



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Mariana Pires

ESTÉRIL DE FOSFATADO NA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

Belo Horizonte

2022

Mariana Pires

ESTÉRIL DE FOSFATADO NA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra.

Coorientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Belo Horizonte

2022

Pires, Mariana.
P667e Estéril de fosfatado na produção de ladrilho hidráulico / Mariana Pires. – 2022.

75 f. : il.

Orientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra

Coorientador: Domingos Sávio de Resende

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.

Bibliografia.

1. Ladrilhos. 2. Fosfatos - Minas e mineração. 3. Pozolanas. 4. Mineração - Reaproveitamento. I. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. II. Resende, Domingos Sávio de. III. Título.

CDD: 363.728



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 31 / 2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.046583/2022-18

Belo Horizonte-MG, 12 de setembro de 2022.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

?Estéril de fosfato na produção de ladrilho hidráulico?

Autor: Mariana Pires

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 13 de setembro de 2022 esta Dissertação:

Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Flavio Renato de Goes Padula (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Domingos Savio de Resende (EXAMINADOR EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais ? CEFET-MG

Prof.^a Dr.^a Sofia Araújo Lima Bessa (EXAMINADORA EXTERNA)
Universidade Federal de Minas Gerais ? UFMG

(Assinado digitalmente em 13/09/2022 11:34)
AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: 2506476

(Assinado digitalmente em 13/09/2022 11:34)
DOMINGOS SAVIO DE RESENDE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTETAX (11.50.18)
Matrícula: 4194738

(Assinado digitalmente em 13/09/2022 11:35)
FLAVIO RENATO DE GOES PADULA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEC (11.56.07)
Matrícula: 1353659

(Assinado digitalmente em 13/09/2022 11:34)
SOFIA ARAÚJO LIMA BESSA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 863.904.063-04

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à Deus por todas as bênçãos e oportunidades que são colocadas no meu caminho;

À minha família pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos;

Ao meu orientador Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra pela oportunidade de realizar este trabalho, pela disponibilidade e por todo conhecimento compartilhado;

Ao meu coorientador Prof. Dr. Domingos Sávio pela confiança e disponibilidade;

À Rayanne pela amizade, por todo apoio, pela convivência e compartilhamento de experiências;

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais, em especial ao Richard pela disposição e auxílio nos ensaios;

Ao Departamento de Minas e Construção Civil pelo incentivo e compreensão;

Ao CEFET-MG e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Uma das principais preocupações da indústria da mineração é a grande quantidade de resíduos gerados na extração e no processamento mineral. Além de causar impactos ao meio ambiente estes passivos ambientais ocupam extensas áreas e podem levar a problemas na sua disposição. O aproveitamento de tais resíduos na construção civil tem se mostrado promissor por meio de diversas pesquisas. Este trabalho propõe a incorporação de estéril proveniente de uma mina de fosfato na produção de ladrilhos hidráulicos em substituição parcial ao cimento Portland. O estéril foi caracterizado por meio de ensaios de análise granulométrica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG) e avaliação de atividade pozzolânica. Os ladrilhos hidráulicos foram desenvolvidos com substituição do cimento pelo estéril no teor de 25%. As peças foram produzidas com o estéril sem tratamento térmico e tratados nas temperaturas de 400°C e 600°C. Os ladrilhos foram avaliados em função de alguns parâmetros como análise visual e dimensional, absorção de água, ataque ácido e resistência mecânica. Como resultado do trabalho foi possível obter ladrilhos hidráulicos pigmentados pela utilização do estéril com consumo de cimento Portland reduzido, resistência mecânica satisfatória e esteticamente adequados.

Palavras-chave: ladrilho hidráulico; estéril de mineração; materiais pozzolânicos, pigmentação.

ABSTRACT

One of the main concerns of the mining industry is the large amount of waste generated in mineral extraction and processing. In addition to causing impacts on the environment, these environmental liabilities occupy large areas and can cause problems in their disposal. The use of such residues in civil construction has been promising through several researches. This dissertation seeks to incorporate sterile from phosphate mine in the production of hydraulic tiles in partial replacement to Portland cement. The waste was characterized by means of granulometric analysis tests, scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TG) and evaluation of pozzolanic activity. The hydraulic tiles was produced by replacing cement with waste in the content of 25%. The pieces were produced with the waste without calcining and calcined at temperatures of 400°C and 600°C. The tiles were evaluated according to some parameters such as visual and dimensional analysis, water absorption, color uniformity and mechanical resistance. As a result of the work, it was possible to obtain pigmented hydraulic tiles by using the waste with reduced Portland cement consumption, satisfactory mechanical strength and aesthetically appropriate.

Keywords: hydraulic tile; sterile; pozzolanic materials, pigmentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista frontal de uma frente de lavra da mina.....	36
Figura 2 - Amostra de estéril de fosfatado após o processo de moagem.	38
Figura 3 – Distribuição granulométrica do estéril.	42
Figura 4 – Difratoograma do estéril.	43
Figura 5 – Micrografias eletrônicas de varredura do estéril.....	44
Figura 6 – Análise termogravimétrica do estéril.	45
Figura 7 – Análise termogravimétrica das pastas.....	47
Figura 8 – Resultado do Índice de atividade pozolânica.	48
Figura 9 – Curva granulométrica do estéril e cimento.	57
Figura 10 – Curva granulométrica da areia e pó de pedra.	57
Figura 11 – EST-0 (a), EST-400 (b) e EST-600 (c).	59
Figura 12 – Conjunto de forma para ladrilho hidráulico.....	60
Figura 13 – Processo de produção do ladrilho hidráulico.....	62
Figura 14 – Ensaio de absorção de água.....	65
Figura 15 – Ladrilho hidráulico solicitado à flexão.....	66
Figura 16 – Ladrilhos produzidos.	68
Figura 17 – Absorção de água e índice de vazios.....	69
Figura 18 – Perda de massa após ataque ácido.....	70
Figura 19 – Ensaio de resistência a flexão dos ladrilhos.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicação de resíduos de mineração como agregado em compósitos cimentícios.	25
Tabela 2 – Classificação de pozolanicidade.....	39
Tabela 3 – Quantidades dos materiais utilizados.....	40
Tabela 4 – Composição química do estéril.....	43
Tabela 5 – Resultado do ensaio de condutividade elétrica.....	46
Tabela 6 – Análise de variância e teste de Tukey.....	49
Tabela 7 – Massa específica dos materiais utilizados.....	58
Tabela 8 – Formulações para produção dos ladrilhos.....	59
Tabela 9 – Traços para produção de ladrilho hidráulico.....	61
Tabela 10 – Requisitos, dimensões e tolerância das peças.....	64
Tabela 11 – Avaliação dimensional dos ladrilhos.....	67
Tabela 12 – Análise de variância.....	69
Tabela 13 – Análise de variância e teste de Tukey.....	71
Tabela 14 – Análise de variância e teste de Tukey.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C – graus Celsius

µm – Micrômetro

pr – Massa específica real

A – Absorção de água

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CMT – Complexo de Mineração de Tapira-MG

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CP – Corpo de prova

DRX – Difração de raios X

FRX – Espectrometria de Fluorescência de raios X em energia dispersiva

kg – Quilogramas

g – Gramas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

Iv – Índice de vazios

M – Massa molecular

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

ml – mililitros

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TGA – Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	Estrutura do Trabalho.....	13
1.3	Referências.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Impactos ambientais gerados pela construção civil.....	15
2.2	Aproveitamento de resíduos de mineração.....	17
2.3	Resíduos de mineração como material cimentício suplementar.....	19
2.4	Resíduos de mineração como agregados.....	22
2.5	Artefatos cimentícios.....	26
2.6	Considerações Finais.....	29
2.7	Referências.....	29
3.	ESTÉRIL DE FOSFATADO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR.....	34
3.1	Introdução.....	34
3.2	Materiais e Métodos.....	35
3.2.1	Materiais.....	35
3.2.1.1	Estéril.....	36
3.2.2	Caracterização da amostra de estéril.....	37
3.2.3	Caracterização do estéril como pozolana.....	39
a)	Método de Lúxan.....	39
b)	Análise termogravimétrica.....	39
c)	Índice de Desempenho com cimento Portland.....	40
3.3	Resultados.....	41
3.3.1	Caracterização da amostra de estéril.....	41
3.3.2	Caracterização do estéril como pozolana.....	45
a)	Método de Luxan.....	45
b)	Análise termogravimétrica das pastas.....	46
c)	Índice de desempenho com cimento Portland.....	47
3.4	Conclusão.....	50
3.5	Referências.....	50

