland	7
2.2. Tipos de Cimento	8
2.2.1. Cimento Portland de Calcário	9
2.3. Pozolanas	9
2.3.1. Pozolanas Naturais	10
2.3.1.1. Pozolanas Naturais de Origem Vulcânica	11

2.3.1.2. Pozolanas Naturais de Origem Sedimentar	1	2
2.3.2. Pozolanas Artificiais	1	3
2.3.2.1. Pozolanas obtidas a partir de processos industriais	1	3
2.3.2.2. Pozolanas obtidas a partir da matéria orgânica	1	6
2.3.3. Utilização de Materiais Pozolânicos na Construção Civil	1	8
2.3.4. Reacção Pozolânica	1	9
2.3.5. Avaliação da Actividade Pozolânica	2	1
2.4. Cinzas de Resíduos Vegetais como Pozolanas	2	2
2.4.1. Características das Plantas em Estudo	2	3
2.4.1.1. Phragmites Australis	2	3
2.4.1.2. Pistia Stratiotes	2	4
2.4.1.3. Eichhornia Azurea	2	4
CAPÍTULO III: METODOLOGIA	2	6
3.1. Colecta e Pré-tratamento das amostras	2	6
3.2. Produção da Cinzas	2	6
3.3. Determinação da Actividade Pozolânica	2	7
3.3.1. Resistência à Compressão e Índice de Actividade Pozolânica (IAP)	2	7
3.3.2. Teste Frattini	2	9
3.3.3. Teste Chapelle	3	0
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO	3	2
4.1. Optimização do processo de produção das cinzas	3	2
4.2. Composição Química das Cinzas	3	3
4.3. Resultados da Resistência à Compressão e Índice de Actividade Pozolânica	3	4

4.4. Resultados do Teste Frattini	3 6
4.5. Resultados do Teste Chapelle	3 7
4.6. Correlação entre os Métodos	3 8
CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	4 0
5.1. Conclusões	4 0
5.2. Recomendações	4 1
Referências Bibliográficas	4 2
ANEXO A	A
ANEXO B	G
ANEXO C	H
ANEXO D	J

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil destaca-se por movimentar grande quantidade de recursos financeiros e serviços, além de provocar a degradação do meio ambiente, devido à exploração de recursos naturais, alta demanda energética e geração de resíduos. O material mais utilizado na construção civil é o concreto, que apresenta como principal constituinte o cimento Portland (Soares *et al.*, 2017). A produção de cimento é reconhecida como sendo responsável por cerca de 8% do global das emissões de CO₂ e pelo elevado consumo energético. A produção de cimento representa também uma pressão sobre os recursos naturais usados como matéria-prima para a sua produção (Alujas *et al.*, 2015; Malyadri & Supriya, 2015; Panagoda *et al.*, 2023). Uma das áreas que está merecendo atenção ultimamente para resolver estes dois problemas é da utilização de cinzas de resíduos agrícolas, em substituição parcial do cimento, contribuindo assim para a redução das emissões e do elevado consumo de energia associados à produção do cimento (Soares *et al.*, 2017; Zerihun *et al.*, 2022).

A utilização destes resíduos para este fim está associada às suas propriedades pozolânicas. Classificam-se como materiais pozolânicos os materiais que fazem parte do grupo dos silicatos ou aluminossilicatos, que por si só não apresentam actividade cimentícia, mas quando finamente moídos e em presença de água, reagem com o Ca(OH)₂ existente no cimento, formando compostos com propriedades cimentícias, responsáveis pelo melhoramento de algumas propriedades tecnológicas das massas onde estes produtos são incorporados (Donatello *et al.*, 2010; Mostafa *et al.*, 2001).

Actualmente, a cinza da casca do arroz e do bagaço de cana-de-açúcar têm merecido grande atenção, devido aos altos teores de sílica existentes nelas. As propriedades pozolânicas das cinzas da casca do arroz e do bagaço de cana-de-açúcar parecem estar associadas à presença de sílica, que existe quer na fase amorfa como na fase cristalina. A presença de uma ou outra forma de sílica, incluindo os seus teores, está relacionada às condições de processamento das cinzas, como atestam Marizane *et al.* (2020) e Payá *et al.* (2001).

A actividade pozolânica pode ser determinada por meio de métodos como a Difracção de Raios X (DRX), Termogravimetria (TG), Teste de *Frattini*, Teste de *Chapelle*, Conductividade Eléctrica, Calorimetria, Microscopia Electrónica de Varredura (MEV),

Velocidade de Pulso Ultrassónico (UPV) e teste R^3 (*Rapid, Relevant and Reliable*) (Elyasigorji *et al.*, 2023; Pinheiro *et al.*, 2023). No estudo da actividade pozolânica tem sido usado o método da comparação da resistência padrão de argamassas com aditivos e uma argamassa de referência, um método indirecto mas que tem encontrado muita aplicação (Bentz *et al.*, 2011; Donatello *et al.*, 2010).

Para o efeito, foram seleccionadas a *Phragmites australis* (PA), *Eichhornia azurea* (EA) e a *Pistia stratiotes* (PS) como biomassas, com o objectivo de avaliar a actividade pozolânica das suas cinzas, base para o seu uso na substituição parcial de cimento em argamassas. Esta preocupação surge como forma de mitigação dos problemas ambientais, por um lado causados por estas plantas que apresentam um crescimento exagerado, tornando-se assim em plantas invasoras em rios e lagos do país, e por outro lado, causados na produção do cimento (Arya *et al.*, 2021; Byabasaija *et al.*, 2020; Jamil *et al.*, 2022; Kacheche & Mzuza, 2021; Rai, 2022; Zerihun *et al.*, 2022).

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo Geral

- Avaliar as potencialidades das cinzas de *Phragmites australis*, *Eichhornia azurea* e de *Pistia stratiotes* na substituição parcial do cimento em argamassas.

1.1.2. Objectivos Específicos

- Optimizar o processo de produção de cinzas de *Phragmites australis*, *Eichhornia azurea* e de *Pistia stratiotes*, por meio do processo de queima controlada em Laboratório;
- Determinar a actividade pozolânica das cinzas por meio de testes *Chapelle* e *Frattini*, resistência mecânica dos materiais e Índice de Actividade Pozolânica (IAP);
- Correlacionar os resultados de determinações de resistência, resultados dos ensaios de determinação da actividade pozolânica e parâmetros usados na caracterização das cinzas.

1.2. Justificativa

O Cimento Portland é um dos materiais amplamente usado nos últimos anos no mundo e é considerado o principal material para a civilização humana devido a sua vasta aplicação na construção civil, com um consumo global de cerca de 3,7 bilhões de toneladas por ano (Moraes *et al.*, 2015).

O Cimento Portland era inicialmente composto por clínquer finamente dividido e de uma substância responsável por regular o tempo de pega do cimento (Oliveira, 2017). Porém, a busca de menores custos para a produção do Cimento tem gerado interesse para o estudo adições activas, como é o caso dos materiais pozolânicos, os quais, não só são usados por razões ecológicas mas também as tecnológicas, visto que estes materiais para além de contribuírem para a redução da emissão de CO₂, aumentam a resistência mecânica e melhoram a durabilidade do concreto (Oliveira, 2017; Hidalgo *et al.*, 2021) .

Com isso, é necessário fazer-se um estudo de materiais localmente disponíveis e que apresentem um potencial para serem aplicados como pozolanas, tal como as cinzas de *Phragmites australis*, *Eichhornia azurea* e *Pistia stratiotes*. E para que estas cinzas sejam consideradas pozolanas, elas devem:

- consumir uma quantidade de cal superior a 660 mg na mistura cal-cinza, numa proporção de 2:1, no teste de Chapelle (Pontes *et al.*, 2013; Quarcioni *et al.*, 2015);
- apresentar um poder de remoção de cálcio, após substituírem 20% de cimento no teste de Frattini (Parhizkar *et al.*, 2010), e
- possuir um IAP não inferior a 75% em argamassas preparadas substituindo 25% do cimento pelas cinzas, e com 28 dias de cura (Kramar & Ducman, 2018; Pinheiro *et al.*, 2023).

Phragmites australis, *Eichhornia azurea* e *Pistia stratiotes* são plantas invasoras distribuídas em todo o território moçambicano, principalmente em rios, lagos, lagoas e pântanos. Estas plantas crescem em ambientes com excesso de matéria orgânica biodegradável impedindo assim a circulação de água, oxigénio, radiação solar, actividades agrícolas, pesqueiras e de navegação, chegando ao ponto de fazer perder os valores ecoturísticos e sócio-económicos dos corpos hídricos (Lourenço *et al.*, 2004; Caldas, 2014).

Uma substituição parcial do cimento por cinzas destas plantas poderia gerar um menor custo para a fabricação do cimento com consequente aumento da produtividade, além de minimizar os impactos ambientais decorrentes da sua produção, diminuindo a emissão de CO₂ e também reduzindo o consumo de energia durante o processo de fabricação.

CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cimento Portland

Cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que pode ser facilmente moldada e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água (BSI, 2011).

A busca por ligantes hidráulicos ideais foi activamente perseguida em vários países na metade do século XIX, sendo os mais bem-sucedidos os de *John Smeaton* (desenvolveu um produto de alta resistência, cal hidráulica, por meio de calcinação de calcários moles argilosos) e *James Parker* (patenteou o cimento hidráulico natural, produto à base de calcinação de nódulos de calcário impuro com argila chamado “Cimento de *Parker* ou Romano”), ambos da Inglaterra e de *Louis-Joseph Vicat*, da França (preparou cal hidráulica artificial calcinando misturas sintéticas de calcário e argila). Em 1824 *Joseph Aspdin*, da Inglaterra, inventou o cimento Portland queimando uma mistura de argila finamente moída e pó de pedra calcária em um forno de alvenaria até que o CO₂ fosse eliminado. O produto sinterizado foi então triturado e ele chamou de cimento Portland, em alusão à Ilha de Portland, na Inglaterra, que tem em sua formação rochas duras e de cor cinza, semelhantes a sua criação (ABCP, 2016; Artioli & Bullard, 2013).

Cimento Portland é um pó fino produzido pela moagem de clínquer de cimento Portland, gesso e constituintes menores (conforme permitido por vários padrões). O clínquer de cimento Portland é um material hidráulico que consiste em pelo menos dois terços em massa de silicatos de cálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), sendo o restante constituído por fases contendo alumínio, ferro e outros compostos. O clínquer de cimento Portland é feito por aquecimento, em um forno, de uma mistura homogénea de matérias-primas a uma temperatura de sinterização, que é cerca de 1450 °C para os cimentos modernos (Baghchesaraei & Baghchesaraei, 2012).

O processo de produção do Cimento consome quantidades substanciais de energia, principalmente na forma de combustíveis fósseis, resultando em emissões significativas de CO₂. A indústria de cimento é uma das principais contribuintes para as emissões globais de

gases de efeito estufa, respondendo por aproximadamente 8% do total de emissões de CO₂. Além das emissões de CO₂, a produção de cimento também gera outros impactos ambientais. A mineração de matérias-primas pode resultar em destruição de habitat, erosão do solo e poluição da água. As altas temperaturas no forno levam à libertação de poluentes, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado, contribuindo para a poluição do ar e problemas respiratórios (Panagoda *et al.*, 2023).

2.1.1. Composição química do cimento Portland

A composição química do cimento Portland envolve óxidos principais e minoritários. Os óxidos principais são óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido férrico (Fe₂O₃). As combinações destes óxidos são responsáveis pela formação das fases: silicato tricálcico (3CaO·SiO₂), silicato dicálcico (2CaO·SiO₂), aluminato tricálcico (3CaO·Al₂O₃) e ferroaluminato tetracálcico (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) (Figura 1).

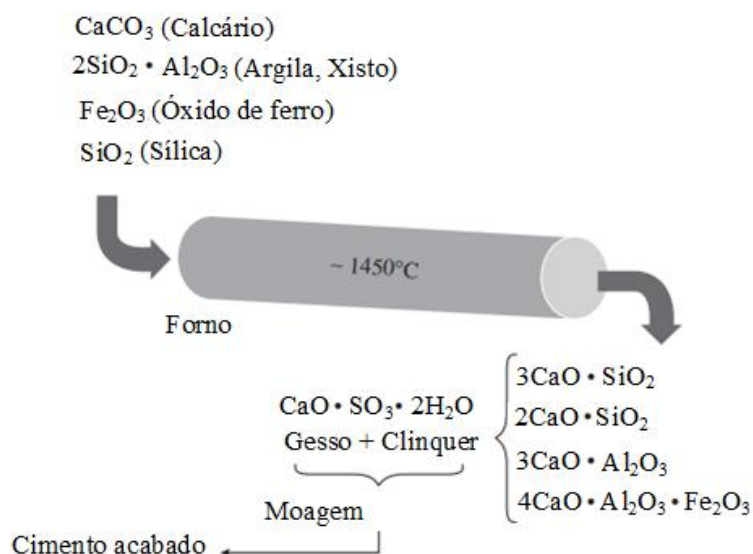


Figura 1: Esquema Simplificado de Produção de Cimento (Singh, 2019)

Os componentes minoritários mais importantes são: óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O) e gesso (CaSO₄ · 2H₂O). As vezes estão inclusos os componentes como flúor, cloreto e metais traço, em pequenas quantidades (Artioli & Bullard, 2013; Baghchesaraei & Baghchesaraei, 2012; Bediako & Amankwah, 2015; Dunuweera &

Rajapakse, 2018; Senff *et al.*, 2005). A Tabela 1 ilustra a composição aproximada do cimento Portland.

Tabela 1: Composição aproximada do Cimento Portland

Composto	Fórmula	Notação	% massa
Alite (silicato tricálcico)	Ca_3SiO_5 [3CaO·SiO ₂]	C ₃ S	45 – 65
Belite (silicato dicálcico)	Ca_2SiO_4 [2CaO·SiO ₂]	C ₂ S	10 – 30
Celite (aluminato tricálcico)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ [3CaO·Al ₂ O ₃]	C ₃ A	5 – 12
Ferrite (ferroaluminato tetracálcico)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ [4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃]	C ₄ AF	6 – 12
Óxido de magnésio	MgO	M	0,8 – 2,5
Óxido de sódio	Na ₂ O	N	0,07 – 0,22
Óxido de potássio	K ₂ O	K	0,52 – 1,0
Gesso (sulfato de cálcio dihidratado)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [CaO·SO ₃ ·2H ₂ O]	C $\overline{\text{S}}$ H ₂	2 – 10

Fonte: (Baghchesaraei & Baghchesaraei, 2012; Newman & Choo, 2003)

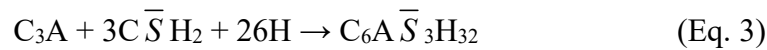
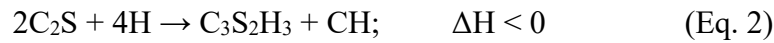
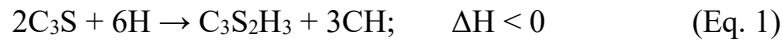
O C₃S e C₂S são os constituintes fundamentais na composição química do cimento, pois são responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O C₃A é um componente que se hidrata mais rápido, mas tem pouca contribuição para a resistência mecânica da pasta. O C₄AF praticamente não contribui para a resistência mecânica da pasta a longo prazo, tendo a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química (Ahmed *et al.*, 2019; Newman & Choo, 2003).

2.1.2. Hidratação do Cimento Portland

Quando a água é misturada com o cimento Portland, o produto perde a plasticidade em poucas horas e endurece ao longo de algumas semanas. Um concreto típico endurece em cerca de 6 horas e desenvolve uma resistência à compressão de 8 MPa em 24 horas. A resistência aumenta para 15 MPa em 3 dias, 23 MPa em uma semana, 35 MPa em 4 semanas e 41 MPa em três meses. A resistência continua a aumentar lentamente enquanto a água estiver disponível para a hidratação contínua (Baghchesaraei & Baghchesaraei, 2012).

