

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Kleber Roberto Matos da Silva

Concreto produzido com cimento a partir da substituição parcial de clínquer por resíduos de celulose da Amazônia: propriedades mecânicas e durabilidade.

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2024



Kleber Roberto Matos da Silva

Concreto produzido com cimento a partir da substituição parcial de clínquer por resíduos de celulose da Amazônia: propriedades mecânicas e durabilidade.

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém
2024



CONCRETO PRODUZIDO COM CIMENTO A PARTIR DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CLÍNQUER POR RESÍDUOS DE CELULOSE DA AMAZÔNIA: PROPRIEDADES MECÂNICAS E DURABILIDADE

AUTOR:

KLEBER ROBERTO MATOS DA SILVA

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 23 / 01 / 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 31/01/2025 15:20:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA
Data: 30/01/2025 12:14:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira
Membro Externo (UFG)

Documento assinado digitalmente
gov.br RODRIGO RODRIGUES DA CUNHA
Data: 31/01/2025 14:57:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha
Membro Externo (IFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALCEBIADES NEGRÃO MACEDO
Data: 30/01/2025 15:21:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 31/01/2025 13:48:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Documento assinado digitalmente
gov.br DENIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA
Data: 11/03/2025 14:17:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Kleber Roberto Matos da Silva

TÍTULO: Concreto produzido com cimento a partir da substituição parcial de clínquer por resíduos de celulose da Amazônia: propriedades mecânicas e durabilidade.

GRAU: Doutor ANO: 2024

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Kleber Roberto Matos da Silva.

Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá
66.075-110 Belém – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586c Silva, Kleber Roberto Matos da.

Concreto produzido com cimento a partir da substituição parcial de clínquer por resíduos de celulose da Amazônia: propriedades mecânicas e durabilidade / Kleber Roberto Matos da Silva. – 2024
122 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Durabilidade do concreto. 2. Resíduo de celulose. 3. Cimento Portland. 4. Adições Minerais. I. Título.

CDD - 620. 136

À minha família, presente de Deus e meu
porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e Nossa Senhora de Nazaré a força necessária para persistir.

Ao Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço pela orientação e confiança durante a realização da pesquisa.

Aos meus pais, Eudes Rosas da Silva (*in memoriam*) e Alexandrina Mattos da Silva (*in memoriam*), meus maiores orientadores na vida, minha eterna gratidão.

Aos Profs. Drs. Oscar Jesus Choque Fernandez e Rodrigo Rodrigues da Cunha pela colaboração e contribuições.

Aos Profs. Nilton César Almeida Queiroz e Marco Antônio Barbosa de Oliveira pela parceria.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém, em especial aos colegas dos cursos Técnicos em Estradas e Edificações, pelo apoio recebido durante essa jornada.

Ao Laboratório de Tecnologia das Construções, LABTEC FAU-UFPA, na pessoa de seu coordenador Prof. Dr. Márcio Santos Barata e equipe, técnico Leandro Ferreira, Thiago Braga e Walber Lopes, pelo apoio nos ensaios de durabilidade.

Ao Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações – LaMiGA/UFPA pelo apoio nos ensaios de caracterização mineralógica.

Aos técnicos Lucas Silva Castro, Rosinaldo Silveira, Rogério Costa e Joel Martins pelo apoio na realização dos ensaios mecânicos, mineralógicos e controles tecnológicos.

À empresa TotalMIX Controle Tecnológico em Concreto, Argamassa e Solos, na pessoa de seu diretor Eng. José Luiz Pinto Soares Filho, e colaboradores, pelo apoio na realização dos ensaios mecânicos.

À empresa Cimento Verde do Brasil, Açailândia – MA, pelo fornecimento de matéria-prima para a realização dos estudos.

À empresa Votorantim Cimentos pela doação do cimento de referência e informações técnicas.

À empresa Suzano Papel e Celulose, filial Imperatriz - MA, pelo fornecimento dos resíduos de celulose e orientações técnicas.

À empresa Cimento ELO, Currais Novos – RN, pelo apoio nos ensaios de caracterização das matérias-primas.

À empresa Tabalmix Concreto Ltda, na pessoa de seu diretor Eng. Klemerson Brito Veloso, e demais colaboradores, pelo fornecimento de agregados para a pesquisa.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais (ISI-TM), na pessoa de seu diretor Dr. Adriano Reis Lucheta e Engenheiro Fernando Gomes pelo apoio nas pesquisas.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

“Tudo é do Pai, toda honra e toda glória
É Dele a vitória alcançada em minha vida”
(Frederico Cruz)

RESUMO

SILVA, K.R.M. **Concreto produzido com cimento a partir da substituição parcial de clínquer por resíduos de celulose da Amazônia: propriedades mecânicas e durabilidade.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2025.

Reduzir a emissão de gases de efeito estufa é uma das formas que a indústria cimenteira pode contribuir para a minimizar a crise climática atual. Este trabalho avalia o uso de resíduos da fabricação de celulose (lama de cal e cinza volante), como material cimentício suplementar, em substituição parcial do clínquer na produção de cimentos. Foram verificadas as características físicas, químicas, mineralógicas e comportamento térmico dos resíduos. Posteriormente foram elaboradas misturas cimentícias, em composições binárias e ternárias, para a produção de argamassas, sendo avaliadas suas características e propriedades mecânicas no tocante a resistência à compressão axial. Em seguida, foram produzidos concretos e analisados seu comportamento mecânico, referente à resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e absorção de água por imersão, absorção por capilaridade e índice de vazios. As propriedades de durabilidade foram verificadas por meio de ensaios de carbonatação e penetração de cloretos. Os resultados demonstraram que os resíduos apresentam potencial para utilização em misturas cimentícias, corroborados pelos valores das resistências à compressão que variaram entre 73% e 105% acima dos valores de referência. A resistência à compressão dos concretos atingiu valores de 63% do valor do concreto de referência e a resistência à tração na flexão alcançou valores de até 36% acima da referência, além de indicadores de permeabilidade que os classificam como duráveis. Em relação à durabilidade, as profundidades de carbonatação e penetração de cloretos ficaram abaixo do valor mínimo normativo para cobrimento das armaduras, comprovando sua viabilidade técnica, econômica e ambiental com redução do teor de clínquer.

Palavras-chave: resíduos de celulose; materiais cimentícios suplementares; durabilidade; concreto sustentável; carbonatação; penetração de cloretos.

ABSTRACT

SILVA, K.R.M. **Concrete produced with cement from the partial replacement of clinker by cellulose waste from the Amazon: mechanical properties and durability.**

Doctoral Thesis. Postgraduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. Belém, 2025.

Reducing greenhouse gas emissions is one way the cement industry can contribute to minimizing the current climate crisis. This study evaluates the use of pulp manufacturing waste (lime slurry and fly ash) as a supplementary cementitious material, partially replacing clinker in cement production. The physical, chemical, mineralogical characteristics and thermal behavior of the waste were verified. Subsequently, cementitious mixtures were prepared in binary and ternary compositions for the production of mortars, and their characteristics and mechanical properties regarding axial compression strength were evaluated. Then, concretes were produced and their mechanical behavior was analyzed, regarding axial compression strength, flexural tensile strength and water absorption by immersion, capillary absorption and void index. Durability properties were verified by means of carbonation and chloride penetration tests. The results demonstrated that the waste has potential for use in cement mixtures, corroborated by the compressive strength values that ranged from 73% to 105% above the reference values. The compressive strength of the concrete reached values of 63% of the reference concrete value and the flexural tensile strength reached values of up to 36% above the reference, in addition to permeability indicators that classify them as durable. Regarding durability, the carbonation and chloride penetration depths were below the minimum normative value for reinforcement coverage, proving its technical, economic and environmental viability with reduced clinker content.

Keywords: cellulose waste; supplementary cementitious materials; durability; sustainable concrete; carbonation; chloride penetration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estrutura da tese.....	21
Figura 2.1 - Localização das unidades fabris e dos centros de distribuição associadas à Ibá	23
Figura 2.2 - Fluxograma para geração de resíduos de celulose em fábrica de papel	25
Figura 3.1 - Atividades desenvolvidas neste trabalho.	36
Figura 3.2 - Difrátogramas de raios-X da lama de cal (LM), cinza volante (FA).....	38
Figura 3.3 - Índice de atividade pozzolânica com hidróxido de cálcio.....	39
Figura 3.4 - Índice de atividade pozzolânica com cimento	39
Figura 3.5 - Termogramas (TG/DSC) da lama de cal	40
Figura 3.6 - Termogramas (TG/DSC) da cinza volante	41
Figura 4.1 - Difrátogramas das misturas cimentícias	55
Figura 4.2 - Granulometria a laser das misturas cimentícias.....	56
Figura 4.3 - Superfície específica das misturas cimentícias.....	57
Figura 4.4 - Variação do tempo de pega das misturas cimentícias.....	58
Figura 4.5 - Reatividade álcalis -agregado	59
Figura 4.6 - Resistência à compressão das argamassas	60
Figura 5.1 - Granulometria a laser das matérias-primas e das misturas cimentícias.....	70
Figura 5.2 - Morfologia dos componentes das misturas.....	70
Figura 5.3 - Curva granulométrica dos agregados graúdos	71
Figura 5.4 - Granulometria do agregado miúdo	72
Figura 5.5 - Resultados do ensaio de consistência do concreto.....	75
Figura 5.6 - Resistência à compressão.....	76
Figura 5.7 - Resistência à tração na flexão	77
Figura 5.8 - Absorção por imersão	78
Figura 5.9 - Absorção de água e o índice de vazios	79
Figura 5.10 - Relação entre o índice de vazios e a densidade	80
Figura 5.11 - Absorção por capilaridade	81
Figura 5.12 - Absorção por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral	82
Figura 5.13 - Difrátogramas das misturas com maiores resistências à compressão.....	83
Figura 6.1 - Representação da penetração de CO ₂ na estrutura de concreto	92
Figura 6.2 - Corpos de prova preparados para o ensaio de carbonatação	95
Figura 6.3 - Corpos de prova selados com parafina	96

Figura 6.4 - Câmara de carbonatação e corpos de prova prontos para ensaio.....	96
Figura 6.5 - Corpos de prova após aplicação de solução de fenolftaleína.....	97
Figura 6.6 - Corpos de prova imersos em solução alcalina	98
Figura 6.7 - Amostras após a aplicação da solução de nitrato de prata.....	99
Figura 6.8 - Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios	99
Figura 6.9 - Comportamento dos corpos de prova após a aplicação de fenolftaleína	101
Figura 6.10 - Média dos resultados dos ensaios de carbonatação	101
Figura 6.11 - Coeficientes de carbonatação acelerada para os concretos.....	103
Figura 6.12 - Comportamento dos corpos de prova de concreto após a aplicação de nitrato de prata	104
Figura 6.13 - Resultados dos ensaios de penetração de cloretos	105
Figura 6.14 - Correlação entre penetração de cloretos e índice de vazios das amostras .	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Maiores produtores mundiais de celulose	22
Tabela 2.2 - Composição química da lama de cal e da cinza volante (%)	27
Tabela 2.3 - Classificação da qualidade do concreto	29
Tabela 3.1 - Composição química das matérias-primas usadas para misturas cimentícias	37
Tabela 3.2 - Massa específica.....	40
Tabela 4.1 - Nomenclaturas e porcentagens das misturas cimentícias.....	52
Tabela 4.2 - Composição química das matérias-primas usadas para misturas cimentícias	53
Tabela 4.3 - Composição química das misturas cimentícias	54
Tabela 4.4 - Massa específica e área superficial específica das misturas cimentícias	56
Tabela 4.5 - Água de consistência, início e fim de pega	58
Tabela 4.6 - Resistência à compressão das argamassas.....	59
Tabela 5.1 - Características físicas e mecânicas dos cimentos e misturas utilizados.....	69
Tabela 5.2 - Caracterização dos agregados	72
Tabela 5.3 - Massa específica dos insumos utilizados	72
Tabela 5.4 - Consumo de material dos concretos avaliados (kg/m ³).....	73
Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão.....	76
Tabela 5.6 - Classificação dos concretos em função da porosidade e absorção de água ..	78
Tabela 6.1 - Características dos agregados utilizados	93
Tabela 6.2 - Proporções das misturas do concreto sustentável.....	94
Tabela 6.3- Resultados dos ensaios de carbonatação	100
Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios de penetração de cloretos.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Significado
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>a/l</i>	Relação água/ligante
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Al₂O₃</i>	Óxido de Alumínio - Alumina
<i>Ca(OH)₂</i>	Hidróxido de cálcio
<i>CaCO₃</i>	Carbonato de cálcio
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>CaSO₄</i>	Sulfato de cálcio
<i>CaSO₄.1/2H₂O</i>	Bassanita
<i>CO₂</i>	Gás Carbônico
<i>CP II</i>	Cimento Portland Composto
<i>CP IV</i>	Cimento Portland Pozolânico
<i>DRX</i>	Difração de Raio X
<i>FRX</i>	Fluorescência de Raio X
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>Na₂S</i>	Sulfeto de sódio
<i>Na₃CO₃</i>	Carbonato de sódio
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>kg</i>	quilograma
<i>SiO₂</i>	Dióxido de Silício – Sílica
<i>t</i>	Tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	A PRODUÇÃO DE CELULOSE	22
2.2	OS RESÍDUOS DE CELULOSE	24
2.2.1	Usos da lama de cal e cinza volante em materiais cimentícios	26
2.3	DURABILIDADE DO CONCRETO	27
2.3.1	Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:	28
2.3.2	Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:	28
2.3.3	Mecanismos de deterioração da estrutura:	28
3	ARTIGO 1 - O POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CELULOSE, LAMA DE CAL E CINZA VOLANTE, DA AMAZÔNIA, BRASIL, COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS	30
3.1	INTRODUÇÃO.....	33
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.2.1	Materiais	36
3.2.1.1	Coleta de amostras.....	36
3.2.1.2	Preparação das amostras.....	36
3.2.2	Métodos.....	36
3.2.2.1	Composição química	36
3.2.2.2	Composição mineralógica	36
3.2.2.3	Ensaio Físicos	37
3.2.2.4	Análises Térmicas	37
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.3.1	Caracterização química	37
3.3.2	Caracterização mineralógica	38
3.3.3	Ensaio físicos	38

3.3.3.1	Índice de atividade pozolânica com cal.....	38
3.3.3.2	Índice de atividade pozolânica com cimento	39
3.3.3.3	Massa específica.....	40
3.3.3.4	Análises térmicas.....	40
3.4	CONCLUSÃO	42
4	ARTIGO 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS, UTILIZANDO RESÍDUOS DE CELULOSE, CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER.....	46
4.1	INTRODUÇÃO.....	48
4.2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	49
4.3	METODOLOGIA	50
4.3.1	Materiais	50
4.3.2	Métodos	51
4.3.2.1	Preparação das amostras.....	51
4.3.2.2	Preparação das misturas	51
4.3.2.3	Ensaio químicos e mineralógicos	52
4.3.2.4	Ensaio físicos e mecânicos	53
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.4.1	Caracterização química e mineralógica.....	53
4.4.2	Ensaio físicos	55
4.4.2.1	Granulometria.....	55
4.4.2.2	Massa específica e área superficial específica pelo método Blaine	56
4.4.2.3	Tempo de pega e água de consistência.....	57
4.4.2.4	Reatividade álcalis-agregado.....	59
4.4.2.5	Resistência à compressão das argamassas.....	59
4.5	CONCLUSÃO	61
5	ARTIGO 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO SUSTENTÁVEL CONTENDO CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CELULOSE, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER NAS MISTURAS CIMENTÍCIAS.....	65
5.1	INTRODUÇÃO.....	67

5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	69
5.2.1	Materiais	69
5.2.1.1	Cimento de referência	69
5.2.1.2	Elementos das misturas cimentícias	69
5.2.1.3	Agregados.....	71
5.2.2	Métodos.....	72
5.2.2.1	Proporções das misturas	72
5.2.3	Ensaio no concreto fresco	73
5.2.4	Ensaio no concreto endurecido	74
5.2.4.1	Resistência à compressão	74
5.2.4.2	Resistência à tração na flexão	74
5.2.5	Permeabilidade	74
5.2.5.1	Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	74
5.2.5.2	Absorção de água por capilaridade	74
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.3.1	Ensaio no concreto fresco	74
5.3.2	Propriedades mecânicas	75
5.3.3	Permeabilidade	77
5.3.3.1	Absorção por imersão e índice de vazios	77
5.3.3.2	Absorção por capilaridade.....	80
5.3.3.3	Análise mineralógica.....	82
5.4	CONCLUSÃO	84
6	ARTIGO 4 - PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DO CONCRETO SUSTENTÁVEL COM USO DE CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER.....	89
6.1	INTRODUÇÃO.....	91
6.2	MATERIAIS E MÉTODOS	93
6.2.1	Materiais.....	93
6.2.1.1	Cimento de referência	93
6.2.1.2	Agregados.....	93
6.2.1.3	Concreto sustentável.....	94
6.2.1.4	Aditivo.....	94
6.2.2	Métodos.....	94

6.2.2.1	Ensaio de permeabilidade do concreto	94
6.2.2.2	Ensaio de carbonatação acelerada	95
6.2.2.3	Ensaio de penetração de cloretos.....	97
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
6.3.1	Ensaio de permeabilidade do concreto	99
6.3.2	Ensaio de carbonatação acelerada	100
6.3.3	Ensaio de penetração de cloretos.....	104
6.4	CONCLUSÃO	106
7	CONCLUSÃO GERAL	111
8	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	112
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do tema e justificativa

O concreto é uma mistura de aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água e/ou aditivos, sendo o aglomerante mais usado o cimento Portland, o qual é definido como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais (ABNT, 2018).

A produção mundial de cimento Portland em 2020 foi de aproximadamente 4,1 Gt (USGS, 2022), sendo responsável por 8% das emissões de gases de efeito estufa (Wei e Cen, 2019), resultando na liberação de, aproximadamente, 1 ton de CO₂ para cada ton de cimento produzido (Monteiro et al, 2017), além de um consumo da ordem de 3% de energia térmica global (Coffeti et al, 2022).

O clínquer é constituído, em sua maior parte, de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas obtidos pela queima, a uma temperatura de cerca de 1450°C, de misturas convenientemente moídas e dosadas de materiais calcários e argilosos, sendo o maior responsável pela emissão de CO₂ (Juhart et al, 2021).

A produção de clínquer é responsável pela liberação de aproximadamente 50% de CO₂ do total emitido pela fabricação do cimento, onde 35% são provenientes da combustão de combustíveis fósseis para calcinação, e o restante dos processos de escavação, transporte e moagem (Madalena et al, 2018).

Os impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira impulsionam pesquisas em busca de soluções alternativas, novas tecnologias construtivas, estratégias inovadoras que podem reduzir significativamente a pegada de carbono, o uso excessivo de energia e a geração de resíduos associados à construção civil, como o uso de agregados reciclados, materiais cimentícios suplementares e subprodutos industriais, como cinzas volantes e escória, na produção de concreto (Nilimaa, 2023).

Reduzir esses impactos ambientais resulta na obtenção do concreto sustentável, que atenda às necessidades humanas de construção de habitação e infraestrutura com a preservação do meio ambiente, sem comprometer a durabilidade e o desempenho do concreto, adotando estratégias de melhoria da eficiência das fábricas de cimento, técnicas de captura, utilização e armazenamento de carbono, uso de materiais cimentícios suplementares como substituição

parcial de cimento Portland, produção de novos tipos de clínqueres, uso de materiais ativados por álcalis, uso agregados reciclados e artificiais, uso de água não potável, além de aditivos para melhorar a durabilidade e uso de concretos de alto desempenho.

Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de substituir o clínquer por outros elementos que tornem o cimento mais sustentável, com a redução das emissões de CO₂ e reduzindo o consumo de energia (Hou et al, 2020) (Hanein et al, 2020), utilizando cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim e escória de alto-forno granulada moída, (Mardani-Aghabaglou, 2019), além de nano-sílica e hidróxido de cálcio, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (Madalena et al, 2018).

O uso de materiais cimentícios suplementares, que possuam o potencial para substituir parcial ou completamente o cimento na indústria da construção, contribui para mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de carbono, minimizando as concentrações atmosféricas de CO₂ (Khan e Javed, 2023).

Materiais cimentícios suplementares são pós solúveis siliciosos, aluminossiliciosos ou aluminossiliciosos de cálcio usados como substitutos parciais de clínquer em cimentos ou como substitutos parciais de cimento Portland em misturas de concreto, sendo uma das principais ferramentas para reduzir as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de concreto (Juenger et al, 2019).

Ao estudar a resistência à compressão dos concretos de alta resistência contendo apenas cimento Portland e comparando com sílica ativa em misturas binárias e um terceiro ligante (cinzas volantes Classe F ou Classe C ou escória granulada de alto-forno moída) em misturas ternárias, Erdem (2008) concluiu que as misturas ternárias obtiveram resistências maiores que misturas binárias de sílica ativa, sendo o desempenho da escória nas misturas ternárias melhor do que a cinza volante da classe F, mas pior do que a cinza volante da classe C.

Esse trabalho de pesquisa, desenvolvido no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (PPGEC/ITEC/UFPa), no Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais (GAEMA) propõe a produção de concreto com cimento a partir da substituição parcial do clínquer por lama de cal e cinza volante de biomassa, materiais esses provenientes da produção de celulose da Amazônia, como forma de contribuir para a sustentabilidade da construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa propõe analisar as propriedades físicas e as características de durabilidade do concreto produzido com cimento feito a partir da mistura de clínquer, gipsita e resíduos de celulose (lama de cal e cinza volante), combinados em misturas binárias e ternárias, comparando-o com o concreto de referência com cimento Portland tradicional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a viabilidade técnica da substituição parcial do clínquer por uso da lama de cal e cinza volante na produção de argamassas sustentáveis;
- Determinar as melhores proporções do concreto com adição de lama de cal e cinzas volantes;
- Verificar as propriedades mecânicas do concreto, no estado fresco, com adição de lama de cal e cinzas volantes;
- Verificar as propriedades mecânicas do concreto, no estado endurecido, com adição de lama de cal e cinzas volantes no tocante à resistência à compressão e resistência à tração na flexão;
- Verificar as propriedades de durabilidade do concreto com adição de lama de cal e cinzas volantes no tocante à absorção de água por capilaridade, imersão e índice de vazios, penetração de cloretos e carbonatação e
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios do concreto com adição de lama de cal e cinzas volantes com o concreto de referência

1.3 Estrutura da tese

A estrutura do trabalho está dividida em 7 capítulos, distribuídos como segue:

O primeiro capítulo tem por finalidade apresentar a introdução do estudo, a relevância e justificativa do tema, os objetivos e a estrutura da tese.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura, abordando os aspectos do uso dos resíduos de celulose na produção de concretos, bem como de durabilidade e os parâmetros previstos na NBR 6118 (ABNT, 2014), além de diretrizes, no campo de especificações de ensaios, apresentadas em normas regulamentadoras sobre durabilidade de estruturas de concreto.

O terceiro capítulo apresenta o artigo intitulado “O potencial da utilização de resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, da Amazônia, Brasil, como materiais cimentícios”, com ênfase na caracterização do clínquer, gipsita, cinza volante e lama de cal utilizados na produção das misturas cimentícias.

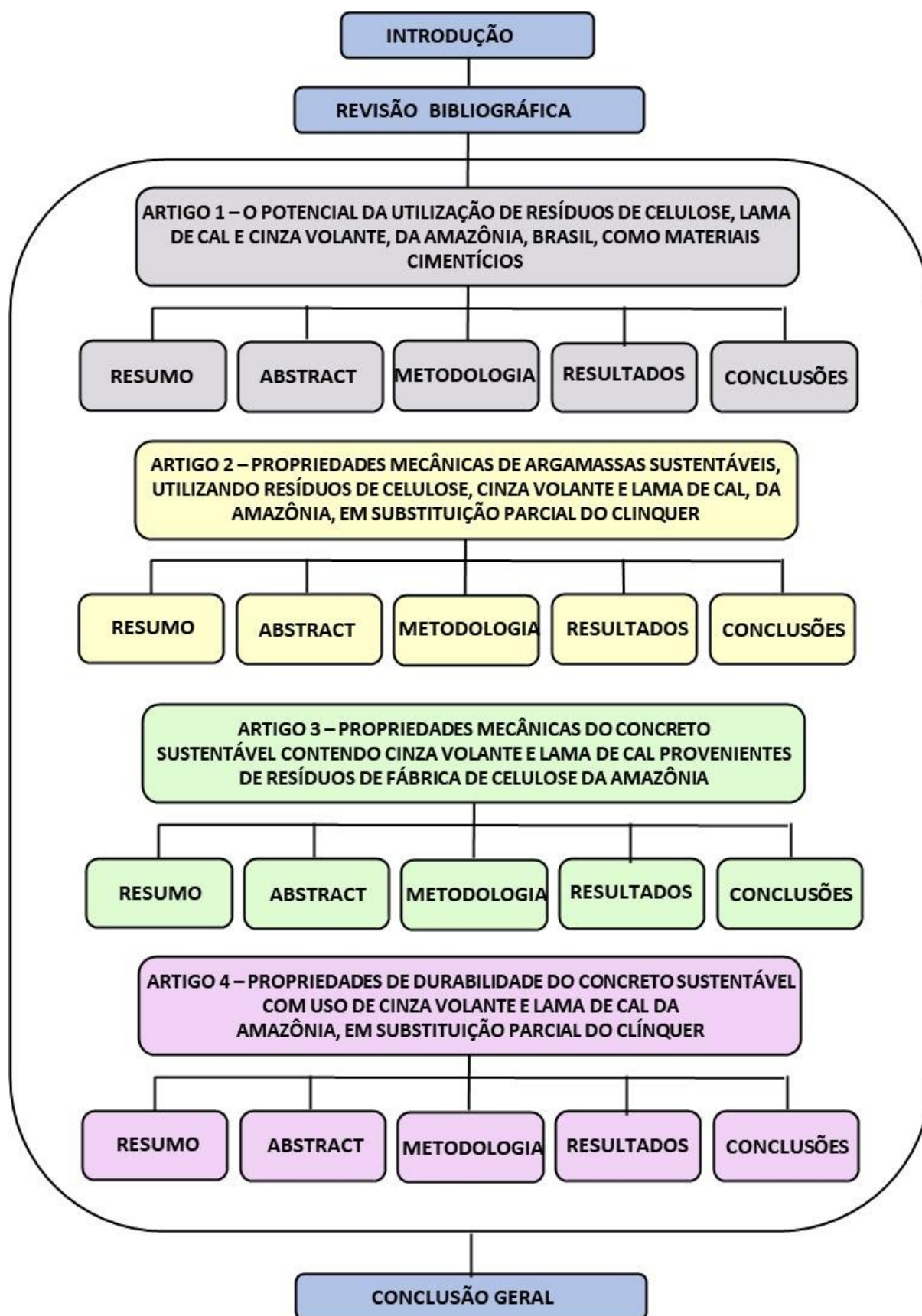
O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios sobre o comportamento mecânico de argamassas com o artigo intitulado “Propriedades mecânicas de argamassas sustentáveis, utilizando resíduos de celulose, cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer”.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios sobre o comportamento mecânico de concretos com o artigo intitulado “Propriedades mecânicas do concreto sustentável contendo cinza volante e lama de cal, provenientes de resíduos da produção de celulose, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer nas misturas cimentícias”.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios sobre o comportamento de durabilidade de concretos com o artigo intitulado “Propriedades de durabilidade do concreto sustentável contendo cinza volante e lama de cal, provenientes de resíduos da produção de celulose, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer nas misturas cimentícias”.

No último capítulo, têm-se as conclusões gerais referentes aos resultados obtidos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o organograma de como será feita a estruturação da pesquisa.

Figura 1.1 - Estrutura da tese



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A produção de celulose

O Brasil possui 220 empresas produtoras de celulose distribuídas em 540 municípios e 18 estados, sendo o segundo maior produtor de celulose do mundo, tendo produzido 24,3 milhões de toneladas em 2021, correspondendo a 11,3% da produção mundial, conforme Tabela 2.1. Desse total, 18,1 milhões de toneladas foram destinadas à exportação (IBÁ,2024).

Tabela 2.1 - Maiores produtores mundiais de celulose

País	Produção (10 ⁶ t)	% da produção
EUA	47,8	27,4
Brasil	24,3	11,3
China	22,6	8,0
Canadá	14,2	8,3
Suécia	11,8	6,5
Finlândia	10,9	5,7
Indonésia	10,1	4,5
Rússia	8,8	4,7
Japão	7,7	3,9
Chile	4,7	2,8

Fonte: Ibá (2024)

A matéria-prima utilizada, no Brasil, para a produção de celulose, são árvores de reflorestamento do tipo eucalipto, com área plantada de 7,83 milhões de hectares, com produtividade estimada em 33,7 m³/ha/ano (com casca), com idade média de 7,2 anos (IBÁ, 2024).

Os resíduos de celulose utilizados nessa pesquisa são a cinza volante, proveniente da queima de biomassa e a lama de cal, produzida a partir da recuperação de agentes químicos durante a etapa de caustificação da produção de celulose pelo processo Kraft, foram fornecidos pela empresa Suzano Papel e Celulose, filial do município de Imperatriz (MA), que produz 1,7 milhões de toneladas/ano de celulose.

No gerenciamento dos resíduos sólidos industriais oriundos da produção de celulose, a Suzano observa a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição ambientalmente adequada dos rejeitos, com o

objetivo de buscar uma destinação mais sustentável para os resíduos e em último caso a disposição em aterro.