4.	SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR ESTÉRIL DE FOSFATADO NA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO	54
4.1	Introdução.....	54
4.2	Materiais e Métodos.....	56
4.2.1	Materiais	56
4.2.2	Produção do ladrilho hidráulico.....	58
4.2.3	Caracterização do ladrilho hidráulico com adição de estéril	63
a)	Análise visual e dimensional.....	63
b)	Absorção de água e índice de vazios	64
c)	Ensaio de ataque ácido	65
d)	Ensaio de resistência à flexão	66
4.3	Resultados.....	67
a)	Análise visual e dimensional.....	67
b)	Absorção de água e Índice de vazios	68
c)	Ensaio de ataque ácido	70
d)	Ensaio de resistência à flexão	71
4.4	Conclusão.....	72
4.5	Referências.....	73

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento acelerado da urbanização e da construção civil nos últimos anos tem gerado um grande impacto ambiental devido ao alto consumo de matérias-primas e energia, com isso torna-se necessária algumas ações e estratégias para que a construção se desenvolva de forma mais sustentável a fim de evitar o esgotamento de recursos naturais. Uma alternativa para esse desenvolvimento por parte da indústria da construção civil é através da seleção de materiais de construção sustentáveis (AKADIRI; OLOMOLAIYE; CHINYIO, 2013; DU PLESSIS, 2007; GOVINDAN; SHANKAR, KANNAN, 2016).

O emprego de resíduos e subprodutos industriais como matéria-prima na construção civil com substituição dos materiais tradicionais por materiais alternativos é de grande importância para o desenvolvimento sustentável do setor, a fim de reduzir o consumo de recursos naturais sem perder a qualidade no ambiente construído. O uso de resíduos, como material, matéria prima ou adição cimentícia, pode ser aplicado na fabricação de cimentos compostos, concreto, tijolo, agregados, entre outros. Resíduos de várias atividades podem ser utilizados na construção civil, como resíduos de natureza orgânica, resíduos industriais como escórias, resíduos de combustão do carvão, resíduos de construção e resíduos de mineração (CARVAJAL-ARANGO, 2019; PAPPU; SAXENA; ASOLEKAR, 2007).

A indústria minerária gera grande quantidade de resíduos, os quais são depositados e acumulados ao longo de muitos anos e muitas vezes falta espaço para o armazenamento adequado, causando impactos ao meio ambiente. Esses passivos ambientais podem ser recuperados como materiais alternativos na produção de materiais de construção, devido às suas propriedades físicas, químicas e microestruturais (ALMEIDA et al, 2020; YELLISHETTY et al., 2008).

As pesquisas relacionadas a incorporação de resíduos de mineração na construção civil abrangem diferentes tipos de materiais e composições. Entre as diversas aplicações, pode-se destacar: a produção de tijolos, pisos cerâmicos, utilização como agregado em compósitos cimentícios, material cimentício

suplementar, pigmento, artefatos cimentícios, entre outros (ALMEIDA et al., 2020; LAMANI et al., 2016; YELLISHETTY et al., 2008).

A construção civil tem grande potencial para absorver cada vez mais os descartes da mineração para utilização em materiais alternativos, apresentando inúmeros benefícios como redução dos custos, menor consumo de matérias primas, redução de energia, entre outros (GOMES 2017; LI et al., 2016; MÁRMOL et al., 2010). A utilização desses resíduos minerais na construção civil é de suma importância para redução dos impactos ambientais tanto na indústria minerária como na construção civil. O modelo de economia circular na mineração tem grande potencial para resolver os problemas relacionados aos impactos ambientais e redução do desperdício, portanto é essencial intensificar e ampliar cada vez mais os estudos nessa área (ALMEIDA et al, 2020; KINNUNEN, KAKSONEN, 2019).

O ladrilho hidráulico consiste em uma placa cimentícia paralelepípedica executada por prensagem (ABNT NBR 9457, 2013), possui um processo de produção empírico e mão de obra essencialmente artesanal. Embora diversas pesquisas relacionadas a incorporação de resíduos em artefatos cimentícios estejam sendo realizadas, os estudos relacionados a produção de ladrilhos hidráulicos ainda são muito limitados, isso possivelmente se deve ao método de produção artesanal e a ausência de metodologia padrão para dosagem dos constituintes das peças. Nesse sentido, o presente trabalho tem como finalidade avaliar o estéril proveniente de uma mina de fosfato, como material cimentício suplementar e incorporá-lo na produção de ladrilhos hidráulicos. Para isso, foram avaliados os parâmetros físicos, mecânicos, visuais e de durabilidade. A aplicação desse resíduo traz a possibilidade de para agregar valor ao estéril, redução de custos na produção e minimização dos impactos ambientais, além de ampliar o conhecimento acerca da metodologia de produção dos ladrilhos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de ladrilhos hidráulicos com a incorporação de estéril de fosfatado.

1.1.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- a) Avaliar o potencial do estéril de fosfatado como material cimentício suplementar.
- b) Avaliar parâmetros físicos, mecânicos de ladrilhos hidráulicos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por estéril de fosfatado.
- c) Avaliar a estética, pigmentação e durabilidade de ladrilhos hidráulicos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por estéril de fosfatado.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura abrangendo os conteúdos de maior relevância à pesquisa, como consumo de cimento, artefatos cimentícios, impactos ambientais e reaproveitamento de resíduos de mineração. Os capítulos 3 e 4 foram elaborados no formato de artigos individuais, os quais estão subdivididos em Introdução, Materiais e Métodos, Resultados, Conclusões e Referências Bibliográficas.

1.3 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR9457**: Ladrilhos Hidráulicos para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

AKADIRI, P. O.; OLOMOLAIYE, P. O.; CHINYIO, E. A. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. **Automation in Construction**, v. 30, p. 113–125, 2013.

ALMEIDA, J. et al. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. January, p. 101215, 2020.

CARVAJAL-ARANGO, D. et al. Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1322–1337, 2019.

DU PLESSIS, C. A strategic framework for sustainable construction in developing countries. **Construction Management and Economics**, v. 25, n. 1, p. 67–76, 2007.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2017. 98f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

GOVINDAN, K.; MADAN SHANKAR, K.; KANNAN, D. Sustainable material selection for construction industry - A hybrid multi criteria decision making approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 1274–1288, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Gestão e manejo de Rejeitos de Mineração. 2016. Disponível em: www.ibram.org.br. Acessado em: 06/09/2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília: Ipea, 2012.

KINNUNEN, P. H.-M; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 153–160. 2019.

LAMANI S. R.; ARUNA M.; VARDHAN H. Utilisation of mine waste in the construction industry - A Critical Review. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v.09, n. 1, p. 182-195, 2016.

LEVISKI, A. **Utilização de agregados de RCC e resíduo de polimento de placas cimentícias em artefatos de concreto**. 2016. 126f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.

LI, H. et al. Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1017–1026, 2016.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.

MÁRMOL, I. et al. Cement & Concrete Composites Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. v. 32, p. 617–622, 2010.

PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S. R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and Environment**, v. 42, n. 6, p. 2311–2320, 2007.

YELLISHETTY, M. et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions : A case study. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 52, p. 1283–1289, 2008.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Impactos ambientais gerados pela construção civil

A construção civil, que engloba atividades como edifícios residenciais e não residenciais, fábricas, rodovias, pontes, barragens e túneis, é responsável por impactos ambientais expressivos (ARIOĞLU AKAN; DHAVALE; SARKIS, 2017). Em nível global, o setor responde por metade do consumo de matérias-primas e resíduos industriais (MERLI et al., 2020), 40% do consumo de energia (MARINKOVIĆ et al., 2017) e entre 40% e 50% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (PETEK GURSEL et al., 2014). Além disso, ocasiona outros impactos como degradação do ecossistema, contaminação do solo, água e ar (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, apresentando alta resistência mecânica, baixo custo e durabilidade adequada para construção civil e estradas (PENG; YANG; OUYANG, 2015). Considerando as grandes quantidades de cimento e concreto consumidos, é inerente que a indústria civil e atividades associadas acarretem impactos ambientais (HABERT et al., 2020).