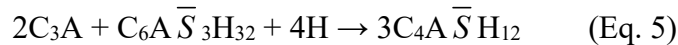
A hidratação do cimento Portland envolve uma série de reações das fases anidras de silicatos de cálcio (C₃S e C₂S) e aluminatos de cálcio (C₃A e C₄AF) com água para formar fases

hidratadas. Os principais produtos da hidratação do cimento Portland são: silicato de cálcio hidratado [Tobermorite: C-S-H], hidróxido de cálcio [Portlandite: Ca(OH)₂] e sulfoaluminatos de cálcio hidratados [Etringite: C₆A $\bar{S}$ ₃H₃₂] (Jamil *et al.*, 2013; Newman & Choo, 2003; Senff *et al.*, 2005). As reacções de hidratação do cimento Portland são resumidas pelas Equações 1, 2, 3 e 4:



Onde C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; $\bar{S}$ = SO₃.

Na maioria dos cimentos Portland comerciais o sulfato é insuficiente para sustentar a formação de etringite. Quando o sulfato disponível é consumido, a etringite reage com o C₃A para formar uma fase com menor teor de SO₃, conhecida como monossulfato. A hidratação do C₄AF é análoga à do C₃A mas ocorre lentamente (Newman & Choo, 2003). As reacções podem ser resumidas pelas Equações 5 e 6:



Portanto, a hidratação de C₃S e C₂S são as principais reacções exotérmicas.

2.2. Tipos de Cimento

De acordo com a Norma Inglesa (EN 197-1), os produtos da família dos cimentos comuns estão agrupados em cinco tipos principais de cimento da seguinte forma:

- CEM I – Cimento Portland (> 95% de clínquer);

- CEM II – Cimento Portland Composto (65 – 94% de clínquer, e 6 – 35% de outros constituintes);
- CEM III – Cimento de Alto-forno (5 – 64% de clínquer, e 36 – 95% de escória de alto forno);
- CEM IV – Cimento Pozolânico (45 – 89% de clínquer, e 11 – 55% de sílica activa ou pozolana ou cinza volante ou uma combinação dos mesmos);
- CEM V – Cimento Composto (20 – 64% de clínquer, e 18 – 50% de escória de alto forno, e 18 – 50% de pozolana ou cinza volante siliciosa ou uma combinação das mesmas).

A natureza e o teor dos ingredientes utilizados para a produção do cimento, de acordo com a norma, determinam os tipos e os 27 produtos da família de cimentos comuns.

2.2.1. Cimento Portland de Calcário

De acordo com a norma EN-197-1, existem dois tipos de Cimento Portland de Calcário (CPC) contendo 6 – 20% e 21 – 35% de filer calcário, respectivamente. As designações dos CPC fabricados são CEM II/A-L (ou A-LL) e CEM II/B-L (ou B-LL), onde:

- CEM II/A-L (ou A-LL) pode conter 6 – 20% de calcário;
- CEM II/B-L (ou B-LL) pode conter 21 – 35% de calcário.

O sufixo –LL, ao contrário de –L, significa uma fonte de calcário de alta pureza com um teor particularmente baixo de material orgânico.

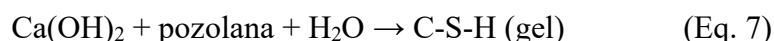
2.3. Pozolanas

A denominação “pozolana” deriva do tufo¹ vulcânico de *Pozzuoli*. Estes materiais pozolânicos foram usados pela primeira vez no Império Romano, quando as pozolanas naturais foram misturadas com cal para criar um material forte e durável para edifícios civis. Hoje em dia, as pozolanas são utilizadas não apenas por razões ecológicas, mas também tecnológicas, pois

¹ Tufo é designação comum dada a um vasto conjunto de rochas caracterizadas pela sua baixa densidade, reduzida consistência intergranular que se traduz na presença de grãos facilmente desagregáveis.

esse material aumenta a resistência mecânica e melhora a durabilidade dos cimentos Portland misturados (Moraes *et al.*, 2015; Müller, 2005).

Materiais pozolânicos, são essencialmente materiais siliciosos ou alumino-siliciosos que por si só, têm pouca ou nenhuma propriedade de ligação, mas quando misturados com cimento Portland, reagem com cal (produzida pela hidratação do cimento) na presença de água, endurecendo deste modo como cimento (Martirena & Monzó, 2018; Parhizkar *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2015). A Equação 7 da reacção pozolânica é representada a seguir:



As pozolanas são classificadas em materiais naturais e artificiais: estes últimos são, em sua maioria, subprodutos industriais. As pozolanas naturais estão relacionadas aos resíduos de actividades vulcânicas, rochas do impacto de meteoritos, depósitos de terra diatomácea, bauxite, enquanto as pozolanas artificiais estão relacionadas a argilas calcinadas, cinzas volantes com baixo teor de cálcio, sílica activa condensada, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de palha de trigo, cinza de folhas de bambu, entre outros (Moraes *et al.*, 2015; Müller, 2005).

2.3.1. Pozolanas Naturais

As pozolanas naturais são divididas em dois grupos: um de origem vulcânica e outro de origem sedimentar. As de origem vulcânica são encontradas na forma de tufos (rochas ígneas formadas pelo acúmulo de cinzas vulcânicas), cinzas vulcânicas, escórias vulcânicas, obsidiana e pedra-pomes (rocha ígnea vulcânica vítrea de cor cinza), ao passo que as de origem sedimentar são encontradas na forma de terra diatomácea, *cherts* (rocha sedimentar rica em sílica), sílica opalina e argilas naturalmente calcinadas pelo fluxo de lava ardente. As pozolanas naturais não requerem nenhum tratamento químico além da moagem. Elas contêm pequenas quantidades de minerais não reactivos (argilominerais, feldspato alcalino e quartzo) e grandes quantidades de minerais reactivos (zeólito e vidro vulcânico). Quimicamente, elas são compostas principalmente por óxidos de alumínio e silício (al-Swaidani, 2018; Xia *et al.*, 2021).

2.3.1.1. Pozolanas Naturais de Origem Vulcânica

Cinza vulcânica e pedra-pomes: são materiais constituídos por uma mistura de minerais e fases vítreas expelidas durante as erupções vulcânicas. As cinzas vulcânicas são fragmentos finos de materiais piroclásticos, que geralmente têm menos de 2 mm de tamanho. Este tipo de pozolana possui alto teor de compostos siliciosos. Além disso, a pedra-pomes é um sólido amorfo, composto principalmente de quartzo, biotite e feldspato, consiste em 63% a 75% de óxido de silício e é considerada um dos principais depósitos piroclásticos ao lado da escória vulcânica. A pedra-pomes é derivada de um magma ácido, seu pH é de aproximadamente 7,5. Além disso, é um composto altamente microvesicular, com porosidade variando de 60% a 70% e sua densidade ($700\text{-}1200\text{ kg/m}^3$) varia conforme sua formação (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022).

Escória vulcânica: é um material de origem vulcânica, com baixo teor de humidade e é poroso. Sua cor varia do preto ao castanho-escuro. A escória vulcânica é muito semelhante à pedra-pomes, mas é derivada do magma basáltico ou andesítico. Em comparação com a pedra-pomes, tem um teor de sílica inferior (40%-60%) e quase semelhante em pH (7.6) e densidade ($500\text{-}1300\text{ kg/m}^3$). Por sua vez, tem natureza vesicular (com pequenas cavidades esféricas) causada pelo escape de gases durante as erupções. Sua porosidade varia entre 30% e 60% (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022).

Tufos Zeolíticos: os zeólitos são aluminossilicatos cristalinos de elementos dos grupos IA e IIA, como sódio, potássio, bário, magnésio e cálcio (Duvarci et al., 2007). Tufos zeolíticos são substâncias que contêm silicato de alumina e podem ser usados como materiais de mistura em cimentos. Eles ocupam uma posição significativa entre as matérias-primas industriais usadas em áreas como gerenciamento de poluição, energia, agricultura, pecuária e metalurgia de minas devido às suas estruturas físicas e propriedades químicas. As propriedades químicas (teor reactivo de SiO_2 , Al_2O_3), físicas (alta área superficial, alta capacidade de troca catiónica e porosidade), ambiental (adsorção de Cr^{6+} , agente antibacteriano, material condicionador de humidade) e económicas (alta reservas, baixo custo de produção) tornam a zeólita atraente para a tecnologia de materiais de construção (Yilmaz et al., 2007).

2.3.1.2. Pozolanas Naturais de Origem Sedimentar

Terra diatomácea: A diatomite é uma rocha sedimentar contendo partículas de sílica fina e amorfa que são criadas devido ao acúmulo de conchas ou esqueletos de algas fossilizadas e partículas microscópicas chamadas diatomáceas (Ahmadi *et al.*, 2018). A terra de diatomáceas (TD) é um pó que varia de branco, cinza e amarelo a vermelho. A poeira é formada a partir de diatomáceas fossilizadas, algas unicelulares de várias formas e tamanhos que são compostas quase inteiramente de dióxido de silício amorfo (Korunic, 2013).

A massa específica varia, dependendo do tipo e fonte de TD, de 220-230 g/l até cerca de 670 g/l, enquanto o valor do pH varia de 4.4 a 9. TD é inodoro, seu teor de humidade é de cerca de 2-6%, é insolúvel em água, não inflamável e sem risco de explosão. Além da sílica amorfa (60 a 93%), o elemento principal é o cálcio, tendo outros elementos, como alumínio, magnésio, sódio, ferro, fósforo, enxofre, níquel, zinco, manganês e mais. Após o processamento (escavação, secagem, moagem), as partículas têm cerca de 1 a 150 µm de diâmetro, com tamanho médio de partícula entre 2.5 a 30 µm (Korunic, 2013).

Sedimentos de origem detrítica e mista: os sedimentos detríticos são compostos em grande parte por minerais que aparecem como resultado do intemperismo e erosão das rochas. Um dos sedimentos que pode ser utilizado como pozolana é o solo Sacrofano, de origem mista, encontrado próximo a Viterbo, na Itália. Este solo possui um teor de óxido de silício em torno de 85% a 90% em peso. Diatomáceas, partículas vulcânicas e alguns minerais cristalinos foram drasticamente alterados por fluidos ácidos que se infiltraram pelo topo do depósito. Outros materiais derivados de rochas detríticas são argilas queimadas naturalmente, como a porcelana de Trinidad e o *gliezh*² da Ásia Central. A porcelana é formada pela combustão espontânea de argilas betuminosas, e o segundo tipo é composto de xistos queimados naturalmente a partir de incêndios subterrâneos de carvão. Outro tipo de pozolana de origem detrítica é a bentonite, que é uma argila absorvente de filossilicato de alumínio composta principalmente por montmorilonite (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022).

² Aditivo de aluminossilicato mais eficaz no cimento, que substitui ao máximo a parte de clínquer do cimento Portland sem reduzir a resistência e, ao mesmo tempo, aumentar suas propriedades de desempenho (Iskandarova *et al.*, 2023).

2.3.2. Pozolanas Artificiais

Pozolanas artificiais são materiais produzidos ou alterados por meio de um processo industrial e, em muitos casos, são resíduos de processos produtivos. Entre estes encontram-se cinza volante (FA), escória de alto-forno (BFS), sílica activa (SF), metacaulino (MK), resíduo cerâmico (CW), resíduo de construção e demolição (CDW), cinza de casca de arroz (RHA), cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) e cinza de madeira (WA). Quimicamente, as pozolanas artificiais são compostas principalmente por óxidos de alumínio, ferro e silício. Elas podem ser divididas em: pozolanas artificiais obtidas a partir de processos industriais, metacaulino e pozolanas de calcinação de matéria orgânica (Paris *et al.*, 2016; Snellings *et al.*, 2012).

2.3.2.1. Pozolanas obtidas a partir de processos industriais

Cinzas volantes (FA): são os principais resíduos industriais derivados da queima de combustíveis sólidos. São materiais pozolânicos à base de sílica ou alumina-sílica, permitindo sua incorporação ao concreto em substituição parcial ao cimento (Alterary & Marei, 2021).

A cinza volante é composta de três componentes principais: (1) materiais orgânicos, (2) materiais inorgânicos constituídos de fase amorfa e cristalina, e (3) materiais fluidos presentes tanto em materiais orgânicos quanto inorgânicos (Alterary & Marei, 2021).

A cinza volante é classificada em dois grupos principais: cinzas volantes de classe C e classe F. As cinzas volantes de classe F são pozolânicas extraídas da queima de carvão antracite ou betuminoso, a quantidade total de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 é superior a 70%. As cinzas da classe C são pozolânicas e cimentícias produzidas a partir da queima de carvão sub-betuminoso ou linhito, a quantidade total de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 é superior a 50%. A maior parte do teor de óxidos metálicos representa a base para a maioria das técnicas de caracterização para cinza volante classe C e F. A FA com mais de 10% de CaO é classificado como classe C e menor que 10% como classe F (Alterary & Marei, 2021).

De acordo com o tempo de formação, a cinza volante é classificada em fases primária, secundária e terciária. As fases primárias não encontram nenhuma mudança. Durante a combustão do carvão, as fases secundárias, incluindo os óxidos e silicatos, são formadas.

Além disso, as fases terciárias são criadas através do transporte de cinza volante compreendendo portlandite e gesso. Os principais elementos da cinza volante são oligoelementos, silício, oxigénio, cálcio, alumínio, carbono, ferro, magnésio, potássio, hidrogénio, titânio, sódio, fósforo, nitrogénio e bário. A cinza volante é classificada e categorizada também de acordo com seu teor de óxido. O CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 constituem a maior parte da cinza volante. À medida que CaO aumenta, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 diminuem, ao contrário dos álcalis, incluindo Na_2O e K_2O , bem como o SO_3 , que aumentam. Além disso, a densidade das cinzas volantes pode ser determinada a partir do teor de ferro e carbono. Assim, quando o teor de carbono aumenta na cinza volante, sua densidade diminui, e quanto mais ferro, maior a densidade da cinza volante. Além disso, a demanda de água e a trabalhabilidade nas cinzas volantes são afectadas pelo teor de carbono (Alterary & Marei, 2021).

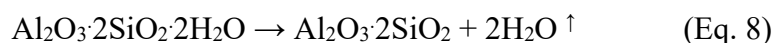
Escória de alto-forno (BFS): é definida como o produto não metálico consistindo essencialmente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, que é desenvolvido em estado fundido simultaneamente com ferro em um alto-forno. Quando a mistura de minério de ferro, coque e calcário é colocada no alto-forno, o ferro fundido e a escória fundida são produzidos a cerca de $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura. A escória granulada de alto-forno (GBFS) é obtida pela têmpera rápida da escória fundida usando jatos de água de alta pressão. São partículas granulares vítreas com tamanho de partícula geralmente menor que 5 mm , como areia. Os principais constituintes do BFS são sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), cal (CaO) e magnésia (MgO) que perfazem 95% da composição (Yuksel, 2018).

Sílica activa (SF): consiste em partículas finas com superfície específica cerca de seis vezes de cimento. Portanto, quando a sílica activa é misturada com o concreto, os minúsculos espaços de poros diminuem. Além disso, a adição de sílica activa diminui a trabalhabilidade da mistura (Panjehpour *et al.*, 2011).

A sílica activa é um subproduto das indústrias de produção de ligas de silício e ferrosilício. A produção de sílica activa ocorre em altas temperaturas a partir da redução do quartzo. O quartzo de alta pureza é aquecido com carvão, coque ou lascas de madeira em um forno eléctrico a uma temperatura de $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ para eliminar o oxigénio. O vapor de monóxido de silício é liberto na redução do quartzo à liga e é colectado na base do forno. A fumaça oxida e

condensa nas partes superiores do forno produzindo microesferas de sílica amorfa que é o óxido de silício. É um pó ultrafino também conhecido como micro sílica com 75% de teor de silício contendo sílica não cristalina na faixa de 85-95%. As partículas são muito finas e de forma esférica, 95% das partículas são menores que 1 µm. A área superficial das partículas varia de 13000 a 30000 m²/kg. As partículas de sílica activa são cerca de 100 vezes menores que a partícula média de cimento (Mehta & Ashish, 2019).