A partir dessa premissa, a disposição final dos resíduos, pela empresa, é feita da seguinte forma:

- ✓ lodo primário e o lodo biológico proveniente da ETE são misturados com cascas e são queimados em caldeira de biomassa para geração de vapor que é turbinado para gerar energia;
- ✓ palitos da depuração são enviados para aterro (Classe IIA), o qual é licenciado e localizado dentro da fábrica e
- ✓ resíduos de caustificação (lama de cal) e cinzas da caldeira de biomassa (cinza volante) são utilizados para elaboração de corretivo de pH do solo.

A Figura 2.1 apresenta a localização das principais empresas produtoras de celulose no Brasil, com destaque para a empresa Suzano papel e celulose em Imperatriz (MA).

Figura 2.1 - Localização das unidades fabris e dos centros de distribuição associadas à Ibá



Fonte: Ibá (2024)

2.2 Os resíduos de celulose

A celulose é produzida a partir do cozimento da madeira gerando um líquido rico em compostos de sódio e matéria orgânica, a lixívia ou licor preto, a qual é queimada em caldeiras de recuperação de reagentes químicos, produção de vapor e de eletricidade.

A produção de celulose gera como resíduos a casca, a lama de cal, o lodo orgânico da estação de tratamento de efluentes, o resíduo celulósico e a cinza de caldeira (cinza volante) resultante da queima de biomassa (Martinez-Lage et al, 2016), os quais apresentam grande potencial para substituições de matérias-primas tradicionais utilizadas na produção de clínquer devido a alta concentração de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 (Simão et al, 2018).

Qina e Pinheiro (2020) descrevem o processo de produção de celulose através do processo Kraft, destacando que é o mais utilizado a nível mundial, o qual realiza a transformação da madeira em material fibroso, com o objetivo de dissolver a lignina, agente ligante das fibras na madeira, para a liberação das fibras com o mínimo de degradação da celulose e da hemicelulose. É realizado seguindo as etapas de descascamento; picagem; classificação; cozimento; depuração, branqueamento e recuperação do licor.

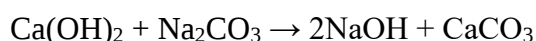
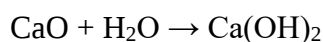
Neste processo a madeira é descascada, picada e levada ao cozimento no digestor, em uma solução aquosa contendo hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na_2S). Concluída esta etapa, os residuais químicos e as substâncias dissolvidas formam o licor preto. A polpa de celulose deixa o digestor e passa por um processo de lavagem da massa marrom para, em seguida ir para o processo de branqueamento, secagem e enfardamento.

Enquanto isso o licor negro passa por um processo de recuperação de produtos químicos, com a evaporação e consequente elevação do teor de sólidos, gerando o licor preto forte, e posterior queima deste na caldeira de recuperação, resultando no licor verde, o qual é rico em sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3), liberando materiais insolúveis denominados de dregs.

Em seguida ocorre o processo de caustificação que tem por objetivo a recuperação do licor branco para uso no digestor no processo de cozimento da madeira. Para isso é adicionada cal (CaO) no licor verde, dissolvida em água, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que reage com o carbonato de sódio (Na_2CO_3), presente no licor verde, produzindo a soda cáustica

(NaOH) e carbonato de cálcio (CaCO_3), que é calcinado no forno de cal para produzindo a lama de cal.

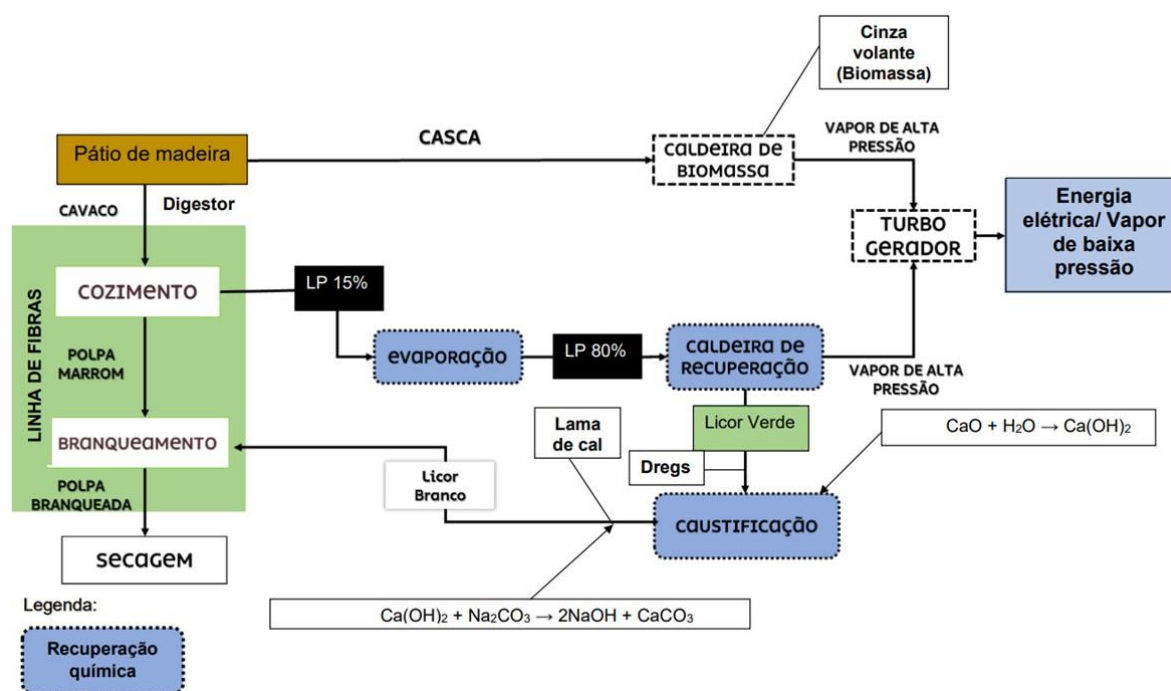
Qin et al (2015) relatam que a lama de cal é um resíduo industrial obtido durante a reação de caustificação de um processo de reciclagem de álcalis na indústria de papel, onde é adicionada cal, a qual misturada com a água, para recuperação da soda cáustica, cujo principal componente químico é o carbonato de cálcio (CaCO_3) conforme reação:



Os grits são materiais removidos da descarga do forno de cal para evitar o acúmulo de caustificantes e desgaste mecânico nos componentes do filtro.

A Figura 2.2 apresenta o fluxograma para geração de resíduos de celulose em fábrica de papel.

Figura 2.2 - Fluxograma para geração de resíduos de celulose em fábrica de papel



Fonte: Suzano Papel e Celulose, adaptado pelo autor (2024)

A geração de resíduos em fábricas de celulose que usam o método kraft é de, aproximadamente, 97 kg/t de polpa seca ao ar, sendo 25 kg/t de lama de cal e 30 kg/t de cinza volante (Qina e Pinheiro, 2020). Considerando a produção de celulose no Brasil, podemos inferir que a geração de lama de cal é de 562.500 t e a cinza volante de 675.000 t.

Neste trabalho serão utilizados a cinza volante, indicados para a produção de concreto, cimento e tijolos, estabilização de solos de rodovias e a lama de cal, que também contribui para a melhoria da capacidade de carga das rodovias (Meyer, 2022).

2.2.1 Usos da lama de cal e cinza volante em materiais cimentícios

A lama de cal e as cinzas volantes vêm sendo estudadas e utilizadas em vários campos do conhecimento como a agronomia, construção rodoviária e engenharia civil, principalmente em argamassas e concretos, conforme Quadro 1.1.

Sahu et al (2017) misturaram lama de cal e cinza volante e estabilizaram usando cal e gesso, alcançando resultados satisfatórios para aplicação como material de camada de base em pavimentos flexíveis devido a sua boa resistência e durabilidade.

Simão et al (2018) produziram ecoclínqueres, cimentos com baixo teor de clínquer, utilizando lama de cal, cinza volante e lodo da estação de tratamento de efluentes, misturando-os em diversas proporções, concluindo que algumas proporções eram mais ricas em belita e tinham quantidades relativamente pequenas de alita, e em outros era o inverso.

Vashistha et al (2019) concluíram que a substituição parcial do cimento Portland por 10% a 30% do por lama de cal é uma alternativa sustentável, assim como recomendam para a produção de componentes de cimento e cerâmica a combinação de lama de cal com materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa, nanossílica e cinzas volantes.

Li et al (2021) ao estudarem o concreto aerado com adição de lama de cal e cinza volante para uso em rodovias, constataram melhoria nas propriedades mecânicas do concreto devido ao seu efeito de preenchimento de vazios e à alta alcalinidade da lama de cal, o que estimulou a atividade da cinza volante.

A Tabela 2.2 mostra a composição química da lama de cal e da cinza volante em % de massa reportadas em outros estudos, considerando-se os principais elementos.

Tabela 2.2 - Composição química da lama de cal e da cinza volante (%)

Resíduo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Perda ao fogo	Autor
Lama de cal	3,4–11,0	0,5–1,4	0,2–1,2	44,4–52,0	0,6–3,4	31,5–43,5	Qin et al (2015)
	1,06	0,22	0,16	53,55	0,91	42,25	Simão et al (2018)
	6,85	0,25	0,27	50,10	0,92	40,10	Vashistha et al (2019)
	1,35	0,28	0,16	52,47	<0,05	42,28	Pizzato et al (2021)
	2,08	0,71	0,36	47,5	2,74	42,84	Li et al (2021)
Cinzas volantes	33,9–59,7	16,5–35,4	1,5–19,7	0,8–10,4	0,7–1,9	1,2–33,6	Qin et al (2015)
	49,65	9,94	4,07	2,10	1,25	26,87	Simão et al (2018)
	61,3	19,91	6,9	1,33	1,74	3,65	Booya et al (2019)
	41,11	25,13	6,05	12,19	0,15	13,35	Vashistha et al (2019)
	48,24	34,68	5,23	2,6	0,46	4,67	Li et al (2021)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Observa-se que os estudos com a lama de cal apresentam alto teor de CaO que, ao reagir com o CO₂ forma o CaCO₃ (calcita), fase característica de materiais carbonáticos, indicando ser este material adequado para uso como filler em misturas cimentícias.

Para que um material seja considerado pozzolânico a soma dos elementos constituintes dos materiais como o SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ têm que ser superior a 50% (ASTM C618, 2022), percentual esse alcançado pelas cinzas volantes estudadas, caracterizando-as como materiais com potencial pozzolânico.

2.3 Durabilidade do concreto

O concreto é um elemento que apresenta inúmeros poros, o que possibilita a entrada de gases e água pelos poros abertos que estejam interligados. Grande parte da degradação física e química das estruturas de concreto é provocada pela entrada da água que atua como veículo que transporta substâncias agressivas que causam sérios danos, principalmente, a reservatórios e obras de contenção (Wong, 2015).

Durabilidade do concreto é definida como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas no projeto, conservando sua segurança, estabilidade e aptidão

em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) (Giulietti et al, 2021).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define os mecanismos de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto em três grupos:

2.3.1 Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:

- ✓ lixiviação é o mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras;
- ✓ expansão por sulfato provocada pela ação de águas ou solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado e
- ✓ reação álcali-agregado proveniente da ação das reações entre os álcalis do concreto e agregados reativos.

2.3.2 Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:

- ✓ despassivação por carbonatação provocada pela ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura e
- ✓ despassivação por ação de cloretos que consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon-cloro. Os cloretos afetam a durabilidade iniciando a corrosão do aço de reforço e os sulfatos pela deterioração do concreto através da formação de produtos expansivos e de reação de fissuração (etringita e gesso) (Alaghebandian et al, 2020).

2.3.3 Mecanismos de deterioração da estrutura:

- ✓ são todos aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação, bem como as diversas ações que atuam sobre a estrutura.

Até esta data não existe norma brasileira que defina metodologias de ensaios que possibilitem avaliar a durabilidade do concreto. Cascudo e Oliveira (2021) propõem a utilização

das normas NT Build 492 para os ensaios de migração de cloretos em regime não estacionário e a ISO 1920-12 para os ensaios de carbonatação acelerada do concreto.

Ribeiro et al (2023) apresentaram uma proposta de classificação da qualidade do concreto, baseada na resistência à carbonatação para diferentes ambientes, a partir dos valores dos coeficientes de carbonatação acelerada obtidos conforme a norma ISO 1920-12 e considerando as camadas de cobertura de concreto apresentada segundo NBR 6118 (ABNT,2014), apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação da qualidade do concreto

Resistência à carbonatação do concreto	Ambiente rural, urbano ou industrial moderado (%CO ₂ <0,08%; x'= 7,0 – 8,0)		Ambiente Industrial Severo (0,08 ≤ % CO ₂ < 0,30; x'= 3,0)	
	Coeficiente de carbonatação acelerada, K _{acel}			
	(mm·ano ^{-0,5})	(mm·semana ^{-0,5})	(mm·ano ^{-0,5})	(mm·semana ^{-0,5})
Excepcional	<18,5	<2,55	<15,5	< 2,15
Muito alto	18,5–20,0	2,55–2,75	15,5–17,0	2,15–2,35
Alto	20,0–22,5	2,75–3,10	17,0–19,0	2,35–2,65
Moderado	22,5–27,0	3,10–3,75	19,0–23,0	2,65–3,20
Baixo	27,0–36,0	3,75–5,00	23,0–30,0	3,20–4,15
Muito baixo	36,0–50,5	5h00–7h00	30,0–42,5	4,15–5,90
Insignificante	≥50,5	≥7,00	≥42,5	≥5,90

Fonte: Ribeiro et al (2023)

A durabilidade de uma estrutura está ligada intrinsecamente à sua vida útil, e para que esta condição seja atingida é fundamental que sejam adotadas medidas que a preservem como o projeto compatível com o seu uso, aliado a ações de manutenção que preservem as suas características iniciais.

3 ARTIGO 1 - O POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CELULOSE, LAMA DE CAL E CINZA VOLANTE, DA AMAZÔNIA, BRASIL, COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS

DOI:10.55905/rcssv13n5-007

Receivedon:Apr10th,2024

Acceptedon:Apr30th,2024

RESUMO

Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de substituir o clínquer por outros elementos que tornem o cimento mais sustentável, com a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia utilizando materiais cimentícios suplementares. Os resíduos provenientes de fábrica de celulose, a lama de cal, o lodo orgânico da estação de tratamento de efluentes, o resíduo celulósico e a cinza de caldeira (cinza volante), têm sido estudados como alternativas de materiais cimentícios suplementares. Este trabalho avaliou o potencial do uso da lama de cal e da cinza volante, provenientes de resíduos de celulose da Amazônia, para uso em materiais cimentícios, usando técnicas de caracterização para essa finalidade. A cinza volante, em estudo, é constituída por quartzo (SiO₂), calcita (CaCO₃) e bassanita (CaSO₄.1/2H₂O), enquanto que na lama de cal, em estudo, predomina a calcita. A composição química da cinza volante apresentou uma alta concentração de SiO₂ (32,66%), e óxidos importantes no processo para obtenção de materiais cimentícios, como Al₂O₃ (14,99%), Fe₂O₃ (6,38%) e CaO (15,52%), cuja somatória desses óxidos é igual a 54,03%, portanto, superior a 50% comprovando o potencial pozolânico da cinza volante. A lama de cal mostra teor maioritário de CaO (48,80%) e elevada perda ao fogo (41,51%). A cinza volante pode ser considerada material pozolânico, pois seu índice de atividade pozolânica alcançou 90%, enquanto que a lama de cal pode ser considerada material carbonático pois apresenta teor de carbonato de cálcio igual a 87,14%. A cinza volante apresenta massa específica igual a 2,59 g/cm³, enquanto a da lama de cal é igual a 2,68 g/cm³. Esses materiais sofrem diversos eventos térmicos das fases observadas por DRX sendo principalmente a decomposição de carbonatos e sulfatos para fases estáveis de cálcio. Analisando-se os resultados dos estudos, pode-se inferir que os materiais apresentam potencial para uso como adições minerais para misturas cimentícias.

Palavras-chave: Cinza volante, Lama de cal, Adições minerais, Misturas cimentícias, Caracterização.

ABSTRACT

Many studies have been carried out aiming to replace clinker with other components to make cement more sustainable, thereby reducing CO₂ emissions and energy consumption. These studies often use additional cementitious materials derived from industrial waste, such as lime mud, organic sludge from effluent treatment plants, cellulose residues, and boiler ash (fly ash), as alternative supplementary cementitious materials. This work investigates the potential use of

lime mud and fly ash from cellulose waste in the Amazon as components in cementitious materials, using a variety of characterization techniques to assess their suitability. The fly ash under study is composed of quartz (SiO_2), calcite (CaCO_3), and bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), while the lime mud is predominantly calcite. The chemical composition of fly ash shows a high concentration of SiO_2 (32.66%) and other key oxides for cementitious material production, including Al_2O_3 (14.99%), Fe_2O_3 (6.38%), and CaO (15.52%), with their combined total exceeding 50%, indicating the pozzolanic potential of the fly ash. The lime mud contains principally CaO (48.80%) and has a high loss on ignition (41.51%). Fly ash can be considered a pozzolanic material because its pozzolanic activity index reached 90%, while lime mud can be considered a carbonatic material due to its calcium carbonate content of 87.14%. The specific gravity of the fly ash is 2.59 g/cm^3 , while the lime mud has a specific gravity is 2.68 g/cm^3 . Both materials undergo several thermal transformations, as observed through XRD analysis, primarily involving the decomposition of carbonates and sulfates into stable calcium-based phases. Based on these results, it can be concluded that these materials have potential for use as mineral additions in cement mixtures.

Keywords: Fly ash, Lime mud, Mineral additions, Cement mixtures, Caracterization.

RESUMEN

Se han realizado varios estudios con el objetivo de sustituir el clínker por otros elementos que hagan más sostenible el cemento, reduciendo las emisiones de CO_2 y el consumo energético utilizando materiales cementantes adicionales. Como materiales cementosos suplementarios alternativos se han estudiado residuos de la fábrica de celulosa, lodos calcáreos, lodos orgánicos de la depuradora de efluentes, residuos de celulosa y cenizas de caldera (cenizas volantes). Este trabajo evalúa el potencial del uso de lodos de cal y cenizas volantes, provenientes de residuos de celulosa amazónica, para su uso en materiales cementantes, utilizando técnicas de caracterización para tal fin. Las cenizas volantes en estudio están constituidas por cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) y bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), mientras que en el lodo de cal, en estudio, predomina la calcita. La composición química de las cenizas volantes mostró una alta concentración de SiO_2 (32,66%), y óxidos importantes en el proceso de obtención de materiales cementantes, como Al_2O_3 (14,99%), Fe_2O_3 (6,38%) y CaO (15,52%). cuya suma de estos óxidos es igual al 54,03%, por tanto, superior al 50%, comprobándose el potencial puzolánico de las cenizas volantes. La ceniza volante puede considerarse un material puzolánico, ya que su índice de actividad puzolánica alcanzó el 90%, mientras que el lodo de cal puede considerarse un material carbonático porque presenta un contenido de carbonato de calcio del 87,14%. El lodo de cal presenta un contenido mayoritario de CaO (48,80%) y altas pérdidas por incendio (41,51%). Las cenizas volantes tienen una masa específica igual a $2,59 \text{ g/cm}^3$, mientras que la del lodo calizo es igual a $2,68 \text{ g/cm}^3$ a 3 g/cm^3 . Estos materiales sufren varios eventos térmicos de las fases observadas por XRD, principalmente la descomposición de

carbonatos y sulfatos a fases estables de calcio. Analizando los resultados de los estudios se puede inferir que los materiales tienen potencial para ser utilizados como aditivos minerales para mezclas de cemento.

Palabras clave: Cenizas volantes, Lodos calizos, Adiciones minerales, Mezclas cementosas, Caracterización.

3.1 Introdução

O cimento é o principal insumo utilizado para a produção de concreto e argamassas, sendo constituído por uma mistura de clínquer e adições. A produção mundial de cimento em 2022 foi de, aproximadamente, 4,1 milhões de toneladas, sendo a produção do Brasil 65 mil toneladas (USGS, 2023). A indústria cimentícia é responsável por 8% das emissões de gases de efeito estufa (Ellis et al, 2019; Andrew, 2019), resultando na liberação de, aproximadamente, 1 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido (Monteiro; Miller; Hovard, 2017), além de um consumo da ordem de 3% de energia térmica global (Coffetti et al, 2022).

As emissões de CO₂ na produção do cimento são decorrentes da utilização de combustíveis fósseis que geram energia para a produção de clínquer, a partir da calcinação de calcário e argila a uma temperatura de, aproximadamente, 1450°C, decompondo os carbonatos, notadamente o CaCO₃, em óxidos, processo que contribui com 5% do total das emissões antropogênicas de CO₂ (Andrew, 2019).

No Brasil a indústria cimentícia vem envidando esforços no sentido de reduzir as emissões de CO₂, passando de 700 kg CO₂/t cimento em 1990, para 572 kg CO₂/t cimento em 2021, o equivalente a um decréscimo de 18%, acima da média mundial de redução que foi de 611 kg CO₂/t cimento (SNIC, 2022).

Uma das alternativas para reduzir o impacto no meio ambiente e no aquecimento global, causado pela produção de Cimento Portland Comum são os cimentos belíticos, obtidos a temperaturas inferiores à comumente utilizada na indústria cimenteira, apresentando menor quantidade necessária de carbonatos, reduzindo a emissão de CO₂ (SENFF et al, 2011) e, consequentemente uma redução considerável no consumo energético.

Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de substituir o clínquer por outros elementos que tornem o cimento mais sustentável, com a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia utilizando materiais cimentícios suplementares (Hanein et al, 2018; Hou et al, 2020; Torres, 2020).

Os resíduos provenientes de fábrica de celulose, a lama de cal, o lodo orgânico da estação de tratamento de efluentes, o resíduo celulósico e a cinza de caldeira (cinza volante) resultante da queima de biomassa, têm sido estudados como alternativas de materiais cimentícios suplementares, pois apresentam grande potencial para substituições de matérias-

primas tradicionais utilizadas na produção de clínquer devido à alta concentração de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 (Simão et al, 2018).

O Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo, tendo produzido 25 milhões de toneladas em 2022, correspondendo a 16,9% da produção mundial (IBÁ, 2023). Os resíduos de papel e celulose produzidos pelas indústrias brasileiras são geralmente destinados a aterros sanitários após tratamento em tanques de sedimentação primária, enquanto os efluentes tratados são lançados em rios e lagos (Azevedo et al, 2020).

O Brasil possui 220 empresas distribuídas em 540 municípios e 18 estados, sendo o segundo maior produtor de celulose do mundo, tendo produzido 22,5 milhões de toneladas em 2021, correspondendo a 11,3% da produção mundial. Desse total, 15,7 milhões de toneladas foram destinadas à exportação (IBÁ, 2022).

A geração de resíduos em fábricas de celulose que usam o método kraft para a produção de papel, é de, aproximadamente, 97 kg/t de polpa seca ao ar, sendo 25 kg/t de lama de cal e 30 kg/t de cinza volante (Qina; Pinheiro, 2020). Considerando a produção de celulose no Brasil, podemos inferir que a geração de lama de cal é de 562.500 t e a cinza volante de 675.000 t. A lama de cal e as cinzas volantes vêm sendo estudadas e utilizadas em vários campos do conhecimento como a agronomia, construção rodoviária e engenharia civil, principalmente em argamassas e concretos.

A lama de cal é um resíduo industrial obtido durante a reação de caustificação de um processo de reciclagem de álcalis na indústria de papel, onde é adicionada cal (CaO), a qual é misturada com a água, para recuperação do hidróxido de sódio (NaOH), cujo principal componente químico é o carbonato de cálcio (CaCO_3) (Qin et al, 2015). A cinza volante é proveniente da queima de biomassa nas caldeiras para a geração de energia.

Há diversos estudos de uso de lama de cal e cinzas volantes como materiais cimentícios:

- a) Buruberri; Seabra; Labrincha (2015) analisaram a lama de cal, o lodo biológico e a cinzas volantes provenientes da queima de biomassa para a preparação de clínquer, testados em argamassas, as quais apresentaram resistência mecânica satisfatória e não revelaram sinais de deterioração ou fragilidades de durabilidade, podendo ser utilizado pela indústria cimentícia com vantagens energéticas e ambientais.

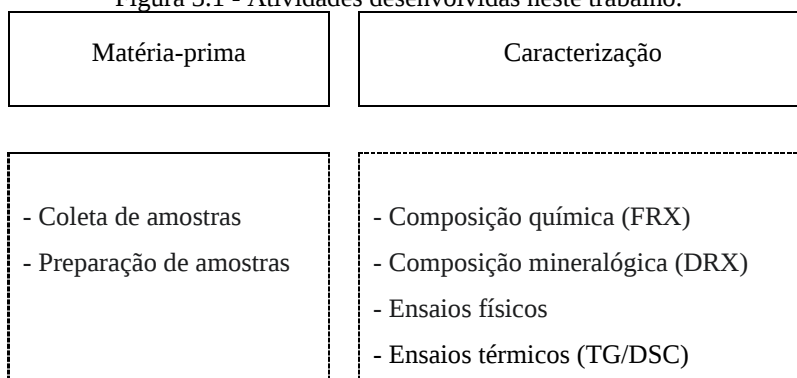
- b) Sahu et al (2017) misturaram lama de cal e cinza volante e estabilizaram usando cal e gesso, alcançando resultados satisfatórios para aplicação como material de camada de base em pavimentos flexíveis, devido a sua boa resistência e durabilidade.
- c) Simão et al (2018) produziram clínquer utilizando lama de cal, cinza volante e lodo da estação de tratamento de efluentes, misturando-os em diversas proporções, concluindo que algumas proporções eram mais ricas em belita e tinham quantidades relativamente pequenas de alita.
- d) Vashistha et al (2019) concluíram que a substituição parcial do cimento Portland por 10% a 30% de lama de cal é uma alternativa sustentável, assim como recomendam para a produção de componentes de cimento e cerâmica a combinação de lama de cal com materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa, nanossílica e cinzas volantes.
- e) Li et al (2021) estudaram a viabilidade de concreto espumado com baixo teor de cimento utilizando lama residual de cal e cinza volante como adições minerais, para uso na construção rodoviária, o qual apresentou excelente trabalhabilidade e estabilidade, bem como bons resultados de resistência à compressão, resistência à tração e CBR em todas as misturas e;
- f) Moukannaa et al (2022) investigaram a viabilidade da utilização de quatro cinzas da fábrica de papel coletadas em diferentes estágios do mesmo processo de incineração, em diferentes taxas de substituição de cimentos, concluindo que podem ser utilizadas como alternativa de material cimentício suplementar, contribuindo para a redução da emissão de gases de efeito estufa além de diminuir a quantidade de cinzas das fábricas de papel depositadas em aterros.

Visando o reaproveitamento de materiais residuais, este trabalho avalia o potencial do uso da lama de cal e da cinza volante, da Amazônia, para uso em materiais cimentícios.

3.2 Materiais e métodos

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em duas etapas, coleta e preparação da matéria prima, seguida da caracterização, como é observada no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 - Atividades desenvolvidas neste trabalho.



Fonte: Autor (2024)

3.2.1 Materiais

3.2.1.1 Coleta de amostras

Os resíduos de celulose utilizados nesta pesquisa são a cinza volante, proveniente da queima de biomassa e a lama de cal, produzida a partir da recuperação de agentes químicos durante a etapa de caustificação da produção de celulose pelo processo kraft, fornecidos por uma indústria de papel da região nordeste do Brasil.

3.2.1.2 Preparação das amostras

Os materiais foram destorroados, em sua forma natural, em moinho de bolas, até atingir quantidades de 80% de material passante na peneira 75 μm , em intervalos de tempo iguais a 1 hora para a gipsita e 2 horas para o clínquer, enquanto que a lama de cal e a cinza volante foram destorroadas durante 3 horas no mesmo moinho. O material retido na peneira foi recolocado no moinho até atingir quantidades de 100% de material passante na peneira 75 μm .

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Composição química

As análises de composição química da matéria-prima (clínquer, gipsita, cinza volante e lama de cal) foram determinadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), usando o espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX) S2 RANGER da Bruker, tubo de raios-X de Pd. Para esse ensaio, foram utilizadas pastilhas prensadas em 20 t.

3.2.2.2 Composição mineralógica

Para determinação das fases presentes nos materiais foram realizadas análises mineralógicas por difração de raios-X (DRX), método do pó, usando um difratômetro de bancada D2Phaser da Bruker, tubo de cobre $\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$, e varredura entre 10 a 70 $^{\circ}2\theta$.

A identificação das fases foi feita pelo software HighScore X'pert Plus e base de dados PDF (Powder Diffraction File).

3.2.2.3 Ensaios Físicos

Foram realizados seguintes ensaios:

- a) Os índices de atividade pozolânica da cinza volante e da lama de cal foram verificados conforme as normas NBR 5751 (ABNT,2015) e NBR 5752 (ABNT,2014), utilizando-se hidróxido de cálcio e cimento Portland.
- b) As massas específicas da cinza volante e da lama de cal foram determinadas por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.2.4 Análises Térmicas

Foram realizadas análises termogravimétricas e de calorimetria exploratória diferencial, usando um Analisador Térmico Simultâneo (Tg/DSC), modelo STA 449 F3 Júpiter, da Netzsch. Aproximadamente 30 mg da amostra pulverizada foi submetida a rampa de temperatura de 25 a 1000°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min., fluxo de 70mL/min de N2 5.0, em cadinho de Pt/Rh e em forno cilíndrico vertical de SiC.