O processo de produção de cimento é a terceira maior fonte antrópica emissora de dióxido de carbono, atrás somente das usinas de energia e produção de ferro e aço (BENHELAL; SHAMSAEI; RASHID, 2021). A emissão de CO₂ pela indústria ocorre principalmente em quatro momentos diferentes. A maior parte das emissões, entre 50% e 60%, deve-se à decomposição do calcário (CaCO₃) para a produção de CaO como principal constituinte do cimento. Cerca de 30% a 40% do CO₂ total é gerado na combustão de combustíveis fósseis na unidade de processamento (pré-aquecedor, calcinador e forno) e o restante é decorrente do consumo de eletricidade nos moinhos e resfriadores de ar (BENHELAL; ZAHEDI; HASHIM, 2012).

Além disso, ineficiências técnicas e de gestão no processo de produção de cimento podem contribuir para emissões extras de CO₂. Tais ineficiências causam problemas como redução no desempenho da planta, consumo extra de combustível e eletricidade, desperdício térmico e, conseqüentemente, emissões

de CO₂. As principais causas de emissões extras de CO₂ na indústria de cimento incluem: (1) aplicação de processo ineficiente, como processo úmido ou semi-úmido; (2) perda de calor térmico através dos fluxos de exaustão e da superfície das instalações; (3) utilização de matérias-primas impróprias e combustíveis fósseis intensivos em carbono; (4) produção de cimento com alta proporção de clínquer; e (5) empregar maquinaria ineficiente e obsoleta (BENHELAL; SHAMSAEI; RASHID, 2021).

A produção mundial de cimento Portland atualmente alcança cerca de 3 a 5Gt por ano e com previsão de contínuo crescimento (JIANG et al., 2020). Essa produção aumentou no mundo cerca de 34 vezes nos últimos 65 anos, enquanto a população aumentou menos de três vezes, essa taxa de crescimento elevada está relacionada diretamente com a melhoria do padrão de vida da população. Em 2015 a produção de cimento no mundo chegou a 4,6 bilhões de toneladas, que corresponde a 626kg/per capita (SCRIVENER, 2016). No Brasil, conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2019), o consumo de cimento Portland no Brasil em 2019 foi de aproximadamente 36 milhões de toneladas, a região Sudeste foi responsável pelo consumo de 44%.

O cimento Portland é a base de artefatos e materiais como argamassas e concretos, que são utilizados em grande quantidade por possuírem baixo custo e ampla disponibilidade para construção civil e estradas (RODRIGUES; JOEKES, 2010). Estima-se que mais de 10 bilhões de metros cúbicos de concreto sejam produzidos por ano em todo o mundo (LEDESMA; CORINALDESI; JIMÉNEZ, 2016).

Neste contexto, é evidente a relevância da sustentabilidade no setor da construção civil. Esta iniciativa pode ajudar a atender às necessidades das gerações atuais e futuras, conservando energia, água e recursos naturais através de práticas de reutilização, reciclagem, design inovador e minimização de resíduos e poluição (LIMA et al., 2021). Para isso, devem ser tomadas medidas proativas para reverter ou minimizar os impactos negativos que as atividades de construção causam ao meio ambiente (AIGBAVBOA; OHIOMAH; ZWANE, 2017). Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos industriais na construção civil

reduz os problemas ambientais além de economizar recursos naturais e energia (ARGANE et al., 2016).

A redução das emissões de CO₂ é um dos pontos necessários para se ter uma indústria de construção sustentável. A substituição parcial do clínquer por materiais alternativos na fabricação de cimento Portland é uma opção para diminuir as emissões de CO₂ (COSTA; RIBEIRO, 2020; GARTNER; HIRAO, 2015; MILLER et al., 2018). Diferentes resíduos industriais são objetos de pesquisas para substituições das matérias-primas tradicionais na produção do clínquer (BARBOZA-CHAVEZ; GÓMEZ-ZAMORANO; ACEVEDO-DÁVILA, 2020; CARVALHO et al., 2018; GOLEWSKI, 2020; LI et al., 2018; MIRKOVIĆ et al., 2021; SINGLA; KUMAR; ALEX, 2020; SHAH et al., 2020; SHI et al., 2019; ZHAO et al., 2022;).

2.2 Aproveitamento de resíduos de mineração

A indústria da mineração vem crescendo ao longo dos últimos anos. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2020), a Produção Mineral Brasileira (PMB) atingiu em 2019 US\$ 38 bilhões, com aumento de 11% do que foi apurado no ano anterior, para o cálculo do PMB é levado em consideração a média do volume de produção dos bens minerais, os preços no mercado nacional e internacional e o comércio exterior mineral.

A mineração no Brasil possui uma função relevante no desenvolvimento econômico e social, porém a atividade mineradora gera grandes impactos ambientais, além de representar um potencial impacto ecológico ao solo e às águas devido à grande quantidade de resíduos (GOMES, 2017; WEISHI et al., 2018). De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração - ANM (2018) no Brasil, a região Sudeste é a principal empregadora da indústria mineral (49,6%). Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais possui alta concentração de atividades econômicas da indústria mineral e ocupa a posição de maior estoque de mão de obra no setor de extração mineral do Brasil, com 31,5% da distribuição nacional. Além disso a produção no estado corresponde a aproximadamente 70% da produção nacional (SANT'ANA FILHO, 2013; SILVA, 2016).

Conforme preconizado na Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo é todo material descartado

resultante de atividades humanas cuja destinação ambientalmente adequada pode ser a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético ou a estocagem final. Os resíduos de mineração consistem em materiais naturais sem nenhuma modificação ou materiais naturais processados durante as fases de beneficiamento de minério e possivelmente contendo aditivos químicos, orgânicos e inorgânicos (YELLISHETTY et al., 2008).

Os resíduos produzidos pelas atividades de mineração podem ser de dois tipos: estéreis e rejeitos. Os estéreis são produzidos no processo de decapeamento e lavra da mina, depositados em pilhas e, a princípio, não possuem valor econômico para a indústria. Os rejeitos são produzidos nos processos de beneficiamento, podem conter alto grau de toxicidade, partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes (IBRAM, 2016).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH na Lei nº 12.334 define o sistema de disposição de estéril como uma estrutura projetada para acumular materiais, de forma transitória ou permanente, de forma controlada em condições de estabilidade geotécnica e protegida de ações erosivas. O sistema de disposição de rejeito é definido como uma estrutura para contenção e deposição de resíduos provenientes do tratamento de minérios.

Após o decapeamento no processo de lavra, os estéreis são caracterizados, removidos, transportados e estocados em pilhas. Tais pilhas possuem um certo risco devido a alguns fatores como projeto, construção e local de implantação. Sua remoção da área da lavra e disposição final são processos que podem gerar implicações econômicas, ambientais e de segurança (GOMES, 2017).

Com relação a classificação granulométrica, esses resíduos podem variar desde estéril grosseiro até argila fina e lamas, o que dificulta o desenvolvimento de projetos de áreas específicas para os estéreis. A disposição de estéreis e rejeitos da usina de beneficiamento podem acarretar contaminação do meio ambiente (CARVALHO, 2009). A gestão de resíduos é de grande importância para as mineradoras, pois além de contribuir com o meio ambiente ainda há um retorno econômico para a empresa (GOMES, 2017).

Os estudos relacionados a incorporação de resíduos de mineração na construção civil são amplos e abrange diferentes tipos de resíduos e composições, envolve quatro principais usos: reciclagem de metais ou minerais do rejeito, emprego como material de enchimento, aplicação como matéria prima na construção civil e recuperação de terras agrícolas no aterro de rejeitos para possível reflorestamento (ALMEIDA et al., 2020; YUNHONG et al., 2016).

Segundo Gomes (2017) as aplicações industriais dos resíduos de mineração dependem das características minerais, dentre os destinos mais aplicados, pode-se destacar:

- a. Finos de ferro: siderúrgicas e aplicações na indústria civil.
- b. Resíduos finos de rochas ornamentais: argamassas, cerâmicas vermelhas (tijolos e telhas), vidros, tintas, manilhas, corretivos de solos, entre outros.
- c. Resíduos grossos de rochas ornamentais: fábricas de cimento, brita e areia artificial, artesanatos, seixos ornamentais, bijuterias, muros de contenção de taludes, pavimentação, filetes para muros etc.