Metacaulino (MK): Origina-se do mineral caulinite e é processado para diversos usos e aplicações, inclusive sistemas cimentícios. MK é produzido principalmente por calcinação de argilas do tipo caulino a uma temperatura variando entre 600 a 800 °C. O processo de calcinação é importante para a produção de material pozolânico altamente reactivo. A água é expelida da caulinite (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) e a estrutura do material colapsa, resultando em um aluminossilicato amorfo (Al₂O₃·2SiO₂) conhecido como metacaulino ou metacaulinite. O processo é denominado desidroxilação e pode ser expresso pela seguinte Equação 8 (Khatib *et al.*, 2018):



Resíduos cerâmicos (CW) e resíduos de construção e demolição (CDW): são resíduos provenientes da construção e demolição de edifícios e têm sido utilizados como substitutos do cimento. A distribuição granulométrica dos resíduos cerâmicos é semelhante à do cimento e sua gravidade específica está entre 2.3 e 2.8 (adimensional). Seus principais compostos são sílica, alumina e óxido de ferro. Mineralogicamente, os resíduos cerâmicos são compostos por quartzo, hematite, moscovite e microclina; além disso, o conteúdo de material amorfo é de aproximadamente 38% (Sánchez de Rojas *et al.*, 2019; Sánchez de Rojas *et al.*, 2006).

Os CDW são resíduos gerados na construção, reconstrução, ampliação, alteração, manutenção e demolição de edifícios e outras infra-estruturas. Para que esses resíduos possam ser utilizados em misturas cimentícias devem ter sua granulometria reduzida. Portanto, recomenda-se reduzir o tamanho das partículas abaixo de 63 µm para serem usadas como material substituto do cimento. O conteúdo mineralógico do CDW é composto por ilite, quartzo, ortoclásio, anortite, calcite, dolomite e hematite. O óxido de silício é o componente

majoritário (75%), seguido por alumina e óxido de ferro (Sánchez de Rojas *et al.*, 2019; Sánchez de Rojas *et al.*, 2006).

2.3.2.2. Pozolanas obtidas a partir da matéria orgânica

Cerca de um bilhão de toneladas de resíduos agrícolas são produzidos a cada ano, aproximadamente 80% dos quais são de origem orgânica. Devido ao baixo preço desses resíduos, seu valor económico é inferior ao custo de sua colecta, transporte e processamento. No entanto, quando esses resíduos são usados na incineração, eles se tornam materiais valiosos. A incineração de resíduos agrícolas para geração de energia é chamada de gaseificação. Este processo é realizado em câmara fechada e, como subproduto do processo, são geradas cinzas. Alguns dos resíduos utilizados são arroz e casca de arroz, bagaço de cana e serragem de madeira. Eles são caracterizados por baixo teor inorgânico e alto teor de carbono. A composição das cinzas produzidas, bem como a sua origem, depende da temperatura e duração da incineração e por isso têm propriedades e aplicações únicas (Aja & Al-Kayiem, 2014; Aprianti *et al.*, 2015; Asadullah, 2014).

Cinza de Casca de Arroz (RHA): A casca de arroz é extraordinariamente rica em cinzas em comparação com outros combustíveis de biomassa, variando de 5 a 30%. A cinza é 92-95% de sílica, altamente porosa e leve, com uma área de superfície externa (Babaso & Sharanagouda, 2017; Ettah *et al.*, 2018; Moayedi *et al.*, 2019; Prasad *et al.*, 2001). A temperatura ideal para produzir RHA está entre 600 a 700 °C. A sílica nas cinzas sofre transformações estruturais dependendo de condições como tempo e temperatura de combustão. De 500 a 700 °C forma-se cinza amorfa e a uma temperatura superior a esta forma-se cinza cristalina. Esses tipos de sílica têm propriedades diferentes e é importante produzir cinzas com a especificação correcta para o uso final específico (Ettah *et al.*, 2018). A composição química da casca de arroz varia de uma amostra para outra devido às diferenças no tipo de arroz, ano de cultivo, clima e condições geográficas (Habeeb & Mahmud, 2010). Existem vários factores que afectam as propriedades das cinzas, como condições de incineração (temperatura e duração), taxa de aquecimento, técnica de queima (Babaso & Sharanagouda, 2017)

Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA): Quando o caldo da cana-de-açúcar é extraído, uma grande quantidade de bagaço húmido é produzida; aproximadamente 30% a 40% em peso

da cana colhida. O bagaço obtido, tem composição química composta por celulose (45%-55%), hemicelulose (20-25%), lignina (18-24%) e cinzas (1%-4%) (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022). O bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo agrícola que pode ser transformado por incineração em material substituto do cimento para diversos fins de cimentação. A queima do bagaço na temperatura de 600 – 700°C produz sílica amorfa, que eventualmente resulta em sua reactividade pozzolânica substancial. A cinza do bagaço contém grandes quantidades de sílica amorfa e óxidos de alumínio, necessários para que um material seja pozzolânico (Amin *et al.*, 2020). As propriedades físicas e composições do SCBA dependem de vários factores, como variedades de cana-de-açúcar, crescimento, temperatura de combustão, duração da combustão, pureza do bagaço, local de colecta das cinzas do bagaço, tipo de resfriamento, equipamento da caldeira, métodos de colecta das cinzas do bagaço e finura das cinzas. Devido à presença de partículas de carbono leves, porosas e fibrosas, a área de superfície específica (145 m²/kg) e a gravidade específica (1,91) do SCBA bruto são relativamente baixas. A área de superfície específica e a gravidade específica variam com a temperatura de queima, pois a composição e a morfologia do SCBA mudam com a temperatura de queima (Xu *et al.*, 2018).

Cinza de madeira (WA): é um resíduo inorgânico gerado pela combustão da madeira (serragem, casca, galhos e outros), principalmente para produção de energia eléctrica. A temperatura na qual a madeira é calcinada varia entre 400°C e 1100°C (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022). Cinza de resíduo de madeira (WWA) consiste em 25.4% de partículas finas, que são menores que 75 µm. As cinzas de madeira apresentam uma área superficial específica relativamente alta que proporciona boa adsorção. A gravidade específica de WWA é 2.41, diâmetro médio de partícula d₅₀ (mm) é 0.223, densidade aparente (kg/m³) é 663 – 997 e área de superfície específica (m²/kg) é 4200 – 100,600. Um aumento no tamanho das partículas aumenta as concentrações de alumínio, arsénio, bário e cobre e diminui as concentrações de boro, cádmio, manganês, chumbo, zinco, potássio, magnésio e cálcio (Martínez-García *et al.*, 2022).

A combustão da madeira produz cinzas altamente alcalinas (o pH varia de 9 a 12). O rendimento de cinzas diminui aproximadamente para 45% com um aumento na temperatura de queima de 538°C para 1093°C. O teor de metal nas cinzas aumenta com o aumento da

temperatura de queima. Com o aumento da temperatura de queima, elementos como cálcio, ferro, magnésio, manganês e fósforo aumentam e elementos como zinco, potássio e sódio diminuem. A alcalinidade de WWA depende do conteúdo de carbonato, bicarbonato e hidróxido nele. A composição do WWA também varia durante o armazenamento e sob diferentes condições ambientais, pois o dióxido de carbono e a humidade reagem com o WWA para formar carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Um aumento na concentração de potássio, sódio e manganês aumenta linearmente com a concentração de cinzas (Martínez-García *et al.*, 2022).

Borra activada de papel (APS): é gerada pela indústria papelreira utilizando papel reciclado como matéria-prima. Quando seco, esse lodo (35%-40% de humidade) é composto por 30% de matéria orgânica, 35% de calcita e 20% de caulinita. Para activar esse resíduo e eliminar toda a matéria orgânica (80-90% de redução), é necessário calciná-lo a uma temperatura entre 650°C e 700°C por duas horas. O produto obtido apresenta partículas menores que 90 µm com brilho superior a 90%. A composição química dessa lama activada depende das condições de activação, da natureza do papel reciclado e de sua composição química. Este resíduo constitui uma fonte alternativa de meta caulinita e é composto principalmente por 30% de sílica, 30% de cal, 18% de alumina e <5% de magnésio (Becerra-Duitama & Rojas-Avellaneda, 2022; García *et al.*, 2008; Kaur *et al.*, 2020).

2.3.3. Utilização de Materiais Pozolânicos na Construção Civil

Pozolanas podem ser usadas para substituir uma porção significativa de cimento em uma mistura de concreto, razão pela qual representam uma potencial fonte de material barato de construção, pois, para além de serem eficazes na redução do calor de hidratação da argamassa, o que melhora sua trabalhabilidade e durabilidade, também podem melhorar a resistência do concreto e da argamassa tanto ao ataque de sulfato quanto à reação álcali-sílica, o que as torna benéficas para uso em grandes projectos de concreto, como pontes e represas (Al-Chaar *et al.*, 2013). Na Tabela 2 estão destacadas algumas pozolanas em misturas de cimento.

Tabela 2: Pozolanas em misturas de Cimento

Pozolana	Destaque
Escória vulcânica	A incorporação de escória vulcânica em argamassa e concreto aumenta propriedades como durabilidade, permeabilidade ao cloreto e resistência à compressão. Essas propriedades aumentam com a idade de cura e diminuem com o teor de escória vulcânica na mistura. Essa diminuição é causada pelo fato de que as reações pozolânicas são retardadas à temperatura ambiente
Cinzas volantes	A adição de cinzas volantes no concreto melhora a trabalhabilidade, reduz o escoamento e a retração linear, diminui a quantidade de ar na mistura e o calor de hidratação. Além disso, a resistência à compressão aumenta com a idade de cura.
Escória de alto-forno	Aumenta a resistência à compressão e flexão em idades maduras. Isso depende, em grande parte, da finura e das percentagens usadas na mistura. Além disso, a porosidade diminui, aumentando a resistência ao ataque de sulfato e melhorando a durabilidade. A escória de alto-forno diminui o calor de hidratação, mas aumenta a densidade aparente.
Sílica activa	Aumenta a resistência à compressão em idades maduras, a resistência ao ataque ácido, a densidade e a durabilidade do concreto.
Metacaulino	O nível recomendado de metacaulino como substituto do cimento no concreto é entre 10% e 20%. Dentro dessas percentagens, maiores resistências à flexão e à compressão na mistura são alcançadas. Da mesma forma, a adição de metacaulino reduz a retração autógena e aumenta a resistência ao sulfato e o calor de hidratação
Cinzas de casca de arroz	Melhora a resistência à compressão, tração e flexão. Além disso, a cinza de casca de arroz reduz a retração autógena. Ela também diminui a difusão de ácidos na mistura. Os autores recomendam uma substituição de 20% de cimento para melhores resultados
Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	Aumenta a resistência à compressão em idades maduras, reduz a permeabilidade e aumenta a resistência ao ataque ácido. No entanto, ainda não foi estabelecido como isso afecta a durabilidade do concreto.
Cinza de madeira	A trabalhabilidade e a densidade aparente não são afetadas por essa substituição, mas, o desempenho mecânico é reduzido em até 45% em comparação às amostras de referência. No entanto, o cimento pode ser substituído por cinza de madeira, até 15%, sem afectar o desempenho das argamassas.

Fonte: Bacerra-Duitama e Rojas-Avellaneda (2022)

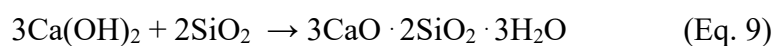
2.3.4. Reacção Pozolânica

A reacção pozolânica envolve dois parâmetros principais: o consumo máximo de hidróxido de cálcio e a taxa da reacção. Estes parâmetros dependem principalmente da natureza do material pozolânico, isto é, da composição química e mineralógica das pozolanas e do tamanho de suas partículas (Kramar & Ducman, 2018; Tashima *et al.*, 2014). A taxa de combinação de cal aumenta na presença de sulfatos como gesso e Na_2SO_4 e outros produtos químicos como CaCl_2 . Um aumento da área específica e/ou diminuição no tamanho da partícula irá expor uma superfície maior à reactividade intensificadora da reacção química. E, as estruturas amorfas

são mais reactivas do que as cristalinas, devido à maior mobilidade e localização superficial de seus átomos (Walker & Pavía, 2011).

Pozolanas não contêm cálcio suficiente para formar materiais cimentícios, a maioria contém uma grande quantidade de sílica que reage com hidróxido de cálcio, o produto de hidratação do cimento, formando um produto que desenvolve resistência, o silicato de cálcio hidratado (Ahmed *et al.*, 2019; Lilkov *et al.*, 2011).

A equação da reacção entre Ca(OH)_2 e SiO_2 , também conhecida como a Equação 9 da reacção pozolânica é mostrada a seguir:



As pozolanas participam de uma reacção cimentícia com hidróxido de cálcio (ou seja, cal) e outros álcalis. Elas são eficazes na redução do calor de hidratação, o que melhora a trabalhabilidade e a durabilidade da argamassa, além disso, também podem melhorar a resistência do concreto e da argamassa, tanto ao ataque de sulfato quanto à reacção álcali-sílica (Al-Chaar *et al.*, 2013; Klemm *et al.*, 2022).

É geralmente reconhecido que a reacção pozolânica é a reactividade dos materiais cimentícios suplementares ao Ca(OH)_2 liberto pela hidratação do cimento Portland. Assim, uma medida do consumo de Ca(OH)_2 pode fornecer uma rota alternativa para a determinação da pozolanicidade (Yang *et al.*, 2011).

Pozolanas quando usadas em quantidades adequadas, modificam certas propriedades de argamassas e concretos frescos e endurecidos, tais como (Abdullah *et al.*, 2012):

- Redução do calor de hidratação;
- Redução da reacção de agregado alcalino;
- Melhoramento da resistência ao ataque de sulfato em solos e água do mar;
- Melhoramento da extensibilidade;
- Menor susceptibilidade à dissolução e lixiviação;
- Melhoramento da trabalhabilidade;
- Menor custo.

2.3.5. Avaliação da Actividade Pozolânica

A actividade de uma pozolana refere-se tanto à sua capacidade de ligar a cal quanto à velocidade com que ocorre a reacção de ligação, portanto, abrange todas as reacções que ocorrem entre os componentes activos da pozolana, cal e água (Walker & Pavía, 2011). A actividade pozolânica é um índice da extensão da reacção cal-pozolana (Mostafa *et al.*, 2001). Os métodos de avaliação da actividade pozolânica são classificados em directos e indirectos.

Métodos directos avaliam o consumo de hidróxido de cálcio (CH) sob a reacção pozolânica, que pode ser medido por difracção de raios x (DRX), análise termogravimétrica (TGA) ou titulação química clássica (Donatello *et al.*, 2010a; Qian *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2020).

DRX: permite evidenciar os produtos formados e remanescentes após a cura das pastas de cimento/cinzas, através da sua caracterização mineralógica (Moon *et al.*, 2017; Parhizkar *et al.*, 2010);

TGA: permite determinar o teor de portlandite residual das pastas de cal/cinzas com base na perda de peso ao longo do seu intervalo de desidroxilação (400 – 500°C), comparando com o teor da pasta padrão (Kramar & Ducman, 2018; Parhizkar *et al.*, 2010; Roszczynialski, 2002);

Teste Chapelle: método que envolve titulação para avaliar a actividade pozolânica do material baseando-se no consumo de Ca(OH)_2 em meio saturado de água (Ferraz *et al.*, 2015).

Teste Fratini: método de titulação que permite determinar as concentrações dos iões Ca^{2+} e OH^- dissolvidos em uma solução contendo CEM-I e a pozolana de teste (Donatello *et al.*, 2010a; Ferraz *et al.*, 2015).