3.3 Resultados e discussões

3.3.1 Caracterização química

Os resultados das composições químicas obtidos por FRX das matérias-primas são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química das matérias-primas usadas para misturas cimentícias

Componente	Cinza Volante (%)	Lama de cal (%)
SiO ₂	32,66	1,60
Al ₂ O ₃	14,99	0,87
Fe ₂ O ₃	6,38	0,53
CaO	15,52	48,80
Na ₂ O	2,04	1,50
MgO	3,72	3,16
P ₂ O ₅	1,27	0,97
SO ₃	7,20	0,73
K ₂ O	3,76	0,14
TiO ₂	1,41	-
MnO	0,20	0,13
SrO	0,09	0,07
ZrO ₂	0,19	-
Perda ao fogo	10,57	41,51

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

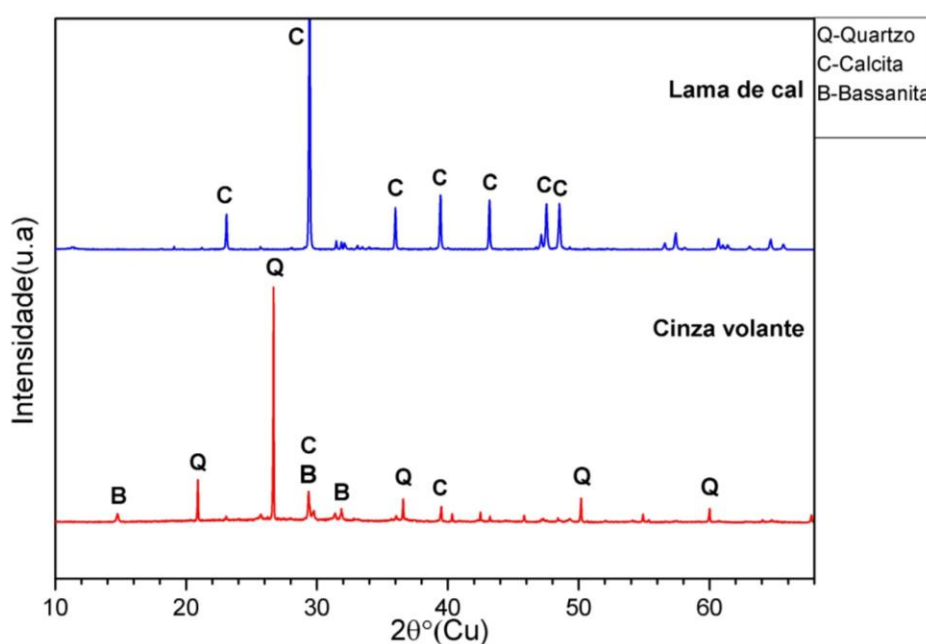
A composição química da cinza volante apresentou uma alta concentração de sílica (32,66%), além de conter percentuais consideráveis de outros óxidos importantes no processo para obtenção de materiais cimentícios, como Al_2O_3 (14,99%), Fe_2O_3 (6,38%) e CaO (15,52%), cuja somatória desses óxidos é igual a 54,03%, portanto, superior a 50% comprovando o potencial pozzolânico da cinza volante (ASTM, 2022).

A lama de cal apresenta composição química com teor maioritário de CaO (48,80%) e elevada perda ao fogo (41,51%). A lama de cal é proveniente do processo de caustificação durante a fabricação de celulose, quando ocorre a calcinação do CaCO_3 , e subsequente precipitação do CO_2 . O material em estudo apresenta teor de carbonato de cálcio igual a 87,14%, superior a 75% preconizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). A perda ao fogo são os voláteis de CO/CO_2 ocorridos durante a calcinação.

3.3.2 Caracterização mineralógica

Os resultados mineralógicos obtidos por DRX são mostrados na Figura 3.2. No difratograma da cinza volante, são constatados a presença de quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), confirmando a presença maioritária de sílica e óxido de cálcio observados nos resultados de FRX. Na lama de cal destaca-se a fase calcita como predominante.

Figura 3.2 - Difratogramas de raios-X da lama de cal (LM), cinza volante (FA)



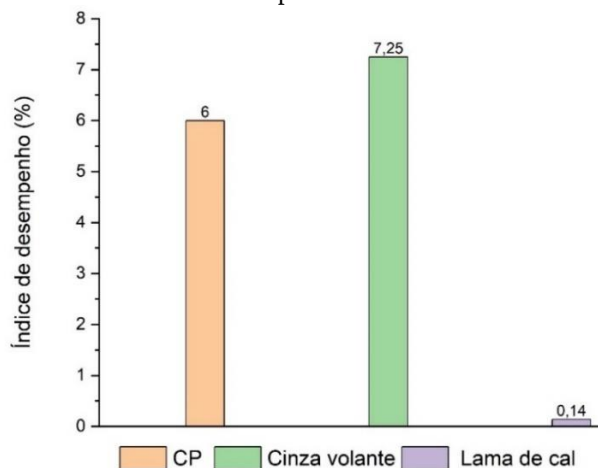
Fonte: Autor (2024).

3.3.3 Ensaios físicos

3.3.3.1 Índice de atividade pozzolânica com cal

Os resultados de índice de atividade pozolânica da cinza volante e da lama de cal com o uso de hidróxido de cálcio são apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Índice de atividade pozolânica com hidróxido de cálcio



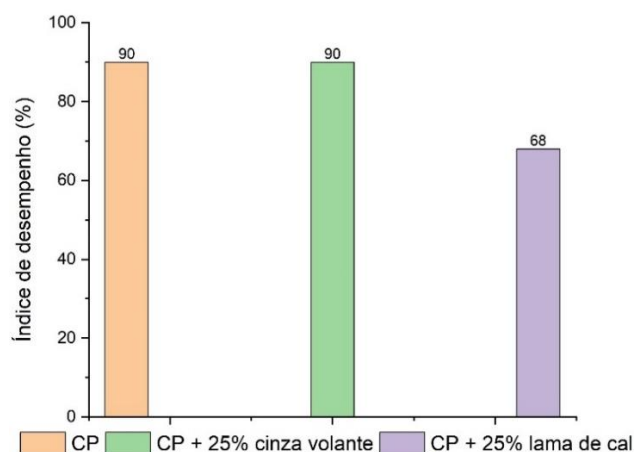
Fonte: Autor (2024)

A cinza volante obteve resistência média de 7,25 MPa aos sete dias, podendo ser considerado material pozolânico, enquanto que a lama de cal apresentou resistência de 0,14 MPa, abaixo da resistência mínima que deve ser 6 MPa conforme NBR 12653 (ABNT, 2015).

3.3.3.2 Índice de atividade pozolânica com cimento

A Figura 3.4 apresenta o índice de atividade pozolânica da cinza volante e da lama de cal com o uso de cimento Portland (CP).

Figura 3.4 - Índice de atividade pozolânica com cimento



Fonte: Autor (2024)

A argamassa com adição de 25% de cinza volante obteve resistência média de 31 MPa aos 28 dias, com o índice de atividade pozolânica igual a 90%. A argamassa com adição de

25% lama de cal apresentou resistência média de 26 MPa, com o índice de atividade pozolânica igual a 68%.

Conforme NBR 12653 (ABNT, 2015) a cinza volante pode ser considerada material pozolânico.

3.3.3.3 Massa específica

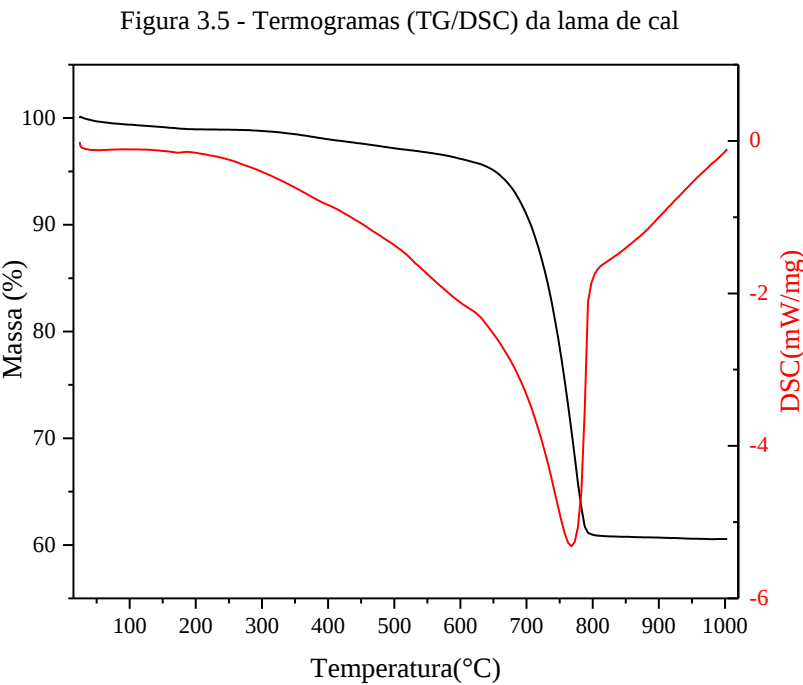
A Tabela 3.2 - Massa específica apresenta os resultados de massa específica

Tabela 3.2 - Massa específica	
MATÉRIA-PRIMA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)
Clínquer	3,09
Cinza volante	2,59
Lama de cal	2,68

Fonte: Autor (2024)

3.3.3.4 Análises térmicas

O comportamento térmico das amostras de lama de cal e cinza volante foram investigadas por TG/DSC e monitoradas por difração de raios-X. A Figura 3.5 mostra o termograma da lama de cal.



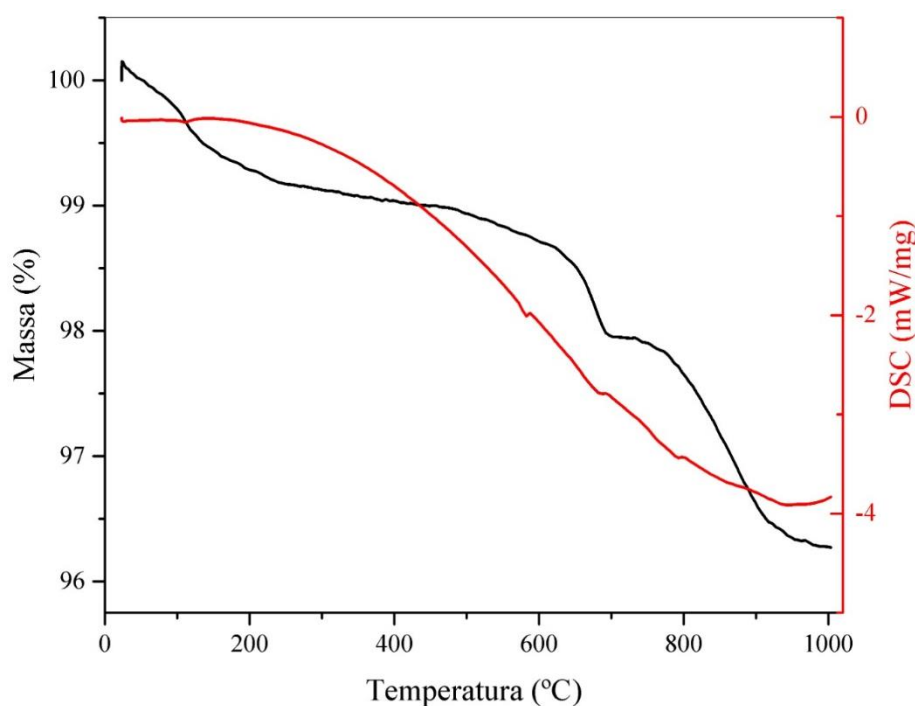
Fonte: Autor (2024)

A lama de cal mostra uma curva apresentando um pico endotérmico, em 800°C relacionando a decomposição da calcita (CaCO₃) com perda de CO₂ desse calcário, devido à

volatilização. Tal reação de decomposição acarreta uma perda de massa de cerca de 41%. O processo de degradação inicia à temperatura de 200°C e encerra em 800°C estando de acordo com outros estudos (Buruberri; Seabra; Labrincha, 2015; Qin et al, 2015; Simão et al, 2018).

A Figura 3.6 mostra o termograma da cinza volante.

Figura 3.6 - Termogramas (TG/DSC) da cinza volante



Fonte: Autor (2024)

Com base nos resultados de DRX, constatou-se a presença de bassanita, calcita e quartzo nas amostras de cinzas resultantes da combustão de celulose. As análises por DSC mostram uma curva contínua de decomposição dessas fases, exceto o quartzo. Dois efeitos endotérmicos são observados, referentes à perda de umidade que se inicia aos 50°C, e finaliza em aproximadamente 170°C, que corresponde à perda de água estrutural pela transformação do sulfato de cálcio hidratado para anidrita (CaSO_4). Após essa temperatura a curva mostra a transformação do sulfato de forma contínua de 200°C a 350°C, isto é, até anidrita insolúvel.

Na curva se observa pico endotérmico da decomposição de CaCO_3 e CaSO_4 em 700°C ainda em decomposição até 900°C. A perda em massa total corresponde a 3,7%, sendo 1% para perda de umidade, 1% para água estrutural e 1,7% para componentes voláteis dos carbonatos e sulfatos. Os resultados encontrados estão em conformidade com os valores encontrados em outros estudos (Buruberri et al, 2015; Simão et al, 2018).

3.4 Conclusão

Este trabalho avalia o potencial do uso dos resíduos da lama de cal e da cinza volante, provenientes de resíduos de celulose da Amazônia, para uso em materiais cimentícios, usando técnicas de caracterização para essa finalidade.

A lama de cal é constituída, principalmente por calcário calcítico com elevados teores de CaO (48,80%), quase estequiométrico. A cinza volante é uma mistura de carbonatos (calcítico) e sulfatos (bassanita), com elevados teores de SiO₂ (32,66%), CaO (15,52%), Al₂O₃ (14,99%) e Fe₂O₃ (6,38%), cuja somatória desses óxidos igual a 54,03%, portanto, superior a 50% comprova o potencial pozolânico da cinza volante.

Esses materiais apresentam propriedades físicas de massas específicas iguais a 2,59 g/cm³ e 2,68 g/cm³ para a cinza volante e lama de cal, respectivamente. A cinza volante pode ser considerada material pozolânico, pois seu índice de atividade pozolânica alcançou 90%, enquanto que a lama de cal pode ser considerada material carbonático pois apresenta teor de carbonato de cálcio igual a 87,14%.

A lama de cal, constituída por calcáreo e cinza volante por calcáreo e sulfatos sofrem diversos eventos térmicos desde perdas de água e estrutural para os sulfatos e de decomposição por volatilização desses materiais para fases estáveis de cálcio.

É importante reconhecer que esse material pode ser amplamente utilizado na indústria do cimento bem como aproveita o uso da reciclagem térmica e recuperação de energia a partir desses resíduos. Com esses dados pode se inferir que o material pode ser usado como adições minerais para misturas cimentícias.

REFERÊNCIAS

- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production 1928–2018. **Earth System Science Data**, v 11, p. 1675–1710, 20 Nov. 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C618**. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Philadelphia, 2022.
- AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Technological and environmental comparative of the processing of primary sludge waste from paper industry for mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119336>
- BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 252-260, abr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>
- COFFETTI, D.; CROTTI, E.; GAZZANIGA, G.; CARRARA, M.; PASTORE, T.; COPPOLA, L. Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, p. 106718, abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>
- ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.; KAMAL, A. Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115728, out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115728>

ELLIS, L. D.; BADEL, A. F.; CHIANG, M. L.; PARK, R. J. Y.; CHIANG, Y.M. Toward electrochemical synthesis of cement - An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO_3 while producing useful gas streams. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 23, p. 12584 - 12591, set. 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>

HANEIN, T.; GALVEZ-MARTOS, J. L.; BANNERMAN, M. N. Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2278 - 2287, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.183>

HOU, G.; CHEN, J.; LU, B.; CHEN, S.; CUI, E.; NAGUIB, H. M.; GUO, M.-Z.; ZHANG, Q. Composition design and pilot study of an advanced energy-saving and low-carbon rankinite clinker. **Cement and Concrete Research**, v. 127 p. 105926, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105926>

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório Anual 2022. Disponível em <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 10/02/2024.

LI, Z.; YUAN, H.; GAO, F.; ZHANG, H.; GE, Z.; WANG, K.; SUN, R.; GUAN, Y.; LING, Y.; JIANG, N. A. Feasibility study of low cement content foamed concrete using high volume of waste lime mud and fly ash for road embankment. **Materials**, v. 15, p. 86, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma15010086>

MONTEIRO, P.; MILLER, S.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Mater**, v. 16, p. 698–699, 2017. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1038/nmat4930>

MOUKANNAA, S.; ALZEER, M.; RAMTEKE, D. D.; OHENOJA, K.; ROPPO, J.; KINNUNEN, Paivo.; ILLIKAINEN, M. Investigation of different paper mill ashes as potential supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132583, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132583>

QIN, J.; CUI, C.; CUI, X.; HUSSAIN, A.; YANG, C.; YANG, S. Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature. **Ceramics International**, v. 41, n. 4 p. 5648-5655, mai. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.149>

QUINA, M. J.; PINHEIRO, C. T. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: the transition from landfill to industrial applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2317, mar. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072317>

SAHU, V.; SRIVASTAVA, A.; MISRA, A. K.; SHARMA, A. K. Stabilization of fly ash and lime sludge composites: Assessment of its performance as base course material. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 17, n. 3, p. 475 - 485, mai. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.010>

SENFF, L.; CASTELA, A.; HAJJAJI, W.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Formulations of sulfobelite cement through design of experiments. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3410 - 3416, ago. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.032>

SIMÃO, L.; LÓH, N. J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Thermal characterization of hydrated eco-friendly clinkers produced from pulp and paper mill waste. **Cerâmica**, v. 64, n. 371. p. 311-317, set, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712339>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório Anual, 2022. Disponível em: https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em 20/03/2024.

TORRES, C. M. M. E.; SILVA, C. M.; PEDROTI, L.G.; FERNANDES, W. E. H.; BALLOTIN, F. C.; ZANUNCIO, A. J. V. Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 3, p. 851-861, jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00983-x>

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023: **U.S. Geological Survey**, 210 p., 2013. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>

VASHISTHA, P.; SINGH, S. K.; Dutt, D.; KUMAR, V. Sustainable utilization of paper mill solid wastes via synthesis of nano silica for production of belite based clinker. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 557 - 565, jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.207>

4 ARTIGO 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS, UTILIZANDO RESÍDUOS DE CELULOSE, CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER

DOI: 10.54033/cadpedv21n7-183

Originals received: 06/19/2024

Acceptance for publication: 07/09/2024

RESUMO

As indústrias cimentícias são responsáveis pela emissão de 8% do CO₂ lançado na atmosfera global, provenientes da reação química envolvida na produção do clínquer, razão pela qual busca alternativas para mitigar esse passivo ambiental. Esta pesquisa tem por objetivo analisar as propriedades mecânicas de argamassas sustentáveis, utilizando resíduos de celulose, cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer, a partir da otimização de misturas cimentícias para obter argamassas com características de resistência e fluidez comparáveis à argamassa de referência de cimento Portland comum. As misturas cimentícias utilizadas foram obtidas através de composições binárias e ternárias com o clínquer, sendo a cinza volante utilizada como material pozolânico e a lama de cal como material carbonático. As composições químicas das misturas foram determinadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e a determinação das fases presentes foram realizadas através de análises mineralógicas por difração de raios-X (DRX). As misturas foram caracterizadas no tocante a granulometria a laser, massa específica, área superficial e consistência. As propriedades mecânicas foram determinadas através da moldagem de corpos de prova cilíndricos para verificar a resistência à compressão. As resistências à compressão variaram de 55% a 103% em relação à argamassa de referência aos 28 dias e 73% a 105% aos 91 dias, comprovando a viabilidade do uso de lama de cal e cinzas volantes como adições minerais para misturas cimentícias, com menor consumo de clínquer, reduzindo custos, promovendo a economia circular com o aproveitamento de resíduos, que seriam descartados em aterros sanitários.

Palavras-chave: Resíduo de celulose. Lama de cal. Cinza volante. Argamassa. Materiais cimentícios suplementares. Argamassa sustentável.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for the emission of 8% of CO₂ released into the global atmosphere, resulting from the chemical reaction involved in the production of clinker, which is why it seeks alternatives to mitigate this environmental liability. This research aims to analyze the mechanical properties of sustainable mortars, using cellulose residues, fly ash and lime mud, from the Amazon, in partial replacement of clinker, based on the optimization of cement mixtures to obtain mortars with resistance and fluidity characteristics comparable to standard Portland cement reference mortar. The cement mixtures used were obtained through binary and ternary compositions with clinker, with fly ash being used as a pozzolanic material and lime mud as a carbonate material. The chemical compositions of the mixtures were determined by X-ray fluorescence spectrometry and the determination of the phases present was carried out through mineralogical analyzes by X-ray diffraction. The mixtures were

characterized with regard to laser granulometry, specific mass, surface area and consistency. The mechanical properties were determined by molding cylindrical specimens to check the compressive strength. Compressive strengths ranged from 55% to 103% in relation to the reference mortar at 28 days and 73% to 105% at 91 days, proving the viability of using lime mud and fly ash as mineral additions for cement mixtures, with lower clinker consumption, reducing costs, promoting the circular economy with the use of waste, which would otherwise be discarded in landfills.

Keywords: Cellulose waste. Lime mud. Fly ash. Mortar. Supplementary cementitious materials. Sustainable mortar.

Resumen

La industria cementera es responsable por la emisión del 8% del CO₂ liberado a la atmósfera global, producto de la reacción química involucrada en la producción del clinker, por lo que busca alternativas para mitigar este pasivo ambiental. Esta investigación tiene como objetivo analizar las propiedades mecánicas de morteros sustentables, utilizando residuos de celulosa, cenizas volantes y lodos calcáreos, provenientes de la Amazonia, en sustitución parcial del clinker, a partir de la optimización de mezclas de cemento para obtener morteros con características de resistencia y fluidez comparables a las de morteros de referencia de cemento Portland estándar. Las mezclas de cemento utilizadas se obtuvieron a través de composiciones binarias y ternarias con clinker, utilizándose cenizas volantes como material puzolánico y lodo de cal como material carbonatado. Las composiciones químicas de las mezclas se determinaron mediante espectrometría de fluorescencia de rayos-X y la determinación de las fases presentes se realizó mediante análisis mineralógicos por difracción de rayos-X. Las mezclas se caracterizaron en cuanto a granulometría láser, masa específica, área superficial y consistencia. Las propiedades mecánicas se determinaron moldeando probetas cilíndricas para comprobar la resistencia a la compresión. Las resistencias a la compresión oscilaron entre 55% y 103% con relación al mortero de referencia a los 28 días y 73% a 105% a los 91 días, demostrando la viabilidad de utilizar lodos de cal y cenizas volantes como aditivos minerales para mezclas de cemento, con menor consumo de clinker, reduciendo costes, fomentando la economía circular con el aprovechamiento de residuos, que de otro modo serían desechados en vertederos.

Palabras clave: Residuos de celulosa. Barro de cal. Cinza volante. Mortero. Materiales cementosos suplementarios. Mortero sostenible.

4.1 Introdução

Em tempos de preocupação, a nível mundial, com as alterações no meio ambiente, provocadas pelos diversos processos produtivos relacionados à urbanização, agricultura, indústria, alterando o clima e provocando catástrofes, a indústria cimentícia busca alternativas para mitigar as ações por ela geradas. As indústrias cimentícias são responsáveis pela emissão de 8% do CO₂ lançado na atmosfera global, provenientes da reação química envolvida na produção do clínquer, através da decomposição do CaCO₃, em óxidos, principalmente CaO e CO₂ pela adição de calor, bem como pela combustão de combustíveis fósseis para gerar energia para a queima do clínquer (Gartner; Sui, 2018; Andrew, 2019). A NBR 16697 (ABNT, 2018) define o cimento Portland como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, acrescido de sulfato de cálcio e adições minerais, e, do mesmo modo, conceitua o clínquer Portland como um produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio, com propriedades hidráulicas, obtido pela calcinação, à temperatura média de 1450° C, de calcário e argila.

As alternativas para reduzir as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento são diminuir, ao máximo, o teor de clínquer do produto final e maximizar a proporção de adições minerais no cimento, os chamados materiais cimentícios suplementares, originados de subprodutos industriais, como cinzas volantes e escória granulada de alto forno, que proporcionam melhorias no concreto, no tocante à trabalhabilidade, resistência à fissuração térmica, expansão de agregados alcalinos e ao ataque de sulfatos, além de redução de custos (Mehta; Monteiro, 2006).

Diversos estudos vêm sendo realizados para mitigar os danos ambientais associados à indústria do cimento, incluindo o desenvolvimento de tipos alternativos de cimento e a substituição parcial de cimento por materiais cimentícios suplementares (Miller; Myers, 2020), reduzindo as emissões de CO₂ em 40% sem afetar a resistência, durabilidade ou o custo de produção do material (Skibsted; Snellings 2019).

Com o uso de inovações tecnológicas e ambientais na produção de cimento, é possível ao adotar-se estratégias sustentáveis a partir da gestão e reuso de resíduos sólidos ou rejeitos disponíveis, resultantes de recursos naturais e processos industriais, em substituição total ou parcial do cimento ou do clínquer. Este trabalho tem por objetivo analisar as propriedades mecânicas de argamassas sustentáveis, utilizando resíduos de celulose, cinza volante e lama de

cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer, a partir da otimização de misturas cimentícias para obter argamassas com características de resistência e fluidez comparáveis à argamassa de referência de cimento Portland comum.

4.2 Referencial teórico

A produção industrial da celulose para a fabricação de papel é feito, segundo Qina et al (2020), por diversos processos químicos, destacando-se o processo kraft, onde a madeira é descascada, picada e levada ao cozimento no digestor, em uma solução aquosa contendo hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na_2S), gerando resíduos inorgânicos como o licor verde, os grits, lama de cal e a cinza volante de biomassa de caldeira, a qual resulta da combustão de cascas de madeira e outros resíduos de madeira para recuperação energética.

Uma etapa importante, na produção de celulose, é o processo de caustificação, que tem por objetivo a recuperação do licor branco para uso no digestor no processo de cozimento da madeira, com a adição de cal (CaO) no licor verde, dissolvida em água, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que reage com o carbonato de sódio (Na_2CO_3), presente no licor verde, produzindo a soda cáustica (NaOH) e carbonato de cálcio (CaCO_3), que é calcinado no forno de cal produzindo a lama de cal (Vashistha et al 2019),

Estudos para o aproveitamento de resíduos de celulose têm sido desenvolvidos. Buruberri, Seabra e Labrincha (2015) mostraram que é possível aproveitar a lama de cal, o lodo biológico e as cinzas volantes, provenientes das fábricas de celulose, na indústria cimenteira com vantagens energéticas e ambientais por apresentarem compatibilidade química com as matérias-primas tradicionalmente utilizadas para a produção de clínquer/cimento, e as argamassas preparadas com este cimento, apresentaram boa resistência mecânica para uso em rebocos internos e externos.

Sahu et al (2017) avaliaram um compósito usando materiais residuais como cinzas volantes, lodo biológico e cal comercial, os quais apresentaram resistência e durabilidade significativas para aplicações em camadas de base de pavimentos flexíveis, reduzindo a necessidade de materiais naturais como pedras britadas e cascalhos.

Simão et al (2018) identificaram os principais componentes (Al_2O_3 , SiO_2 e CaO) em resíduos de lama de cal, lodo de ETE e cinzas de biomassa, necessários para a clínquerização, obtendo assim um clínquer denominado de eco-clínquer com diferentes teores de C_3S e C_2S .

Vashistha et al (2019) estudaram a lama de cal, cinzas de caldeira e cinzas volantes na produção de clínquer à base de belita. Os resíduos, ao serem misturados com nanosílica, reduzem a temperatura de síntese da belita para 1000° C, sem adição de qualquer estabilizador químico e pré-calcinação enquanto que convencionalmente a belita é sintetizada acima de 1200° C, resultando em um método energeticamente eficiente e ecologicamente correto. Mandeep et al (2019) definem como revolucionário e inovador, para o desenvolvimento sustentável e para a redução de potenciais efluentes tóxicos, a produção de clínquer a partir de resíduos da indústria de celulose.

Li et al (2021) utilizaram lama de cal e cinza volante como adições minerais na produção de concreto espumado, para uso em pavimentos rodoviários, o qual apresentou excelente trabalhabilidade e estabilidade com fluidez entre 170 e 190 mm, melhorando assim as propriedades mecânicas dos concretos espumados.

Wu e Huang (2022) estudaram as cinzas volantes provenientes da co-combustão de resíduos de fábricas de papel e concluíram que estas têm potencial para serem utilizadas como materiais cimentícios em substituição parcial do cimento.

Moukannaa et al (2022) estudaram a viabilidade do uso de cinzas de fábrica de papel, coletadas em diferentes etapas do mesmo processo de incineração, em substituição parcial do cimento nas proporções de 5%, 10%, 20% e 30%, concluindo que as cinzas poderiam ser consideradas como materiais cimentícios suplementares.

Elliott, Kahmood e Kamal (2022) relatam que as fábricas de celulose e papel, que utilizam caldeiras de biomassa, geram dois tipos de cinza. O primeiro tipo são as cinzas volantes que consistem em partículas sólidas que escapam com os gases de combustão e são capturadas por meio de lavadores, filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos. O segundo tipo é chamado de cinza pesada ou cinza grelhada, com forma relativamente densa que se acumula no fundo da caldeira.

4.3 Metodologia

4.3.1 Materiais

O clínquer e o gesso utilizados neste trabalho foram disponibilizados pela indústria Cimento Verde do Brasil, localizada no município de Açailândia - MA, coletados diretamente do galpão de clínquer. O cimento utilizado para a confecção da argamassa de referência (CREF)

foi o CP II F 32, cedido pela empresa Votorantim. Os resíduos de celulose utilizados nesta pesquisa são a cinza volante, proveniente da queima de biomassa e a lama de cal, produzida a partir da recuperação de agentes químicos durante a etapa de caustificação da produção de celulose pelo processo kraft, fornecidos pela empresa Suzano Papel e Celulose, unidade de Imperatriz - MA.