Uma abordagem a ser adotada a partir desse contexto, é o aproveitamento de resíduos de mineração na construção civil, alguns estudos têm demonstrado apresentar viabilidade. Pode-se destacar a utilização de resíduos de mineração, rejeitos e estéreis, em matrizes cimentícias como material suplementar (CARVALHO et al, 2019; VARGAS; LOPEZ, 2018; YOUNG; YANG, 2019; ZHENG; ZOU; GBOZEE, 2015), na produção de blocos, telhas e tijolos cerâmicos (LOUTOU et al., 2019; MENDES et al., 2019; SILVA et al., 2014), como agregados em argamassas e concretos (FONTES et al, 2016; SHETTIMA et al, 2016; ZHAO; FAN; SUN; 2014), como pigmentos à base de óxidos de ferro (GALVÃO et al, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012) e na produção de artefatos de cimento, como em blocos de pavimentação, blocos cimentícios e revestimentos hidráulicos (FONTES et al., 2018; GUERRA, 2014; MACHADO, 2018; SANT'ANA FILHO et al., 2017).

2.3 Resíduos de mineração como material cimentício suplementar

Sob a perspectiva da economia circular, recursos secundários alternativos são altamente incentivados para diferentes propósitos. Nesse cenário e abrangendo a construção civil, vale ressaltar que pesquisas têm se concentrado

no desenvolvimento de produtos cimentícios sustentáveis para minimizar os impactos negativos gerados pelo setor. Assim, o emprego de materiais cimentícios suplementares, surge como regra fundamental para a obtenção desses compósitos cimentícios (FRANCO DE CARVALHO et al., 2019). Essa estratégia pode vir acompanhada de vantagens tecnológicas como melhorias no desempenho mecânico e durabilidade.

Os materiais cimentícios suplementares são pós solúveis, constituídos por sílica, aluminossilicatos ou aluminossilicatos de cálcio, usados como substitutos parciais na fabricação de clínquer ou como substitutos parciais de cimento Portland em compósitos cimentícios (JUENGER; SNELLINGS; BERNAL, 2019). A utilização de MCS, em torno de 5% a 20% como substituição do clínquer, embora seja em quantidade relativamente pequena, resulta em um material com menor custo, menor impacto ambiental e maior resistência a longo prazo (JUENGER; SIDDIQUE, 2015).

A substituição do cimento Portland por MCS já é uma prática industrial consolidada, sendo calcário, cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno os materiais mais utilizados. Contudo, a disponibilidade de MCS convencionais varia regionalmente e pode não ser capaz de suprir as necessidades globais no futuro. Por exemplo, as quantidades de cinzas volantes estão diminuindo, haja visto que as usinas a carvão estão sendo substituídas gradualmente para fins de proteção ambiental em vários países (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019). Dessa forma, o desenvolvimento de novos MCS que sejam comparáveis ou superiores aos convencionais é, portanto, a direção do desenvolvimento sustentável da indústria cimenteira (YAO et al., 2020).

Estudos propõem o reaproveitamento de rejeito de minério de ferro como MCS como matéria-prima para a fabricação de clínquer (LUO et al., 2016) ou mesmo substituindo parcialmente o cimento em compósitos cimentícios (DE MAGALHÃES et al., 2018). Exemplificando, a pesquisa de Young e Yang (2019) destaca a viabilidade da reciclagem do rejeito de minério de ferro na produção de clínquer. Os resultados mostram que a farinha crua com adição de 10% (em peso) de rejeito sinterizada a 1420°C produz clínquer de cimento de melhor qualidade comparada a farinha crua sem rejeito.

Estudos apontam a viabilidade da aplicação de rejeito de minério de ferro na produção de clínquer, uma vez que quando comparado com o mesmo material sem adição, este apresentou as mesmas fases de clínquer e os mesmos produtos de hidratação (WANG et al., 2020a).

Quanto ao emprego do rejeito de minério de ferro como substituto parcial ou total de cimento, verifica-se que o rejeito favorece a hidratação das fases de aluminato devido ao efeito de nucleação. Contudo, a trabalhabilidade das matrizes cimentícias, assim como o comportamento reológico, são afetados pela forma angular das partículas (GOULART BEZERRA et al., 2021).

Para promover melhorias em relação a reatividade dos resíduos de mineração, lança-se mão de tratamentos térmicos, nos quais o material é submetido a altas temperaturas até que minerais cristalinos, como o caulim, se tornem amorfos (SIMONSEN et al., 2020). A ativação térmica, juntamente com a granulometria adequada, pode ocasionar melhoria no desempenho mecânico em até 40% (VARGAS; LOPEZ, 2018).

A lama de lavagem de cascalho (LLC), resíduo proveniente da extração de cascalho, também é um promissor material cimentício suplementar, utilizado como substituto parcial de cimento Portland comum. O pó da LLC são materiais ricos em aluminossilicatos, com tamanho médio de partículas em torno de 7-9 μ m, dependendo da temperatura de calcinação. É perceptível o aumento da resistência à compressão de pastas e argamassas contendo pós de LCC calcinados a 850°C com nível de substituição de CPC de 20% em peso (THAPA; WALDMANN; SIMON, 2019).

Os resíduos de mineração de carvão surgiram recentemente como alternativa promissora de SCM, atuando como material pozzolânico (GARCÍA et al., 2015; YAGÜE et al., 2018). Estes resíduos, geralmente, são constituídos por argilas cauliníticas impuras e possuem características necessárias para serem considerados matérias primas para a produção de metacaulim, promovendo vantagens ambientais, sociais e econômicas sobre a exploração de jazidas naturais de caulinita (CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021).

A adição de resíduo de mineração de carvão calcinado (0%, 6%, 10% e 20% de substituição em relação ao peso do cimento Portland) modifica as

propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Ocorre aumento em 3% e 7% da demanda de água nas substituições de 10% e 20%, respectivamente. Este efeito é justificado pela maior finura do resíduo em comparação ao cimento Portland, bem como, pela capacidade de adsorção de águas das argilas calcinadas, e está de acordo com o comportamento observado dos cimentos elaborados com pozolanas (VEGAS et al., 2015).

Embora sejam observados sinais moderados de deterioração no início da exposição, pastas com substituição de cimento de 50% por resíduo de mineração de carvão calcinado apresentam benefícios a longo prazo em relação a resistência ao ataque de sulfatos. Os danos iniciais podem ser atribuídos à precipitação de produtos (principalmente etringita e monossulfatoaluminato) nos pequenos poros capilares. Por sua vez, a resistência ao ataque de sulfatos pode ser explicada pela ocorrência da menor lixiviação de cálcio, impedindo a formação de gesso. Outro fator que contribui para essa resistência é a presença de maior teor de carboaluminato, que promove menores níveis de supersaturação dos poros em relação à etringita e reduzi as tensões derivadas (CANEDA-MARTÍNEZ et al., 2021).

Visto o exposto acima, a substituição parcial do clínquer Portland por recursos secundários alternativos pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais, além de melhorar as propriedades de durabilidade de compósitos cimentícios (LI et al., 2020).

2.4 Resíduos de mineração como agregados

Os agregados são materiais aplicados em diversos produtos empregados na construção civil, tais como argamassas e concretos (ALMEIDA et al., 2020). Na sua maioria, estes materiais são recursos não renováveis e seu consumo em ritmo acelerado é uma ameaça à sustentabilidade do setor (EL MACHI et al., 2021). Dessa forma, para o desenvolvimento sustentável, é necessário adotar abordagens que considerem a utilização de resíduos industriais, incluindo aqueles gerados nas atividades de extração e beneficiamento de minérios.

Estéreis provenientes das operações de extração de minérios podem ser considerados como recursos naturais, podendo ser aplicados como agregados na construção civil. À vista disso, é possível traçar um caminho de pesquisa

promissor para aprimorar a ideia de que subprodutos de minas são materiais alternativos e não resíduos (EL MACHI et al., 2021).