Métodos indirectos medem as diferenças das propriedades físicas entre a amostra de teste e a amostra de controlo. Estes métodos utilizam a resistência à compressão das argamassas como parâmetro para avaliação da actividade pozolânica e são amplamente empregados devido ao seu baixo custo, embora não forneçam informações químicas sobre a reacção pozolânica (Qian *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2020).

2.4. Cinzas de Resíduos Vegetais como Pozolanas

O princípio por detrás da reacção pozolânica dos resíduos agrícolas é a reacção do SiO_2 reactivo presente nas cinzas com o hidróxido de cálcio formado durante a reacção do cimento, para formar mais hidratos. Isso possibilita a substituição do cimento pelo material pozolânico. As taxas de substituição normais são de até 30% de cimento (em peso), embora esses dados dependem do tipo e das características da pozolana (Martirena & Monzó, 2018).

A sílica (SiO_2) em resíduos agrícolas vem da concentração através da queima. Existem plantas que são conhecidas por apresentar sílica amorfa em sua estrutura. Os resíduos agrícolas mais utilizados são casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar ou palha (folhas da cana-de-açúcar que são removidas como parte do processamento industrial) e, em menor medida, outros como casca de trigo e folhas de bambu (Martirena & Monzó, 2018; Paul *et al.*, 2019).

As cinzas agrícolas apresentam boa reactividade quando a sílica ocorre na forma amorfa. Isso acontece se o material for queimado em temperaturas em torno de 600 – 700 °C, onde a sílica permanece amorfa. Se a temperatura for superior a 700 °C, a sílica passa a ocorrer na forma cristalina cuja composição de fases depende da temperatura de queima e do regime de arrefecimento (Martirena & Monzó, 2018).

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são escolhidos com base em suas características químicas favoráveis, contendo quantidades suficientes de minerais aluminossilicatos, com potencial para boa actividade pozolânica combinando com o produto de hidratação do cimento (Ca(OH)_2) em um ambiente alcalino adequado (Farrant *et al.*, 2022).

Em geral, as cinzas de biomassa tendem a afectar a trabalhabilidade da argamassa, aumentando a demanda hídrica da mistura para manter a mesma consistência. Este comportamento pode ser explicado pelas características físicas e morfológicas das cinzas de biomassa. Devido à sua alta finura e porosidade, a incorporação de cinzas gera um aumento na quantidade de água necessária para humedecer as partículas. Além disso, algumas morfologias de partículas tendem a formar aglomerados quando em contacto com a água, prendendo-a entre as partículas e, consequentemente, diminuindo o teor de água livre na mistura (Bonfim & de Paula, 2021).

No entanto, as cinzas de biomassa podem trazer alguns benefícios para a argamassa no estado endurecido, desempenhando um papel activo como material pozolânico, ou inerte, actuando como pontos de nucleação e preenchimento de vazios (efeito de enchimento). A reacção da sílica amorfa (SiO_2) encontrada nas cinzas com o hidróxido de cálcio formado durante a reacção de hidratação do cimento Portland, ou na forma de cal hidratada adicionada à mistura, dá origem aos cristais de C-S-H formando uma matriz de ligação contínua com uma grande superfície. É o principal responsável por desenvolver resistência e reduzir a permeabilidade da pasta de cimento (Bonfim & de Paula, 2021).

2.4.1. Características das Plantas em Estudo

2.4.1.1. *Phragmites Australis*

Phragmites australis (Caniço da água) – ordem *Cyperales*, classe *Liliopsida*, família *Poaceae*, género *Phragmites*, espécie *Australis* (Jebali *et al.*, 2016) – é uma planta perene, com até 5 m de altura (Figura 2), invasiva em ambientes pantanosos, nativa da América do Norte e amplamente distribuída no mundo (Köbbing *et al.*, 2013; Mazur *et al.*, 2014; Saltonstall & Meyerson, 2016; Shaltout *et al.*, 2006).



Figura 2: *Phragmites Australis*

Phragmites Australis, é uma espécie com alta plasticidade ecológica, que cresce em solos com diferentes pH, fertilidade, textura e tolera moderada salinidade (Shaltout *et al.*, 2006).

2.4.1.2. *Pistia Stratiotes*

Pistia stratiotes (alface d'água), pertencente à família *Araceae*, é uma planta aquática que possui extenso sistema radicular e alta taxa de propagação vegetativa (Figura 3). Esta estrutura morfológica torna a planta como uma das ervas daninhas notórias. É uma erva perene que se distribui amplamente em regiões tropicais e subtropicais, flutua gregariamente na água estagnada e cobre completamente grandes áreas de superfície da água (Cicero *et al.*, 2007; Galal & Farahat, 2015; Tripathi *et al.*, 2010).



Figura 3: *Pistia Stratiotes*

A alface d'água é reconhecida como uma das mais distribuídas e piores ervas daninhas aquáticas do mundo, que forma extensos tapetes capazes de bloquear canais de navegação, impedir o fluxo de água em canais de irrigação e controle de enchentes e interromper a geração de energia hidroelétrica. O crescimento rigoroso desta planta muitas vezes leva a reduções drásticas na diversidade de plantas aquáticas nativas e comunidades de animais (Cicero *et al.*, 2007; Galal & Farahat, 2015; Tripathi *et al.*, 2010; Živković *et al.*, 2019).

2.4.1.3. *Eichhornia Azurea*

Eichhornia azurea (Jacinto da água) é uma macrófita aquática flutuante, da família *Pontederiaceae*, fundamental para o equilíbrio de ecossistemas naturais (Figura 4). Esta planta fica enraizada no sedimento dos rio ou lagos e os seus longos caules flutuantes (até 8 m) desenvolvem-se a poucos centímetros abaixo da superfície da água, formando aglomerados densos que podem atingir mais de 50 m de largura. Possui raízes bem desenvolvidas aderidas

aos seus nós, permanecendo em contacto com o meio hídrico. Sua biomassa expande com facilidade e causa bloqueio de canais e rios. Portanto, caules e raízes de *E. azurea* conferem complexidade estrutural adicional às regiões litorâneas (Agostinho *et al.*, 2007; Silva & Fortuna, 2021).



Figura 4: *Eichhornia Azurea*

Essa macrófita é caracterizada pela grande plasticidade morfológica de suas raízes secundárias submersas, que mudam morfológicamente dependendo das concentrações de nutrientes da água (principalmente fósforo). *E. azurea* apresenta um alto grau de heterogeneidade estrutural devido às suas raízes submersas, que podem fornecer uma grande diversidade de abrigos subaquáticos para macroinvertebrados e peixes. O comprimento das raízes pode chegar até 1 m, reduzindo assim o espaço livre para a fauna aquática e chegando a colonizar regiões litorâneas em lagos de várzea (Padial *et al.*, 2009).

CAPÍTULO III: METODOLOGIA

A presente pesquisa consistiu nas seguintes etapas: colecta e pré-tratamento das amostras, produção das cinzas e determinação da actividade pozolânica.

3.1. Colecta e Pré-tratamento das amostras

As amostras foram colhidas na cidade de Maputo, concretamente nos bairros de Costa de Sol (*Phragmites australis*) e Infulene (*Eichhornia azurea* e *Pistia stratiotes*), lavadas (para as últimas duas amostras) e submetidas à secagem a temperatura ambiente durante duas semanas conforme ilustra a Figura 5.

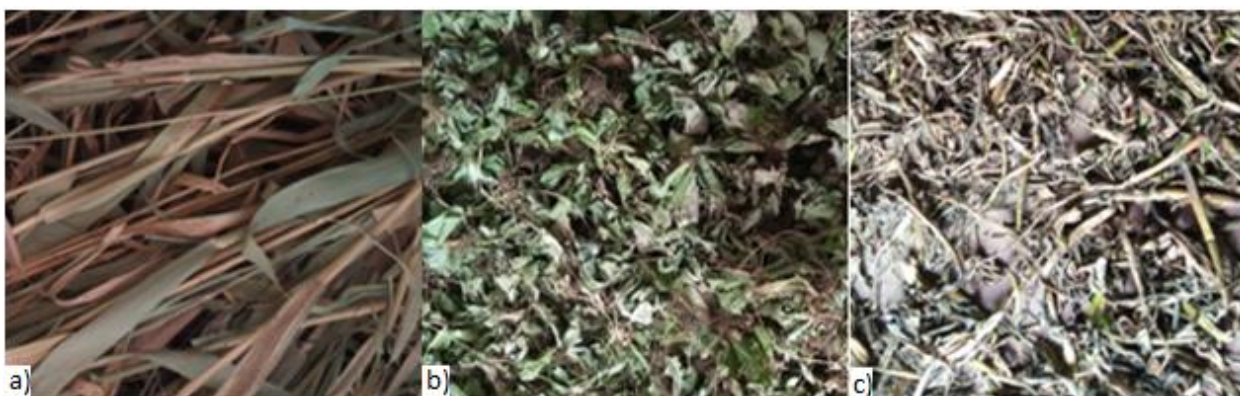


Figura 5: Secagem das amostras à temperatura ambiente, (a)- *Phragmites australis*, (b) – *Pistia Stratiotes* e (c) – *Eichhornia azurea*

3.2. Produção da Cinzas

Conforme ilustra a Figura 6, as plantas secas foram submetidas à pré-incineração à temperatura não controlada, a fim de eliminar parcialmente a matéria orgânica. De seguida, as cinzas foram calcinadas em uma mufla à temperatura de 500 – 700 °C (para CPA a temperatura inicial foi de 400°C), durante intervalos de tempo variados entre as duas e a quatro horas. Finalmente, foram moídas em um almofariz e passadas por um crivo de 106 µm de abertura para uniformização da granulometria, similarmente descrito por Bahurudeen e Santhanam (2015); Cordeiro e Sales (2015).

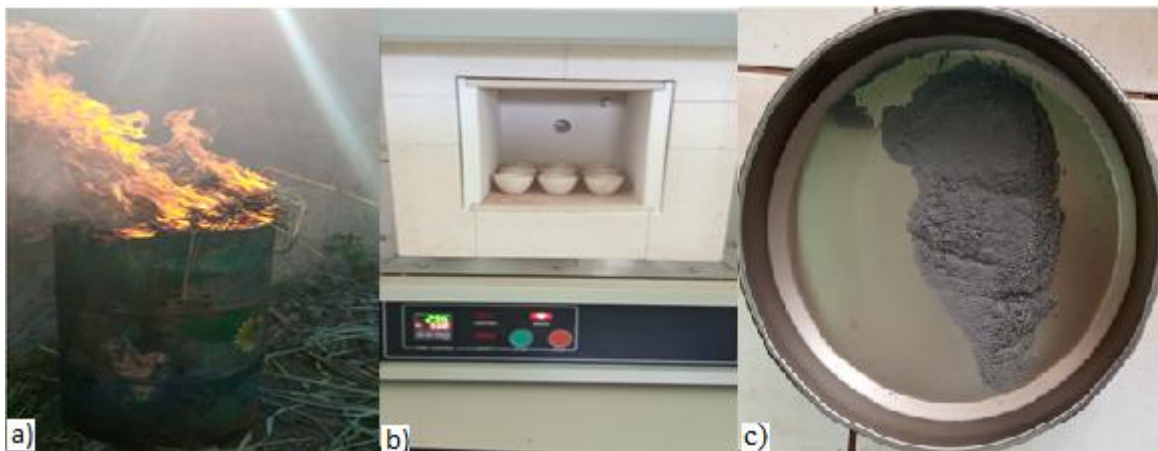


Figura 6: Produção das cinzas, a)- pré-incineração das amostras à temperatura não controlada; b)- calcinação das cinzas à temperatura controlada; c) cinzas moídas e passadas por um crivo de 106 µm de abertura.

O pré-tratamento das amostras assim como a produção das cinzas foram realizados baseando-se nos procedimentos descritos por Cordeiro *et al.*, 2017; Ojewumi *et al.*, 2014; Soares *et al.*, 2017.

3.3. Determinação da Actividade Pozolânica

A actividade pozolânica das cinzas foi determinada pela medição do Índice de Actividade Pozolânica (IAP) das argamassas e por meio de testes *Frattini* e *Chapelle* (Pontes *et al.*, 2013).

3.3.1. Resistência à Compressão e Índice de Actividade Pozolânica (IAP)

O procedimento seguiu a norma (EN 196-1, 2002). As argamassas de controlo foram preparadas misturando 1350 g de areia, 450 g de cimento Portland e 225 g de água. As argamassas misturadas foram preparadas de acordo com (EN 450-1, 2012; Kramar & Ducman, 2018; Pinheiro *et al.*, 2023; Pontes *et al.*, 2013), onde 25% da massa de cimento foi substituída por pozolana (Tabela 3). As argamassas foram moldadas em prismas de 40 x 40 x 160 mm. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas e colocados em tanque de cura até 7, 14 e 28 dias após a moldagem. Posteriormente, foram testados a resistência à compressão nos dias anteriormente mencionados, conforme mostra a Figura 7.



Figura 7: Ensaio de resistência à compressão.

O índice de actividade pozolânica foi determinado em argamassas com 28 dias de cura, de acordo com a Equação 10 (Kramar & Ducman, 2018).

$$IAP = \frac{A}{B} \times 100 \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde A é a resistência à compressão da argamassa pozolana (MPa) e B é a resistência à compressão da argamassa de controlo (MPa).

Tabela 3: Preparação das argamassas.

Cimento (g)	Teor de cinza		Areia (g)	Água (mL)
	(%)	(g)		
450	0	0	1350	225
337.5	25	112.5	1350	225

Para Pinheiro *et al.* (2023), o índice de actividade pozolânica consiste em fazer duas argamassas diferentes e sua posterior comparação com relação à sua resistência à compressão, sendo uma das argamassas de referência e a outra com 25% de substituição do cimento por material pozolânico.

A norma EN 450-1 (2012) estabelece que o índice de actividade pozolânica é a razão entre a resistência à compressão da argamassa padrão preparada com 75% de cimento e 25% de cinza, e a resistência à compressão da argamassa padrão preparada com 100% de cimento, quando testadas na mesma idade de cura.

Kramar e Ducman (2018) definem o índice de actividade pozolânica como a razão entre a resistência à compressão da argamassa contendo 25% de cinza como um material cimentício suplementar e aquela de uma argamassa de controlo, e não deve ser inferior a 75% e 85% após 28 e 90 dias, respectivamente.

3.3.2. Teste Frattini

O teste foi feito de acordo com a norma (BS EN 196-5, 2011). Vinte (20) gramas de cada amostra foram preparados misturando 80% de Cimento Portland (16.0 g) e 20% de cinza (4.0 g).

As misturas foram acondicionadas em um frasco plástico lacrado com 100 mL de água destilada livre de CO₂ (ferveu-se a água destilada durante 1 hora) e levadas à estufa a 40°C durante 8 dias. Após a passagem deste período, as amostras foram filtradas e tituladas 25 mL de cada solução (A titulação foi feita em duas etapas): inicialmente, foram tituladas com HCl 0.1M usando o indicador alaranjado de metil para determinar a concentração de OH⁻, de seguida, foram ajustados o pH de cada solução a 12.5 ± 0.2 e tituladas com uma solução de EDTA 0.03M usando indicador Negro de *Eriocromo T* para determinar a concentração de CaO (Figura 8). Os valores de [OH⁻] e [CaO] foram determinados de acordo com as Equações 11 e 12.

$$[\text{OH}^-] = 4 \times V_1 \times f_1 \quad (\text{Eq. 11})$$

$$[\text{CaO}] = 1.2 \times V_2 \times f_2 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde V₁ e V₂ são os volumes de HCl e EDTA gastos na titulação, f₁ (= 1,07) e f₂ (= 0,96) são os factores de correcção de HCl 0.1 M e EDTA 0.03M, respectivamente.