Para a produção das argamassas foi utilizado areia padrão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, com quatro frações granulométricas, atendendo as especificações da NBR 7214 (ABNT, 2015).

4.3.2 Métodos

4.3.2.1 Preparação das amostras

A matéria-prima foi destorroada, em sua forma natural, em moinho de bolas, até atingir quantidades acima de 80% de material passante na peneira 75 μm , em intervalos de tempo iguais a 1 hora para a gipsita e 2 horas para o clínquer, a lama de cal e a cinza volante. O material retido na peneira 75 μm foi recolocado no moinho até atingir 100% de material passante.

4.3.2.2 Preparação das misturas

As misturas cimentícias utilizadas foram obtidas através de composições binárias e ternárias com o clínquer, sendo a cinza volante utilizada como material pozolânico e a lama de cal como material carbonático, conforme Silva et al (2024).

As proporções foram misturadas manualmente e, em seguida, levadas ao moinho de jarro, para homogeneização durante cinco minutos, estando prontas para uso após esses procedimentos.

Foram estudadas nove composições de argamassas, as quais foram comparadas com uma argamassa de referência (REF) constituída por cimento e areia na proporção de 1:3 em massa em acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019).

As misturas cimentícias foram concebidas a partir do que preconiza a NBR 16697 (ABNT, 2018) para Cimento Portland composto com material pozolânico que permite adição de 6% a 14% de material pozolânico e 0% a 15% de material carbonático e Cimento Portland pozolânico, que permite adição de 15% a 50% de material pozolânico e 0% a 10% de material

carbonático, de modo a obter-se uma mistura sustentável, com a diminuição do teor de clínquer, e consequente contribuição para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

As argamassas foram obtidas através da mistura de clínquer, gipsita (sulfato de cálcio), lama de cal e cinza volante. Foi considerado o percentual de 2,5 % de gipsita em todas as misturas, variando-se os teores de lama de cal em 0%, 15% e 20% e os teores de cinza volante variaram de 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% e 50%.

A composição das argamassas e respectivas nomenclaturas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Nomenclaturas e porcentagens das misturas cimentícias

Nomenclatura	Clínquer + sulfato de cálcio (%)	Material carbonático (%)	Material pozolânico (%)
CREP	75 - 89	11 - 25	0
CV50	47,50 +2,50	-	50
CL5V45	47,50 +2,50	5	45
CV40	57,50 +2,50	-	40
CL5V35	57,50 +2,50	5	35
CL15V35	47,50 +2,50	15	35
CL20V30	47,50 +2,50	20	30
CL15V25	57,50 +2,50	15	25
CL20V20	57,50 +2,50	20	20
CL15V15	67,50 +2,50	15	15

Fonte: Autor (2024)

4.3.2.3 Ensaios químicos e mineralógicos

As análises de composição química das misturas foram determinadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), usando o espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (FRX) S2 RANGER da Bruker, tubo de raios-X de Pd. Para esse ensaio, foram utilizadas pastilhas prensadas em 20 t.

Para determinação das fases presentes nos materiais foram realizadas análises mineralógicas por difração de raios-X (DRX), método do pó, usando um difratômetro de bancada D2Phaser da Bruker, tubo de cobre $\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$, e varredura entre 10 a 70 °2 θ . A identificação das fases foi feita pelo software HighScore X'pert Plus e base de dados PDF (Powder Diffraction File).

4.3.2.4 Ensaios físicos e mecânicos

Os diâmetros das partículas das misturas cimentícias foram determinadas através do ensaio de granulometria por difração a laser. A massa específica de cimento Portland foi determinada por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017).

A determinação da distribuição do tamanho das partículas é obtida a partir da análise da área superficial pelo método de permeabilidade ao ar, também chamado de método de Blaine conforme NBR 16372 (ABNT, 2015).

Para a determinação da consistência da pasta de cimento foi utilizado a norma NBR 16606 (ABNT, 2018). Os ensaios de tempos de pega foram realizados conforme a NBR 16607 (ABNT, 2017).

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e 10 cm de altura. A resistência à compressão das argamassas foi determinada nas idades de 7, 14, 21, 28 e 91 dias, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019) para as diversas misturas propostas. Os resultados obtidos a partir da média das resistências de três corpos de prova. O cimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova de referência foi o CP II F 32.

4.4 Resultados e discussões

4.4.1 Caracterização química e mineralógica

Foram utilizados como matéria-prima, para a produção das misturas cimentícias, o clínquer, a gipsita, a cinza volante e lama de cal. A Tabela 4.2 apresenta a composição química desses materiais.

Tabela 4.2 - Composição química das matérias-primas usadas para misturas cimentícias

Componente (%)	Clínquer	Gipsita	Cinza Volante	Lama de cal
SiO ₂	14,51	5,70	32,66	1,60
Al ₂ O ₃	3,03	2,04	14,99	0,87
Fe ₂ O ₃	3,91	1,10	6,38	0,53
CaO	63,47	30,10	15,52	48,80
Na ₂ O	0,77	-	2,04	1,50
MgO	3,96	1,30	3,72	3,16
P ₂ O ₅	-	0,40	1,27	0,97
SO ₃	3,04	36,40	7,20	0,73
K ₂ O	1,78	0,50	3,76	0,14
TiO ₂	0,28	-	1,41	-
MnO	0,19	-	0,20	0,13
SrO	0,30	0,10	0,09	0,07

Componente (%)	Clínquer	Gipsita	Cinza Volante	Lama de cal
ZrO ₂	-	-	0,19	-
Perda ao fogo	4,76	22,00	10,57	41,51

Fonte: Adaptado pelo autor a parti de Silva et al (2024)

As composições químicas das misturas cimentícias em estudo são mostradas na Tabela 4.3. Os componentes majoritários correspondem a SiO₂ (16-29%), Al₂O₃ (4-8%), Fe₂O₃ (3-5%) e CaO (36-60%). O componente SO₃ está na margem de 5% e a perda a fogo em torno de 9%. Observa-se que os teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ diminuem conforme diminui o teor de cinza volante e aumenta o teor de lama de cal. De modo inverso, quando diminui o teor de cinza volante aumenta os teores de CaO.

Tabela 4.3 - Composição química das misturas cimentícias

Mistura	REF	CV50	CL5V45	CV40	CL5V35	CL15V35	CL15V25	CL20V30	CL20V20	CL15V15
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	18,56	29,23	26,56	26,35	23,78	21,86	18,79	18,78	16,62	16,02
Al ₂ O ₃	4,21	8,01	7,47	7,19	6,47	6,01	5,01	5,34	4,41	4,14
Fe ₂ O ₃	2,95	4,79	4,74	4,63	4,58	4,25	3,98	3,95	3,85	3,89
CaO	59,95	36,15	40,91	41,83	44,76	44,43	48,69	45,67	51,38	52,75
Na ₂ O		1,12	0,00	1,45	1,43	1,39	2,03	2,87	1,76	2,29
MgO	2,97	3,42	3,88	3,76	3,52	3,68	3,60	3,99	3,73	4,06
P ₂ O ₅		0,53	0,60	0,50	0,51	0,65	0,70	0,64	0,55	0,46
SO ₃	2,67	5,35	5,33	5,25	4,91	4,66	4,62	4,24	4,12	4,04
K ₂ O		2,28	2,21	2,21	2,08	1,83	1,91	1,64	1,48	1,46
TiO ₂		0,77	0,75	0,67	0,63	0,60	0,46	0,55	0,44	0,39
MnO		0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14
SrO		0,18	0,19	0,20	0,20	0,19	0,21	0,19	0,21	0,23
PF	7,71	8,02	7,19	5,81	6,98	10,30	9,84	11,99	11,30	10,14

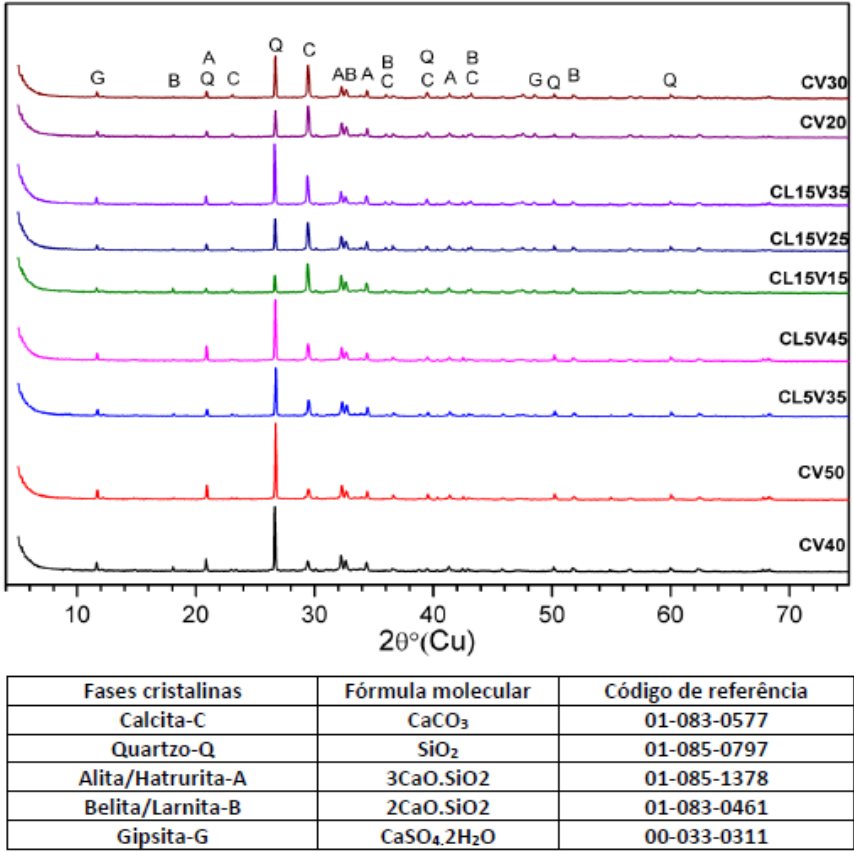
Fonte: Autor (2024)

A NBR 16697 (ABNT, 2018) não especifica parâmetros percentuais para os teores SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e CaO.

A composição mineralógica das misturas cimentícias é apresentada nos difratogramas da Figura 4.1, mostrando que as principais fases cristalinas são calcita, quartzo, alita, belita e gipsita. Podem ser observadas leves variações nos picos dessas fases, nitidamente no quartzo e calcita, em acordo com a composição química majoritária de SiO₂ e CaO (Tabela 4.2). Essas variações na concentração mostram as proporções das misturas cimentícias. Observa-se um

comportamento semelhante em função da pouca variação dos percentuais das adições nas misturas.

Figura 4.1 - Difratogramas das misturas cimentícias



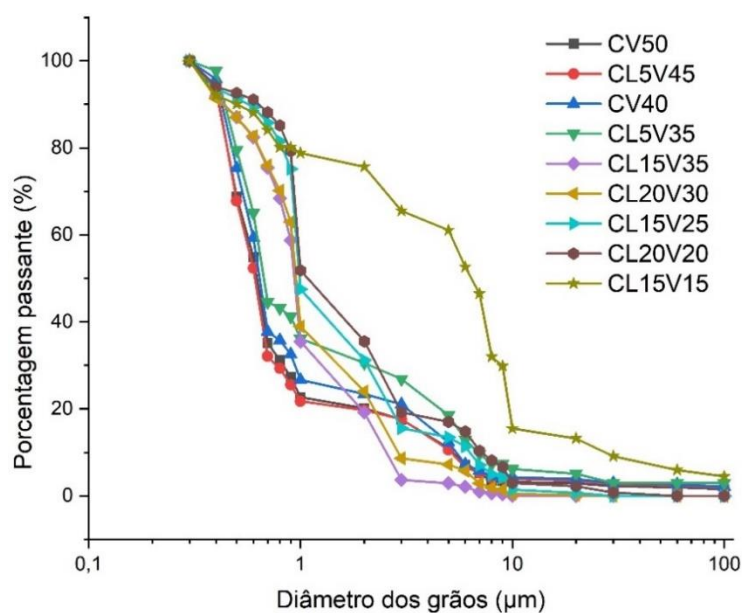
Fonte: Autor (2024)

4.4.2 Ensaios físicos

4.4.2.1 Granulometria

A composição granulométrica das misturas cimentícias é apresentada na Figura 4.2. As curvas granulométricas seguem um comportamento semelhante em todas as misturas cimentícias, excetuando a CL15V15. O D80 passante das partículas está no intervalo de 0,6 a 1 μm , considerando uma granulometria muito fina.

Figura 4.2 - Granulometria a laser das misturas cimentícias



Fonte: Autor (2024)

Em relação ao índice de finura, observa-se que as amostras apresentam percentual de resíduo na peneira 75 µm inferiores a 6%, estando em conformidade com os parâmetros especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que determina a peneira 75 µm como referência.

4.4.2.2 Massa específica e área superficial específica pelo método Blaine

Os resultados de massa específica e área superficial específica pelo método Blaine são mostrados na Tabela 4.4. As massas específicas das misturas cimentícias apresentam pouca variação, entre 2,7 a 3,1 g/cm³.

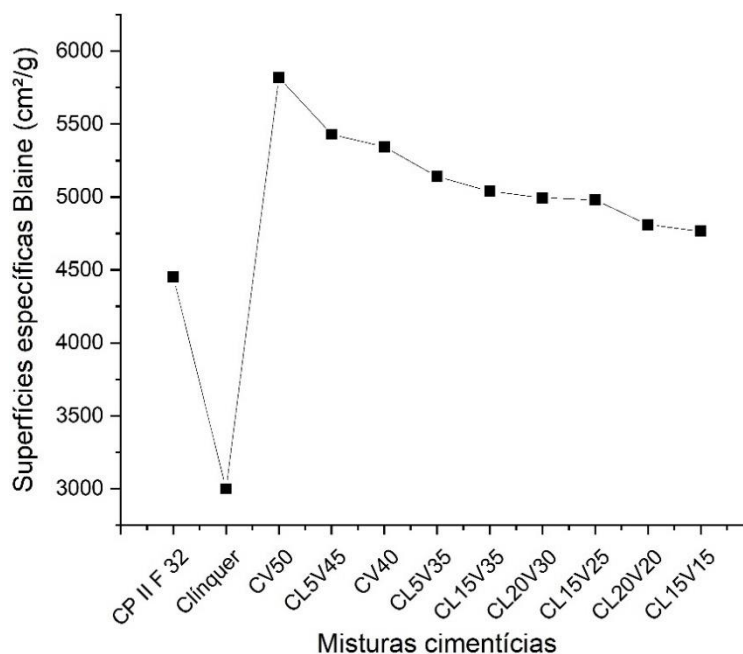
Tabela 4.4 - Massa específica e área superficial específica das misturas cimentícias

Cimento	Massa específica (g/cm ³)	Área superficial específica blaine (cm ² /g)
CP II F32	2,86	4450
Clínquer	3,09	3000
CV40	2,95	5345
CV50	3,12	5820
CL5V35	2,91	5140
CL5V45	3,10	5430
CL15V15	2,73	4765
CL15V25	2,81	4980
CL15V35	2,82	5040
CL20V20	2,78	4810
CL20V30	2,87	4995

Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.3 apresenta a variação da superfície específica das misturas cimentícias utilizadas neste estudo. Quando comparadas com os resultados do cimento e clínquer, as superfícies específicas das misturas são mais elevadas.

Figura 4.3 - Superfície específica das misturas cimentícias



Fonte: Autor (2024)

A finura é uma das características mais importantes, pois quanto mais fino for o cimento, mais rápida será a reação com a água e maiores as resistências alcançadas. A área superficial das misturas varia entre 4765 cm²/g a 5820 cm²/g, sendo que as misturas CL15V15 e CL20V20 apresentam menor área superficial do que o cimento de referência, enquanto que as misturas CV50, CL5V45 e CV40, com maiores teores de material pozzolânico, apresentaram maiores áreas superficiais, o que proporciona maiores resistências iniciais.

4.4.2.3 Tempo de pega e água de consistência

Os resultados dos ensaios de tempo de pega e água de consistência são mostrados na Tabela 4.5. A água necessária à obtenção da consistência normal das misturas cimentícias não apresentou grande variação, sendo que as misturas cimentícias com maior teor de material pozzolânico apresentaram água de consistência maior do que as demais. Os resultados dos ensaios de tempo de pega estão em conformidade com a NBR 16607 (ABNT,2018).

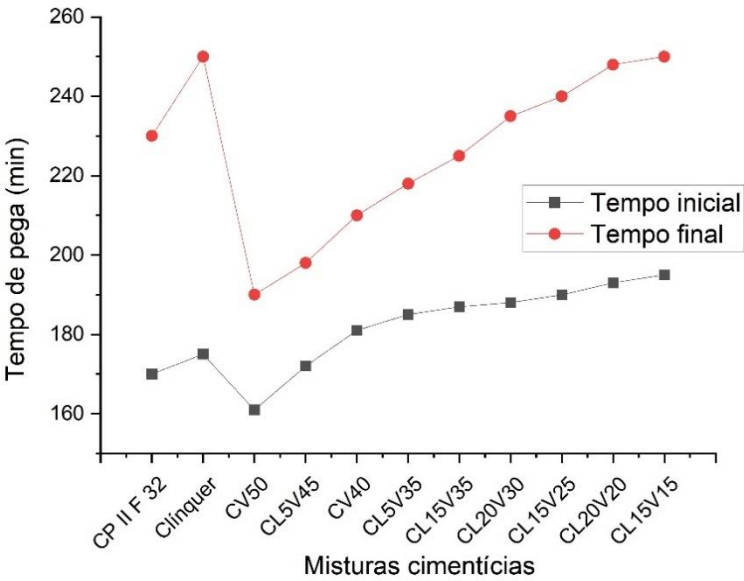
Tabela 4.5 - Água de consistência, início e fim de pega

CIMENTO	Água de	Início de Pega (min)	Fim de Pega (min)
	Consistência (%)	Limite Normativo ≥ 60	Limite Normativo ≤ 600
	NBR 16606 (2018)	NBR 16607 (2018)	NBR 16607 (2018)
CP II F 32	28,50	170	230
Clínquer	24,00	175	250
CV50	32,90	161	190
CL5V45	32,90	172	198
CV40	32,90	181	210
CL5V35	33,10	185	218
CL15V35	32,50	187	225
CL20V30	32,90	188	235
CL15V25	32,50	190	240
CL20V20	31,90	193	248
CL15V15	31,60	195	250

Fonte: Autor (2024)

A variação dos tempos de pega iniciais e finais das misturas cimentícias são mostrados na Figura 4.4. A mistura CV50 apresenta menores tempos de pega inicial e final por apresentar maior teor de adição de cinza volante. Conforme adiciona-se a lama de cal e reduz-se o teor de cinza volante, os tempos de pega inicial e final aumentam, pelo fato de a lama de cal apresentar maior teor de CaO e menor teor de Al₂SO₃.

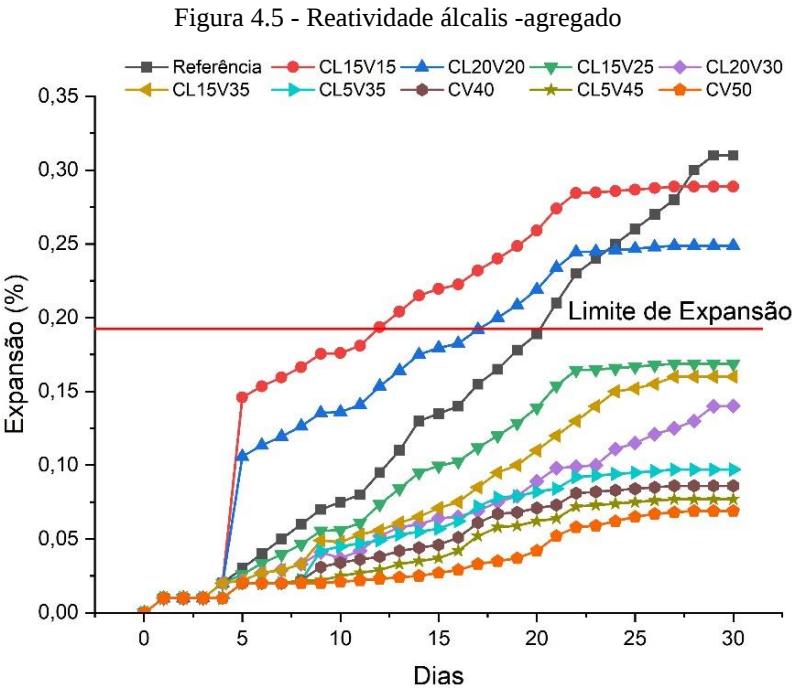
Figura 4.4 - Variação do tempo de pega das misturas cimentícias



Fonte: Autor (2024)

4.4.2.4 Reatividade álcalis-agregado

Os resultados dos ensaios de reatividade álcalis-agregado, obtidos através da expansão dos corpos de prova ao longo do tempo são apresentados na Figura 4.5.



Fonte: Autor (2024)

As misturas cimentícias CL15V15 e CL20V20 apresentaram características potencialmente reativas, enquanto que as demais são potencialmente inócuas, podendo ser utilizadas na confecção de concreto, podendo-se afirmar que as misturas com maior teor de cinza volante reduzem a reação álcalis-agregado.

4.4.2.5 Resistência à compressão das argamassas

Os resultados das resistências à compressão das argamassas produzidas são mostrados na Tabela 4.6, ensaiadas de 7 a 91 dias.

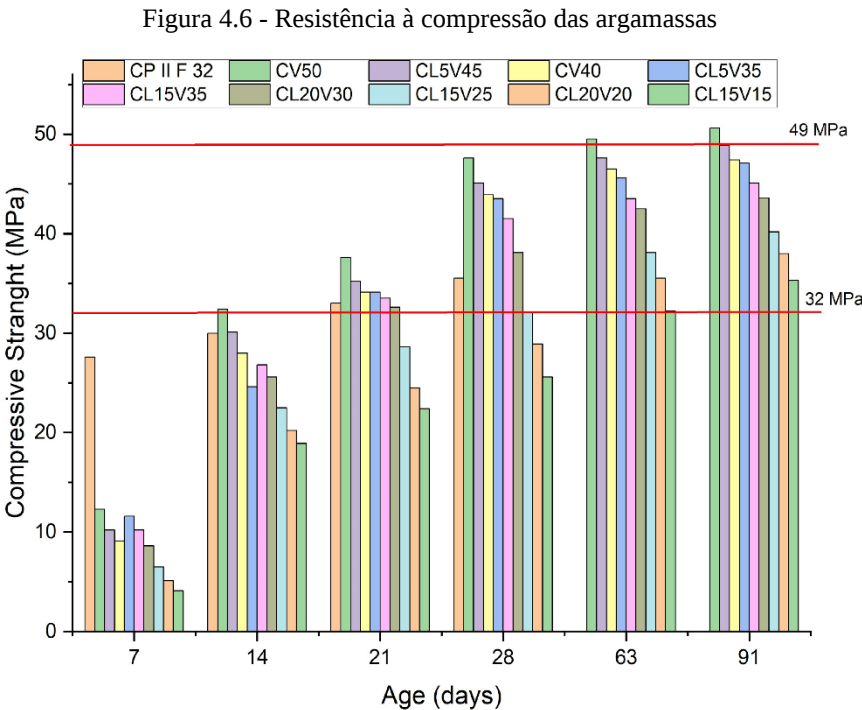
Tabela 4.6 - Resistência à compressão das argamassas

Mistura cimentícia	Resistência à compressão (MPa)				
	7d	14d	21d	28d	91 d
CP II F 32	36,7	40,0	43,0	46,2	48,4
CV50	12,3	32,4	37,6	47,6	50,6
CL5V45	10,2	30,1	35,2	45,1	48,9
CV40	9,1	28	34,1	43,9	47,4
CL5V35	11,6	24,6	34,1	43,5	47,1
CL15V35	10,2	26,8	33,5	41,5	45,1

Mistura cimentícia	Resistência à compressão (MPa)				
	7d	14d	21d	28d	91 d
CL20V30	8,6	25,6	32,6	38,1	43,6
CL15V25	6,5	22,5	28,6	32,1	40,2
CL20V20	5,1	20,2	24,5	28,9	38,0
CL15V15	4,1	18,9	22,4	25,6	35,3

Fonte: Autor (2024)

A Figura 4.6 apresenta o desenvolvimento das resistências apresentadas pelas misturas cimentícias, ensaiadas durante 91 dias.



Fonte: Autor (2024)

As melhores proporções foram CV50, CL5V45, CV40, CL15V35, CL5V35, que alcançaram resistência à compressão superiores a 40 MPa aos 28 dias, equivalentes aos cimentos com classe de resistência 40 MPa, e CL20V30, CL15V25 que alcançaram resistência à compressão superiores 32 MPa, equivalentes aos cimentos com classe de resistência 32 MPa, conforme NBR 16697(ABNT, 2018). As proporções CL20V20 e CL15V15 apresentaram resistências superiores a 32 MPa somente aos 63 dias. As resistências à compressão variaram de 55% a 103% em relação à argamassa de referência aos 28 dias e 73% a 105% aos 91 dias.

Estes resultados reafirmam as conclusões de Buruberri, Seabra e Labrincha (2015) no tocante a viabilidade de aproveitar resíduos gerados pela indústria de pasta de celulose, lama de cal e cinzas volantes, na indústria cimenteira com vantagens energéticas e ambientais.

4.5 Conclusão

Os resultados químicos, mineralógicos e físicos das misturas cimentícias CV50, CL5V45, CV40, CL15V35, CL5V35, CL20V30 e CL15V25, de cinza volante como material pozolânico, lama de cal como material carbonático e clínquer mais gipsita, apresentaram características potencialmente inócuas, podendo ser utilizadas na confecção de argamassas, sendo que as misturas CL15V15 e CL20V20, apresentaram características potencialmente reativas, sendo, portanto, inadequadas para a confecção de argamassas.

A resistência das misturas cimentícias com substituição parcial do clínquer apresenta maiores valores conforme aumenta o teor de cinza volante, sendo que a mistura com de 50% apresentou os melhores resultados em todas as idades. Pode-se inferir que a adição de lama de cal às misturas não influenciou nas resistências das misturas, pelo fato de este material não possuir atividade pozolânica.

As misturas cimentícias CV50, CL5V45, CV40, CL15V35, CL5V35, podem ser enquadradas na classe de resistência 40, pois alcançaram resistência à compressão superiores a 40 MPa aos 28 dias, enquanto que as misturas cimentícias CL20V30, CL15V25, podem ser enquadradas na classe de resistência 32, pois alcançaram resistência à compressão superiores a 32 MPa aos 28 dias. As proporções CL20V20 e CL15V15 apresentaram resistências inferiores a 32 MPa aos 28 dias. As resistências à compressão variaram de 55% a 103% em relação à argamassa de referência aos 28 dias e 73% a 105% aos 91 dias.

Os resultados são relevantes do ponto de vista ambiental, pois, ao reduzir-se a quantidade de clínquer nas misturas cimentícias, menor a emissão de CO₂ para a atmosfera, além de reduzir-se, consideravelmente, o consumo de energia.

Observa-se que, em termos econômicos, a substituição é vantajosa ao alcançar-se boas resistências com menor consumo de clínquer, reduzindo custos, além de promover a economia circular com o aproveitamento de resíduos, que seriam descartados em aterros sanitários, sendo usados como adições minerais para misturas cimentícias.

Esta pesquisa acadêmica comprova a viabilidade técnica da utilização de resíduos de celulose, matérias-primas disponíveis na indústria da região amazônica, como alternativa para a produção de argamassas de baixo impacto ambiental, com menor consumo de energia e baixa

emissão de gás carbônico, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, proporcionando um futuro mais sustentável para a sociedade.

Neste estudo foram avaliadas nove misturas cimentícias e comparadas com uma de referência, entretanto diversas proporções podem ser apreciadas. Para estudos futuros é relevante verificar, ainda, o comportamento dessas misturas cimentícias na produção de concreto, comparando os resultados com os tipos existentes.

REFERÊNCIAS

- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production 1928–2018. **Earth System Science Data**, v 11, p. 1675–1710, 20 nov. 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 20 18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 286, p. 252-260, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>.
- ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.; KAMAL, A. Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. **Journal of Environmental Management**, v. 319, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115728>.
- GARTNER, E.; SUI, T. Alternative cement clinkers. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 27-39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.
- LI, Z.; YUAN, H.; GAO, F.; ZHANG, H.; GE, Z.; WANG, K.; SUN, R.; GUAN, Y.; LING, Y.; JIANG, N. A Feasibility Study of Low Cement Content Foamed Concrete Using High Volume of Waste Lime Mud and Fly Ash for Road Embankment. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 86, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010086>.
- MANDEEP, G.; GUPTA, K.; SHUKLA, P. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122496, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496>.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. 3^a ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- MILLER, S.A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? **Journal of Cleaner Production**. v. 178, p. 587–598, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.008>.

MOUKANNAA, S.; ALZEER, M.; RAMTEKE, D.D.; OHENOJA, K.; ROPPO, J.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Investigation of different paper mill ashes as potential supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132583, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132583>.

QUINA, M. J.; PINHEIRO, C. T. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: the transition from landfill to industrial applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7. p. 2317 2020-03. <https://doi.org/10.3390/app10072317>.

SAHU, V.; SRIVASTAVA, A.; MISRA, A. K.; SHARMA, A. K. Stabilization of fly ash and lime sludge composites: Assessment of its performance as bases course material. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 17, n. 3, p. 475-485, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.010>.

SILVA, K. R. M. da; FERNANDEZ, O. J. C.; CUNHA, R. R. da; PICANÇO, M. de S. O potencial da utilização de resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, da Amazônia, Brasil, como materiais cimentícios. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, v. 13, n. 5, p. e3911, 2024. DOI: 10.55905/rcssv13n5-007. <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/rccs/article/view/3911>.