O material estéril de mina de cobre (EMC) é uma alternativa de substituição de areia natural na produção de compósitos cimentícios. As propriedades físico-mecânicas e geotécnicas da areia EMC são muito semelhantes às aquelas apresentadas pelas areias naturais comumente utilizadas na fabricação de concreto (BENAHSINA et al., 2022).

Os rejeitos provenientes de processos de beneficiamento de minério, geralmente são utilizados como substituição parcial ou total de agregados miúdos devido a sua granulometria. O tipo de rejeito influencia diretamente diversas características da mistura, como trabalhabilidade, densidade, estabilidade dimensional, resistência e durabilidade (GOU; ZHOU; THEN, 2019).

A aplicação de rejeito de minério de ferro como agregado de concretos, substituindo areia de rio em 25%, 50%, 75% e 100% pode acarretar ganhos de resistência à tração e módulo de elasticidade. No entanto, observou-se o aumento da demanda de água e diminuição do abatimento do concreto, influenciados pela área superficial e textura do rejeito (SHETTIMA et al., 2016).

Rejeitos de minério de ferro foram utilizados como agregados finos no concreto para pavimentos em substituição parcial de 10, 20, 30, 40 e 50%. Observou-se que conforme a porcentagem de rejeito aumenta, a trabalhabilidade da mistura diminui. A melhor resistência à compressão foi com substituição de 40%, já a melhor resistência a flexão foi encontrada na dosagem de referência (KUMAR et al., 2014).

Jemishkumar et al. (2014) utilizou resíduos finos de minério de ferro em substituição ao agregado na produção de tijolo. Esses resíduos podem ser utilizados como agregados na fabricação de tijolos não queimados, porém as vezes é necessária a adição de aditivos ligantes para melhorar sua plasticidade e trabalhabilidade (ALMEIDA et al., 2020).

A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de aplicação de resíduos de mineração como agregados para compósitos cimentícios. Através da incorporação destes resíduos é possível melhorar propriedades, como por

exemplo a resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade. No entanto, a trabalhabilidade das misturas pode ser afetada.

Assim, na última década, o interesse na utilização de resíduos de mineração no setor da construção e engenharia civil tem crescido. O reaproveitamento de estéréis e rejeitos é uma alternativa para a redução de gases de efeito estufa e para conservação dos recursos naturais, na medida em que reduz o uso de materiais de construção. Dessa forma, utilizar tais materiais em compósitos cimentícios pode representar um benefício que não se pode negligenciar (GARCIA-TRONCOSO et al., 2022).

Tabela 1: Aplicação de resíduos de mineração como agregado em compósitos cimentícios.

Compósito cimentício	Tipo de resíduo de mineração	% de substituição	Propriedades avaliadas	Resultados	Referência
Argamassa	Estéril de mineração de F-Ba e Pb-Zn	Estéril de mineração de F-Ba: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	Resistência à compressão; Resistência à tração e propriedades de proteção contra radiação gama	Aumento da atenuação dos raios gama. As argamassas com rejeitos F-Ba são mais eficazes que as argamassas com rejeitos Pb-Zn.	(GALLALA et al., 2021)
Argamassa	Rejeito de grafite	10%, 20%, 30% e 40%	Resistência ao gelo/desgelo; Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade	Melhora na resistência à compressão. Redução do grau de deterioração devido aos ciclos de congelamento/descongelamento. Melhoria da estrutura dos poros.	(WANG et al., 2020b)
Concreto	Rejeito de minério de ferro	100%	Abatimento; Resistência à compressão e Resistência à tração indireta	Melhora na resistência à compressão	(KURANCHIE et al., 2015)
Concreto	Rejeito de minério de antimônio	25%, 50%, 75% e 100%	Trabalhabilidade; Resistência à compressão; Resistência à tração; Módulo de elasticidade; Resistência ao efeito gelo/desgelo; Carbonatação; Atividade alcalina e Permeabilidade de Cloretos	Melhora nas resistências à compressão (corpos de prova cúbicos e prismáticos), à tração (corpos de prova cúbicos) e aumento do módulo de elasticidade.	(LI et al., 2021)

Fonte: Autoria própria.

2.5 Artefatos cimentícios

Os artefatos de cimento surgiram na construção civil após a Revolução Industrial (1760-1840) quando novos materiais e técnicas construtivas foram aprimorados, o que resultou em uma gama de produtos (CAMPOS, 2011). A ABCP (2009) descreve artefatos de cimento como um termo aplicado a diversos produtos, como por exemplo, ladrilhos hidráulicos, tubos de concreto, escadas pré-moldadas, mourões, blocos, telhas, lajotas, mobiliário urbano, entre outros.

A partir dos dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2013) é possível verificar que os artefatos de cimento ocupam o segundo lugar com relação ao consumo de cimento do setor industrial, atrás apenas das concreteiras. Em valores absolutos, o consumo de cimento por artefatos cimentícios correspondem a 3.170 toneladas, representando 5% do consumo brasileiro.

O ladrilho hidráulico integra a indústria de artefatos de cimento. Trata-se de uma placa paralelepípedica de dupla camada, constituída de cimento Portland, agregados e água, podendo conter aditivos e pigmentos. A sua produção é realizada por prensagem, com a superfície que será exposta ao tráfego, lisa ou em baixo relevo (ABNT NBR 9457, 2013). Os ladrilhos hidráulicos são produzidos de forma artesanal, podendo ser monocromáticos ou coloridos. As dimensões mais utilizadas são de 200mmx200mm com espessura de 25mm (MARQUES, 2012).

O uso dos ladrilhos hidráulicos ganhou destaque no início do século XX, principalmente nas regiões do Mediterrâneo, sendo associado ao Modernismo na Espanha. A princípio, no Brasil as peças foram todas importadas de Portugal, França e Bélgica. No final do século XIX, os mestres italianos repassaram as técnicas de produção para os habitantes de São Paulo. A utilização de ladrilhos alcançou o auge entre os anos de 1930 e 1940 e sua decadência se deu a partir de 1960 (WAMZER, 2011). A partir dos anos 80 estes artefatos voltaram a ganhar relevância, ao serem utilizados como revestimento decorativo para personalizar ambientes, em restaurações de monumentos tombados, na composição de mosaicos e na utilização em calçadas (CATOIA, 2007). Atualmente passaram a

assumir um valor afetivo, com desenhos tradicionais que revelam brasões familiares, armas, selos, casas de nobreza, castas clericais, preces ou trechos bíblicos, o que demonstra a grandiosidade e longevidade do material que remete a cultura e tradição (LAMAS; LONGO; SOUZA, 2018).

Como mencionado, os ladrilhos hidráulicos são compostos por duas camadas. A camada de revestimento, que compreende a superfície do material, possui aproximadamente 3 a 5mm de espessura e é constituída de uma mistura fina de cimento, pó de mármore ou areia fina e pigmentos convencionais. Esses constituintes têm como finalidade fornecer resistência à abrasão, cor e o brilho da peça. A camada de base, com aproximadamente 20mm de espessura, consiste de uma argamassa de cimento e areia média, e fornece a resistência mecânica. Ambas as camadas são comprimidas em um único ladrilho por um conjunto específico de moldes e uma prensa (FONTES et al., 2018). A resistência da peça é adquirida através da cura do cimento por imersão em água, sem a necessidade da queima, como é o caso dos pisos cerâmicos. Os ladrilhos possuem ampla gama de aplicação, como em calçadas, praças, estacionamentos, ambientes internos, entre outros (MARQUES, 2012).

Quanto ao uso de resíduos de mineração na produção de artefatos cimentícios, Reis e Tristão (2010) desenvolveram um ladrilho hidráulico piso tátil com a adição de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais. O resíduo em questão atuou como filler e foi adicionado em teores de 0% a 40% em relação à massa do cimento e promoveu melhorias nas propriedades analisadas, principalmente na resistência à flexão.