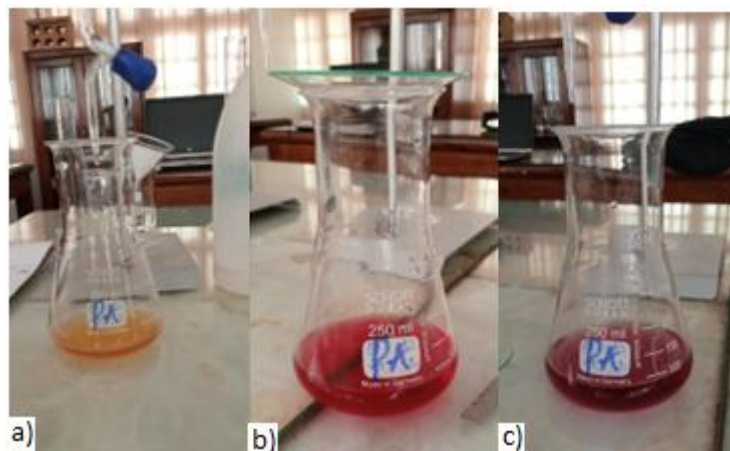


Figura 8: Teste de Frattini – a) antes da titulação, b) primeira titulação, c) segunda titulação

Com os valores obtidos foi traçado um Gráfico da concentração de CaO (mmol/L) versus concentração de OH⁻ (mmol/L). E a actividade pozolânica das cinzas foi definida por meio da curva de solubilidade de cal, traçada a partir da Equação 13, onde a região inferior da curva é considerada pozolânica, e a superior, não (Baki *et al.*, 2020).

$$[CaO]_{Máx.} = \frac{350}{[OH^-] - 15} \quad (\text{Eq. 13})$$

3.3.3. Teste Chapelle

Para este ensaio foram seguidos os procedimentos descritos por Ferraz *et al.* (2015); Pontes *et al.* (2013); Quarcioni *et al.* (2015), onde mediu-se a redução do teor de Ca(OH)₂ causada pela reacção que este material experimenta com materiais siliciosos ou silicatos de alumínio presentes nas pozolanas. Neste caso, uma mistura de 2 g de CaO e 1 g de cinza foi colocada em um Erlenmeyer com 250 mL de água destilada descarbonizada e posta em banho-maria a 90°C durante 16 horas. Uma mistura de controlo foi feita nas mesmas condições, apenas com CaO. Uma mistura de 60 g de sacarose, com o mesmo volume de água (250 mL), foi adicionada a fim de dissolver o Ca(OH)₂ livre. A solução foi filtrada e titulada com HCl 0.1 M (Figura 9), e a quantidade de CaO (em mg) consumida foi determinada pela Equação 14:

$$m_{CaO} = 2x \frac{V_2 - V_1}{V_1} x \frac{74}{56} x 1000 \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde V_2 é o volume de titulação da mistura de controlo (CaO) e V_1 é o volume de titulação da mistura pozolânica (CaO + cinza).

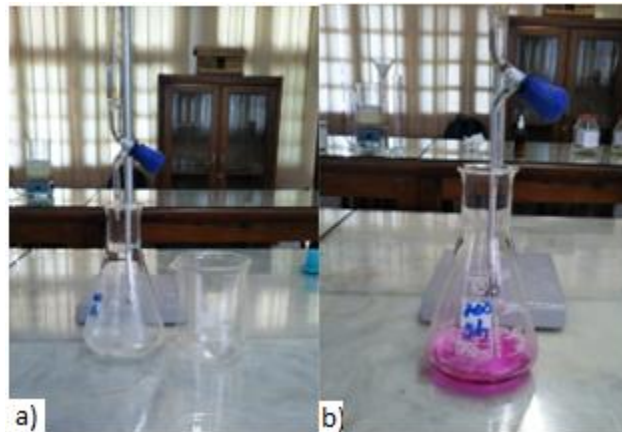


Figura 9: Teste Chapelle – antes (a) e depois (b) da titulação

CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.Otimização do processo de produção das cinzas

As cinzas das plantas em estudo foram calcinadas a diferentes temperaturas (500, 600 e 700 °C para CEA e CPS; 400, 450, 500, 600 e 700 °C para CPA) durante 2 a 4 horas. Para determinação da condição óptima de queima das cinzas, o método *Chapelle* foi usado a fim de verificar o nível de consumo de CaO pelas cinzas, nas diferentes temperaturas. A Figura 10, do consumo de CaO, mostra um máximo a 600 °C, para a CEA e CPS e a 500 °C para CPA.

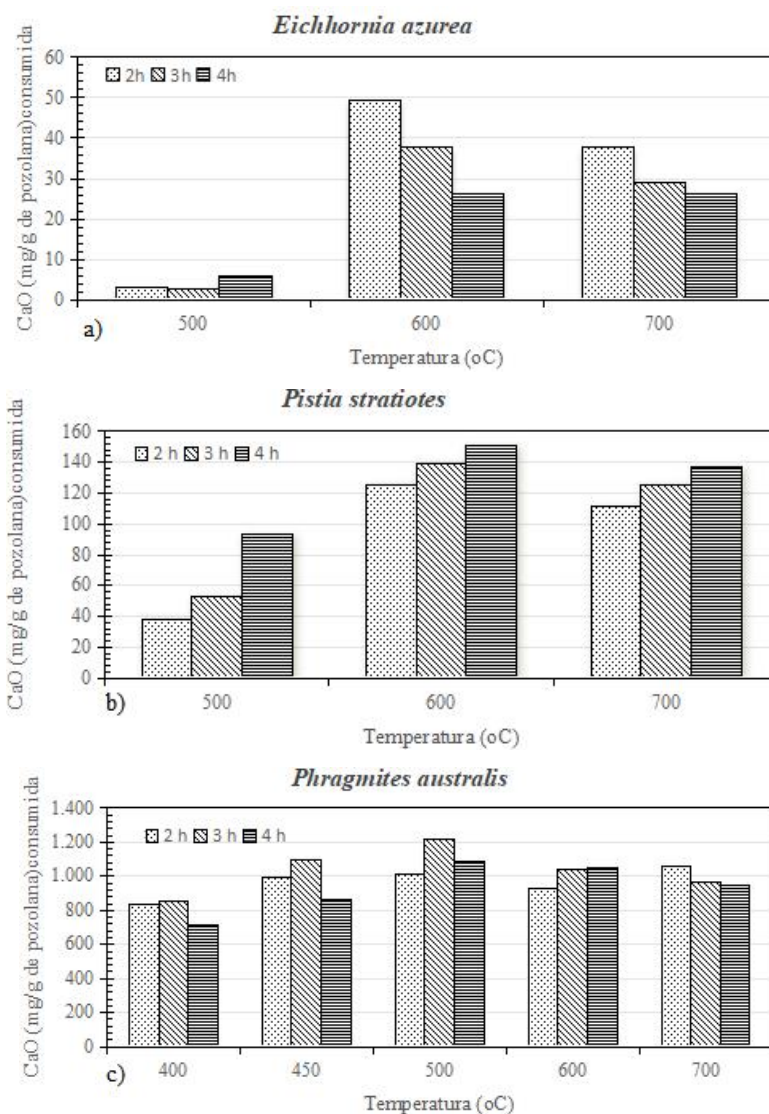


Figura 10: Teor de CaO consumido pelas cinzas de: a) EA; b) PS, e c) PA, em função da temperatura e tempo de queima.

O consumo mais elevado de CaO é observado nas cinzas produzidas após 2 horas para EA, 4 horas para a PS e 3 horas para a PA. Estas são as condições ótimas para a produção das cinzas destas plantas (Tabela 4):

Tabela 4: Condições ótimas para a produção de cinzas de PA, EA e PS com elevada actividade pozolânica.

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Eichhornia azurea	600	2
Pistia stratiotes	600	4
Phragmites australis	500	3

Condições similares de queima foram obtidas por Bie *et al.* (2015) e Cordeiro *et al.* (2009). Cordeiro *et al.* (2010) citado por Aburili *et al.* (2015), num estudo sobre actividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em concreto, afirmam que a queima de bagaço entre 400 e 600 °C produz o aumento do Índice de Actividade Pozolânica devido à perda de carbono durante o processo de queima.

4.2. Composição Química das Cinzas

Num estudo prévio realizado sobre as mesmas cinzas foi determinada a composição química por meio de Fluorescência de Raios - X, cujos resultados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química das cinzas em estudo por XRF.

Component (%)	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Cl ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	ZnO	Cr ₂ O ₃	MnO	LOI
CPA	56.98	16.82	7.65		5.97	4.95	3.45	1.46	0.97	0.39	0.35	0.25	0.78
CPS	26.89	17.50	9.31	4.94	12.99	13.89	6.14	4.94	0.84	0.10	0.16	1.21	1.51
CEA	16.47	18.76	8.66	...	16.62	16.75	4.79	15.74	0.79	0.14	0.19	0.34	0.76

CPA – Cinzas de *Phragmites australis*; CPS – Cinzas de *Pistia stratiotes*; CEA – Cinzas de *Eichhornia azurea*

As exigências químicas estabelecidas pela norma ASTM C618-05 (2012) indicam que a soma dos teores de alumina, sílica e óxido de ferro sejam superiores a 50% para a classe das pozolanas. Logo, as cinzas de *Phragmites australis* atendem a estes requisitos visto que o somatório dos teores destes óxidos corresponde a 64,63%, diferentemente das cinzas de *Eichhornia azurea* e *Pistia stratiotes* onde o total do teor dos óxidos referenciados encontra-se abaixo do limite estabelecido.

Todas as cinzas apresentam teores elevados de álcalis (K_2O) que variam entre 16,82 e 18,76%, que pela norma ASTM C618-05 (2012) o limite máximo é 1,5% em relação a N_2O correspondente a 2,27% em relação a K_2O . A presença acentuada destes álcalis podem causar pode causar reacção álcali-sílica que tem efeitos prejudiciais no concreto, como o início de rachaduras na matriz da pasta, expansão do volume, desenvolvimento de tensão e degradação das propriedades mecânicas do concreto (Panesar, 2019).

Quanto à perda ao fogo, para todas as cinzas o teor encontra-se abaixo do limite máximo recomendado pela norma anteriormente referenciada (6,0%), o que corresponde ao baixo teor de matéria orgânica (Panesar, 2019).

4.3. Resultados da Resistência à Compressão e Índice de Actividade Pozolânica

Na Figura 11 observa-se um aumento significativo de resistência à compressão nos primeiros 7 dias de cura e um aumento lento nos dias posteriores, em todas as amostras incluindo a argamassa de controlo. Ainda na mesma Figura, observa-se uma resistência à compressão nas amostras de PA, aos 14 e 28 dias de cura, ligeiramente acima da argamassa de controlo, com valores 45.6 e 47.9 MPa, respectivamente.

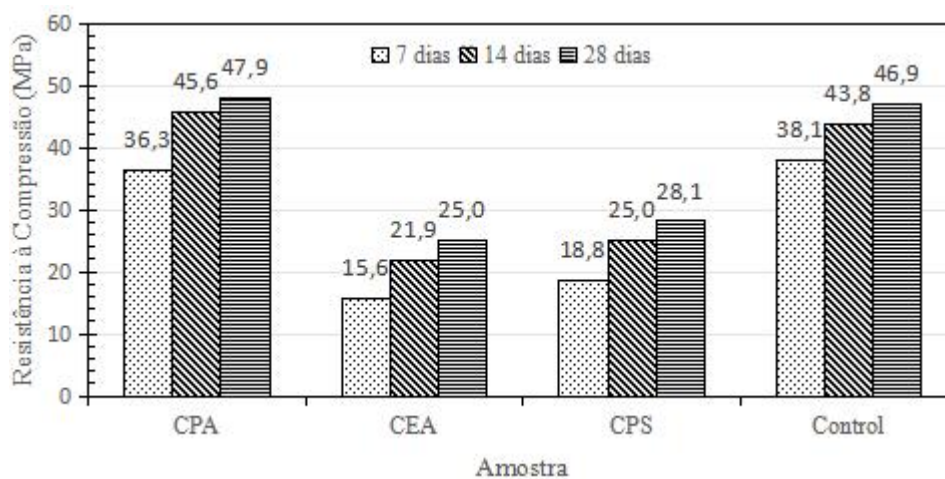


Figura 11: Resistência à compressão das argamassas com 25% de cinzas, aos 7, 14 e 28 dias de cura.

De acordo com Baghchesaraei e Baghchesaraei (2012), quando a água é misturada com o cimento Portland, os produtos de hidratação formam-se em poucas horas e endurecem em um período de semanas, e enquanto houver água disponível para hidratação contínua a resistência

continua a aumentar lentamente. A Tabela 5, da composição química das cinzas em estudo, mostra um teor elevado de SiO_2 para as cinzas de PA, o que justifica a maior resistência à compressão das argamassas contendo estas cinzas diferentemente das outras, visto que a sílica reage com hidróxido de cálcio, o produto de hidratação do cimento, formando um produto que desenvolve resistência, o silicato de cálcio hidratado (Ahmed *et al.*, 2019; Lilkov *et al.*, 2011). Olhando nos resultados, a tendência de formação deste produto, seguiu a ordem: PA > Control > PS > EA.

O IAP é ilustrado na Figura 12, onde o da cinza de PA encontra-se acima de 75% (102%), ao contrário das duas outras amostras, que os índices encontram-se abaixo do valor indicado.

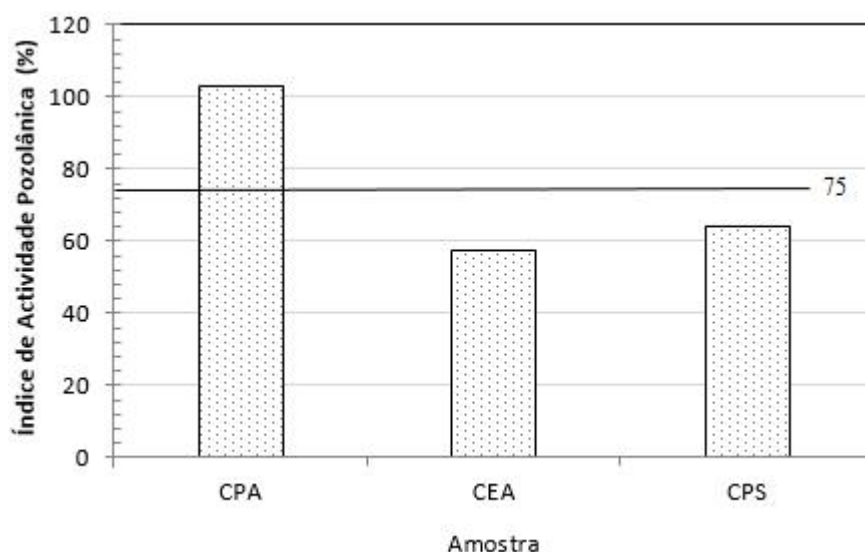


Figura 12: Índice de Actividade Pozolânica das argamassas com 28 dias de cura.

Para que uma amostra seja considerada pozolana, o seu IAP não deve ser inferior a 75% em relação à argamassa de controlo após 28 dias de cura das argamassas (Cordeiro *et al.*, 2009; Kramar & Ducman, 2018; Pontes *et al.*, 2013).

4.4. Resultados do Teste Frattini

A Figura 13 apresenta a curva de solubilidade da cal saturada, que é predefinida de forma única e demarca as áreas pozolânicas e não pozolânicas de acordo com o teste de *Frattini* na norma EN 196-5. Os resultados dos testes abaixo desta curva indicam a remoção de Ca^{2+} da solução, que é atribuída à actividade pozolânica. Os resultados situados sobre ou acima da linha correspondem a nenhuma actividade pozolânica (Parhizkar *et al.*, 2010). Pode-se ver na Figura 8 que apenas as cinzas de PA têm actividade pozolânica.