SIMÃO, L.; LÓH, N. J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Thermal characterization of hydrated eco-friendly clinkers produced from pulp and paper mill waste. **Cerâmica**, v. 64, n. 371. p. 311-317, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712339>.

SKIBSTED, J., SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>.

VASHISTHA, P.; SINGH, S. K.; DUTT, D.; KUMAR, V. Sustainable utilization of paper mill solid wastes via synthesis of nano silica for production of belita based clinker. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 557-565, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.207>.

WU, M.; HUANG, W. [Evaluation of Fly Ash from Co-Combustion of Paper Mill Wastes and Coal as Supplementary Cementitious Materials](https://doi.org/10.3390/ma15248931). **Materials**, v. 15, n. 24, p. 8931, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248931>.

5 ARTIGO 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO SUSTENTÁVEL CONTENDO CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, PROVENIENTES DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CELULOSE, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER NAS MISTURAS CIMENTÍCIAS

Resumo

A indústria cimenteira vem desenvolvendo pesquisas visando a substituição parcial de cimento ou do clínquer, nas dosagens de concreto, por materiais alternativos provenientes de resíduos industriais, para torná-los sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Este artigo tem o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas dos concretos com adição de cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em diferentes proporções, comparando os resultados com o concreto de referência. Foram produzidos concretos com cinza volante com substituição de 40% e 50% da massa de clínquer, em misturas binárias, concretos com adição de cinza volante e lama de cal, em misturas ternárias, com substituição de 30%, 40% e 50% da massa de clínquer. Foram mantidas as quantidades de agregados e a relação água/ligante é igual a 0,45. Com esses parâmetros foram moldados corpos de prova para verificar a consistência, as resistências à compressão e tração na flexão, além da durabilidade relacionada a absorção de água por imersão, índice de vazios e absorção por capilaridade. Os resultados indicam que os concretos estudados, com redução do teor de clínquer, apresentaram resistências à compressão e à tração na flexão correspondente a 63% das resistências dos concretos de referências. Em relação à durabilidade os concretos com cinza volante podem ser considerados duráveis e os concretos com cinza volante e lama de cal podem ser classificados como normais. Conclui-se pela viabilidade técnica do uso dos concretos em construções que requeiram as resistências alcançadas.

Palavra-chave: Propriedades mecânicas; Durabilidade; Resíduo de celulose; Concreto sustentável; Concreto verde.

Abstract

The cement industry has been developing research aimed at partially replacing cement or clinker in concrete mixes with alternative materials from industrial waste, in order to make them sustainable and contribute to reducing greenhouse gas emissions. This article aims to evaluate the mechanical properties of concretes with the addition of fly ash and lime mud from the Amazon in different proportions, comparing the results with the reference concrete. Concretes

were produced with fly ash replacing 40% and 50% of the clinker mass in binary mixtures, and concretes with the addition of fly ash and lime mud in ternary mixtures replacing 30%, 40% and 50% of the clinker mass. The quantities of aggregates were maintained and the water/binder ratio was equal to 0.45. Using these parameters, test specimens were molded to verify the consistency, compressive and tensile strengths in flexure, in addition to durability related to water absorption by immersion, void index and absorption by capillarity. The results indicate that the concretes studied, with reduced clinker content, presented compressive and tensile strengths in flexure corresponding to 63% of the strengths of the reference concretes. Regarding durability, the concretes with fly ash can be considered durable and the concretes with fly ash and lime mud can be classified as normal. It is concluded that the technical feasibility of using the concretes in constructions that require the strengths achieved.

Keywords: Mechanical properties; Durability; Cellulose residue; Sustainable concrete; Green concrete.

5.1 Introdução

Sustentabilidade é a palavra de ordem em todos os setores produtivos a nível mundial e isto requer a utilização de materiais que comprometam minimamente o meio ambiente, sendo que a sustentabilidade ambiental é definida a partir de quatro medidas tecnológicas para redução de emissões de CO₂ na indústria cimenteira: (1) uso de matérias-primas e combustíveis alternativos na produção de cimento; (2) melhoria da eficiência energética através da implantação das melhores tecnologias e uso de equipamentos energeticamente eficientes; (3) substituição do clínquer por outros materiais com propriedades semelhantes e com menor teor de carbono; e (4) captura e armazenamento do CO₂ antes de ser liberado para a atmosfera (Liu et al, 2017).

O concreto é uma mistura de aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água e/ou aditivos, sendo o aglomerante mais usado o cimento Portland, ligante hidráulico composto por uma mistura de clínquer e sulfatos de cálcio, escória de alto forno e material carbonático conforme NBR 16697 (ABNT, 2018).

O clínquer é constituído, em sua maior parte, de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas obtidos pela queima, a uma temperatura de cerca de 1450°C, de misturas convenientemente moídas e dosadas de materiais calcários e argilosos, sendo o maior responsável pela emissão de CO₂ (Juhart et al, 2021) em função da decomposição do CaCO₃ encontrado no calcário, o qual é decomposto em óxidos, CaO e CO₂, pela adição de calor (Andrew, 2019).

Diversos estudos têm sido feitos com o objetivo de substituir o clínquer por outros elementos que tornem o cimento mais sustentável, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia (Hou et al, 2020; Hanein et al, 2018; Torres et al, 2020) utilizando materiais cimentícios suplementares.

O cimento é um dos principais insumos utilizados na indústria da construção civil, sendo a indústria cimentícia responsável por 8% das emissões de gases de efeito estufa (Ellis et al, 2019; Andrew, 2019). A redução do teor de clínquer na produção do cimento aliado à redução do cimento na produção do concreto são alguns das possibilidades que contribuem para a melhoria desse cenário (Favier et al, 2018).

Para alcançar esses objetivos diversos materiais cimentícios suplementares estão sendo utilizados na substituição parcial do clínquer ou do cimento na produção de concreto, destacando-se a escória de alto forno, as cinzas volantes e a sílica fumê, incluindo resíduos

gerados nas fábricas de celulose na produção de cimento, em substituição parcial de cimento, adição em concreto de cimento Portland, produção de clínquer, cerâmica, e pavimentação de estradas (Sahu et al,2019; Simão et al, 2017; Vashistha et al, 2019, Li et al,2021).

Mohammed e Fang (2011) avaliaram as propriedades mecânicas do concreto contendo lodo primário da estação de tratamento de águas residuais (ETA) e cinza volante. As misturas contendo teores de cinzas volantes de 20% a 60% e 1% de teor residual mostraram um ganho de resistência inicial lento e ganhos maiores em 60 e 90 dias, sendo que a melhor proporção foi com 20% de cinza que atingiu resistências à compressão iguais a 34 MPa e 46,3 MPa aos 28 e 90 dias, enquanto a resistência à tração na flexão atingiu 5,99 MPa aos 28 dias.

Madrid et al (2017) avaliaram as propriedades do concreto e a viabilidade do uso da cinza de madeira e lama de cal em substituição ao cimento, nas proporções de 5%, 10% e 15% em volume na fabricação de unidades de alvenaria de concreto de baixa resistência. Os melhores resultados das resistências foram as substituições com 5% de cinza volante com 5,36 MPa, abaixo do valor de referência 5,92 MPa, enquanto a mistura com substituição de 5% de lama apresentou resistência de 7,56 MPa, superior ao concreto de referência.

Kumar e Prasad (2019) avaliaram o uso de cinza volante, sílica ativa e lodo de cal em diferentes proporções de misturas de concreto de cimento ternário, constatando melhorias significativas nas propriedades mecânicas do concreto com teores de cinza volante, sílica ativa e lodo de cal de nas proporções de 15%, 8% e 10%, bem como na resistência à penetração de íons cloreto.

A utilização de resíduos pós-industriais na produção de cimento, contribui para a redução da emissão de CO₂ e do consumo de energia. A utilização de lama de cal como fonte de cálcio, contribui para a redução do consumo de calcário natural, resultando em diminuição da temperatura de processamento na produção do clínquer (Singh e Bhagath, 2019).

Singh e Subramaniam (2019) avaliaram a produção de cimento e clínquer usando lodo de cal gerado pela indústria de papel e ferro-esponja produzido durante o processamento de ferro, obtendo um clínquer rico em belita, demonstrando que o lodo de cal, como fonte de cálcio reduz o consumo de calcário natural.

O objetivo desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas do concreto com uso de cinza volante e lama de cal, em substituição parcial do clínquer, em diferentes proporções, assim como a permeabilidade relacionada à absorção de água por imersão, índice de vazios e

absorção por capilaridade, comparando os resultados com o concreto de referência de cimento Portland CP II F 40.

5.2 Materiais e métodos

5.2.1 Materiais

5.2.1.1 Cimento de referência

Neste estudo foi utilizado, para o concreto de referência, o cimento Portland CP II F 40, da fábrica de cimentos Votorantim, localizada na região nordeste do estado do Pará (Brasil).

5.2.1.2 Elementos das misturas cimentícias

Os resíduos de celulose utilizados nesta pesquisa são a cinza volante, proveniente da queima de biomassa de eucaliptos, e a lama de cal, resíduo gerado na produção de celulose, no processo de moagem Kraft, como subproduto em uma reação de caustificação no processo de reciclagem de álcalis da indústria de papel, fornecidos pela indústria Suzano Papel e Celulose, filial Imperatriz (MA).

As misturas cimentícias foram produzidas a partir da homogeneização do clínquer, gipsita, lama de cal e cinza volante, nas proporções sugeridas por Silva et al (2024). A Tabela 5.1 apresenta as principais características físicas e mecânicas dos cimentos e misturas utilizados.

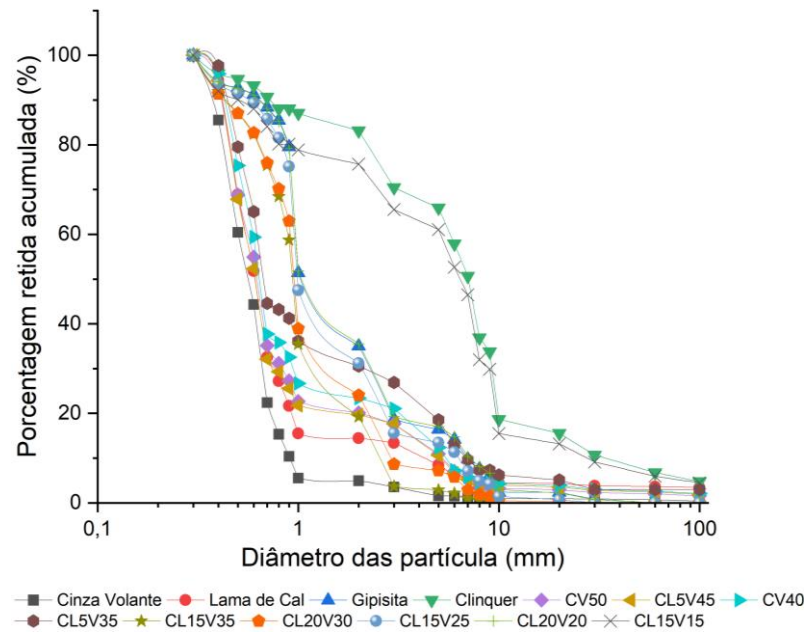
Tabela 5.1 - Características físicas e mecânicas dos cimentos e misturas utilizados

CIMENTO	REF	CV50	CV40	L5V45	L5V35	L15V35	L15V25	L15V15
Massa específica (g/cm ³)	3,09	3,12	2,95	3,10	2,91	2,82	2,81	2,73
Tempo de início de pega (min)	200	161	181	172	185	187	190	195
Tempo de fim de pega (min)	260	190	210	198	218	225	240	250
Blaine (cm ² /g)	4850	5820	5345	5430	5140	5040	4980	4765
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	36,9	12,3	9,1	10,2	11,6	10,2	6,5
	14 dias	40,9	32,4	28,0	30,1	24,6	26,8	22,5
	21 dias	44,0	37,6	34,1	35,2	34,1	33,5	28,6
	28 dias	46,2	47,6	43,9	45,1	43,5	41,5	32,1

Fonte: Silva et al (2024)

A Figura 5.1 apresenta a granulometria a laser das misturas cimentícias utilizadas na produção dos concretos.

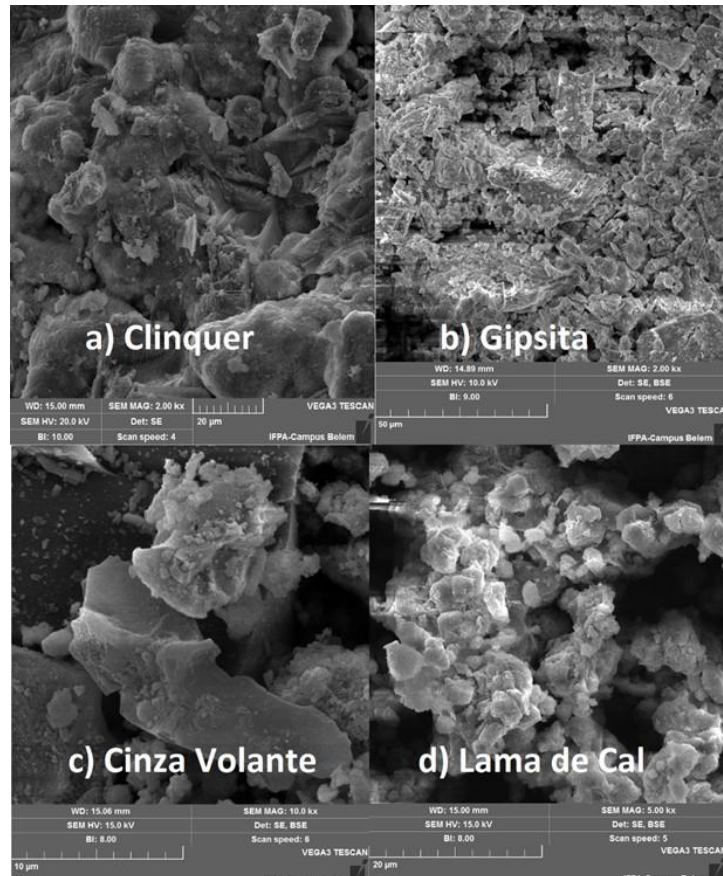
Figura 5.1 - Granulometria a laser das matérias-primas e das misturas cimentícias



Fonte: Autor (2024)

A morfologia das matérias-primas utilizadas nas misturas cimentícias, em imagens obtidas de MEV, são mostradas na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Morfologia dos componentes das misturas



Fonte: Autor (2024)

O clínquer (Figura 5.2a) mostra formas globulares compactas em tamanhos de até 30 micrometros, que sugere corresponda a belita. Também foram observadas estruturas cristalinas finas de cristais aciculares e prismáticos que podem corresponder a alita (Zea-Garcia et al. 2019). A gipsita (Figura 5.2b) exhibe intercrescimentos de prismas tabulares formando aglomerados de até 50 micrometros. Também são observadas placas de gipsita pseudoprismáticas por vezes com contornos irregulares disseminados na matriz gipsítica.

As cinzas volantes (figura 5.2c) exibem placas irregulares tamanhos micrométricos, com grãos finamente disseminados na superfície das placas. Também são observados agregados de cristais prismáticos em tamanhos de 2 micrometros de fase quartzo microcristalino. A lama de cal (figura 5.2d), mostra cristais romboédricos, típico de fases calcíticas, por vezes com contornos irregulares e formando aglomerados, de tamanho homogêneo de até 10 micrometros,

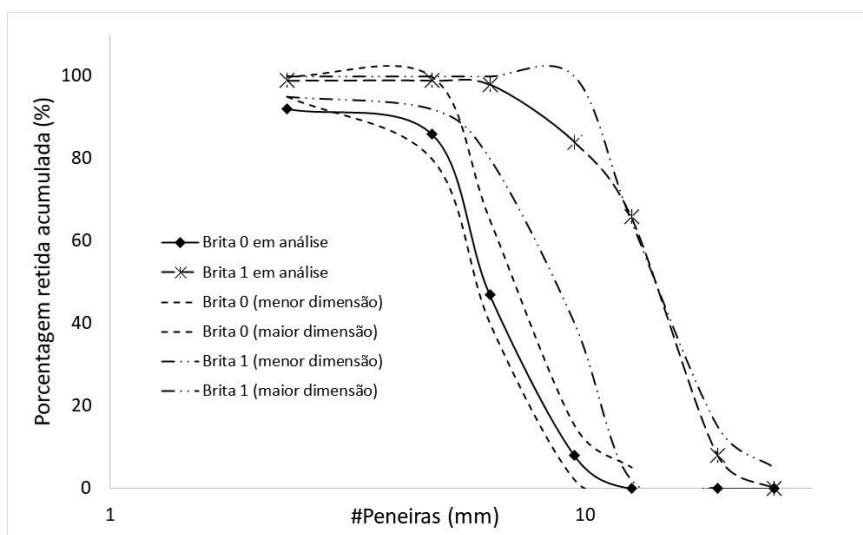
5.2.1.3 Agregados

Os agregados graúdos utilizados foram a brita 1 e brita 0, provenientes da jazida no município de Tracuateua, localizado na região nordeste do estado do Pará (Brasil), as quais, após analisadas, foram estabilizadas granulometricamente para garantir um bom desempenho mecânico das propriedades mecânicas de misturas.

A areia foi coletada conforme norma NBR 16915 (ABNT, 2021), proveniente de jazidas situadas na região metropolitana de Belém. A composição granulométrica foi determinada segundo a norma NBR 17054 (2022).

A Figura 5.3 apresenta a curva granulométrica dos agregados graúdos utilizados nesse estudo.

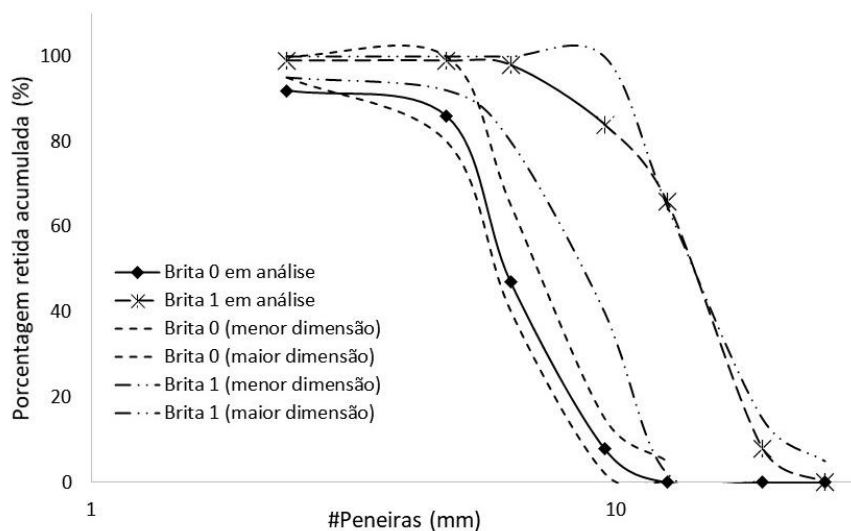
Figura 5.3 - Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2024)

A Figura 5.4 apresenta a curva granulométrica dos agregados miúdos utilizados nesse estudo.

Figura 5.4 - Granulometria do agregado miúdo



Fonte: Autor (2024)

A Tabela 5.2 apresenta as características dos agregados utilizados, conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021).

Tabela 5.2 - Caracterização dos agregados

Material	Densidade real (kg/dm ³)	Módulo de finura	Teor de material pulverulento (%)	Absorção (%)	Diâmetro máximo característico (mm)
Brita 0	2,69	5,53	0,51	2,73	12,5
Brita 1	2,69	6,85	0,51	2,73	25
Areia	2,62	1,66	0,85	0,50	1,2

Fonte: Autor (2024)

5.2.2 Métodos

5.2.2.1 Proporções das misturas

Os ensaios de massa específica, realizados conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), mostraram que as massas específicas do cimento e do clínquer são iguais a 3,09 g/cm³ e as dos demais insumo são significativamente diferentes, a substituição foi realizada em massa com compensação de volume. A Tabela 5.3 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica.

Tabela 5.3 - Massa específica dos insumos utilizados

MATÉRIA-PRIMA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)
Clínquer	3,09
Gipsita	2,69
Cinza volante	2,59
Lama de cal	2,68

Fonte: Autor (2024)

A dosagem dos concretos foi realizada utilizando a metodologia apresentada pelo IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1993). O teste de abatimento foi utilizado para a caracterização dos concretos em estado fresco, adotando-se o valor de 140 ± 20 mm, classe S100, segundo NBR 8953 (ABNT, 2015). Neste método, três projetos de mistura foram considerados com razões cimento/agregado de 1:1,4;0,678:1,582:0,45 (ligante: areia: brita 1: brita 0: água), para atender as classes de agressividade ambiental III e IV NBR 6118 (ABNT, 2024) e NBR 12655 (ABNT, 2022). Este método fornece correlações de características como resistência à compressão, relação a/c, dosagem da mistura e consumo de cimento.

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e a plasticidade das misturas foi utilizado aditivo hiperplastificante em pó à base de policarboxilatos.

A Tabela 5.4 apresenta o consumo de material em cada concreto.

Tabela 5.4 - Consumo de material dos concretos avaliados (kg/m³)

CONCRETO	REFERÊNCIA	CV50	L5V45	CV40	L5V35	L15V35	L15V25	L15V15
a/1	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cimento	450	-	-	-	-	-	-	-
Clinker	-	213,75	213,75	258,75	258,75	213,75	258,75	303,75
Gipisita	-	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79
Lama de cal	-	-	19,51	-	19,51	58,54	58,54	58,54
Cinza volante	-	188,59	169,73	150,87	132,01	132,01	94,30	56,58
Areia	630	630	630	630	630	630	630	630
Brita 1	303	303	303	303	303	303	303	303
Brita 0	707	707	707	707	707	707	707	707
Água	205	205	205	205	205	205	205	205
Aditivo	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575

Fonte: Autor (2024)

5.2.3 Ensaios no concreto fresco

As propriedades mecânicas do concreto no estado fresco foram avaliadas a partir da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme NBR 16889 (ABNT, 2020).

5.2.4 Ensaios no concreto endurecido

As propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido foram avaliadas através de:

5.2.4.1 Resistência à compressão

Após a dosagem, foram moldados 120 corpos de prova cilíndricos (10 x 20) cm, sendo 15 para cada mistura, os quais foram imersos em água insaturada com cal hidratada conforme NBR 5738 (ABNT, 2015) até a data de realização dos ensaios.

A resistência à compressão foi verificada conforme os procedimentos descritos na norma NBR 5739 (ABNT, 2016). As amostras de cada mistura foram testadas aos 7, 14, 21, 28 e 91 dias.

5.2.4.2 Resistência à tração na flexão

Foram moldados 48 corpos de prova prismáticos, sendo 6 para cada mistura, nas dimensões 10x10x40 cm, os quais foram rompidos aos 28 e 91 dias para verificar a resistência à tração na flexão conforme NBR 12142 (ABNT, 2010).

5.2.5 Permeabilidade

5.2.5.1 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Para o ensaio de absorção de água por imersão foram moldados 48 corpos de prova, o qual foi realizado conforme as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005), com o objetivo de determinar o índice de vazios do concreto e avaliar a porosidade aos 28 e 91 dias.

5.2.5.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012), com o objetivo de determinar a absorção de água, através da ascensão capilar do concreto endurecido. Foram moldados 48 corpos de prova para verificação de absorção por capilaridade aos 28 e 91 dias.

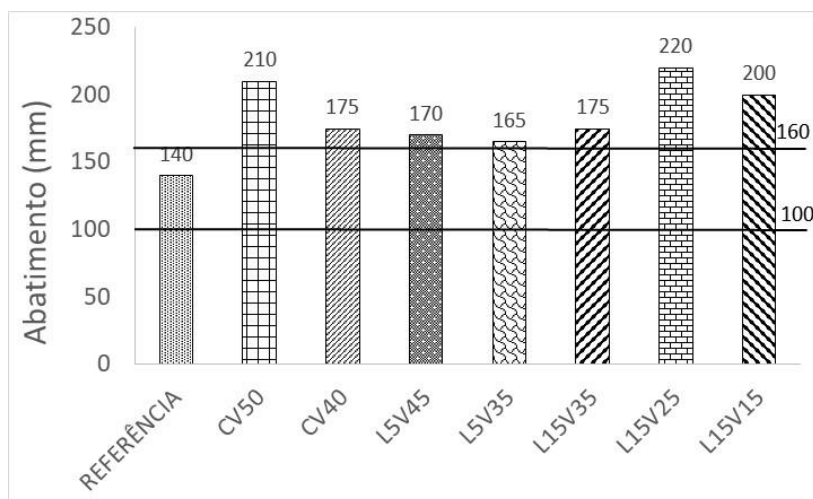
5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Ensaios no concreto fresco

A trabalhabilidade do concreto está relacionada com a consistência, a qual é uma medida da umidade da mistura de concreto, comumente avaliada em termos de abatimento (ou seja,

quanto mais úmida a mistura, maior o abatimento). Os resultados do ensaio de consistência do concreto são apresentados na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Resultados do ensaio de consistência do concreto



Fonte: Autor (2024)

A amostra de referência apresentou um abatimento de 140 mm, conforme calculado na dosagem, enquanto que as demais amostras apresentaram abatimento superiores a amostra de referência. Observa-se que apenas a amostra de referência atendeu o abatimento previsto pela NBR 8953 (ABNT, 2015) para a classe de concreto S100, as demais enquadram-se na classe S160, provavelmente pelo uso de aditivo plastificante.

Houve redução no abatimento das amostras com substituição do clínquer apenas por cinza volante, quando estas foram reduzidas de 50% para 40%, com redução nos valores dos abatimentos de 210 mm para 175 mm.

A adição de 5% de lama de cal e a consequente diminuição, no mesmo percentual de cinza volante, como nas misturas L5V45 e L5V35, apresentaram redução nos valores de abatimento de 170 mm para 165 mm.

Com a adição de 15% de lama de cal e redução do teor de cinza volante, ao analisarmos as misturas L5V35, L15V25 e L15V15, a mistura com maior abatimento foi a L15V25 com 220 mm.

5.3.2 Propriedades mecânicas

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão para as várias misturas de concreto são apresentados na Tabela 5.5.

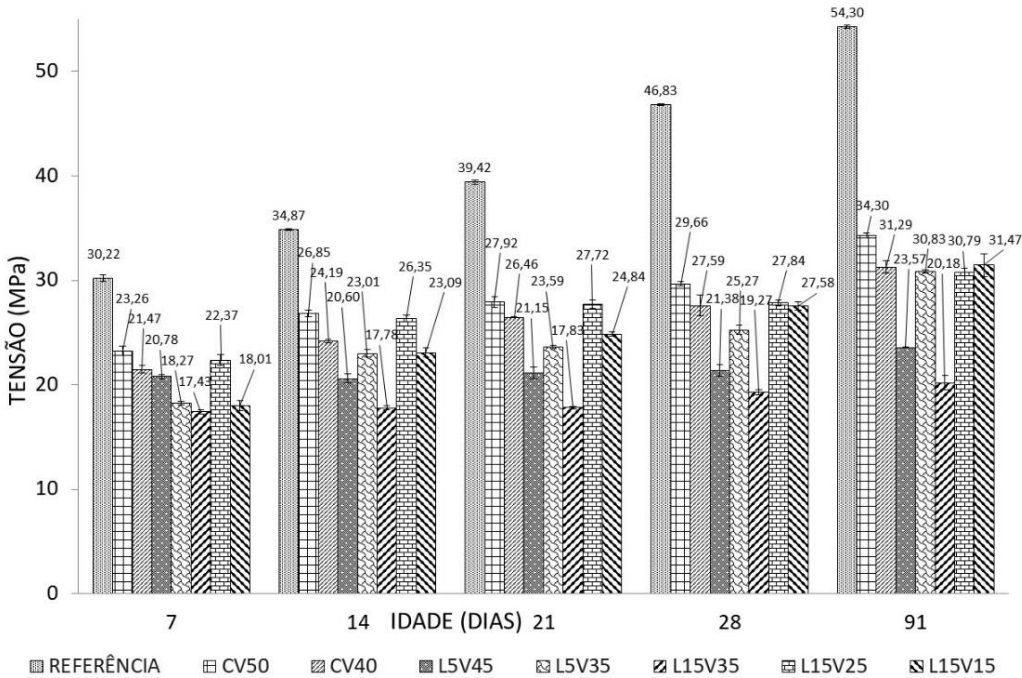
Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão

Mistura	Resistência à compressão (MPa)					Resistência à tração na flexão (MPa)	
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
Referência	30,22	34,87	39,42	46,83	54,30	4,95	5,98
CV50	23,6	26,85	27,92	29,66	34,30	6,73	7,07
CV40	21,47	24,19	26,46	27,59	31,29	3,01	6,46
L5V45	20,78	20,60	21,15	21,38	23,57	4,19	5,95
L5V35	18,27	23,01	23,59	25,27	30,83	2,73	5,15
L15V35	17,43	17,78	17,83	19,27	20,18	4,06	5,40
L15V25	22,37	26,35	27,72	27,84	30,79	5,03	6,64
L15V15	18,01	23,09	24,84	27,58	31,47	4,02	4,91

Fonte: (Autores, 2024)

A Figura 5.6 apresenta os valores das resistências à compressão axial das misturas.