Fontes et al. (2018) avaliaram o potencial da utilização de rejeito de minério de ferro como agregado e pigmento na fabricação de ladrilhos hidráulicos. Para isso, os autores utilizaram o rejeito in natura e processado, nas granulometrias de areia, para substituição do agregado fino e na granulometria de argila, para produção de pigmento. O rejeito na granulometria de argila apresentou grande potencial como pigmento e como material cimentício suplementar. Os resultados apontaram que o rejeito na granulometria de areia possui grande potencial para substituição do agregado, sem impactar na densidade do compósito. A calcinação e a moagem do rejeito melhoraram o formato das partículas e a capacidade de

preencher vazios menores, contribuindo com a pigmentação. Entretanto, as amostras calcinadas foram as que obtiveram os piores desempenhos mecânicos. Todas as amostras testadas apresentaram resistência a tração superior ao mínimo necessário estabelecido pela norma. O desempenho do rejeito foi considerado satisfatório com relação as propriedades físicas e mecânicas obtidas.

Guerra (2014) estudou a incorporação de rejeito de minério de ferro na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto, como filler. O autor avaliou três dosagens de concreto, com 5 e 10% de adição de rejeito em relação a massa do cimento. As análises químicas e mecânicas demonstraram potencial para utilização, destacando o fato que o concreto com 5% de rejeito apresentou o melhor resultado, com resistência à compressão 6,6% superior à resistência de referência.

Sant'ana Filho et al. (2017) produziram blocos intertravados para pavimentação com a incorporação de rejeitos localizados no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Foram utilizadas três proporções, 10%, 50% e 80% de resíduo, ao qual foi verificada significativa redução da porosidade e aumento da densidade. Os valores de resistência a compressão foram de aproximadamente 50MPa. O rejeito mostrou-se adequado para substituição de areia e apresentou capacidade de suportar tráfego pesado. Os autores concluíram que além de blocos intertravados, é possível produzir diversos materiais com esse tipo de resíduo como, pedra sintética, placas de concreto, tijolos e base de material para rodovias.

Machado (2018) verificou a utilização dos rejeitos da Barragem de Candonga como matéria-prima no desenvolvimento de um produto a ser utilizado na construção civil. Na pesquisa foram moldados blocos a partir da mistura de carbonato de sódio e água e após se tornar uma massa homogênea foi prensado e tratado termicamente a 700°C para produção de um bloco monolítico, a matriz vítrea formada ao redor das partículas de quartzo proporcionou resistência mecânica ao material, como resultado pode-se verificar o potencial uso da mistura como produto similar ao tijolo cerâmico maciço e como ladrilho hidráulico, os blocos desenvolvidos apresentaram uma resistência à flexão média de 4,42 +/- 0,69MPa, acima do mínimo (3,5MPa) recomendado pela norma.

2.6 Considerações Finais

A indústria da mineração possui grande importância no cenário mundial, porém a deposição dos resíduos é um problema crítico, que vêm ocasionando acidentes, além de ocupar grandes áreas. Concomitante a essa problemática, o cimento Portland está em demanda crescente e dessa forma acarretando danos ao meio ambiente, como emissão de gases poluentes.

Nesse sentido, a literatura demonstra que o aproveitamento de resíduos de mineração tem se apresentado como alternativa promissora na indústria da construção civil, uma vez que além de agregar valor ao material, mostra-se ambientalmente e tecnicamente viável, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Contudo, ainda existe a necessidade de dar continuidade a esses estudos, de forma a ampliar o uso desses materiais e suas possíveis aplicações.

2.7 Referências

ALUJAS, A. et al. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 94–101, 2015.

Agência Nacional de Mineração - ANM. Informe Mineral, 2018. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe-mineral-2018-2o-semester-1>. Acesso em: 23/12/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9457**: Ladrilhos Hidráulicos para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia Básico de utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Artefatos de cimento**. São Paulo, 2009.

AIGBAVBOA, C.; OHIOMAH, I.; ZWANE, T. Sustainable Construction Practices: “a Lazy View” of Construction Professionals in the South Africa Construction Industry. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3003–3010, 2017.

ALMEIDA, J. et al. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. **Journal of Building Engineering**,

v. 29, n. October 2019, p. 101215, 2020.

ARIOĞLU AKAN, M. Ö.; DHAVALÉ, D. G.; SARKIS, J. Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1195–1207, 2017.

BARBOZA-CHAVEZ, A. C.; GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y.; ACEVEDO-DÁVILA, J. L. Synthesis and characterization of a hybrid cement based on fly ash, metakaolin and portland cement clinker. **Materials**, v. 13, n. 5, 2020.

BENAHSSINA, A. et al. Natural sand substitution by copper mine waste rocks for concrete manufacturing. **Journal of Building Engineering**, v. 47, n. November 2021, p. 103817, 2022.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M. I. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 104, p. 84–101, 2021.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; HASHIM, H. A novel design for green and economical cement manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, n. 1, p. 60–66, 2012.

CANEDA-MARTÍNEZ, L. et al. Exploring sulphate resistance of coal mining waste blended cements through experiments and thermodynamic modelling. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, n. April, 2021.

CARVALHO, S. Z. et al. Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 385–390, 2018.

CHENG, Y. et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 164–170, 2016.

COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. Reduction in CO₂ emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123302, 2020.

DE MAGALHÃES, L. F. et al. Iron ore tailing as addition to partial replacement of portland cement. **Materials Science Forum**, v. 930 MSF, p. 125–130, 2018.

EL MACHI, A. et al. Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121886, 2021.

FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 2019.

GALLALA, W. et al. Effect of F-Ba and Pb-Zn tailing on the mechanical and radiation shielding properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121603, 2021.

GARCIA-TRONCOSO, N. et al. Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands.

Case Studies in Construction Materials, v. 16, n. January, p. e01031, 2022.

GARCÍA, R. et al. Mineralogical study of calcined coal waste in a pozzolan/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 45–54, 2015.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO_2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126–142, 2015.

GOLEWSKI, G. L. Energy savings associated with the use of fly ash and nanoadditives in the cement composition. **Energies**, v. 13, n. 9, 2020.

GOMES, A. C. F. Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração. p. 84, 2017.

GOU, M.; ZHOU, L.; THEN, N. W. Y. Utilization of tailings in cement and concrete: A review. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 26, n. 1, p. 449–464, 2019.

GOULART BEZERRA, C. et al. Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 303, n. August, p. 124496, 2021.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, n. 11, p. 559–573, 2020.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, n. May, p. 257–273, 2019.

KUMAR, B. N. S. et al. Utilization of Iron Ore Tailings As Replacement To Fine Aggregates in Cement Concrete Pavements. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 03, n. 07, p. 369–376, 2014.

KURANCHIE, F. A. et al. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**, v. 2, n. 1, 2015.

LEDESMA, E. F.; CORINALDESI, V.; JIMÉNEZ, J. R. **Study of environmentally friendly bedding mortars prepared with recycled aggregates and biomass ash**. Second International Conference on Concrete Sustainability. **Anais...**2016

LI, H. et al. Approach to the management of magnesium slag via the production of Portland cement clinker. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 3, p. 1701–1709, 2018.

LI, L. et al. Strength and durability properties of antimony tailing coarse aggregate (Atca) concrete. **Materials**, v. 14, n. 19, 2021.

LIMA, L. et al. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125730, 2021.

LUO, L. et al. Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, p. 1596047, 2016.

MARINKOVIĆ, S. et al. Environmental assessment of green concretes for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 633–649, 2017.

MERLI, R. et al. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 2020.

MILLER, S. A. et al. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. August, p. 115–124, 2018.

MIRKOVIĆ, M. et al. Fly ash as a raw material for low-carbon cement clinkers and its radiological properties. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 328, n. 3, p. 1391–1398, 2021.

PENG, K.; YANG, H.; OUYANG, J. Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material. **Powder Technology**, v. 286, p. 678–683, 2015.

PETEK GURSEL, A. et al. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 38–48, 2014.

SHAH, V. et al. Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete. **Advances in Cement Research**, v. 32, n. 3, p. 101–111, 2020.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72–79, 2016.

SHI, Z. et al. Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 116, n. October 2018, p. 238–251, 2019.

SIMONSEN, A. M. T. et al. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. **Waste Management**, v. 102, p. 710–721, 2020.

SINGLA, R.; KUMAR, S.; ALEX, T. C. Reactivity Alteration of Granulated Blast Furnace Slag by Mechanical Activation for High Volume Usage in Portland Slag Cement. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 6, p. 2983–2993, 2020.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. May, p. 105799, 2019.

THAPA, V. B.; WALDMANN, D.; SIMON, C. Gravel wash mud, a quarry waste material as supplementary cementitious material (SCM). **Cement and Concrete Research**, v. 124, n. July, p. 105833, 2019.