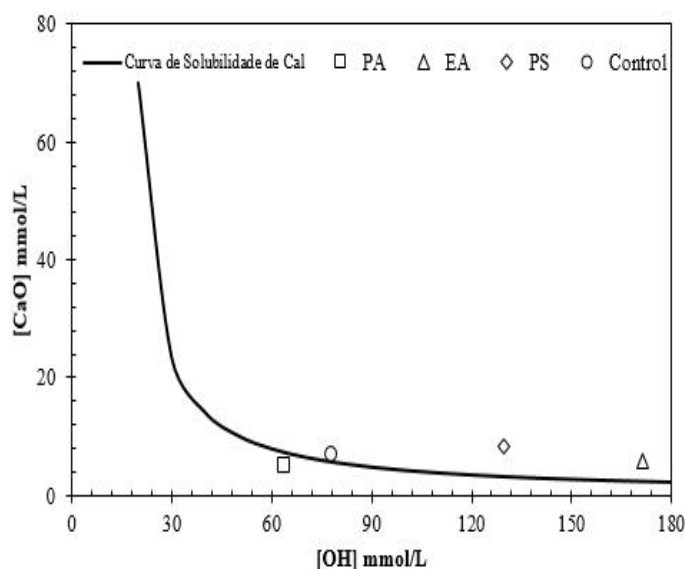


Figura 13: Teste Frattini para amostras com 8 dias de cura a 40° C.

De modo a sustentar os resultados do teste *Frattini*, a percentagem de remoção de CaO foi determinada conforme os procedimentos descritos por Donatello *et al.* (2010) e Jurić *et al.* (2021), onde a concentração de cálcio da amostra $[\text{CaO}]$ é comparada com o máximo teórico $[\text{CaO}]$ e o resultado quantificado como a diferença entre os dois valores que finalmente é expresso como uma percentagem do máximo teórico removido. A Tabela 6 ilustra as concentrações determinadas para $[\text{OH}^-]$ e $[\text{CaO}]$ nas soluções de amostra após 8 dias, juntamente com o máximo teórico de CaO calculado e a redução de CaO.

Tabela 6: Resultados de teste *Frattini* após 8 dias.

Material	Concentration (mmol/L)			CaO reduzido (%)
	OH ⁻	CaO	CaO* _{max.}	
control	78.32	6.80	5.53	-
PA	63.77	4.84	7.18	32.59
EA	171.20	8.41	2.24	-
PS	129.68	5.99	3.05	-

*teórico

O material de controlo, EA e PS, apresenta valores de [CaO] máximo teórico calculado menores que [CaO] medido, razão pela qual não foram calculados os valores de %[CaO] reduzida. Estes resultados revelam a não pozolanicidade dos materiais. Similarmente ao observado nos resultados de IAP, a maior reactividade nos testes de Frattini foi detectada nas cinzas de PA.

4.5. Resultados do Teste Chapelle

A Figura 14 mostra resultados obtidos de acordo com o teste *Chapelle*. Neste teste, para que o material seja considerado pozolânico, a quantidade de CaO consumida deve estar acima de 660 mg/ 1 g de cinza (Pontes *et al.*, 2013; Quarcioni *et al.*, 2015).

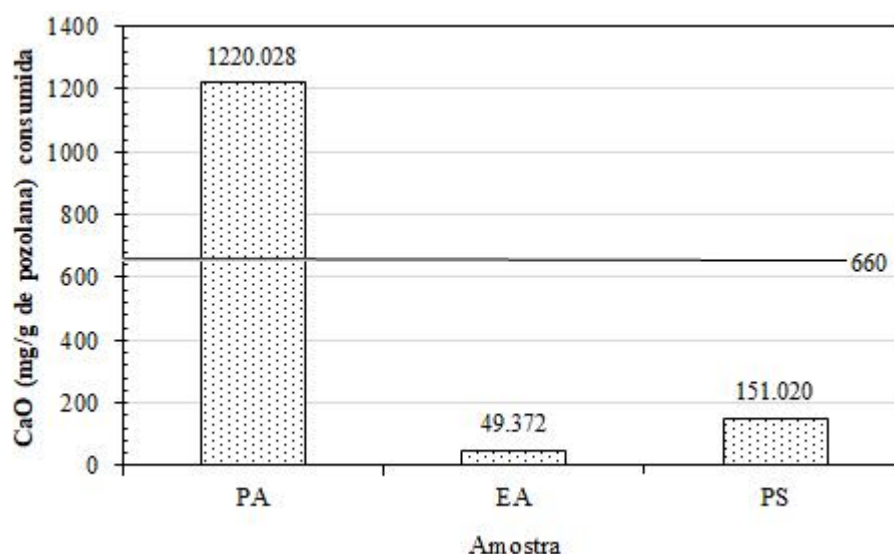


Figura 14: Quantidade de CaO consumida por 1g de cada amostra.

Os resultados obtidos (Figura 14) mostram que apenas as cinzas de PA são consideradas pozolana. Esta afirmação está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, onde a reactividade das cinzas testadas por estes métodos, seguiu a ordem: PA > PS > EA. Em determinações da actividade pozolânica de materiais envolvendo cinzas de resíduos agrícolas, Pontes *et al.* (2013) obtiveram um máximo de consumo de CaO de 620 mg/g de cinza de casca de arroz; Quarcioni *et al.* (2015) 867 mg/g de cinza de casca de arroz e 468 mg/g de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e, Hernández-Toledo *et al.* (2017) 850 mg/g de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, portanto, os resultados variam de acordo com as origens dos materiais.

4.6. Correlação entre os Métodos

As Figuras 15-17 mostram claramente que existe uma correlação entre os resultados obtidos em diferentes métodos usados nesta pesquisa, com mais destaque entre os resultados de IAP e teste *Chapelle* ($R^2 = 0.9931$), onde a ordem de sequência de reactividade das cinzas testadas por estes métodos são muito semelhantes. Portanto, os métodos de teste de *Fratinni*, teste de *Chapelle* e IAP podem ser usados para avaliar o grau de reactividade de pozolanas.

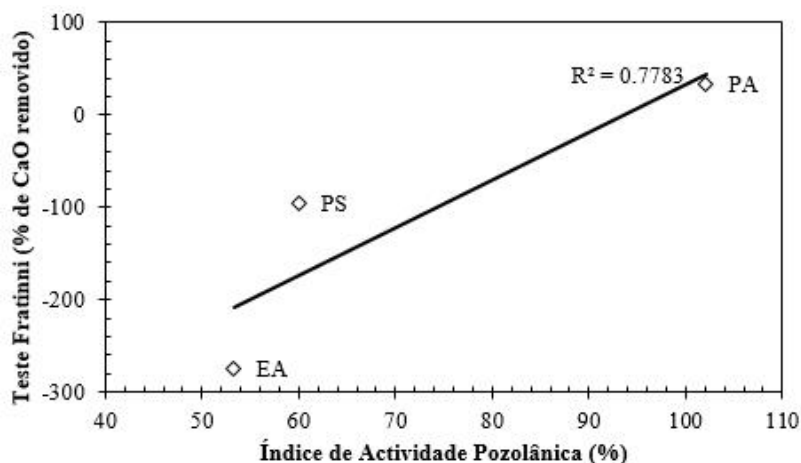


Figura 15: Correlação entre os resultados de IAP e teste Fratinni.

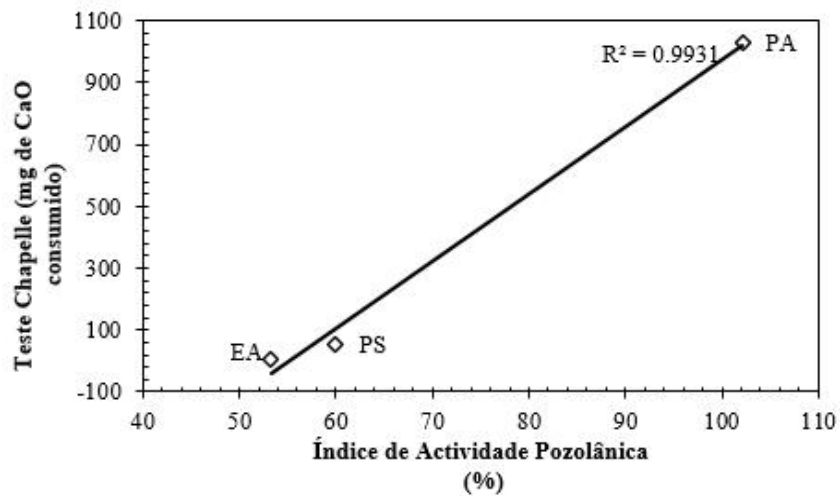


Figura 16: Correlação entre os resultados de IAP e teste *Chapelle*.

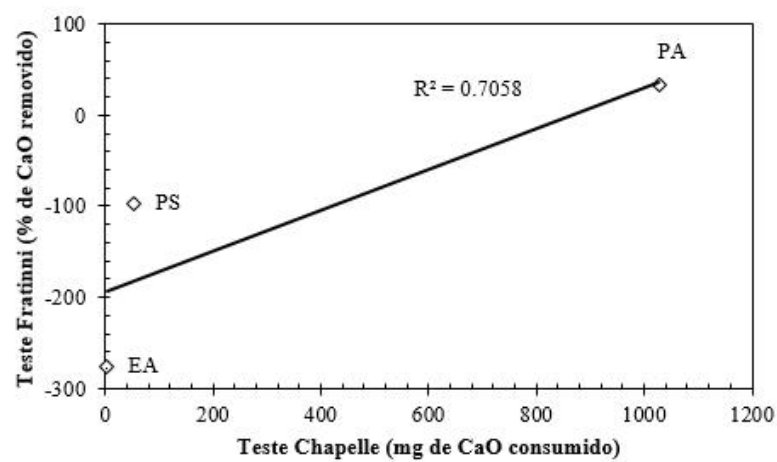


Figura 17: Correlação entre os resultados de teste *Chapelle* e teste *Fratinni*.

CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

No presente estudo, a aplicação dos testes de *Chapelle* e *Frattini*, da resistência mecânica e Índice de Actividade Pozolânica (IAP) foi para avaliar as possibilidades de uso das cinzas de *Phragmites australis* (PA), *Eichhornia azurea* (EA) e *Pistia stratiotes* (PS) na substituição do cimento em argamassas. De acordo com os objectivos estabelecidos na pesquisa e com base nos resultados apresentados, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- As condições óptimas de produção das cinzas de *Phragmites australis*, *Eichhornia azurea* e *Pistia stratiotes* são, respectivamente, 500° C durante 3 horas, 600° C durante 2 horas e 600° C durante 4 horas.
- As cinzas de PA, EA e PS, no teste de Chapelle, apresentam um poder de consumo de cal na ordem de 1220,028; 49,372 e 151,020 mg;
- Das cinzas analisadas no teste de Frattini, apenas cinzas de PA tem o poder de remover a cal na ordem de 32,59%, razão pela qual o seu resultado encontra-se abaixo da curva de solubilidade de cal, ao contrário das cinzas de EA e PS.
- As argamassas preparadas substituindo 25% de cimento pelas cinzas, após 28 dias de cura, apresentam uma resistência a compressão de 47,9; 25,0; 28,1 e 46,9 MPa para cinzas de PA, EA, PS e argamassa de control, respectivamente, e IAP de 102,1% para PA, 53,3% para EA e 59,9% para PS.
- Os IAPs das argamassas preparadas com 25% de substituição do cimento pelas cinzas de PA, EA e PS, após 28 dias de cura, são, respectivamente 102,1; 53,3 e 59,9%.
- Existe uma correlação positiva entre os métodos usados para a avaliação da actividade pozolânica, com mais destaque entre os resultados de teste de Chapelle e IAP ($R^2 = 0,9931$).
- Portanto, somente cinzas de PA são pozolanas, podem ser usadas como substituintes parciais do cimento em argamassas, pois, apresentam uma capacidade de consumo de cal superior a 660 mg no teste de *Chapelle*, o resultado no teste de *Frattini* encontra-se abaixo da curva de solubilidade de cal e o IAP das argamassas é superior a 75%.

5.2. Recomendações

Recomenda-se aos futuros pesquisadores para que façam a continuidade do estudo, de modo a:

- determinar quantidade ótima das cinzas de PA a ser incorporada ao cimento de modo a melhorar as propriedades tecnológicas das argamassas, dado que os resultados da presente pesquisa confirmam que estas são pozolanas;
- realizar uma análise mais detalhada da granulometria pós-calcinação e verificar a influência do tempo e da temperatura na fase amorfa das cinzas;
- realizar ensaios com diferentes percentuais de substituição (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%) para oferecer uma visão mais abrangente da viabilidade de substituição parcial do cimento;
- expandir a correlação com testes termogravimétricos (TGA) ou análise de difração de raios-X (DRX) para verificar a formação de produtos hidratados e a redução de portlandita.

Referências Bibliográficas

- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (2016). *80 Anos. Uma trajetória de sucesso* (p. 145).
- Abdullah, A., Jaafar, M. S., Taufiq-Yap, Y. H., Alhozaimy, A., Al-Negheimish, A., & Noorzai, J. (2012). The effect of various chemical activators on pozzolanic reactivity: A review. *Scientific Research and Essays*, 7(7). <https://doi.org/10.5897/sre10.858>
- Aburili, K., Onchiri, R. O., & Waswa, G. W. (2015). Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash Concrete. *IJRRPCS*, 1(2), 29–35.
- Agostinho, A. A., Thomaz, S. M., Gomes, L. C., & Baltar, S. L. S. M. A. (2007). Influence of the macrophyte *Eichhornia azurea* on fish assemblage of the Upper Paraná River floodplain (Brazil). *Aquatic Ecology*, 41(4), 611–619. <https://doi.org/10.1007/s10452-007-9122-2>
- Ahmadi, Z., Esmaeili, J., Kasaei, J., & Hajialioghli, R. (2018). Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. *Sustainable Materials and Technologies*, 16(2017), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.05.001>
- Ahmed, A., Kamau, J., Pone, J., Hyndman, F., & Fitriani, H. (2019). Chemical Reactions in Pozzolanic Concrete. *Modern Approaches on Material Science*, 1(4), 128–133. <https://doi.org/10.32474/mams.2019.01.000120>
- Aja, O. C., & Al-Kayiem, H. H. (2014). Review of municipal solid waste management options in Malaysia, with an emphasis on sustainable waste-to-energy options. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(4), 693–710. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0220-z>
- Al-Chaar, G. K., Alkadi, M., & Asteris, P. G. (2013). Natural Pozzolan as a Partial Substitute for Cement in Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7(1), 33–42. <https://doi.org/10.2174/1874836801307010033>
- al-Swaidani, A. M. (2018). Volcanic Scoria as Cement Replacement. *Volcanoes - Geological*

and Geophysical Setting, Theoretical Aspects and Numerical Modeling, Applications to Industry and Their Impact on the Human Health.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.77970>

Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Journal of King Saud University – Science Fly ash properties , characterization , and applications : A review. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101536. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536>

Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolan reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>

Amin, M. N., Ashraf, M., Kumar, R., Khan, K., Saqib, D., Ali, S. S., & Khan, S. (2020). Role of Sugarcane Bagasse Ash in Developing Sustainable Engineered Cementitious Composites. *Frontiers in Materials*, 7(April), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00065>

Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>

Artioli, G., & Bullard, J. W. (2013). Cement hydration: The role of adsorption and crystal growth. *Crystal Research and Technology*, 48(10), 903–918. <https://doi.org/10.1002/crat.201200713>

Arya, A., Joshi, K., Bachheti, A., & Rawat, R. (2021). Status and Impact of Invasive and Alien Species on Environment, and Human Welfare: an Overview. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 42(8), 49–58.

Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>

ASTM C618-05. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined

- Natural Pozzolan for Use in Concrete. *AIP Conference Proceedings*, 1479(1), 860–863.
<https://doi.org/10.1063/1.4756275>
- Babaso, P. N., & Sharanagouda, H. (2017). Rice Husk and Its Applications: Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 1144–1156.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138>
- Baghchesaraei, A., & Baghchesaraei, O. R. (2012). Portland cement. In *International Conference on Transport, Civil, Architecture and Environment engineering (ICTCAEE'2012), UAE* (pp. 51–55).
- Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Baki, V. A., Nayır, S., Erdoğan, Ş., & Ustaş, İ. (2020). Determination of the Pozzolanic Activities of Trachyte and Rhyolite and Comparison of the Test Methods Implemented. *International Journal of Civil Engineering*, 18(9), 1053–1066.
<https://doi.org/10.1007/s40999-020-00516-5>
- Becerra-Duitama, J. A., & Rojas-Avellaneda, D. (2022). Pozzolans : A review Engineering and Applied Science Research Pozzolans : A review. *Engineering and Applied Science Research*, 49(4), 495-504 Engineering. <https://doi.org/10.14456/easr.2022>
- Bediako, M., & Amankwah, E. O. (2015). Analysis of chemical composition of Portland cement in Ghana: A key to understand the behavior of cement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015(December). <https://doi.org/10.1155/2015/349401>
- Bentz, D. P., Gálvez-Moreno, D., & Durán-Herrera, A. (2011). *Comparison of ASTM C311 Strength Activity Index Testing vs . Testing Based on Constant Volumetric Proportions*. 9(1). <https://doi.org/10.1520/JAI104138>
- Bie, R. S., Song, X. F., Liu, Q. Q., Ji, X. Y., & Chen, P. (2015). Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. *Cement and Concrete Composites*, 55, 162–168.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>

Bonfim, W. B., & de Paula, H. M. (2021). Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. *Journal of Cleaner Production*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125869>

British Standard Institution BSI. (2011). Methods of testing Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. *Bs En 197*, November, 50.

BS EN 196-5. (2011). BSI Standards Publication Methods of testing cement Part 5 : Pozzolanicity test for pozzolanic cement. *European Standard*.

Byabasaija, S., Natasha, R., Eunice, C., & Matola, S. (2020). Abundance, distribution and ecological impacts of invasive plant species in Maputo Special Reserve, Mozambique. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 12(4), 305–315. <https://doi.org/10.5897/ijbc2020.1428>

Caldas, R. R. (2014). Estudo comparativo das perdas d'água em mesocosmos colonizados ou não por aguapé (*Eichhornia azurea* (Swartz) kunth). Univesidade Estadual Paulista.

Cicero, E., Pitelli, R., Sena, J., & E Ferraud, A. (2007). Genetic Variability and Sensitivity of *Pistia stratiotes*. *Planta Daninha*, 25(3), 579–587.

Cordeiro, G. C., & Sales, C. P. (2015). Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.019>

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., & Fairbairn, E. M. R. (2009). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3301–3303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>

Cordeiro, G. C., Vieira, A. P., & Da Silva Lopes, É. (2017). Study on the pozzolanic activity of sugar cane straw ash produced using different pretreatments. *Quimica Nova*, 40(3), 264–269. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170002>

- Donatello, S., Tyrer, M., & Cheeseman, C. R. (2010a). Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 121–127.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>
- Donatello, S., Tyrer, M., & Cheeseman, C. R. (2010b). Comparison of Test Methods to Assess Pozzolanic Activity Cement & Concrete Composites Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 121–127.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>
- Dunuweera, S. P., & Rajapakse, R. M. G. (2018). Cement Types, Composition, Uses and Advantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(April).
<https://doi.org/10.1155/2018/4158682>
- Duvarci, Ö. Ç., Akdeniz, Y., Özmihçi, F., Ülkü, S., Balköse, D., & Çiftçioğlu, M. (2007). Thermal behaviour of a zeolitic tuff. *Ceramics International*, 33(5), 795–801.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.01.003>
- Elizabeth Ojewumi, M., Adedoyin Ayomide, A., Mopelola Obanla, O., Olufemi Awolu, O., & Omotayo Ojewumi, E. (2014). Pozzolanic properties of Waste Agricultural Biomass - African Locust Bean Pod Waste. *World Journal of Environmental Biosciences* *Www.Environmentaljournals.Org*, 6(3), 1–7.
- Elyasigorji, F., Farajiani, F., Hajipour Manjili, M., Lin, Q., Elyasigorji, S., Farhangi, V., & Tabatabai, H. (2023). Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods. *Buildings*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/buildings13112789>
- EN 196-1. (2002). Methods of testing cement. *European Standard, BS EN 169-(1)*, 36.
- EN 450-1. (2012). BSI Standards Publication. Fly ash for concrete Part 1: Definition, specification and conformity criteria. *European Standard*.
- Ettah, E. B., Egbe, J. G., Ubi, E. S., & Okon, E. E. (2018). Investigation of Rice Husk Ash (RHA) as a Supplement in Cement for Building Applications. *Civil Engineering*

Research Journal, 6(2), 2–7. <https://doi.org/10.19080/cerj.2018.06.555681>

- Farrant, W. E., Babafemi, A. J., Kolawole, J. T., & Panda, B. (2022). Influence of Sugarcane Bagasse Ash and Silica Fume on the Mechanical and Durability Properties of Concrete. *Materials*, 15(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma15093018>
- Ferraz, E., Andrejkovičová, S., Hajjaji, W., Velosa, A. L., Silva, A. S., & Rocha, F. (2015). Pozzolanic activity of metakaolins by the French standard of the modified Chapelle test: A direct methodology. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 12(3), 289–298. <https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0026>
- Galal, T. M., & Farahat, E. A. (2015). The invasive macrophyte *Pistia stratiotes* L. as a bioindicator for water pollution in Lake Mariut, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4941-4>
- García, R., Vigil de la Villa, R., Vegas, I., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. I. (2008). The pozzolanic properties of paper sludge waste. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1484–1490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.033>
- Habeeb, G. A., & Mahmud, H. Bin. (2010). Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material 3 . Experimental Work 2 . Scope of Work. *Materials Research*, 13(2), 185–190.
- Hernández-Toledo, U., Valdez-Tamez, P., Fajardo, G., Montes, P., & Durán-Herrera, A. (2017). EcoGRAFI CORRELATIONS BETWEEN POZZOLANIC EVALUATION METHODS , ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND CHEMICAL SHRINKAGE TEST. *AJCE - Special Issue*, 35(2), 535–543.
- Hidalgo, S., Soriano, L., Monzó, J., Payá, J., Font, A. & Borrachero, M. V. (2021). Evaluation of Rice Straw Ash as a Pozzolanic Addition in Cementitious Mixtures. *Appl. Sci.* 11 (773):1-17. <https://doi.org/10.3390/app11020773>.
- Iskandarova, M. I., Atabaev, F. B., Yakubzhanova, Z. B., Begjanova, G. B., Mironyuk, N. A., & Axmedova, D. U. (2023). Improving properties of portland cement using new types of composite additives. *E3S Web of Conferences*, 365.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336502013>

Jamil, M. D., Waheed, M., Akhtar, S., Bangash, N., Chaudhari, S. K., Majeed, M., Hussain, M., Ali, K., & Jones, D. A. (2022). Invasive Plants Diversity, Ecological Status, and Distribution Pattern in Relation to Edaphic Factors in Different Habitat Types of District Mandi Bahauddin, Punjab, Pakistan. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20).
<https://doi.org/10.3390/su142013312>

Jamil, M., Kaish, A. B. M. A., Raman, S. N., & Zain, M. F. M. (2013). Pozzolanitic contribution of rice husk ash in cementitious system. *Construction and Building Materials*, 47, 588–593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088>

Jebali, Z., Nabili, A. K., Nafti, M., Namsi, A., & Majdoub, H. (2016). *EXTRACTION AND CHARACTERIZATION OF CELLULOSE FROM COMMON REED*. April.

Jurić, K. K., Carević, I., Serdar, M., & Štirmer, N. (2021). Feasibility of using pozzolanicity tests to assess reactivity of wood biomass fly ashes. *Gradjevinar*, 72(12), 1145–1153.
<https://doi.org/10.14256/JCE.2950.2020>

Kacheche, R. D., & Mzuza, M. K. (2021). Environmental Impacts of Invasive Alien Plant Species on the Biodiversity of the Nyika National Park, Rumphi District, Malawi. *American Journal of Plant Sciences*, 12(10), 1503–1514.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2021.1210106>

Kaur, R., Tyagi, R. D., & Zhang, X. (2020). Review on pulp and paper activated sludge pretreatment, inhibitory effects and detoxification strategies for biovalorization. *Environmental Research*, 182(July 2019), 109094.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109094>

Khatib, J. M., Baalbaki, O., & ElKordi, A. A. (2018). Metakaolin. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, 493–511. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00015-8>

Klemm, A. J., Rostami, R., MacLennan, S., & Almeida, F. (2022). *Supplementary cementitious materials and their impact on sustainable construction*.

- Köbbing, J. F., Thevs, N., & Zerbe, S. (2013). The utilisation of reed (*Phragmites australis*): a review. *Mires and Peat*, 13, 1–14.
- Korunic, Z. (2013). Diatomaceous earths: Natural insecticides. *Pesticidi i Fitomedicina*, 28(2), 77–95. <https://doi.org/10.2298/pif1302077k>
- Kramar, S., & Ducman, V. (2018). Evaluation of ash pozzolanic activity by means of the strength activity index test, frattini test and DTA/TG analysis. *Tehnicki Vjesnik*, 25(6), 1746–1752. <https://doi.org/10.17559/TV-20171203193229>
- Lilkov, V., Petrov, O., Petkova, V., Petrova, N., & Tzvetanova, Y. (2011). Study of the pozzolanic activity and hydration products of cement pastes with addition of natural zeolites. *Clay Minerals*, 46(2), 241–250. <https://doi.org/10.1180/claymin.2011.046.2.241>
- Lourenço, M. H., Lkeda, A. K., Martins, R. M., Rocha, N. M., Santo, C. L., & Silva, H. P. (2004). Ocorrências de *Eichhornia azurea* (Sw.) Kunth e *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms em três pontos da Baía do Malheiros, cáceres-MT, Alto Pantanal, BRASIL. 0, 105.
- Malyadri, T., & Supriya, J. (2015). Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete by Partially Replacement with Cement. *International Journal of Computer Engineering In Research Trends*, 2(12), 995–1001.
- Marizane, K., Manhique, A., & Madivate, C. (2020). Comparative Study of the Effect of Ashes from Rice Husk , Sugarcane Bagasse and Corn Cob on Mortar Properties. *Asian Journal of Materials Science*, 12, 1–8. <https://doi.org/10.3923/ajmskr.2020.1.8>
- Martínez-García, R., Jagadesh, P., Zaid, O., Şerbănoiu, A. A., Fraile-Fernández, F. J., de Prado-Gil, J., Qaidi, S. M. A., & Grădinaru, C. M. (2022). The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review. *Materials*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/ma15155349>
- Martirena, F., & Monzó, J. (2018). Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*, 114(August 2017), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>

- Mazur, M. L. C., Kowalski, K. P., & Galbraith, D. (2014). Assessment of suitable habitat for *Phragmites australis* (common reed) in the Great Lakes coastal zone. *Aquatic Invasions*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.3391/ai.2014.9.1.01>
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2019). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100888>
- Moayedi, H., Aghel, B., Abdullahi, M. M., Nguyen, H., & Safuan A Rashid, A. (2019). Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117851>
- Moon, H., Kim, J. H., Lee, J. Y., Kim, S. G., & Chung, C. W. (2017). Evaluation of Pozzolanic Activity for Effective Utilization of Dredged Sea Soil. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(4), 637–646. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0215-6>
- Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., & Tashima, M. M. (2015). Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. *Construction and Building Materials*, 94, 670–677. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Mostafa, N. Y., El-Hemaly, S. A. S., Al-Wakeel, E. I., El-Korashy, S. A., & Brown, P. W. (2001). Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of Egyptian industrial by-products I: Silica fume and dealuminated kaolin. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 467–474. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00485-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00485-3)
- Müller, C. J. (2005). *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics*. 16299.
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced Concrete Technology: constituent materials*. Elsevier Ltd.

- Oliveira, D. C. (2017). Avaliação da Actividade Pozolânica de Turfa em Cimento Portland. *Dissertação* (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais.
- Padial, A. A., Thomaz, S. M., & Agostinho, A. A. (2009). Effects of structural heterogeneity provided by the floating macrophyte *Eichhornia azurea* on the predation efficiency and habitat use of the small Neotropical fish *Moenkhausia sanctaefilomenae*. *Hydrobiologia*, 624(1), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9690-8>
- Panjehpour, M., Ali, A. A. A., & Demirboga, R. (2011). A Review for Characterization of Silica Fume and Its Effects on Concrete Properties Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste View project Development of Earthquake Energy Dissipation Systems View project. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, 2(2), 7.
- Parhizkar, T., Najirni, M., Pourkhorshidi, A. R., Jafarpour, F., Hillemeier, B., & Herr, R. (2010). Proposing a new approach for qualification of natural pozzolans. *Scientia Iranica*, 17(6 A), 450–456.
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., Deford, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Paul, S. C., Mbewe, P. B. K., Kong, S. Y., & Šavija, B. (2019). Agricultural solid waste as source of supplementary cementitious materials in developing countries. *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071112>
- Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Peris-Mora, E., & Amahjour, F. (2001). Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 41–49. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00434-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00434-8)
- Panesar, D. K. (2019). Supplementary cementing materials. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 55–85. doi:10.1016/b978-0-08-102616-8.00003-4

- Pinheiro, V. D., Alexandre, J., Xavier, G. de C., Marvila, M. T., Monteiro, S. N., & de Azevedo, A. R. G. (2023). Methods for Evaluating Pozzolanic Reactivity in Calcined Clays: A Review. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134778>
- Pontes, J., Santos Silva, A., & Faria, P. (2013). Evaluation of pozzolanic reactivity of artificial pozzolans. *Trans Tech Publications, Switzerland, Materials Science Forum*, 433–438. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732>
- Prasad, C. S., Maiti, K. N., & Venugopal, R. (2001). Effect of rice husk ash in whiteware compositions. *Ceramics International*, 27(6), 629–635. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00010-4)
- Qian, J., Qin, J., Zhang, Z., Shen, Y., Ye, Z., & Hou, P. (2016). How to evaluate pozzolanic activity of sulfate-rich fly ash. *Advances in Cement Research*, 28(3), 141–150. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00027>
- Quarcioni, V. A., Chotoli, F. F., Coelho, A. C. V., & Cincotto, M. A. (2015). Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 8(1), 1–7.
- Rai, P. K. (2022). Environmental Degradation by Invasive Alien Plants in the Anthropocene: Challenges and Prospects for Sustainable Restoration. *Anthropocene Science*, 1(1), 5–28. <https://doi.org/10.1007/s44177-021-00004-y>
- Roszczynialski, W. (2002). Determination of Pozzolanic Activity of Materials by Thermal Analysis*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 70, 387–392.
- Saltonstall, K., & Meyerson, L. A. (2016). *Phragmites australis : from genes to ecosystems*. *Phragmites australis : from genes to ecosystems. Biological Invasions*, August. <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1240-0>
- Sánchez de Rojas, M. I., Frías, M., Sabador, E., Asensio, E., Rivera, J., & Medina, C. (2019). Durability and chromatic behavior in cement pastes containing ceramic industry milling and glazing by-products. In *Journal of the American Ceramic Society* (Vol. 102, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/jace.15996>

- Sánchez De Rojas, M. I., Marín, F., Rivera, J., & Frías, M. (2006). Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(12), 3701–3705. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01279.x>
- Senff, L., Folgueras, M. V., & Hotza, D. (2005). Hidratação do Cimento CP V ARI - RS: Influência da Água nas Reações de Hidratação. *49o Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 1–12. <https://doi.org/10.2331/suisan.35.791>
- Shaltout, K. H., Al-Sodany, Y. M., & Eid, E. M. (2006). *Biology of Common Reed Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.: Review and Inquiry. September 2015*, 1–56.
- Silva, T. L., & Fortuna, J. L. (2021). Capacidade de Eichhornia azurea (Swartz) Kunth de depurar água contaminada por coliformes termotolerantes. *Scientia Plena*, 17(10). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.106201>
- Singh, N. B. (2019). Properties of cement and concrete in presence of nanomaterials. In *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00002-7>
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74(Blezard 2001), 211–278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>
- Soares, E. N. C., Garcia, D. C. S., Yoshida, M. I., Teresa, M., Aguilar, P., & Figueiredo, R. B. (2017). Avaliação da pozolanicidade das cinzas do capim elefante. *Ciência & Engenharia*, 26(2), 41–48.
- Tashima, M. M., Soriano, L., Monzó, J., Borrachero, M. V., Akasaki, J. L., & Payá, J. (2014). New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime: Pozzolan suspensions. *Materiales de Construcción*, 64(316). <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00914>
- Torres, S. M., de Lima, V. E., Basto, P. de A., de Araújo Júnior, N. T., & de Melo Neto, A. A. (2020). Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray

- diffraction. *Construction and Building Materials*, 264, 120684.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120684>
- Tripathi, P., Kumar, R., Sharma, A., Mishra, A., & Gupta, R. (2010). Pistia stratiotes (Jalkumbhi). *Pharmacognosy Reviews*, 4(8), 153–160. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70909>
- Walker, R., & Pavía, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(6), 1139–1150. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>
- Xia, J., Guan, Q., Zhou, Y., Wang, J., Gao, C., He, Y., Wang, Z., & Song, P. (2021). Use of natural pozzolans in high-performance concrete for the Mombasa–Nairobi railway. *Advances in Cement Research*, 33(7), 318–330. <https://doi.org/10.1680/jadcr.20.00045>
- Xu, Q., Ji, T., Gao, S. J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12(1), 1–19.
<https://doi.org/10.3390/ma12010039>
- Yang, H., Fang, K., & Tu, S. (2011). Pozzolan reaction of supplementary cementitious materials and its effects on strength of mass concrete. *Advanced Materials Research*, 168–170(January), 505–511. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.505>
- Yilmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B., & Uz, V. (2007). Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment*, 42(11), 3808–3815.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.006>
- Yu, L., Zhou, S., & Deng, W. (2015). Properties and pozzolan reaction degree of tuff in cement – based composite. *Advances in Concrete Construction*, 3(1), 71–90.
- Yuksel, I. (2018). Blast-furnace slag. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2>

Zerihun, B., Yehualaw, M. D., & Vo, D. H. (2022). Effect of Agricultural Crop Wastes as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5648187>

Živković, M. M., Anđelković, A. A., Cvijanović, D. L., Novković, M. Z., Vukov, D. M., Šipoš, Š., Ilić, M. M., Pankov, N. P., Miljanović, B. M., Marisavljević, D. P., Pavlović, D. M., & Radulović, S. B. (2019). The beginnings of pistia stratiotes l. Invasion in the lower danube delta: The first record for the Province of Vojvodina (Serbia). *BioInvasions Records*, 8(2), 218–229. <https://doi.org/10.3391/bir.2019.8.2.03>

ANEXO A

Tabela 1A: Optimização e teste *Chapelle* para *Phragmites australis* à 400°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	29.300	20.000	9.300	0.317	838.859
	2	28.800	20.300	8.500	0.295	780.010
	3	30.600	20.400	10.200	0.333	880.952
	Média	29.567	20.233	9.333	0.316	834.273
3 h	1	29.300	20.300	9.000	0.307	811.799
	2	28.800	20.000	8.800	0.306	807.540
	3	30.600	19.700	10.900	0.356	941.410
	Média	29.567	20.000	9.567	0.324	855.130
4 h	1	29.300	22.200	7.100	0.242	640.419
	2	28.800	21.200	7.600	0.264	697.421
	3	30.600	21.300	9.300	0.304	803.221
	Média	29.567	21.567	8.000	0.271	715.091

Tabela 2A: Optimização e teste *Chapelle* para *Phragmites australis* à 450°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	29.300	19.000	10.300	0.352	929.059
	2	28.800	18.400	10.400	0.361	954.365
	3	30.600	18.000	12.600	0.412	1088.235
	Média	29.567	18.467	11.100	0.375	992.189
3 h	1	29.300	17.300	12.000	0.410	1082.399
	2	28.800	17.600	11.200	0.389	1027.778
	3	30.600	17.100	13.500	0.441	1165.966
	Média	29.567	17.333	12.233	0.414	1093.493
4 h	1	29.300	18.500	10.800	0.369	974.159
	2	28.800	20.800	8.000	0.278	734.127
	3	30.600	20.400	10.200	0.333	880.952
	Média	29.567	19.900	9.667	0.327	864.068

Tabela 3A: Optimização e teste *Chapelle* para *Phragmites australis* à 500°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	28.300	17.400	10.900	0.385	1017.920
	2	26.800	16.200	10.600	0.396	1045.309
	3	27.000	17.100	9.900	0.367	969.048
	Média	27.367	16.900	10.467	0.382	1010.788
3 h	1	28.300	14.700	13.600	0.481	1270.066
	2	26.800	14.900	11.900	0.444	1173.507
	3	27.000	14.600	12.400	0.459	1213.757
	Média	27.367	14.733	12.633	0.462	1220.028
4 h	1	28.300	15.900	12.400	0.438	1158.001
	2	26.800	16.400	10.400	0.388	1025.586
	3	27.000	15.900	11.100	0.411	1086.508
	Média	27.367	16.067	11.300	0.413	1091.265

Tabela 4A: Optimização e teste *Chapelle* para *Eichhornia azurea* à 500°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	30.200	30.300	-0.100	-0.003	-8.751
	2	30.500	30.200	0.300	0.010	25.995
	3	30.300	30.400	-0.100	-0.003	-8.722
	Média	30.333	30.300	0.033	0.001	2.904
3 h	1	33.100	32.700	0.400	0.012	31.938
	2	33.300	33.100	0.200	0.006	15.873
	3	32.900	33.400	-0.500	-0.015	-40.165
	Média	33.100	33.067	0.033	0.001	2.661
4 h	1	30.200	30.300	-0.100	-0.003	-8.751
	2	30.500	30.300	0.200	0.007	17.330
	3	30.300	30.200	0.100	0.003	8.722
	Média	30.333	30.267	0.067	0.002	5.808

Tabela 5A: Optimização e teste *Chapelle* para *Pistia Stratiotes* à 500°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	30.200	29.700	0.500	0.017	43.756
	2	30.500	29.800	0.700	0.023	60.656
	3	30.300	30.200	0.100	0.003	8.722
	Média	30.333	29.900	0.433	0.014	37.755
3 h	1	33.100	32.900	0.200	0.006	15.969
	2	33.300	31.700	1.600	0.048	126.984
	3	32.900	32.700	0.200	0.006	16.066
	Média	33.100	32.433	0.667	0.020	53.230
4 h	1	30.200	29.300	0.900	0.030	78.761
	2	30.500	29.100	1.400	0.046	121.311
	3	30.300	29.400	0.900	0.030	78.501
	Média	30.333	29.267	1.067	0.035	92.936

Tabela 6A: Optimização e teste *Chapelle* para *Phragmites australis* à 600°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	28.300	18.500	9.800	0.346	915.194
	2	26.800	17.200	9.600	0.358	946.695
	3	27.000	17.500	9.500	0.352	929.894
	Média	27.367	17.733	9.633	0.352	930.311
3 h	1	28.300	16.000	12.300	0.435	1148.662
	2	26.800	17.500	9.300	0.347	917.111
	3	27.000	16.400	10.600	0.393	1037.566
	Média	27.367	16.633	10.733	0.392	1036.541
4 h	1	28.300	16.000	12.300	0.435	1148.662
	2	26.800	16.300	10.500	0.392	1035.448
	3	27.000	17.300	9.700	0.359	949.471
	Média	27.367	16.533	10.833	0.396	1046.198

Tabela 7A: Optimização e teste *Chapelle* para *Eichhornia azurea* à 600°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	30.200	29.600	0.600	0.020	52.507
	2	30.500	30.000	0.500	0.016	43.326
	3	30.300	29.700	0.600	0.020	52.334
	Média	30.333	29.767	0.567	0.019	49.372
3 h	1	30.200	29.900	0.300	0.010	26.254
	2	30.500	29.800	0.700	0.023	60.656
	3	30.300	30.000	0.300	0.010	26.167
	Média	30.333	29.900	0.433	0.014	37.755
4 h	1	30.200	30.100	0.100	0.003	8.751
	2	30.500	30.200	0.300	0.010	25.995
	3	30.300	29.800	0.500	0.017	43.612
	Média	30.333	30.033	0.300	0.010	26.138

Tabela 8A: Optimização e teste *Chapelle* para *Pistia Stratiotes* à 600°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	30.200	29.100	1.100	0.036	96.263
	2	30.500	28.400	2.100	0.069	181.967
	3	30.300	29.200	1.100	0.036	95.945
	Média	30.333	28.900	1.433	0.047	124.882
3 h	1	30.200	28.900	1.300	0.043	113.765
	2	30.500	28.300	2.200	0.072	190.632
	3	30.300	29.000	1.300	0.043	113.390
	Média	30.333	28.733	1.600	0.053	139.403
4 h	1	30.200	28.800	1.400	0.046	122.517
	2	30.500	28.100	2.400	0.079	207.963
	3	30.300	28.900	1.400	0.046	122.112
	Média	30.333	28.600	1.733	0.057	151.020

Tabela 9A: Optimização e teste *Chapelle* para *Phragmites australis* à 700°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	28.300	16.400	11.900	0.420	1111.307
	2	26.800	16.500	10.300	0.384	1015.725
	3	27.000	16.300	10.700	0.396	1047.354
	Média	27.367	16.400	10.967	0.401	1059.074
3 h	1	28.300	17.600	10.700	0.378	999.243
	2	26.800	17.500	9.300	0.347	917.111
	3	27.000	17.100	9.900	0.367	969.048
	Média	27.367	17.400	9.967	0.364	962.502
4 h	1	28.300	17.300	11.000	0.389	1027.259
	2	26.800	17.000	9.800	0.366	966.418
	3	27.000	18.300	8.700	0.322	851.587
	Média	27.367	17.533	9.833	0.359	949.626

Tabela 10A: Optimização e teste *Chapelle* para *Eichhornia azurea* à 700°C

Tempo	Réplica	V ₂	V ₁	V ₂ -V ₁	(V ₂ -V ₁)/V ₂	mg CaO
2 h	1	30.200	29.900	0.300	0.010	26.254
	2	29.800	29.600	0.200	0.007	17.737
	3	30.500	29.700	0.800	0.026	69.321
	Média	30.167	29.733	0.433	0.014	37.964
3 h	1	30.200	30.000	0.200	0.007	17.502
	2	29.800	29.400	0.400	0.013	35.475
	3	30.500	30.100	0.400	0.013	34.660
	Média	30.167	29.833	0.333	0.011	29.203
4 h	1	30.200	29.900	0.300	0.010	26.254
	2	29.800	29.700	0.100	0.003	8.869
	3	30.500	30.000	0.500	0.016	43.326
	Média	30.167	29.867	0.300	0.010	26.283

Tabela 11A: Optimização e teste *Chapelle* para *Pistia Stratiotes* à 700°C

Tempo	Réplica	V₂	V₁	V₂-V₁	(V₂-V₁)/V₂	mg CaO
2 h	1	30.200	29.100	1.100	0.036	96.263
	2	29.800	28.400	1.400	0.047	124.161
	3	30.500	29.200	1.300	0.043	112.646
	Média	30.167	28.900	1.267	0.042	110.971
3 h	1	30.200	28.900	1.300	0.043	113.765
	2	29.800	28.300	1.500	0.050	133.030
	3	30.500	29.000	1.500	0.049	129.977
	Média	30.167	28.733	1.433	0.048	125.572
4 h	1	30.200	28.800	1.400	0.046	122.517
	2	29.800	28.100	1.700	0.057	150.767
	3	30.500	28.900	1.600	0.052	138.642
	Média	30.167	28.600	1.567	0.052	137.253

ANEXO B

Tabela 1B: Resultados de Resistência à Compressão

Dias	Réplica	PA	EA	PS	Control
7	1	36.500	15.200	18.600	38.00
	2	36.100	15.800	18.700	38.100
	3	36.300	15.800	19.100	38.200
	Média	36.300	15.600	18.800	38.100
14	1	45.800	21.800	25.100	43.900
	2	45.300	22.000	25.00	43.600
	3	45.700	21.900	24.900	43.900
	Média	45.600	21.900	25.00	43.800
28	1	48.200	24.800	28.100	46.800
	2	47.900	25.100	28.00	47.100
	3	47.600	25.100	28.200	46.800
	Média	47.900	25.00	28.100	46.900

ANEXO C

Tabela 1C: Resultados da Titulação com HCl 0.1 M no Teste de *Frattini*

Amostra	Réplica	V1	[OH]
Control	1	18.200	77.896
	2	18.400	78.752
	3	18.300	78.324
	Média	18.300	78.324
PA	1	15.100	64.628
	2	14.800	63.344
	3	14.800	63.344
	Média	14.900	63.772
EA	1	39.400	168.632
	2	40.400	172.912
	3	40.200	172.056
	Média	40.000	171.200
PS	1	30.200	129.256
	2	30.300	129.684
	3	30.400	130.112
	Média	30.300	129.684

Tabela 2C: Resultados da Titulação com EDTA 0.03 M no Teste de *Frattini*

Amostra	Réplica	V2	[CaO]
Control	1	6.000	6.912
	2	5.900	6.797
	3	5.800	6.682
	Média	5.900	6.797
PA	1	4.200	4.838
	2	4.100	4.723
	3	4.300	4.954
	Média	4.200	4.838
EA	1	5.300	6.106
	2	5.200	5.990
	3	5.100	5.875
	Média	5.200	5.990
PS	1	7.000	8.064
	2	7.500	8.640
	3	7.400	8.525
	Média	7.300	8.410

Tabela 3C: Resultados do Teste de Frattini usando as médias de [OH⁻] e [CaO]

Material	[OH] mmol/L	[CaO] mmol/L	[CaO] teórico máx. mmol/L	Redução [CaO] %
Control	78.320	6.800	5.530	-23.020
PA	63.770	4.840	7.180	32.560
EA	171.200	5.990	2.240	-167.330
PS	129.680	8.410	3.050	-175.560

ANEXO D



Figura 1D: Provets a serem submetidos a cura



Figura 2D: Reagentes usados para o teste de *Frattini*



Figura 3D: Preparação das amostras para o Teste de *Frattini*

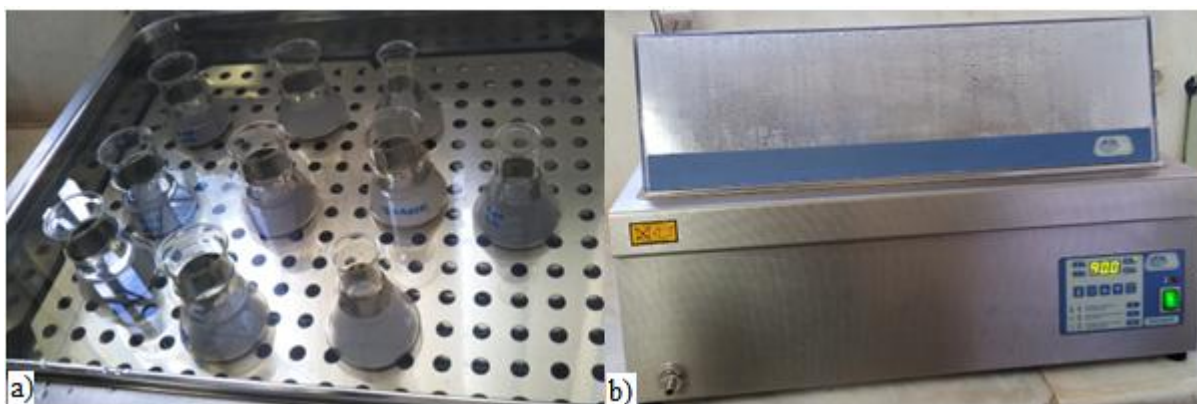


Figura 4D: Teste *Chapelle* – a) amostras inseridas no banho-maria; b) banho-maria durante 16 horas à 90 °C.