Figura 5.6 - Resistência à compressão



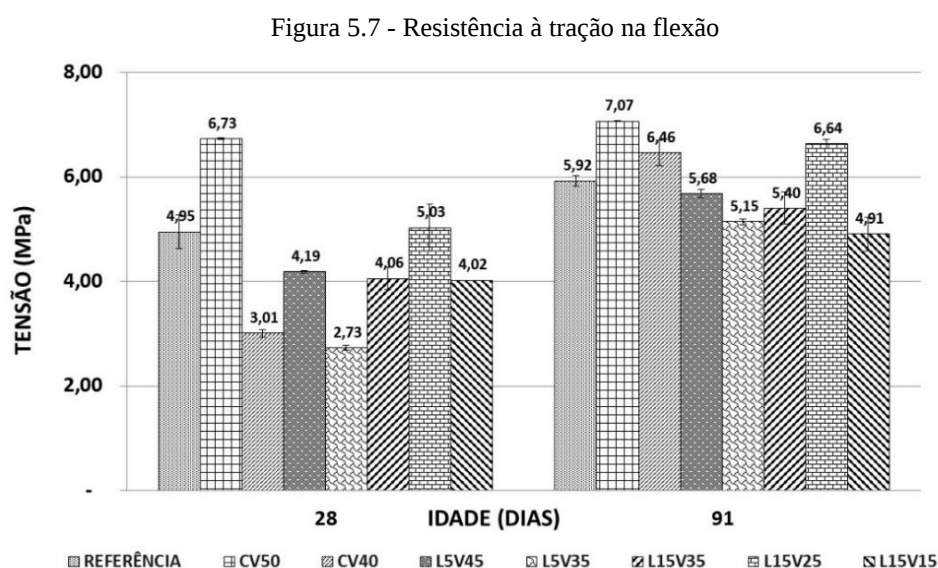
Fonte: Autor (2024)

Os resultados mostram que os concretos com substituição de 50% e 40% do clínquer por cinza volante, apresentaram os melhores resultados, com resistências à compressão de 29,66 MPa e 27,59 MPa aos 28 e 34,30 MPa e 31,29 MPa aos 91 dias, respectivamente, correspondendo a 63% do valor do concreto de referência.

Observa-se ainda que a adição de pozzolana tende a melhorar significativamente as propriedades de ganho de resistência em dias posteriores. A redução em 10% do teor de cinza volante, no caso das misturas CV50 e CV40, implica em redução das resistências à compressão.

Nas misturas com adição de 5% de lama de cal, e redução do teor de cinza volante na proporção de 10%, como, nas misturas L5V45 e L5V35, há aumento das resistências à compressão na mistura L5V35, fato análogo quando se adiciona 15% de lama de cal, com a consequente redução do teor de cinza volante, como nas misturas L15V35, L15V25 e L15V15, onde as misturas L15V25 e L15V15 apresentam valores próximos e maiores do que a mistura L15V35.

Os resultados da resistência à tração na flexão são apresentados na Figura 5.7.



Fonte: Autor (2024)

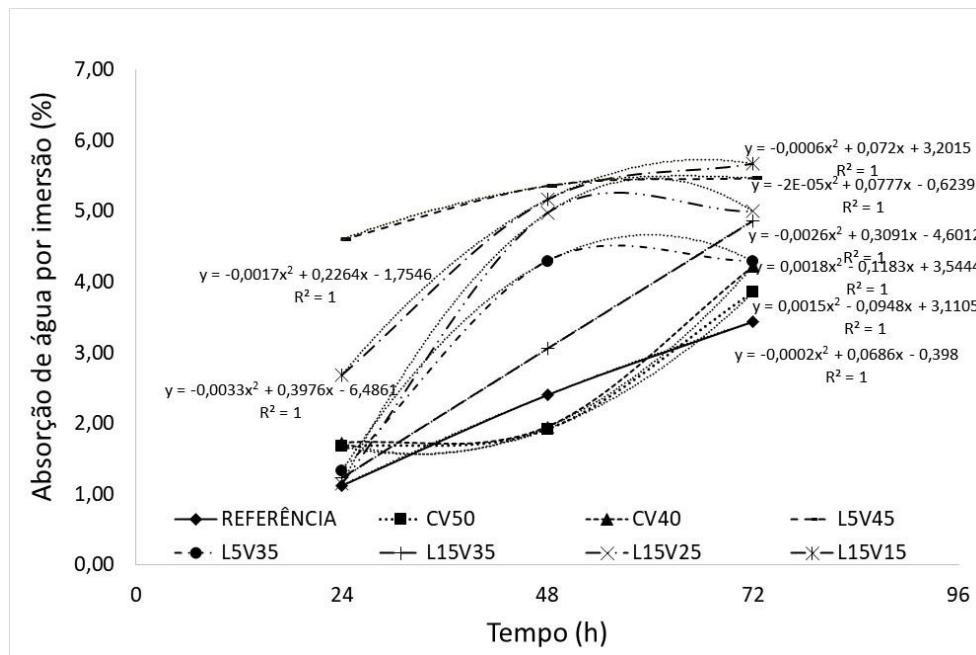
A partir dos resultados pode-se observar que as resistências à tração na flexão dos concretos CV50 e L15V25 são maiores do que o concreto de referência aos 28 dias 36 % e 2%, respectivamente, enquanto que os demais, com exceção das misturas CV40 e L5V35, os demais apresentaram valores próximos ao de referência. Aos 91 dias os concretos CV50, L15V25, e CV40, apresentam resultados 18%, 11% e 8%, superiores ao concreto de referência respectivamente. Com exceção da mistura L15V15, as demais apresentam resultados próximos ao concreto de referência.

5.3.3 Permeabilidade

5.3.3.1 Absorção por imersão e índice de vazios

A Figura 5.8 apresenta o comportamento dos corpos de prova durante o ensaio de absorção de água por imersão.

Figura 5.8 - Absorção por imersão



Fonte: Autor (2024)

Os resultados mostram que todos os concretos absorvem mais do que o concreto de referência e o coeficiente de determinação igual a 1 corrobora os valores encontrados, sendo que os concretos com uso de cinza volante em misturas binárias, CV50 e CV40, absorveram menos água do que as misturas com adição de lama de cal.

Helene (1993) classifica os concretos em função da porosidade e absorção de água em concretos duráveis conforme Tabela 5.6.

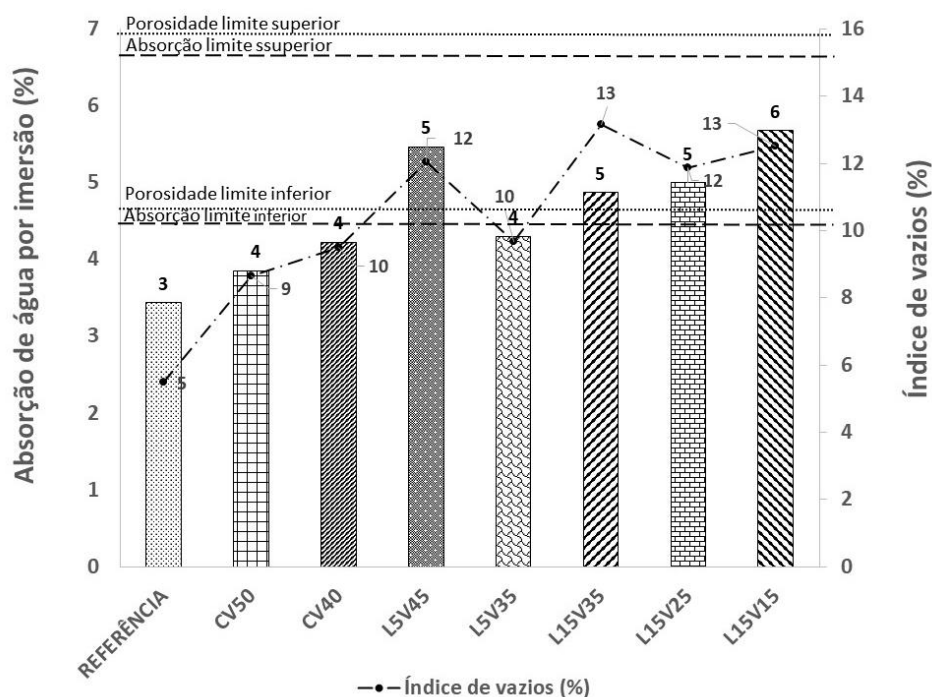
Tabela 5.6 - Classificação dos concretos em função da porosidade e absorção de água

Concreto	Porosidade (i)	Absorção (A)
Durável	$i \leq 10$	$A \leq 4,2$
Normal	$10 > i < 15$	$4,2 > A < 6,3$
Deficiente	$i \geq 15$	$A \geq 6,3$

Fonte: Helene (1993)

A Figura 5.9 apresenta a relação entre a absorção de água e índice de vazios, considerando os limites na Tabela 5.6.

Figura 5.9 - Absorção de água e o índice de vazios



Fonte: Autor (2024)

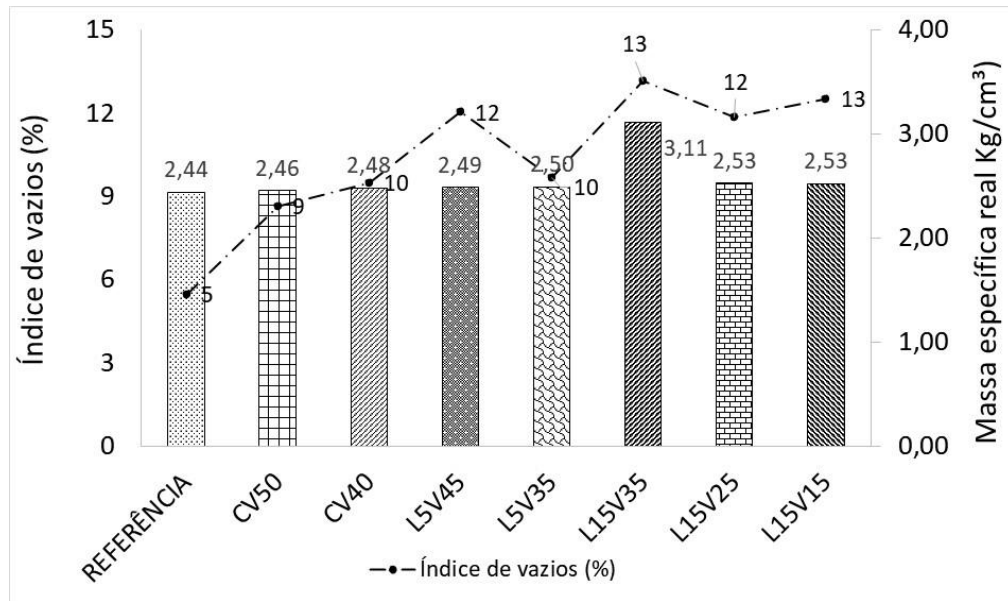
Constata-se que em todas as misturas cimentícias absorção de água é maior do que o concreto de referência. As misturas com adição de cinza volante, CV50 e CV40 apresentam menor absorção e menores índices de vazios, sendo, entretanto, mais permeáveis do que o concreto de referência. Observa-se uma redução de 10% na porosidade quando há maior adição de cinza volante.

Nas misturas com adição de lama de cal e cinza volante o índice de vazios tende a diminuir quando há redução do teor de cinza volante devido à lama de cal, que é material carbonático, funcionar como filler, preencher os vazios da mistura, porém com maior absorção, em função de que a lama não reage com a água, mantendo a porosidade.

O que é relevante é que todos os resultados do ensaio de absorção ficaram abaixo de 10%, podendo ser considerado um bom concreto (Neville, 2016). Portanto, conforme os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios, os concretos de referência, CV50, CV40 são classificados de duráveis e os concretos L5V45, L5V35, L15V35, L15V25 e L15V15 são classificados como normais.

A Figura 5.10 apresenta a relação entre o índice de vazios e a densidade.

Figura 5.10 - Relação entre o índice de vazios e a densidade



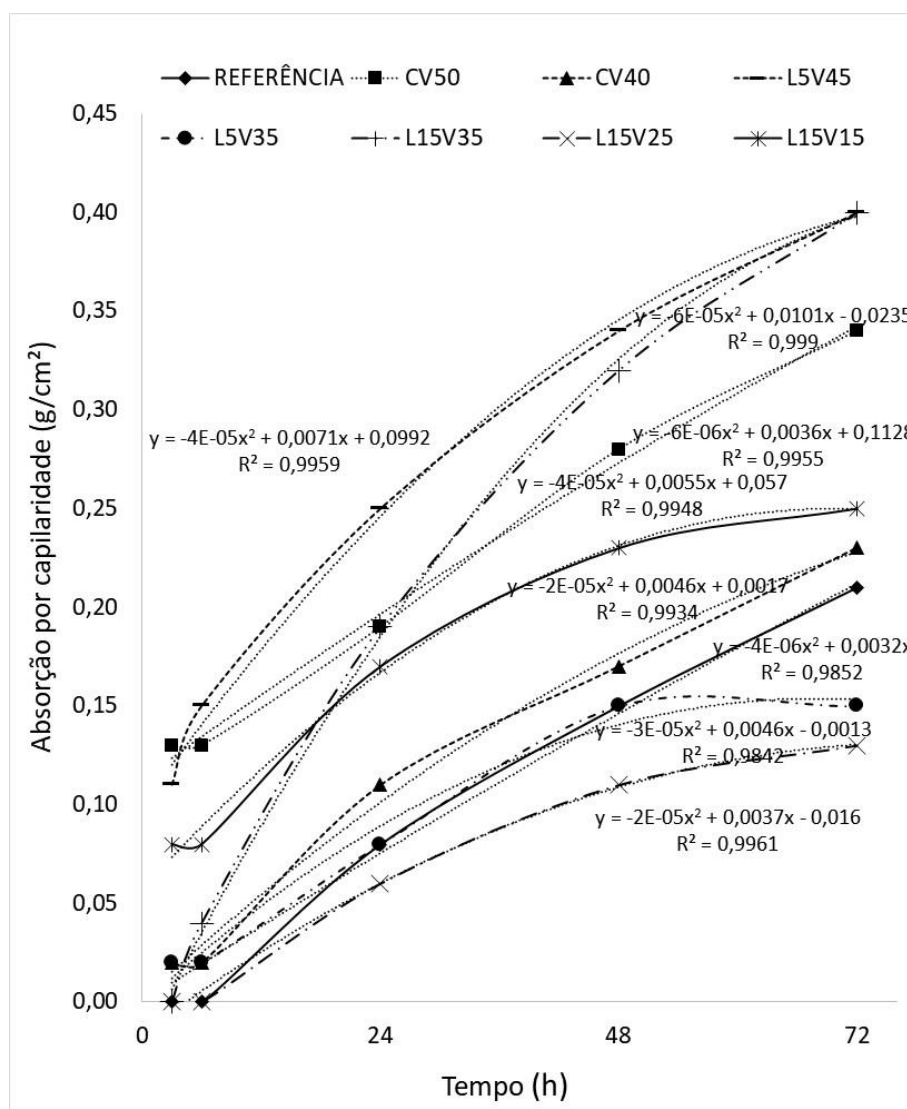
Fonte: Autor (2024)

Observa-se que a densidade dos concretos com as misturas cimentícias apresenta um valor médio de $2,50 \text{ g/cm}^3$, próximo ao valor da densidade do concreto de referência que é igual a $2,44 \text{ g/cm}^3$.

5.3.3.2 Absorção por capilaridade

A Figura 5.11 apresenta os coeficientes de absorção capilar para concretos ao longo de 72h.

Figura 5.11 - Absorção por capilaridade

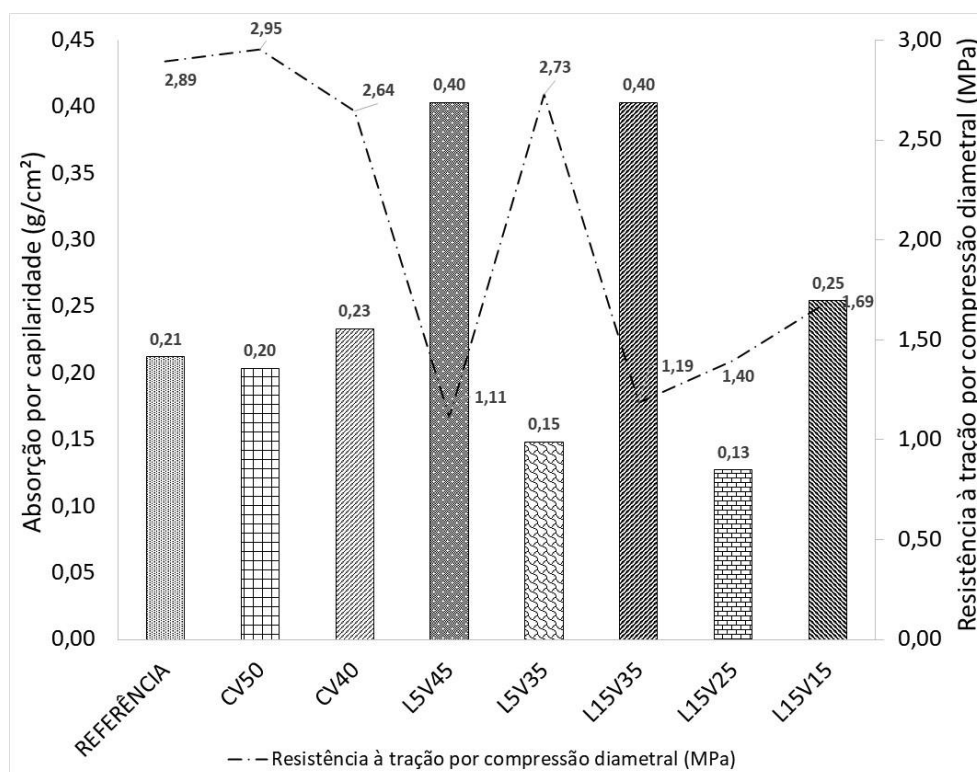


Fonte: Autor (2024)

Pode-se observar que as misturas L15V25 e L5V35 apresentaram os coeficientes de absorção capilar menores que o coeficiente de absorção capilar do concreto de referência. Os concretos L5V45 e L15V35 apresentaram os maiores valores para o coeficiente de absorção capilar.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre a absorção por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral.

Figura 5.12 - Absorção por capilaridade e resistência à tração por compressão diametral



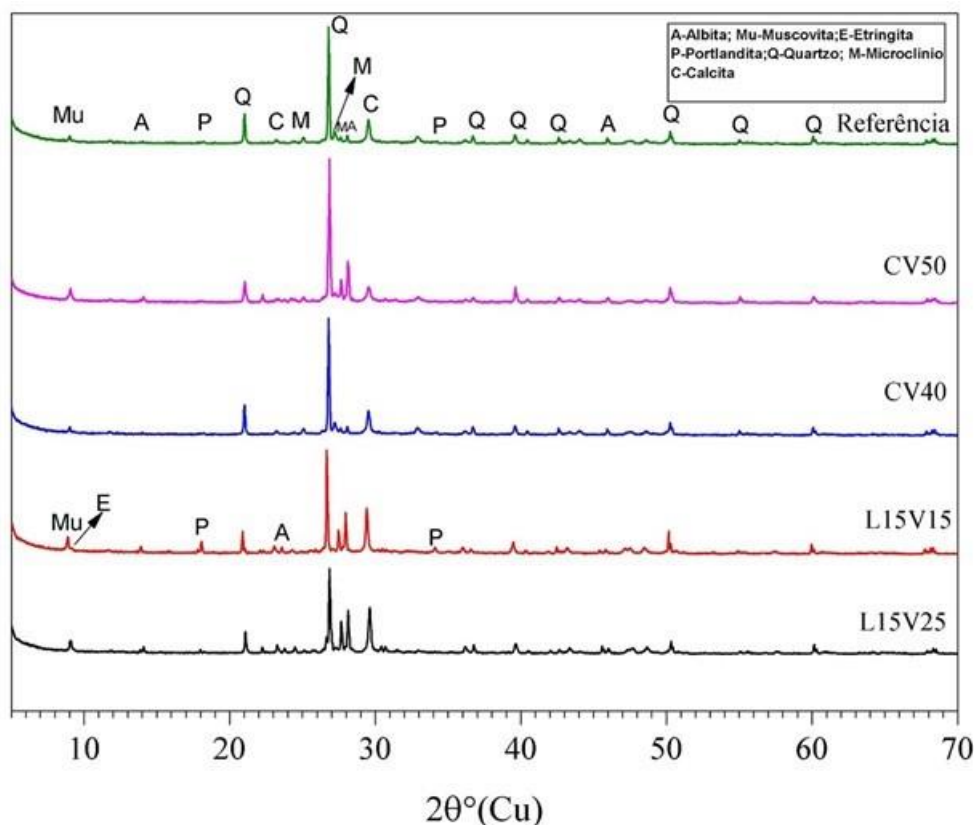
Fonte: Autor (2024)

Os concretos CV50, CV40 e L5V35 apresentaram valores de resistência á compressão diametral iguais a 2,95 MPa, 2,64 MPa e 2,73 MPa, respectivamente, bem próximos do valor do concreto de referência que foi de 2,89 MPa.

5.3.3.3 Análise mineralógica

Neste estudo foi realizada a análise morfológica dos concretos com melhores resistências à compressão na idade de 91 dias, como as misturas binárias com 40 e 50% de cinza volante (CV50, CV40), e as misturas ternárias com 15% lama de cal e 15% cinza volante (L15V15) e com 15% lama de cal e 25% cinza volante (L15V25), os quais foram comparados com o concreto de referência. A Figura 5.13 mostra os difratogramas, obtidos por DRX, das amostras.

Figura 5.13 - Difratomogramas das misturas com maiores resistências à compressão



Fonte: Autor (2024)

Em todas as amostras as fases identificadas foram quartzo, albita, microclínio e muscovita que correspondem aos agregados miúdos –areia- e graúdos –brita-, além do calcário calcita. Também são observados picos de portlandita em todas as amostras analisadas, sendo em maior proporção nas amostras L15V15 e L5V25 e, nas outras, em menor proporção.

Nas amostras L15V15 e L15V25 foi identificada etringita, porem na amostra L15V25, está encoberta pelos picos de muscovita. As fases dos agregados mostram ser típicos de granito com feldspatos, mica e quartzo, que condizem com a análise química e não sofrem mudanças durante a formação do concreto. A formação de portlandita e etringita deu-se pela reação do cimento e água, durante a hidratação do cimento. Este fato é mais propenso nas amostras com lama de cal e cinza volante.

Os resultados da DRX mostram ainda que a intensidade de portlandita diminui com o tempo para todos os cimentos. Isso se deve ao fato do efeito pozolânico, o que justifica a maior resistência dos concretos com maior volume de cinzas volantes, devido, principalmente ao consumo de portlandita.

5.4 Conclusão

A utilização de lama de cal e cinza volante na substituição parcial do clínquer para a produção de matrizes cimentícias contribui em larga escala para a redução das emissões de gases de efeito estufa na produção de aglomerantes alternativos ao cimento Portland, bem como na redução da degradação ambiental de áreas de floresta, ao diminuir a extração de calcário.

Com a relação a/c constante e igual a 0,45 para todas as misturas houve um aumento na trabalhabilidade dos concretos com misturas binárias com maior teor de cinza volante e com misturas ternárias, com maior teor de lama de cal e menores teores de cinza volante.

A resistência à compressão aumentou, com o passar do tempo, nos concretos com misturas binárias de clínquer e cinza volante, devido ao efeito pozzolânico. Nas misturas ternárias com redução do teor de cinza volante e adição de baixos teores de lama de cal, a resistência à compressão diminuiu. Entretanto, quando os percentuais de adição de cinza volante e lama de cal são equivalentes, a resistência à compressão aumentou.

Em relação à resistência à tração na flexão, todas as misturas apresentaram aumento de resistência ao longo do tempo, com destaque para as misturas binárias e, no caso das ternárias, o melhor resultado foi o concreto com maior teor de lama de cal e redução do teor de cinza volante.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade, no tocante a porosidade e absorção de água por imersão, mostraram que as misturas binárias com clínquer e cinza volante podem ser classificadas como concreto durável e as misturas ternárias classificam-se como concreto normal.

As densidades de todos os concretos são equivalentes ao concreto de referência, enquanto que as misturas ternárias apresentaram os menores coeficientes de absorção capilar, entretanto, a mistura binária com maior teor de cinza volante apresentou maior resistência à compressão diametral sob condições extremas dos ensaios.

Em resumo, os benefícios ambientais da utilização de resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, na substituição total ou parcial do clínquer para a produção de matrizes cimentícias, são significativos, reduzindo a emissão de CO₂, consequentemente com menor consumo de energia, apresentando grande potencial para desenvolvimento sustentável,

resultados esses promissores do ponto de vista ambiental e econômico, pois consegue-se boas resistências com redução de, aproximadamente, 50% de clínquer nas misturas cimentícias.

REFERÊNCIAS

- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production 1928–2018. **Earth System Science Data**, v 11, p. 1675–1710, 20 Nov. 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ELLIS, L. D.; BADEL, A. F.; CHIANG, M. L.; PARK, R. J. Y.; CHIANG, Y.M. Toward electrochemical synthesis of cement - An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO_3 while producing useful gas streams. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 23, p. 12584 - 12591, set. 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>

FAVIER, A.; WOLF, C.; SCRIVENER, K.; HABERT, G. A Sustainable future for the european cement and concrete industry: technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050; **ETH**, Zurich, Switzerland, 2018.

HANEIN, T.; GALVEZ-MARTOS, J.-L.; BANNERMAN, M. N. Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2278-2287, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.183>

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. 231 p. Tese (Livre Docência em Engenharia) - Escola Politécnica da USP.

HELENE, P., TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto, São Paulo, Pini, 1993.

HOU, G.; CHEN, J.; LU, B.; CHEN, S.; CUI, E.; NAGUIB, H. M.; GUO, M.-Z.; ZHANG, Q. Composition design and pilot study of an advanced energy-saving and low-carbon rankinite clinker, **Cement and Concrete Research**, v. 127, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105926>

JUHART, J.; AUTISCHER, M.; SAKOPARNIG, M.; KRÜGER, M. The realization of clinker-reduced, performance-based sustainable concrete by the micro-filler, eco-filler concept, **Materials**, v. 14, n. 17, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14174958>

KUMAR, V.V.P.; PRASAD, D.R. Study on strength and durability characteristics of lime sludge based blended cement concrete. **Journal of building pathology and rehabilitation**, v. 4, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0041-5>

LIU, X.; FAN, Y.; WANG, C. An estimation of the effect of carbon pricing for CO₂ mitigation in China's cement industry, **Applied energy**, v. 185, part 1, p. 671-686, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.115>

LI, Z.; YUAN, H.; GAO, F.; ZHANG, H.; GE, Z.; WANG, K.; SUN, R.; GUAN, Y.; LING, Y.; JIANG, N. A Feasibility study of low cement content foamed concrete using high volume of waste lime mud and fly ash for road embankment. **Materials**, v. 15, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma15010086>

MADRID, M.; ORBE, A.; ROJI, E.; CUADRADO, J. The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units. **Construction and building materials**, v. 153, p. 117-128, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.086>.

MALAISKIENE, J.; KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V. The influence of primary paper sludge on concrete properties. **Ceramics - Silikaty**, v. 3, p. 321-329, 2019. <https://doi.org/10.13168/cs.2019.0027>

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

SAHU, V.; SRIVASTAVA A.; MISRA, A. K.; SHARMA, A. K. Stabilization of fly ash and lime sludge composites: Assessment of its performance as base course material. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 17, p. 475–485, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.010>

SILVA, K.R.M; FERNANDEZ, O.J.C; CUNHA, R.R.; PICANÇO, M.S. Propriedades mecânicas de argamassas sustentáveis, utilizando resíduos de celulose, cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer. **Caderno pedagógico**, v. 21, n.7, p. 01-22, 2024. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n7-183>

SIMÃO, L.; JIUSTI, J.; LÓH, N.J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J.A.; MONTEDO, O.R.K. Waste-containing clinkers: valorization of alternative mineral sources from pulp and paper mills. **Process safety and environmental protection**, v. 109, p. 106-116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.038>

SINGH, G. V. P. B.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of cleaner production**, v. 239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118024>

TORRES, C.M.M.E.; SILVA, C.M.; PEDROTI, L.G.; FERNANDES, W. E. H.; BALLOTIN, F. C. ; ZANUNCIO, A. J. V. Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. **Journal of material cycles and waste management**, v. 22, p. 851–861, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00983-x>

VASHISTHA, P.; SINGH, S. K., DUTT, D.; KUMAR, V. Sustainable utilization of paper mill solid wastes via synthesis of nano silica for production of belite based clinker. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 557-565, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.207>

ZEI-GARCIA, J. D.; SANTACRUZ, I.; ARANDA, M. A.G.; De la Torre, A. G. Alite-belite-ye'elinite cements: Effect of dopants on the clinker phase composition and properties. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 192–202, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.019>

6 ARTIGO 4 - PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DO CONCRETO SUSTENTÁVEL COM USO DE CINZA VOLANTE E LAMA DE CAL, DA AMAZÔNIA, EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CLÍNQUER.

Resumo

A produção de concretos sustentáveis é uma das estratégias da indústria da construção civil para contribuir com a redução das emissões de CO₂ e, o uso de materiais cimentícios suplementares é uma das propostas mais analisadas. É fundamental que este concreto seja durável, resistente às condições ambientais, garantam a segurança, a estabilidade e a vida útil da estrutura. Este artigo avalia o desempenho de durabilidade do concreto sustentável com cimento alternativo, feito através da incorporação de resíduos de celulose, cinza volante e lama de cal, da Amazônia, em substituição parcial do clínquer Portland na produção de cimento, como materiais cimentícios suplementares. Foram moldados corpos de prova de concreto com clínquer e cinza volante em misturas binárias nas proporções de 40% e 50%. A lama de cal foi utilizada em misturas ternárias na proporção de 5%, 15% e 25% associada com cinza volante nas proporções 15%, 25%, 35% e 45% e clínquer. Em todas as misturas foi adicionada gipsita teores de 2,5%. Os corpos de prova foram analisados quanto a carbonatação, penetração de cloretos, absorção e índice de vazios. Os resultados mostram que as misturas ternárias com clínquer e gipsita, lama de cal e cinza volante apresentaram maior resistência à carbonatação e a penetração de cloretos aos 91 dias, com destaque para a mistura com 60% de clínquer e gipsita, 5% de lama de cal e 35% de cinza volante, comprovando a viabilidade do uso desses resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, na produção de concreto alternativo sustentável.