VARGAS, F.; LOPEZ, M. Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 427–436, 2018.

VEGAS, I. et al. Physical-mechanical behavior of binary cements blended with thermally activated coal mining waste. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 169–174, 2015.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; COELHO, F. Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 656–666, 2016.

WANG, Q. et al. Application of calcareous iron ore tailings in the production of

cement. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 00, n. 00, p. 1–10, 2020a.

WANG, Z. R. et al. Degradation characteristics of graphite tailings cement mortar subjected to freeze-thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117422, 2020b.

WEISHI, L. et al. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 685–692, 2018.

YAGÜE, S. et al. Coal-mining tailings as a pozzolanic material in cements industry. **Minerals**, v. 8, n. 2, p. 1–13, 2018.

YAO, G. et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863–871, 2020.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 152–156, 2019.

ZHAO, D. et al. Investigation on industrial trial production of multi-phased clinker with crude granular steel slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, n. January, p. 130467, 2022.

3. ESTÉRIL DE FOSFATADO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

3.1 Introdução

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, devido à sua alta resistência mecânica e baixo custo (PENG; YANG; OUYANG, 2015). A produção de cimento alcança quase dois bilhões de toneladas por ano, essa produção é responsável por uma parcela de aproximadamente 5% das emissões globais de CO₂, a maior parte dessas emissões tem origem no processo térmico de calcinação, quando ocorre a decomposição térmica do carbonato de cálcio, e o restante vem da energia necessária para a produção (HUNTZINGER; EATMON, 2009). A previsão é que em 2025, essa indústria emitirá CO₂ a uma taxa de 3,5 bilhões de toneladas/ano (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011). A crescente demanda global por cimento motiva as buscas por soluções para mitigação dessas emissões e consequente redução do impacto ambiental, uma das estratégias empregadas é a substituição do clínquer por materiais alternativos (KAJASTE; HURME, 2016; SANTOS, 2008).

Dentre as características de interesse na avaliação de um possível material cimentício suplementar estão as suas propriedades físicas, como a distribuição de tamanho de partículas e área superficial específica, suas propriedades químicas, incluindo composição de óxidos, composição de fases e conteúdo amorfo, tais características afetam na interação com a hidratação do cimento e a demanda de água (JUENGER; SIDDIQUE, 2015).

A utilização dos MCS pode trazer duas contribuições: a química ou a física. A contribuição química, chamada de efeito pozolânico, está relacionada a formação de produtos de hidratação a partir de hidróxidos de cálcio (CH) produzidos durante a hidratação do cimento e as fases de sílica amorfa presentes no material, onde a taxa de reação pozolânica depende do tamanho das partículas e da disponibilidade de sílica amorfa, água e CH. E a contribuição física, também denominada de efeito de preenchimento, ocorre através de alterações no espaçamento de partículas e disponibilidade de superfície para a nucleação de produtos de hidratação (ZUNINO; LOPES, 2016).

Diversos materiais cimentícios suplementares alternativos estão sendo cada vez mais utilizados para economizar energia e reduzir custos, alguns exemplos são: a escória de alto-forno, as cinzas volantes, escórias de aço, rejeitos e aditivos minerais ativados (PENG; YANG; OUYANG, 2015). Os resíduos provenientes de atividades da mineração vêm demonstrando grande potencial para utilização como material cimentício suplementar (ALMEIDA et al., 2020; MÁRMOL et al., 2010; YAO et al., 2019).

Através da ativação térmica, minerais argilosos são capazes de apresentar reatividade pozolânica, essa reação ocorre através de estruturas parcialmente desordenadas. A economia de energia ocorre, já que a temperatura de calcinação é inferior a temperatura da queima do clínquer. A reatividade pozolânica está associada ao tipo e quantidade de argilominerais no material e na temperatura de calcinação. Depósitos de argilas comuns contendo diferentes minerais argilosos e não argilosos são abundantes no mundo, é de grande interesse a utilização desse tipo de argila como material pozolânico (ALUJAS et al., 2015).

Um dos principais resíduos sólidos gerados pela atividade minerária é o estéril. Os estéreis são materiais extraídos da lavra sem valor econômico e comumente são dispostos sob a forma de pilhas. No estado de Minas Gerais esses constituem entre 70% e 80% da quantidade de resíduos sólidos provocados pela mineração. Os impactos ambientais e os riscos relacionados a esse material estão entre os mais significativos para a indústria da mineração e quando associado a uma carência de métodos alternativos para seu devido descarte ou reaproveitamento, ocupam áreas significativas no meio ambiente, além de provocar impactos ambientais. (IBRAM, 2016; IPEA, 2012).

A partir desse contexto o presente trabalho tem como finalidade avaliar a viabilidade da utilização de estéril proveniente de rochas fosfáticas como material cimentício suplementar.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta etapa foram: cimento Portland composto com material carbonático CPII F32, composto por 75 a 89% de clínquer e 11 a 25% de

material carbonático (ABNT NBR 16697, 2018). Também foi utilizado o cimento CPV ARI (alta resistência inicial) com teor de clínquer entre 90-100% (ABNT NBR 16697, 2018). Como agregados foram empregadas as quatro frações granulométricas da areia normal, 16 (retido entre as peneiras 2,4mm e 1,2mm), 30 (retido entre as peneiras 1,2mm e 0,6mm), 50 (retido entre as peneiras 0,6mm e 0,3mm) e 100 (retido entre as peneiras 0,3mm e 0,15mm) conforme especificado pela ABNT NBR 7214 (2015). A água utilizada no trabalho foi fornecida pela concessionária de rede de abastecimento local (Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA).

3.2.1.1 Estéril

O estéril de rochas fosfáticas utilizados neste trabalho é proveniente do Complexo de Mineração de Tapira (CMT), situado no município de Tapira, a aproximadamente 40Km da cidade de Araxá – MG e foram fornecidos pela empresa *Mosaic* Fertilizantes. O CMT concentra a maior mineração de fosfato da América Latina, ocupa uma área de 78.403.000 m² e possui uma reserva de 280Mt de minério fosfático, com produção anual de 2Mt de concentrado. No complexo são realizadas operações de lavra a céu aberto, beneficiamento do minério, mineroduto e instalações de suporte (SILVA, 2016). A quantidade estimada de estéril no local é de aproximadamente 1,5Gt, dispostas em pilhas de cerca de 100Mt de volume (MORAES; SEER, 2018). A Figura 1 ilustra a vista frontal de uma frente de lavra da mina.

Figura 1 – Vista frontal de uma frente de lavra da mina.



Fonte: Autoria própria

O minério de fosfato situa-se abaixo de uma camada de estéril rica em titânio e entre essas duas camadas ocorre a mistura de ambos. O material utilizado nesse trabalho é proveniente da zona superficial do estéril. Essa camada ocupa cerca de 30 a 40m e é constituído por material de ganga silicatado, apresenta coloração amarelo avermelhado, consistência argilosa, aspecto granular e composto por minerais de goetita, caulinita, anatásio e crandalita (REIS, 2010; SILVA, 2019; SANTOS, SOBRAL, ARAÚJO, 2002).

Foi utilizado neste trabalho amostras de estéril em três condições: *in natura* (EST-0), tratado termicamente a 400°C (EST-400) e a 600°C (EST-600).

3.2.2 Caracterização da amostra de estéril

Após a coleta da amostra de estéril, o material foi pré-homogeneizado através de pilha cônica e homogeneizado através da técnica de pilha alongada, o qual o material foi distribuído ao longo de uma linha de forma uniforme. Após esse processo, uma fração do material foi seco em estufa (FANEM, 515) a 100°C por 24h. Em seguida, passou por moagem em moinho planetário de alto desempenho (FRITSCH, Pulverisette 5) durante cerca de 10 minutos com velocidade de 300 RPM. O equipamento é composto por quatro recipientes de zircônia de 500ml e foram utilizadas 25 esferas moedoras de zircônia em cada recipiente. A Figura 2 apresenta o material após o processo de moagem. Posteriormente, as amostras foram caracterizadas.