Palavras chave: Durabilidade; penetração de cloretos; carbonatação; resíduos de celulose; cinza volante; lama de cal.

Abstract

The production of sustainable concrete is one of the strategies of the construction industry to contribute to the reduction of CO₂ emissions, and the use of supplementary cementitious materials is one of the most analyzed proposals. It is essential that this concrete is durable, resistant to environmental conditions, and ensures the safety, stability, and useful life of the structure. This article evaluates the durability performance of sustainable concrete with alternative cement, made by incorporating cellulose waste, fly ash, and lime mud from the Amazon, in partial replacement of Portland clinker in cement production, as supplementary cementitious materials. Concrete specimens were molded with clinker and fly ash in binary mixtures in proportions of 40% and 50%. Lime mud was used in ternary mixtures in proportions of 5%, 15%, and 25% associated with fly ash in proportions of 15%, 25%, 35%, and 45% and clinker. Gypsum was added to all mixtures at a level of 2.5%. The test specimens were analyzed for carbonation, chloride penetration, absorption and void index. The results show that the ternary mixtures with clinker and gypsum, lime mud and fly ash presented greater resistance to

carbonation and chloride penetration at 91 days, with emphasis on the mixture with 60% clinker and gypsum, 5% lime mud and 35% fly ash, proving the viability of using these cellulose residues, lime mud and fly ash, in the production of sustainable alternative concrete.

Keywords: Durability; chloride penetration; carbonation; cellulose wastes; fly ash; lime mud

6.1 Introdução

Nos últimos anos a construção civil, a nível mundial, vem desenvolvendo estudos que buscam viabilizar o uso de novos materiais sustentáveis, implicando em novas tecnologias construtivas que garantam maior vida útil e durabilidade das edificações. Entende-se por vida útil a medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes, compreendido como o período de tempo entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender aos requisitos do usuário preestabelecidos (NBR 15575-1, 2024).

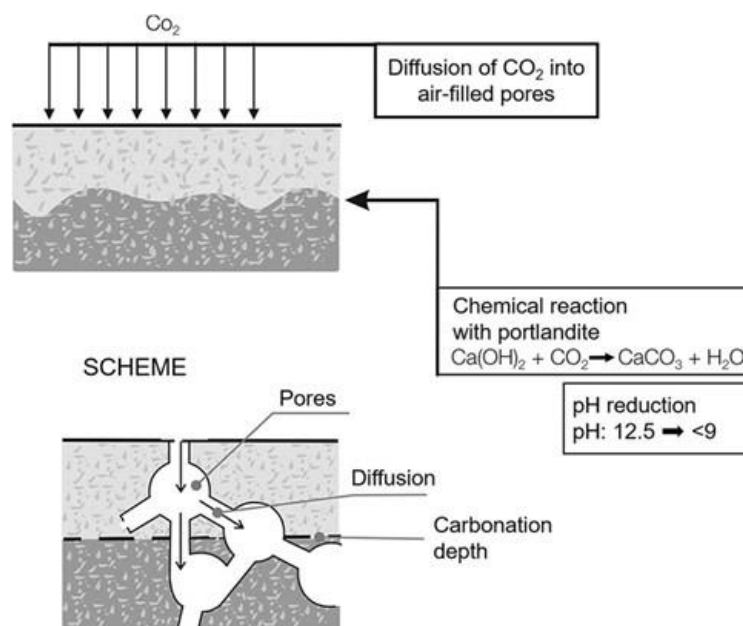
A durabilidade consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto, sendo susceptíveis de deterioração através de lixiviação, expansão por sulfato, reação álcali-agregado, além da despassivação da armadura por carbonatação e por ação de cloretos (NBR 6118, 2014).

Estruturas duráveis apresentam menores incidências de patologias e, portanto, menor custo de manutenção, sendo fundamental, para aumentar a durabilidade do concreto, que se conheçam os mecanismos de transporte de massa, pois o transporte de íons ou fluidos através da estrutura dos poros do concreto, principalmente por difusão, têm grande influência na sua vida útil (Cascudo et al, 2021).

Carbonatação e penetração de cloretos são mecanismos agressivos amplamente conhecidos que causam deterioração das estruturas de concreto armado, os quais são considerados em modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado (Guignone et al, 2019), onde o ambiente influencia diretamente na durabilidade destas estruturas (Oliveira et al, 2023).

A penetração do CO_2 na estrutura de concreto por difusão e o processo de carbonatação é detalhado na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Representação da penetração de CO₂ na estrutura de concreto



Fonte: Ribeiro et al (2023)

Carbonatação refere-se a reação do dióxido de carbono (CO₂) com materiais cimentícios para formar carbonato de cálcio (CaCO₃) (EN 16757), provocando a despassivação do aço pela entrada de CO₂ com diminuição associada do pH da solução dos poros do concreto, enquanto que penetração de cloreto descreve a profundidade na qual os íons cloreto penetram no concreto, a partir do ambiente circundante, resultando na despassivação localizada do aço causada por íons cloreto que atingem a interface aço-concreto (Gluth et al, 2020).

O ataque de cloretos, que ocorre principalmente em meios marinhos ou em estruturas às proximidades do mar, e a carbonatação do concreto são considerados as duas principais causas da corrosão do aço (Li et al, 2024).

O transporte de cloreto dentro do concreto não fissurado é feito pelo gradiente de concentração (difusão), do gradiente de pressão (permeabilidade) e da absorção capilar, sendo a difusão o mecanismo de transporte de cloretos no concreto mais recorrente, expressando o fluxo de íons partindo de regiões (porosas) de maior concentração em direção àquelas de menor concentração, em um meio aquoso, podendo ocorrer em estado estacionário ou não estacionário (Cascudo et al, 2022).

O uso de materiais cimentícios suplementares como sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante, calcário moído e escória de alto forno, contribuem para evitar a deterioração do concreto, melhorando a reação de hidratação no concreto, a resistência, a durabilidade e

propriedades microestruturais, além de reduzir a permeabilidade (Uthaman e Vishwakarma, 2023).

Liu et al (2020) estudaram o concreto de alta durabilidade em diferentes proporções de água/cimento, utilizando cinza volante, sílica ativa, escória de alto-forno granulada moída e mistura de resistência à corrosão por sulfato concluindo que apresentam diferentes resistências à compressão e na durabilidade do concreto, dependendo da sua composição química, finura e atividade pozolânica.

A literatura apresenta estudos do uso de resíduos de celulose em substituição parcial do cimento Portland, priorizando as propriedades mecânicas (Sahu et al, 2019; Simão et al, 2017; Vashistha et al, 2019), não sendo encontrados estudos de durabilidade, o que demonstra a relevância desse estudo, que tem como objetivo avaliar as propriedades de durabilidade do concreto sustentável, com o uso de cimentos elaborados em misturas binárias e ternárias, a partir da mistura de clínquer e gipsita adicionados a cinza volante e lama de cal, em substituição ao cimento Portland.

6.2 Materiais e métodos

6.2.1 Materiais

6.2.1.1 Cimento de referência

Neste estudo foi utilizado, para o concreto de referência, o cimento Portland CP II F 40, por tratar-se de um cimento comercial, da fábrica de cimentos Votorantim, localizada na região nordeste do estado do Pará (Brasil).

6.2.1.2 Agregados

Foram utilizados agregados graúdos nas proporções de 30% de brita 1 e 70% brita 0, com o objetivo de diminuir o volume de vazios. Como agregado miúdo foi utilizada areia proveniente de jazidas na região metropolitana de Belém. A Tabela 6.1 apresenta as características dos agregados utilizados.

Tabela 6.1 - Características dos agregados utilizados

Material	Densidade real (kg/dm ³)	Módulo de finura	Teor de material pulverulento (%)	Absorção (%)	Diâmetro máximo característico (mm)
Brita 0	2,69	5,53	0,51	2,73	12,5
Brita 1	2,69	6,85	0,51	2,73	25
Areia	2,62	1,66	0,85	0,50	1,2

Fonte: Autor (2024)

6.2.1.3 Concreto sustentável

O concreto sustentável é aquele onde há substituição de cimento ou clínquer por materiais de características semelhantes, de forma a contribuir para a redução da emissão de CO₂, diminuir o consumo de energia e o uso de recursos naturais na sua produção.

Neste estudo avaliadas e comparadas com o concreto de referência, sete proporções de concreto sustentável elaboradas a partir de misturas de clínquer, gipsita, lama de cal, produzida a partir da recuperação de agentes químicos durante a etapa de caustificação da produção de celulose pelo processo Kraft e cinza volante, proveniente da queima de biomassa. As proporções das misturas são mostradas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Proporções das misturas do concreto sustentável

CONCRETO	REFERÊNCIA	CV50	L5V45	CV40	L5V35	L15V35	L15V25	L15V15
a/l	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cimento	450	-	-	-	-	-	-	-
Clínquer	-	213,75	213,75	258,75	258,75	213,75	258,75	303,75
Gipsita	-	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79
Lama de cal	-	-	19,51	-	19,51	58,54	58,54	58,54
Cinza volante	-	188,59	169,73	150,87	132,01	132,01	94,30	56,58
Areia	630	630	630	630	630	630	630	630
Brita 1	303	303	303	303	303	303	303	303
Brita 0	707	707	707	707	707	707	707	707
Água	205	205	205	205	205	205	205	205
Aditivo	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575	0,1575

Fonte: Autor (2024)

6.2.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi o hiperplastificante em pó à base de policarboxilatos, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e a plasticidade das misturas.

6.2.2 Métodos

6.2.2.1 Ensaios de permeabilidade do concreto

Para verificar a permeabilidade dos concretos sustentáveis foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, segundo as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012) e absorção de água por imersão e índice de vazios, conforme as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005).

6.2.2.2 Ensaio de carbonatação acelerada

Os ensaios para determinação da profundidade de carbonatação foram executados com base na adaptação da norma ISO 1920. Esta norma prevê um período de ensaios de 112 dias período que compreende uma idade mínima do espécime de 28 d antes do condicionamento, um período mínimo de condicionamento de 14 d, e uma exposição mínima a níveis aumentados de dióxido de carbono de 70 d. A norma EN 13295(2004) especifica um tempo de exposição de 56 dias para determinar a profundidade da carbonatação.

Foram moldados dois corpos de prova para cada mistura cimentícia nas dimensões 100x100x400 mm e submetidos a cura, sob imersão, durante 28 dias. A Figura 6.2 apresenta os corpos de prova preparados para o ensaio de carbonatação acelerada.

Figura 6.2 - Corpos de prova preparados para o ensaio de carbonatação



Fonte: Autor (2024)

Após a cura os corpos de prova foram condicionados em um ambiente de ar de laboratório por 14 dias, não havendo controle de temperatura e umidade. Posteriormente foram vedadas com parafina as duas faces longitudinais e duas as extremidades dos corpos de prova, com o objetivo de impermeabiliza-los. A

apresenta os corpos de prova vedados com parafina.

Figura 6.3 - Corpos de prova selados com parafina



Fonte: Autor (2024)

Posteriormente foram colocados em uma câmara de armazenamento, com um nível de dióxido de carbono de $(3,0 \pm 0,5) \%$ durante 140 dias. A cada período de ensaio, uma fatia de 100 mm foi quebrada de cada prisma e testada quanto à profundidade de carbonatação através da aspersão de fenolftaleína e feito as leituras das espessuras das camadas carbonatadas e comparadas com os resultados do concreto de referência.

As amostras não ensaiadas foram seladas e os prismas retornaram à câmara de armazenamento até o próximo ensaio, conforme apresenta a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 6.4 - Câmara de carbonatação e corpos de prova prontos para ensaio



Fonte: Autor (2024)



A profundidade de carbonatação é a distância média, medida em mm, da superfície do concreto ou argamassa, onde o dióxido de carbono (CO_2) reduziu a alcalinidade do cimento hidratado a tal ponto que uma solução indicadora baseada em fenolftaleína permanece incolor.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os corpos de prova após aplicação da solução de fenolftaleína.

Figura 6.5 - Corpos de prova após aplicação de solução de fenolftaleína



Fonte: Autor (2024)

A profundidade média de carbonatação foi calculada usando a equação 1, proposta por Tutti (1982) e utilizada em diversos estudos (Ribeiro et al, 2024; Ribeiro et al, 2023; Campos Neto et al, 2023; Ortolan et al, 2023), a qual é baseada na 1ª Lei de difusão de Fick (Greve-Dierfeld et al, 2020) que relaciona a profundidade de carbonatação com o tempo de exposição ao ambiente acelerado de carbonatação.

$$x_c(t) = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação (1)}$$

onde:

$x_c(t)$ = profundidade de carbonatação (mm)

k = coeficiente de carbonatação, em $\text{mm}/\text{dia}^{0,5}$;

t = tempo de exposição, em dias.

6.2.2.3 Ensaio de penetração de cloretos

Para a determinação da ação de cloretos no concreto foi utilizado o método colorimétrico, aplicado em outros estudos (He et al, 2018; Slomka-Slupik et al., 2018; Tahwia, 2021; Xu et al, 2022) que consiste na aspersão de solução de nitrato de prata na seção transversal de um corpo de prova fraturado por compressão diametral. Após a reação, aproximadamente 15 minutos depois, a zona livre de cloreto adota uma cor mais escura, em relação à zona afetada por cloreto.

Há uma reação fotoquímica onde o AgNO_3 reage com os cloretos formando cloreto de prata (AgCl), que possui coloração esbranquiçada, enquanto nas regiões com ausência de cloretos livres, há a formação do óxido de prata (Ag_2O), que confere ao concreto coloração marrom (Pontes et al, 2021).

Para a realização do ensaio de penetração de cloretos foram moldados seis corpos de prova para cada mistura cimentícia, três em cada idade de ensaio, os quais foram colocados em um tanque, para cura úmida por imersão, durante 28 dias. Após esse período, foram expostos ao ar em ambiente de laboratório por 24 h e, em seguida, colocados em um recipiente contendo uma solução alcalina com concentração de 3% de NaCl , para simular a água do mar, conforme apresenta a Figura 6.6.

Figura 6.6 - Corpos de prova imersos em solução alcalina



Fonte: Autor (2024)

Nas datas dos ensaios, três amostras de cada mistura de concreto foram removidas da solução de NaCl aos 28 e 91 dias e rompidas por compressão diametral e, em seguida feita a aspersão de uma solução de AgNO_3 em um dos lados, segundo adaptação da norma NT Build 492. Com o auxílio de um paquímetro foram feitas 10 leituras nas laterais e seis nas bordas, tirando-se a média para identificar a profundidade da penetração dos íons cloretos. A Figura 6.7 apresenta os corpos de prova após a aplicação da solução de nitrato de prata.

Figura 6.7 - Amostras após a aplicação da solução de nitrato de prata



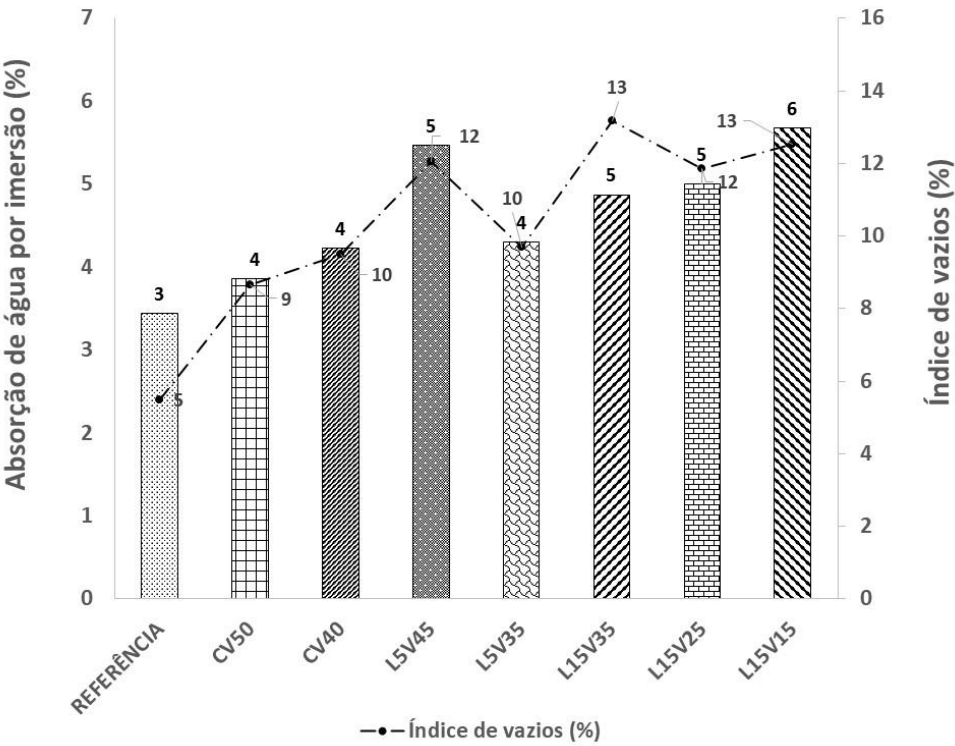
Fonte: Autor (2024)

6.3 Resultados e discussões

6.3.1 Ensaios de permeabilidade do concreto

A Figura 6.8 apresenta os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios.

Figura 6.8 - Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios



Fonte: Autor (2024)

As misturas binárias CV40 e CV50 apresentaram percentuais de absorção 12% e 23% em relação ao concreto referência com índice de vazios 58% e 73%, respectivamente. As misturas ternárias L5V45 e L5V35 observa-se a diminuição da absorção de água e dos índices de vazios com a diminuição do teor de cinza volante em 5%. Nas misturas L15V35, L15V25 e L15V15, as quais tem o teor de lama de cal acrescido para 15%, observa-se um aumento gradual na absorção de água e no índice de vazios.

6.3.2 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada analisa o comportamento do concreto em ambientes com alta concentração de dióxido de carbono. A Tabela 6.3 apresenta os resultados médios das profundidades de carbonatação para corpos de prova de concreto com as diferentes proporções.

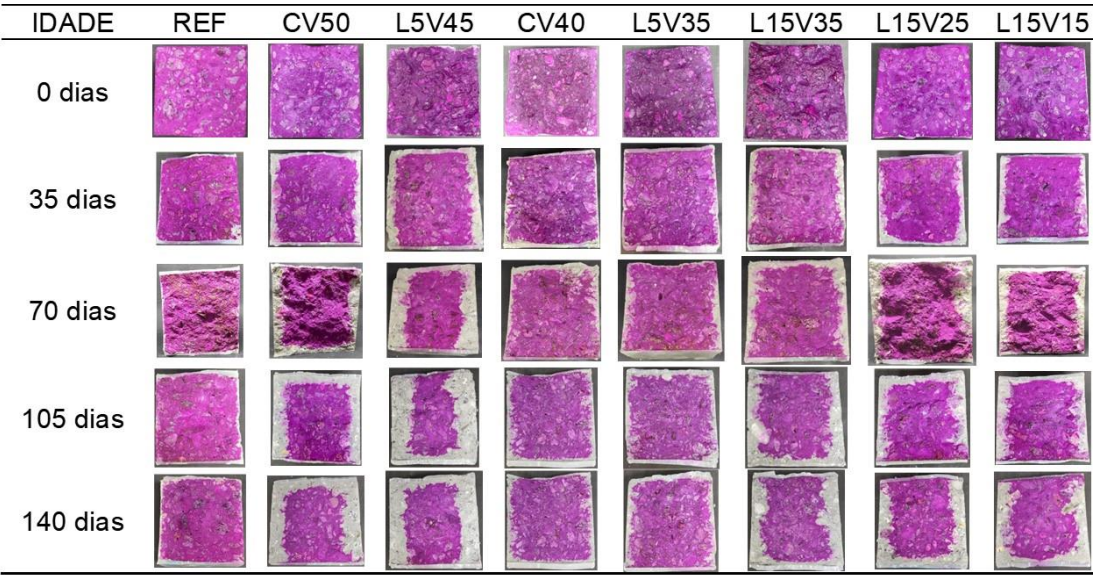
Tabela 6.3- Resultados dos ensaios de carbonatação

CONCRETO	Profundidade de carbonatação (mm)				Variação (%)	Coeficientes de carbonatação
	35 dias	70 dias	105 dias	140 dias		
REFERÊNCIA	1,38	2,06	1,75	1,50	8,8	3,3319
CV50	6,49	10,81	12,95	19,33	197,8	26,7620
L5V45	7,68	15,64	22,22	20,90	172,3	35,5520
CV40	2,49	2,58	3,80	3,68	47,7	6,4889
L5V35	2,34	3,15	3,18	3,52	50,2	6,2428
L15V35	5,93	8,96	12,88	11,75	98,1	22,017
L15V25	6,14	8,50	11,14	14,28	93,7	21,752
L15V15	6,78	7,82	13,43	13,13	132,6	21,321

Fonte: Autor (2024)

A Figura 6.9 apresenta o comportamento dos corpos de prova de concreto, após a aplicação de fenolftaleína, em suas respectivas idades de ensaio.

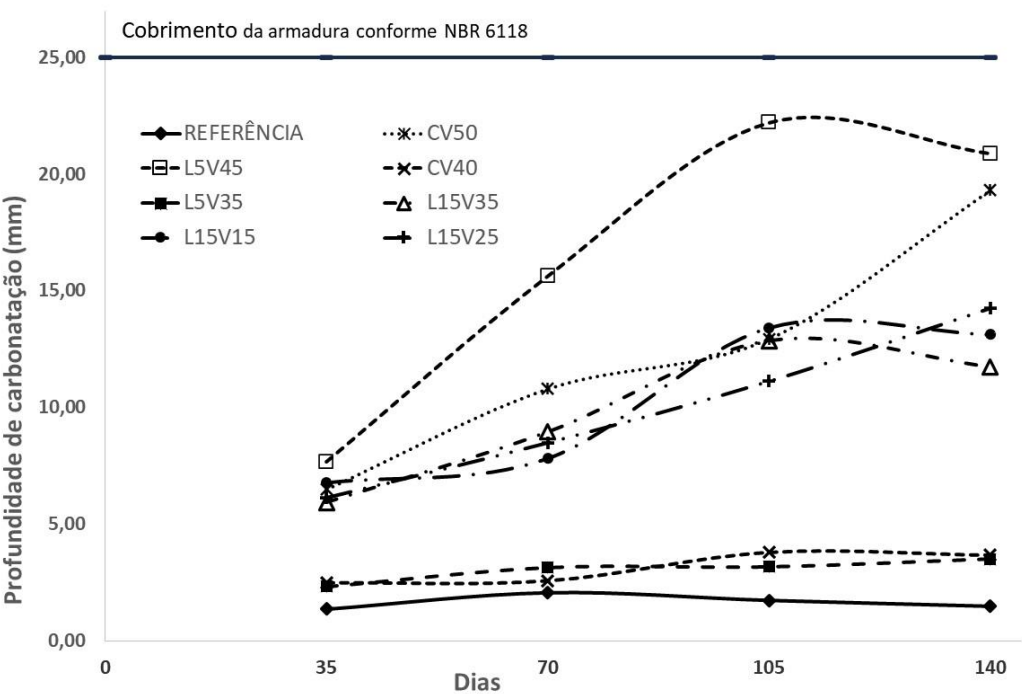
Figura 6.9 - Comportamento dos corpos de prova após a aplicação de fenolftaleína



Fonte: Autor (2024)

A Figura 6.1010 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação, através das médias dos resultados obtidos no ensaio de carbonatação acelerada após a exposição, com a idade final de 140 dias.

Figura 6.10 - Média dos resultados dos ensaios de carbonatação



Fonte: Autor (2024)

Observa-se um aumento na profundidade de carbonatação em todas as misturas com o avanço do tempo de exposição ao CO₂, com a formação de três grupos distintos.

O primeiro grupo caracteriza-se pela profundidade de carbonatação dos cimentos CV40 e L5V35, que apresentarem menores valores de profundidade de carbonatação, iguais a 3,68 mm e 3,52 mm, correspondendo 145% e 134% acima do valor do concreto de referência que é de 1,50 mm aos 140 dias.

No segundo grupo a profundidade de carbonatação dos cimentos L15V35, L15V25 e L15V15 apresentaram valores de 11,75 mm, 14,28 mm e 13,13 mm, correspondendo 683%, 852% e 775% acima do valor do concreto de referência aos 140 dias.

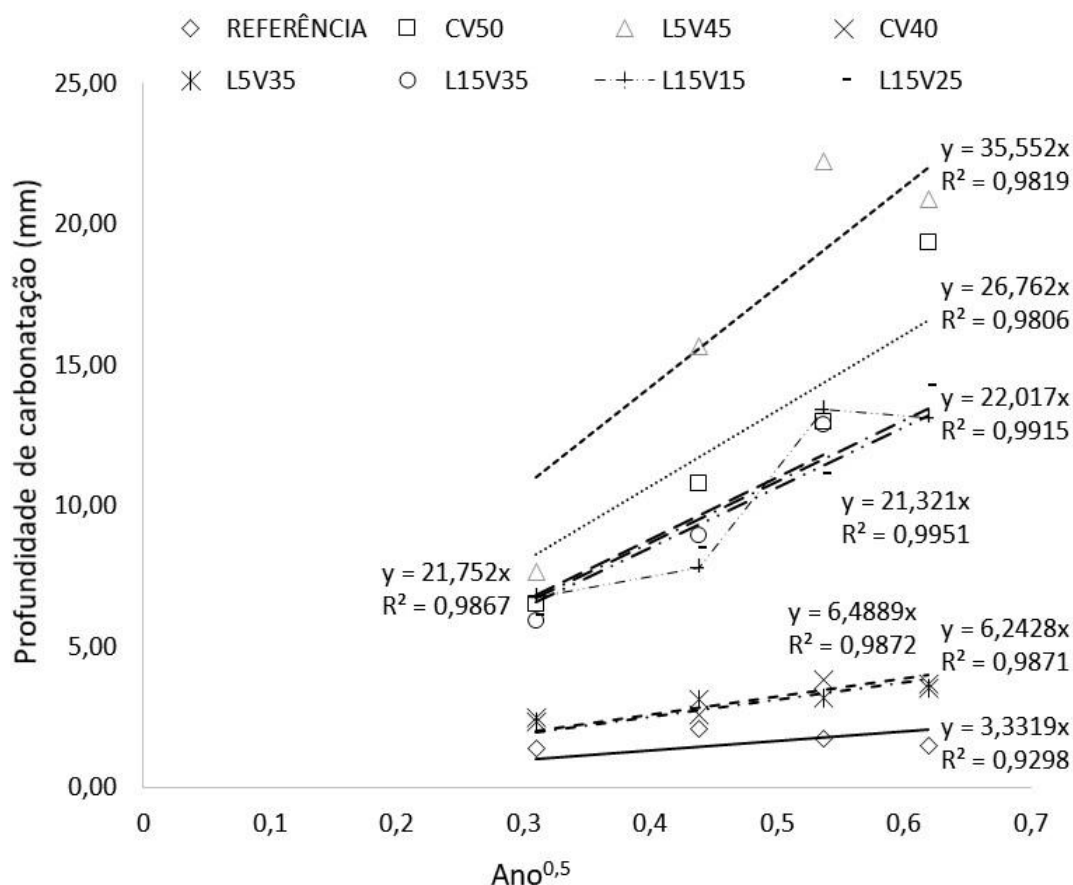
Os resultados mostram três situações. A primeira é que reduzindo os teores de cinza volante e de clínquer e aumentando o teor de lama de cal, mistura L15V35, aumenta a profundidade de carbonatação. Na segunda situação, mistura L15V25, há um aumento maior da profundidade de carbonatação com a redução do teor de cinza volante, aumento do teor de lama de cal e de clínquer. Na terceira situação, há um maior teor de clínquer, redução no teor de cinza volante e aumento do teor de lama de cal.

No terceiro grupo a profundidade de carbonatação dos cimentos CV50 e L5V45 apresentaram valores de 19,33 mm e 20,90 mm, correspondendo a 1387% e 1292% acima do valor do concreto de referência aos 140 dias, demonstrando que com o aumento do teor de cinzas volantes, redução do teor de clínquer Portland, a profundidade de carbonatação aumenta, isto é, reduz a capacidade das misturas em resistir a entrada de CO₂.

Georgescu et al (2022) afirma que o principal fator que influencia a carbonatação é a difusão, que é função do sistema de poros do concreto conforme o tipo de cimento, relação a/c e o grau de hidratação, os quais influenciam na resistência do concreto.

Os coeficientes de carbonatação acelerada obtidas para os concretos estudados são apresentadas na Figura 6.11.

Figura 6.11 - Coeficientes de carbonatação acelerada para os concretos



Fonte: Autor (2024)

O coeficiente de carbonatação tende a diminuir com o tempo, com menor profundidade de penetração, visto que os produtos da reação de carbonatação tendem a bloquear os poros no concreto e causar uma redução na difusividade do gás, ao mesmo tempo em que os materiais cimentícios continuam a hidratar e refinar os poros dentro do material (Greve-Dierfeld et al, 2020).

Considerando os estudos realizados por Ribeiro et al (2023), na condição ambiente urbano severo, para cidades com alta densidade demográfica e tráfego intenso de veículos ou ambiente industrial moderado, com concentração de CO_2 variando entre 0,06 % e 0,08 %, os concretos REFERÊNCIA, CV50, CV40, L5V35, L15V35, L15V25 e L15V15 podem ser classificados com estimativa da resistência à carbonatação do concreto excepcional, pois apresentam coeficientes de carbonatação inferiores a 28,5, enquanto o concreto L5V45 classifica-se como moderado por apresentar coeficiente de carbonatação igual a 35,55, portanto, inferior a 41,5.

6.3.3 Ensaio de penetração de cloretos

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos ensaios de penetração de cloretos.

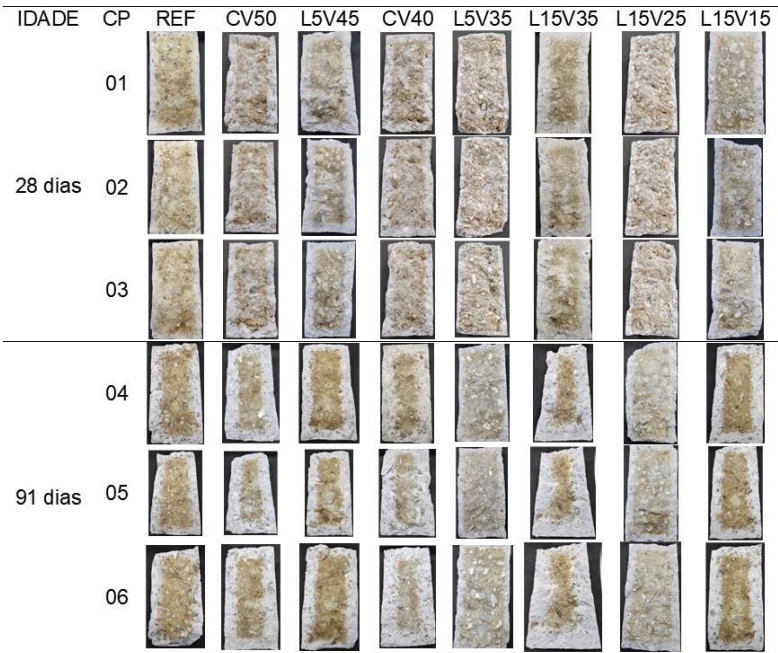
Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios de penetração de cloretos

Mistura	Profundidade de penetração de cloretos (mm)		Acréscimo (%)
	28 dias	91 dias	
Referência	14,3	15,6	9,8
CV50	16,0	21,4	47,5
CV40	16,4	22,1	42,6
L5V45	15,5	17,5	16,8
L5V35	8,5	8,0	1,5
L15V35	20,4	24,3	25,4
L15V25	8,9	11,0	27,4
L15V15	13,3	18,4	45,0

Fonte: Autor (2024)

A Figura 6.12 apresenta o comportamento dos corpos de prova de concreto, após a aplicação de nitrato de prata, em suas respectivas idades de ensaio.

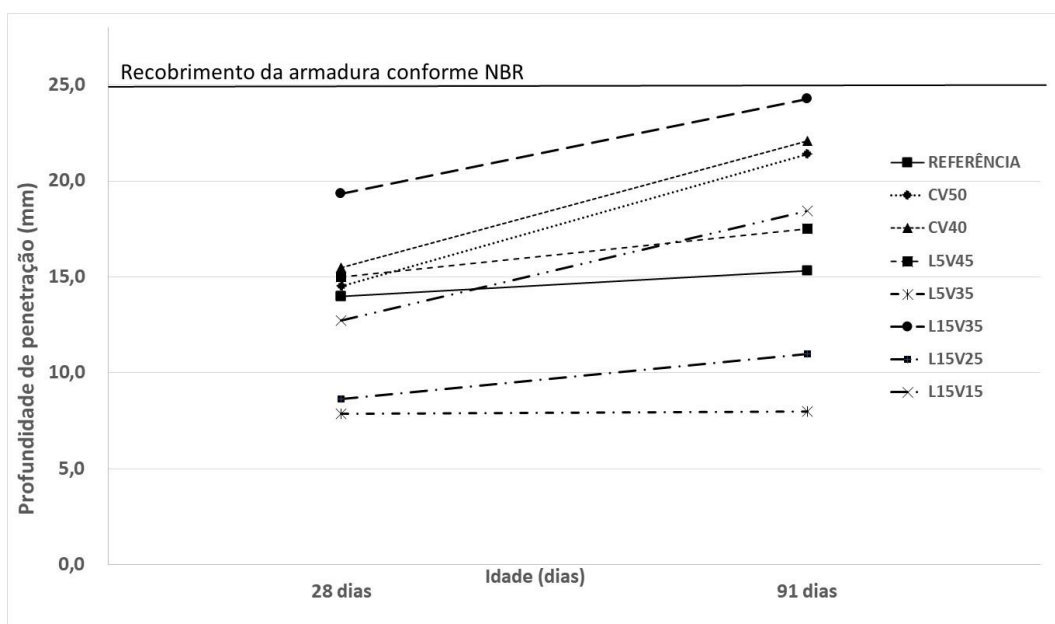
Figura 6.12 - Comportamento dos corpos de prova de concreto após a aplicação de nitrato de prata



Fonte: Autor (2024)

A Figura 6.13 apresenta a evolução dos resultados dos ensaios de penetração de cloretos.

Figura 6.13 - Resultados dos ensaios de penetração de cloretos



Fonte: Autor (2024)

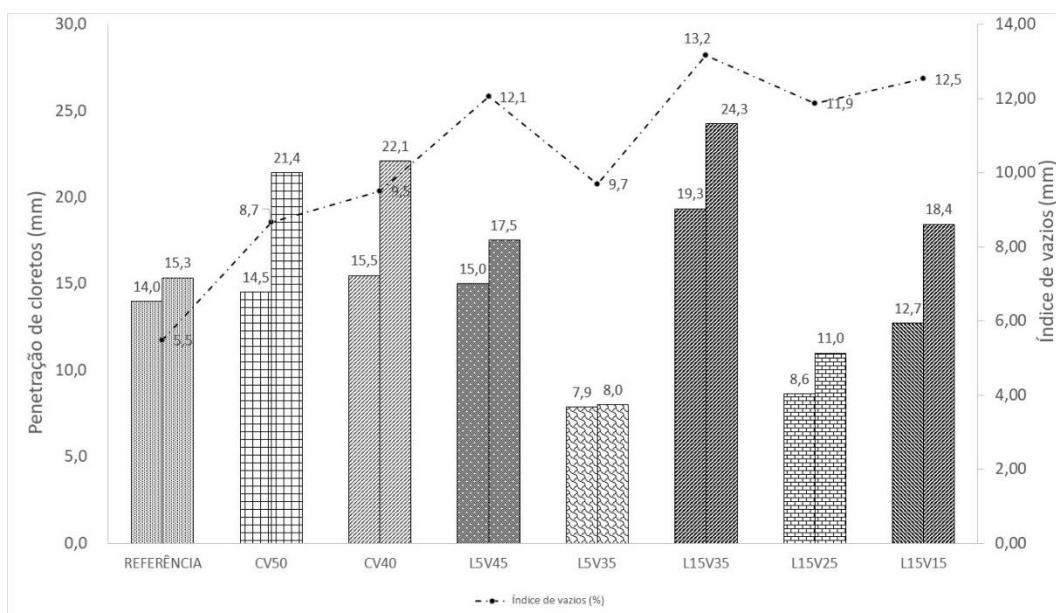
Os resultados mostram que os cimentos L5V35 e L15V25, com teor de 60% de clínquer apresentaram os menores valores de profundidade de penetração de cloretos, com valores de 8 mm e 11 mm, aos 91 dias, respectivamente, abaixo 52% e 72% em relação ao concreto de referência que penetrou 15,6 mm.

A profundidade de penetração de cloretos é maior na mistura com menor teor de cinza volante e maior teor de lama de cal, L15V35, que apresentou valor de penetração de cloretos igual a 24,3 mm, acima 58% do valor do concreto de referência. As misturas com maiores teores de cinza volante, CV50 e CV40 apresentaram valores de 21,4 mm, 22,1 mm acima 48% e 43% do valor do concreto de referência.

As misturas L15V15 e L5V45, apresentaram valores de 18,4 mm e 17,5 mm, correspondendo a 20% e 17% maiores que os valores do concreto de referência.

A Figura 6.14 apresenta a correlação entre os resultados dos ensaios de absorção de penetração de cloretos e índice de vazios.

Figura 6.14 - Correlação entre penetração de cloretos e índice de vazios das amostras



Fonte: Autor (2024)

O concreto de referência apresentou índice de vazios igual a 5,48%. Os concretos CV50, CV40 e L5V35 apresentaram índices de vazios iguais a 8,66%, 9,50% e 9,69%, respectivamente, portanto, inferiores a 10%. Os concretos L5V45, L15V35, L15V25 e L15V15 apresentaram índices de vazios iguais a 12,05%, 13,17%, 11,87 e 12,53%, respectivamente, todos superiores a 10%.

6.4 Conclusão

Os resultados apresentados no ensaio de carbonatação acelerada mostraram que a profundidade de carbonatação é crescente com o aumento dos teores de substituição do clínquer pelos resíduos de celulose pelo fato de que as cinzas volantes, por sua natureza pozolânica, tendem a consumir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e diminuindo a alcalinidade do concreto.

As misturas binárias com maior teor de cinza volante, CV50 e CV40, com teor de clínquer igual a 50% e 60%, respectivamente, apresentaram menor resistência a penetração de cloretos, enquanto que as misturas ternárias com 60% de clínquer e gipsita, L5V35 e L15V25, apresentaram maior resistência à penetração de cloretos. As demais ficaram em um nível intermediário.

A mistura ideal, com maior resistência à carbonatação e penetração de cloretos é a L5V35, constituída de 60% de clínquer e gipsita, 5% de lama de cal e 35% de cinza volante.

Os resultados apresentados foram altamente relevantes do ponto de vista da durabilidade do concreto, visto que as profundidades de carbonatação e penetração de cloretos, em todas as misturas, não atingiram o valor mínimo normativo de cobrimento de armadura, demonstrando que não atingirão o aço, em estruturas que utilizem o concreto com adição de cinza volante e lama de cal, nas proporções estudadas.

O estudo demonstrou que o uso de cinza volante e lama de cal é uma alternativa eficaz para garantir a durabilidade do concreto, ao mesmo tempo em que contribui para a redução da emissão de CO₂, considerando os resultados obtidos em relação ao concreto de referência, visto que a durabilidade impacta diretamente na vida útil e nos requisitos de manutenção das estruturas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. - Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2009.
- CAMPOS NETO, T. F.; CASCUDO, O.; OLIVEIRA, A. M. de. Estimativa de frentes de carbonatação baseada em análises estatísticas: aplicando modelo europeu em território brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 167-185, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300681>
- CASCUDO, O.; TEODORO, R.; OLIVEIRA, A. M.; CARASEK, H. Effect of Different Metakaolins on Chloride-Related Durability of Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 118 n. 3, p. 3-14, 2021. <https://doi.org/10.14359/51732634>
- CASCUDO, O.; LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. de. Métodos de transporte de cloretos em concreto – uma análise crítica e comparativa. **Concreto e construções**, n. 108, 2022. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.108.0002>
- EN 16757:2023 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product category rules for concrete and concrete elements.
- European Committee for Standardization. Products and systems for the protection and repair of concrete structures—test methods—determination of resistance to carbonation (EN 13295:2004), Brussels, Belgium.
- GEORGESCU, D.; VACAREANU, R.; ALDEA, A.; APOSTU, A.; ARION, C.; GIRBOVEANU, A. Assessment of the sustainability of concrete by ensuring performance during structure service life. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 617, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020617>
- GLUTH, G.J.G., ARBI, K., BERNAL, S.A.; BONDAR, D.; CASTEL, A.; CHITHIRAPUTHIRAN, S; DEHGHAN, A; DOMBROWSKI-DAUBE, K; DUBEY, A.; DUCMAN, V; PETERSON, K.; PIPILIKAKI, P.; VALCKE, S. L. A.; YE, G.; ZUO, Y.; PROVIS, J.L. RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes. **Materials and Structures**, v. 53, n. 21, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-020-1449-3>

GREVE-DIERFELD, S.; LOTHENBACH, B.; VOLLPRACHT, A.; WU, B.; HUET, B.; ANDRADE, C.; MEDINA, C.; THIEL, C.; GRUYAERT, E.; VANOUTRIVE, H.; SAÉZ DEL BOSQUE, I. F.; IGNJATOVIC, I.; ELSEIN, J.; PROVIS, J. L.; SCRIVENER, K.; THIENEL, K. C.; SIDERIS, K.; ZAJAC, M.; ALDERETE, N.; CIZER, Ö.; VAN DEN HEEDDE, P.; HOOTON, R. D.; KAMALI-BERNARD, S.; BERNAL, S. A.; ZHAO, Z.; SHI, Z.; DE BELIE, N. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and structures**, v. 53, n. 136, 2020. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>

GUIGNONE, G.C.; VIEIRA, G.L.; ZULCÃO, R.; MION, G.; BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Revista Matéria**, v.24, n.4, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0837>

HE, F.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; TONG, B. Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1095-1103, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.008>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1920-12: testing of concrete - Part 12: determination of the carbonation resistance of concrete: accelerated carbonation method. Switzerland: ISO, 2015.

KUMAR, V. V. P.; PRASAD, D. R. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. **Advances in concrete construction**, v. 7, n. 2, p. 75-85, 2019. <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.7.2.075>

LI, P.; WANG, X.; PENG, J.; LI, D. Chloride penetration and material characterisation of carbonated concrete under various simulated marine environment exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 429, p. 135885, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135885>

LIU, S.; ZHU, M.; DING, X.; REN, Z.; ZHAO, S.; ZHAO, M.; DANG, J. High-durability concrete with supplementary cementitious admixtures used in corrosive environments. **Crystals**, v. 11, n.2, p. 196, 2021. <https://doi.org/10.3390/cryst11020196>

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, A. P.; VIEIRA, J. D.; NEVES JUNIOR, A.; CASCUDO, O. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 64, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105616>

ORTOLAN, T. L. P.; BORGES, P. M.; SILVESTRO, L.; SILVA, S. R.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. J. O. Durability of concrete incorporating recycled coarse aggregates: carbonation and service life prediction under chloride-induced corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 404, p. 133267, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133267>

PONTES, C.V.; RÉUS, G.C.; ARAÚJO, E.C.; MEDEIROS, M.H.F. Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: how to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 10186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101860>

RIBEIRO, D. V.; AMORIM JÚNIOR, N. S.; SANTOS, B. S.; SANTANA, H. A.; PINTO, S. A. proposal for classification of concrete quality based on accelerated carbonation tests. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, p. e02466, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02466>.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S.; DIAS, C. M. R. Functionally graded concrete: porosity gradation to enhance durability under carbonation. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, p. e134936, 2024. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100719>

SANJUÁN, M.Á.; ESTÉVEZ, E.; C. Argiz. Carbon dioxide absorption by blast-furnace slag mortars in function of the curing intensity. **Energies**, v. 12, n. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12122346>

SLOMKA-SLUPIK, B., PODWÓRNY, J., STASZUK, M. Corrosion of cement pastes made of CEM I and CEM III/A caused by a saturated water solution of ammonium chloride after 4 and 25 days of aggressive immersion. **Construction and Building Materials**. v. 170, p. 279-289, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.073>

TAHWIA, A. M.; ELGENDY, G. M.; AMIN, M. Durability and microstructure of eco-efficient ultra-high-performance concrete. **Construction and building materials**, v. 303, p. 124491, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124491>.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Cement and concrete research**, v. 504, p. 469, 1982.

UTHAMAN, S.; VISHWAKARMA, V. Assessment of causes and consequences of concrete deterioration and its remediation. **Journal of building engineering**, v. 79, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107790>

XU, W.; LI, Y.; LI, H.; WANG, K.; ZHANG, C.; JIANG, Y.; QIANG, S. Corrosion mechanism and damage characteristic of steel fiber concrete under the effect of stray current and salt solution. **Construction and building materials**, v. 314, parte A, p. 125618, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125618>

7 CONCLUSÃO GERAL

Os estudos realizados para analisar as propriedades físicas e as características de durabilidade do concreto com cimento produzido a partir da mistura de clínquer e resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, combinados em misturas binárias e ternárias, apresentaram resultados significativos e promissores na busca de um concreto sustentável que contribua para a redução das emissões de CO₂ na atmosfera.

A cinza volante apresentou características pozolânicas enquanto a lama de cal mostrou ser um material carbonático, podendo ser utilizados como materiais cimentícios suplementares em substituição parcial do clínquer ou ainda como adições minerais, conforme os resultados alcançados nos ensaios de atividade pozolânica.

Os resultados dos ensaios químicos, mineralógicos e físico das misturas cimentícias em diferentes proporções, mostraram a predominância das fases calcita, quartzo, alita e belita, bem como potencial inócuo, comprovando a viabilidade na produção de argamassas, as quais apresentaram resistências mecânicas superiores à argamassa de referência aos 28 e 91 dias.

Quando utilizados na produção de concretos, as misturas cimentícias apresentaram resultados relevantes de resistências à compressão e resistências à tração na flexão, comprovando que o uso resíduo de celulose tem o potencial de substituir até 50% do teor de cimento no concreto.

No tocante ao estudo de durabilidade do concreto, os resíduos de celulose propiciaram bom desempenho, uma vez que as profundidades de carbonatação e penetração de cloretos, em todas as misturas, ficaram abaixo do cobrimento de armadura mínimo definido pelas normas técnicas, o que indica perspectivas de uma maior vida útil das estruturas que utilizem esse concreto.

Por fim, há de se ressaltar o ganho ambiental proporcionado pelo concreto com resíduos de celulose, visto que surge como uma forte alternativa para a redução da emissão de gases de efeito estufa na indústria cimenteira, com economia de energia, além de promover mais uma opção de uso desses resíduos, através do coprocessamento, onde o que seria descartado pode ser utilizado na fabricação de cimento.

8 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar concretos com outras dosagens, considerando os teores de materiais e relação a/c específico para essa dosagem;
- Avaliar misturas cimentícias utilizando a #325 e utilizar brita 0 como agregado graúdo, e verificar a porosidade;
- Avaliar outras propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e tenacidade dos concretos;
- Avaliar profundidades de carbonatação e penetração de cloretos utilizando outras metodologias e comparar com os resultados desse trabalho;
- Quantificar as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida dos concretos, objetivando constatar os teores de redução das emissões de gases de efeito estufa em relação à produção de concretos tradicionais;

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C618**. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Philadelphia, 2022.
- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production 1928–2018. **Earth System Science Data**, v 11, p. 1675–1710, 20 nov. 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. - Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Technological and environmental comparative of the processing of primary sludge waste from paper industry for mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119336>

BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 252-260, abr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>

CAMPOS NETO, T. F.; CASCUDO, O.; OLIVEIRA, A. M. de. Estimativa de frentes de carbonatação baseada em análises estatísticas: aplicando modelo europeu em território brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 167-185, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300681>

CASCUDO, O.; LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. de. Métodos de transporte de cloretos em concreto – uma análise crítica e comparativa. **Concreto e construções**, n. 108, 2022. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2022.108.0002>

COFFETTI, D.; CROTTI, E.; GAZZANIGA, G.; CARRARA, M.; PASTORE, T.; COPPOLA, L. Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, p. 106718, abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>

ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.; KAMAL, A. Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115728, out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115728>

ELLIS, L. D.; BADEL, A. F.; CHIANG, M. L.; PARK, R. J. Y.; CHIANG, Y.M. Toward electrochemical synthesis of cement - An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO_3 while producing useful gas streams. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 23, p. 12584 - 12591, set. 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>

EN 16757:2023 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product category rules for concrete and concrete elements.

European Committee for Standardization. Products and systems for the protection and repair of concrete structures—test methods—determination of resistance to carbonation (EN 13295:2004), Brussels, Belgium.

FAVIER, A.; WOLF, C.; SCRIVENER, K.; HABERT, G. A Sustainable future for the european cement and concrete industry: technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050; **ETH**, Zurich, Switzerland, 2018.

GARTNER, E.; SUI, T. Alternative cement clinkers. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 27-39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.

GEORGESCU, D.; VACAREANU, R.; ALDEA, A.; APOSTU, A.; ARION, C.; GIRBOVEANU, A. Assessment of the sustainability of concrete by ensuring performance during structure service life. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 617, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020617>

GLUTH, G.J.G., ARBI, K., BERNAL, S.A.; BONDAR, D.; CASTEL, A.; CHITHIRAPUTHIRAN, S.; DEGHAN, A.; DOMBROWSKI-DAUBE, K.; DUBEY, A.; DUCMAN, V.; PETERSON, K.; PIPILIKAKI, P.; VALCKE, S. L. A.; YE, G.; ZUO, Y.; PROVIS, J.L. RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes. **Materials and Structures**, v. 53, n. 21, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-020-1449-3>

GREVE-DIERFELD, S.; LOTHENBACH, B.; VOLLPRACHT, A.; WU, B.; HUET, B.; ANDRADE, C.; MEDINA, C.; THIEL, C.; GRUYAERT, E.; VANOUTRIVE, H.; SAÉZ DEL BOSQUE, I. F.; IGNJATOVIC, I.; ELSSEN, J.; PROVIS, J. L.; SCRIVENER, K.; THIENEL, K. C.; SIDERIS, K.; ZAJAC, M.; ALDERETE, N.; CIZER, Ö.; VAN DEN HEEDDE, P.; HOOTON, R. D.; KAMALI-BERNARD, S.; BERNAL, S. A.; ZHAO, Z.; SHI, Z.; DE BELIE, N. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and structures**, v. 53, n. 136, 2020. <https://doi.org/10.1617/s11527-020- 01558-w>

GUIGNONE, G.C.; VIEIRA, G.L.; ZULCÃO, R., MION, G.; BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing

metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Revista Matéria**, v.24, n.4, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0837>

HANEIN, T.; GALVEZ-MARTOS, J. L.; BANNERMAN, M. N. Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2278 - 2287, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.183>

HE, F.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; TONG, B. Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1095-1103, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.008>

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. 231 p. Tese (Livre Docência em Engenharia) - Escola Politécnica da USP.

HELENE, P., TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto, São Paulo, Pini, 1993.

HOU, G.; CHEN, J.; LU, B.; CHEN, S.; CUI, E.; NAGUIB, H. M.; GUO, M.-Z.; ZHANG, Q. Composition design and pilot study of an advanced energy-saving and low-carbon rankinite clinker. **Cement and Concrete Research**, v. 127 p. 105926, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105926>

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores – Relatório Anual 2024. Disponível em <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>. Acesso em 17/12/2024.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório Anual 2022. Disponível em <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 10/02/2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1920-12: testing of concrete - Part 12: determination of the carbonation resistance of concrete: accelerated carbonation method. Switzerland: ISO, 2015.

JUHART, J.; AUTISCHER, M.; SAKOPARNIG, M.; KRÜGER, M. The realization of clinker-reduced, performance-based sustainable concrete by the micro-filler, eco-filler concept, **Materials**, v. 14, n. 17, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14174958>

KUMAR, V. V. P.; PRASAD, D. R. Influence of supplementary cementitious materials on strength and durability characteristics of concrete. **Advances in concrete construction**, v. 7, n. 2, p. 75-85, 2019. <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.7.2.075>

KUMAR, V.V.P.; PRASAD, D.R. Study on strength and durability characteristics of lime sludge based blended cement concrete. **Journal of building pathology and rehabilitation**, v. 4, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0041-5>

LI, P.; WANG, X.; PENG, J.; LI, D. Chloride penetration and material characterisation of carbonated concrete under various simulated marine environment exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 429, p. 135885, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135885>

LI, Z.; YUAN, H.; GAO, F.; ZHANG, H.; GE, Z.; WANG, K.; SUN, R.; GUAN, Y.; LING, Y.; JIANG, N. A. Feasibility study of low cement content foamed concrete using high volume

of waste lime mud and fly ash for road embankment. **Materials**, v. 15, p. 86, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma15010086>

LIU, S.; ZHU, M.; DING, X.; REN, Z.; ZHAO, S.; ZHAO, M.; DANG, J. High-durability concrete with supplementary cementitious admixtures used in corrosive environments. **Crystals**, v. 11, n.2, p. 196, 2021. <https://doi.org/10.3390/cryst11020196>

LIU, X.; FAN, Y.; WANG, C. An estimation of the effect of carbon pricing for CO₂ mitigation in China's cement industry, *Applied energy*, v. 185, part 1, p. 671-686, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.115>

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186p. 933-942, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>

MADRID, M.; ORBE, A.; ROJI, E.; CUADRADO, J. The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units. **Construction and building materials**, v. 153, p. 117-128, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.086>

MALAISKIENE, J.; KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V. The influence of primary paper sludge on concrete properties. **Ceramics - Silikaty**, v. 3, p. 321-329, 2019. <https://doi.org/10.13168/cs.2019.0027>

MANDEEP, G.; GUPTA, K.; SHUKLA, P. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122496, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496>

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3^a ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MILLER, S.A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? **Journal of Cleaner Production**. v. 178, p. 587–598, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.008>.

MONTEIRO, P.; MILLER, S.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Mater**, v. 16, p. 698–699, 2017. <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1038/nmat4930>

MOUKANNAA, S.; ALZEER, M.; RAMTEKE, D. D.; OHENOJA, K.; ROPPO, J.; KINNUNEN, Paivo.; ILLIKAINEN, M. Investigation of different paper mill ashes as potential supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132583, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132583>

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. - Porto Alegre: Bookman, 2016.

NILIMAA, J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. **Developments in the Built Environment**, v. 15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>

ORTOLAN, T. L. P.; BORGES, P. M.; SILVESTRO, L.; SILVA, S. R.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. J. O. Durability of concrete incorporating recycled coarse aggregates: carbonation and service life prediction under chloride-induced corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 404, p. 133267, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133267>

PONTES, C.V.; RÉUS, G.C.; ARAÚJO, E.C.; MEDEIROS, M.H.F. Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: how to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 10186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101860>

QIN, J.; CUI, C.; CUI, X.; HUSSAIN, A.; YANG, C.; YANG, S. Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature. **Ceramics International**, v. 41, n. 4 p. 5648-5655, mai. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.149>

QUINA, M. J.; PINHEIRO, C. T. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: the transition from landfill to industrial applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2317, mar. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072317>

RIBEIRO, D. V.; AMORIM JÚNIOR, N. S.; SANTOS, B. S.; SANTANA, H. A.; PINTO, S. A. proposal for classification of concrete quality based on accelerated carbonation tests. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, p. e02466, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02466>.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S.; DIAS, C. M. R. Functionally graded concrete: porosity gradation to enhance durability under carbonation. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, p. e134936, 2024. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100719>

SAHU, V.; SRIVASTAVA A.; MISRA, A. K.; SHARMA, A. K. Stabilization of fly ash and lime sludge composites: Assessment of its performance as base course material. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 17, p. 475–485, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.010>

SANJUÁN, M.Á.; ESTÉVEZ, E.; C. Argiz. Carbon dioxide absorption by blast-furnace slag mortars in function of the curing intensity. **Energies**, v. 12, n. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12122346>

SENEFF, L.; CASTELA, A.; HAJJAJI, W.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Formulations of sulfoelite cement through design of experiments. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3410 - 3416, ago. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.032>

SILVA, K. R. M. da; FERNANDEZ, O. J. C.; CUNHA, R. R. da; PICANÇO, M. de S. O potencial da utilização de resíduos de celulose, lama de cal e cinza volante, da Amazônia, Brasil, como materiais cimentícios. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, v. 13, n. 5, p. e3911, 2024. DOI: 10.55905/rcssv13n5-007. <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/rccs/article/view/3911>.

SIMÃO, L.; JIUSTI, J.; LÓH, N.J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J.A.; MONTEDO, O.R.K. Waste-containing clinkers: valorization of alternative mineral sources from pulp and paper mills. **Process safety and environmental protection**, v. 109, p. 106-116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.038>

SIMÃO, L.; LÓH, N. J.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Thermal characterization of hydrated eco-friendly clinkers produced from pulp and paper mill waste. **Cerâmica**, v. 64, n. 371. p. 311-317, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712339>

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório Anual, 2022. Disponível em: https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em 20/03/2024.

SINGH, G. V. P. B.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of cleaner production**, v. 239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118024>

SKIBSTED, J., SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>.

SLOMKA-SLUPIK, B., PODWÓRNY, J., STASZUK, M. Corrosion of cement pastes made of CEM I and CEM III/A caused by a saturated water solution of ammonium chloride after 4 and 25 days of aggressive immersion. **Construction and Building Materials**. v. 170, p. 279-289, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.073>

TAHWIA, A. M.; ELGENDY, G. M.; AMIN, M. Durability and microstructure of eco-efficient ultra-high-performance concrete. **Construction and building materials**, v. 303, p. 124491, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124491>.

TORRES, C. M. M. E.; SILVA, C. M.; PEDROTI, L.G.; FERNANDES, W. E. H.; BALLOTIN, F. C.; ZANUNCIO, A. J. V. Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 3, p. 851-861, jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00983-x>

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Cement and concrete research**, v. 504, p. 469, 1982.

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p., 2013. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>

UTHAMAN, S.; VISHWAKARMA, V. Assessment of causes and consequences of concrete deterioration and its remediation. **Journal of building engineering**, v. 79, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107790>

VASHISTHA, P.; SINGH, S. K., DUTT, D.; KUMAR, V. Sustainable utilization of paper mill solid wastes via synthesis of nano silica for production of belite based clinker. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 557-565, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.207>

WU, M.; HUANG, W. Evaluation of Fly Ash from Co-Combustion of Paper Mill Wastes and Coal as Supplementary Cementitious Materials. **Materials**, v. 15, n. 24, p. 8931, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248931>

XU, W.; LI, Y.; LI, H.; WANG, K.; ZHANG, C.; JIANG, Y.; QIANG, S. Corrosion mechanism and damage characteristic of steel fiber concrete under the effect of stray current and salt solution. **Construction and building materials**, v. 314, parte A, p. 125618, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125618>