Para a caracterização física, a amostra foi submetida ao ensaio de peneiramento a laser (CILAS 1090 Laser *Particle Size Analyzer*), a fim de verificar a dimensão das partículas da amostra. Para isso, foi dispersa em água com auxílio de ultrassom por 60 segundos e o grau de obscuração utilizado no ensaio foi de 11%.

Figura 2 - Amostra de estéril de fosfatado após o processo de moagem.



Fonte: Autoria própria.

Para observação da morfologia das amostras e obtenção de características microestruturais do material como formas, texturas e dimensões foi utilizado o Microscópio eletrônico de varredura (MEV) de baixo vácuo (Hitachi, TM-3000) com aceleração de elétrons de 5kV a 15kV e magnitude de aumento de 15.000 a 30.000.

A composição elementar da amostra foi identificada através de espectrometria de Fluorescência de raios X em energia dispersiva (Shimadzu EDX-720) e a mineralogia determinada pela Difração de raios X (Shimadzu, XRD-7000), tal análise foi realizada para determinar os minerais que constituem a amostra do material, foi analisado o ângulo 2θ de 10° a 100° , com passo de $0,02^\circ$ e tempo de análise de 3 segundos para cada ponto.

A análise termogravimétrica (Hitachi STA7300) foi utilizada para identificar as temperaturas em que ocorrem as transformações de fases e a perda de massa em função do aumento da temperatura, o ensaio baseia-se na pesagem contínua do material e como resultado é obtido uma curva de variação de massa por temperatura. O ensaio foi executado com velocidade de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ na temperatura ambiente até a temperatura de 1000°C .

As amostras foram calcinadas em duas temperaturas distintas (400°C e 600°C). Após o tratamento térmico, as amostras passaram pelo processo de moagem, foi utilizado o moinho de bolas (SOLAB, SL-34/E) durante o período de

40 minutos, tempo suficiente para as amostras adquirirem granulometria passante na peneira de 0,075mm.

3.2.3 Caracterização do estéril como pozolana

a) Método de Lúxan

O Método proposto por Lúxan; Madruga; Saavedra (1989) consiste em determinar a atividade pozolânica a partir da variação de condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 , a qual o material é adicionado. A diferença de condutividade elétrica em solução de Ca(OH)_2 , ocorre devido a interação entre os íons Ca^{2+} e OH^- e o material a ser adicionado na solução, de forma que para formar produtos de reação ocorre uma redução de íons, e consequente diminuição da condutividade elétrica (SINTHAWORN; NIMITYONGSKUL, 2011).

Após obtida a solução saturada de Ca(OH)_2 , a mesma foi filtrada e coletada 200ml, a qual foi mantida em agitação e aquecida a 40°C, em seguida a condutividade elétrica foi medida através de um medidor de condutividade, após esse processo foram adicionados 5g do material na solução mantendo a agitação constante pelo período de 120 segundos e então a condutividade foi medida novamente. O resultado do ensaio consiste na diferença entre os dois valores de condutividade elétrica. A partir do valor obtido o material é classificado em não pozolânico, pozolanicidade moderada e boa pozolanicidade, conforme apresentado na Tabela 2. O ensaio foi realizado em triplicata onde foi calculado e apresentado a média dos três valores.

Tabela 2 - Classificação de pozolanicidade.

Classificação do material	Variação de condutividade elétrica ($\Delta\text{mS/cm}$)
Não pozolânico	$\Delta\text{mS/cm} < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$>0,4 \Delta\text{mS/cm} < 1,2$
Boa pozolanicidade	$\Delta\text{mS/cm} > 1,2$

Fonte: Adaptado de Lúxan; Madruga; Saavedra (1989).

b) Análise termogravimétrica

Para o ensaio de análise termogravimétrica foi produzida uma pasta de cimento e água como referência e as demais pastas com 25% de substituição do

cimento pelo estéril nas três condições (*EST-0*, *EST-400*, *EST-600*). Após moldados, os corpos de prova foram mantidos secos até a idade do ensaio (28 dias), nessa data o material foi quebrado e moído, uma pequena fração do pó, cerca de 15 a 20mg, foi introduzida no equipamento para quantificar a perda de massa em função do aumento da temperatura.

O objetivo do ensaio é quantificar o teor de hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, com base na perda de massa provocada pela desidratação do hidróxido de cálcio (M_1) e da descarbonatação do carbonato de cálcio (M_2). O teor de hidróxido de cálcio pode ser calculado através da Equação 1 (WANG et al., 2021).

$$CH(\%) = M_1 \frac{74}{18} + M_2 \frac{74}{44} \quad (1)$$

c) Índice de Desempenho com cimento Portland

A determinação do índice de atividade pozolânica foi realizada de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014) através do índice de desempenho com cimento Portland. Para isso, foram moldados corpos de prova, com substituição de 25% em relação a massa de cimento Portland pelo estéril nas três diferentes condições, além de corpos de prova de referência, sem adição de estéril. A Tabela apresenta as quantidades dos materiais utilizados nas argamassas.

A moldagem foi realizada em corpos de prova cilíndricos com medidas de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. O procedimento de mistura dos materiais, moldagem e cura dos corpos de prova foram realizados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019).

Tabela 3 – Quantidades dos materiais utilizados.

Argamassa	Cimento Portland (g)	Estéril de Fosfatado (g)	Água (g)	Areia (g)	Relação água/cimento
REF	624	0	300	1872	0,48
EST-0	468	156	300	1872	0,48
EST-400	468	156	300	1872	0,48
EST-600	468	156	300	1872	0,48

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram rompidos por compressão axial após 28 dias, para cada condição foram rompidos 5 corpos de prova para o cálculo da resistência média, a partir dos resultados foi possível calcular o Índice de Desempenho com Cimento Portland, conforme apresentado na equação (2) (ABNT NBR 5752, 2014). Para que o material seja considerado pozolânico, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) a resistência à compressão deve alcançar 90% da resistência alcançada pela argamassa de referência.

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{ca}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$I_{cimento}$ = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, resultado expresso em porcentagem;

f_{cB} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CII F32 e 25% de material pozolânico (argamassa B), em MPa;

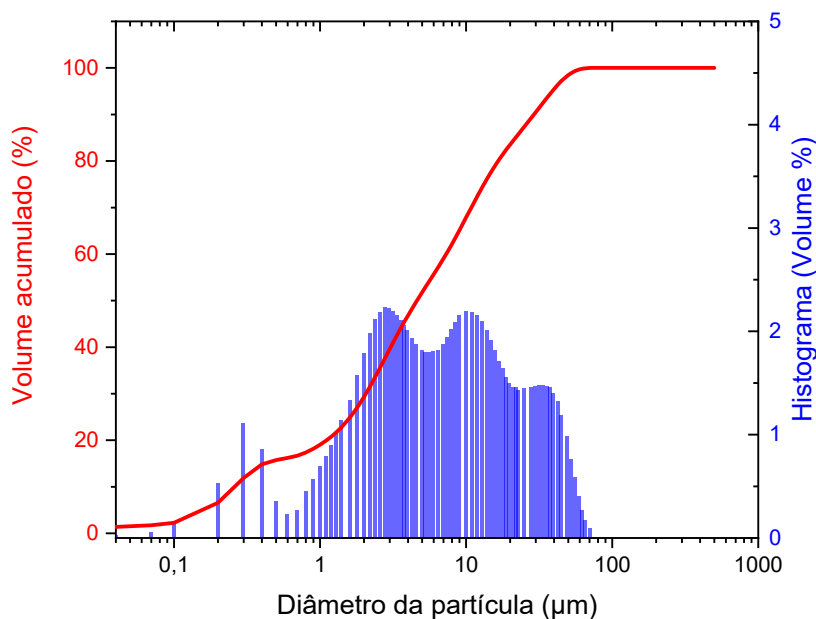
f_{ca} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CII F32, em MPa.

3.3 Resultados

3.3.1 Caracterização da amostra de estéril

O ensaio de granulometria (Figura 3) apresenta um material fino, onde 90% das partículas apresentaram diâmetro de 29,13µm e o tamanho médio dos grãos foi de 9,97µm. De acordo com as informações preconizadas na ABNT NBR 12653 (2014) para o material ser considerado pozolânico a granulometria deve ser menor que 45µm, portanto a granulometria do material estudado está em conformidade com a norma.

Figura 3 – Distribuição granulométrica do estéril.



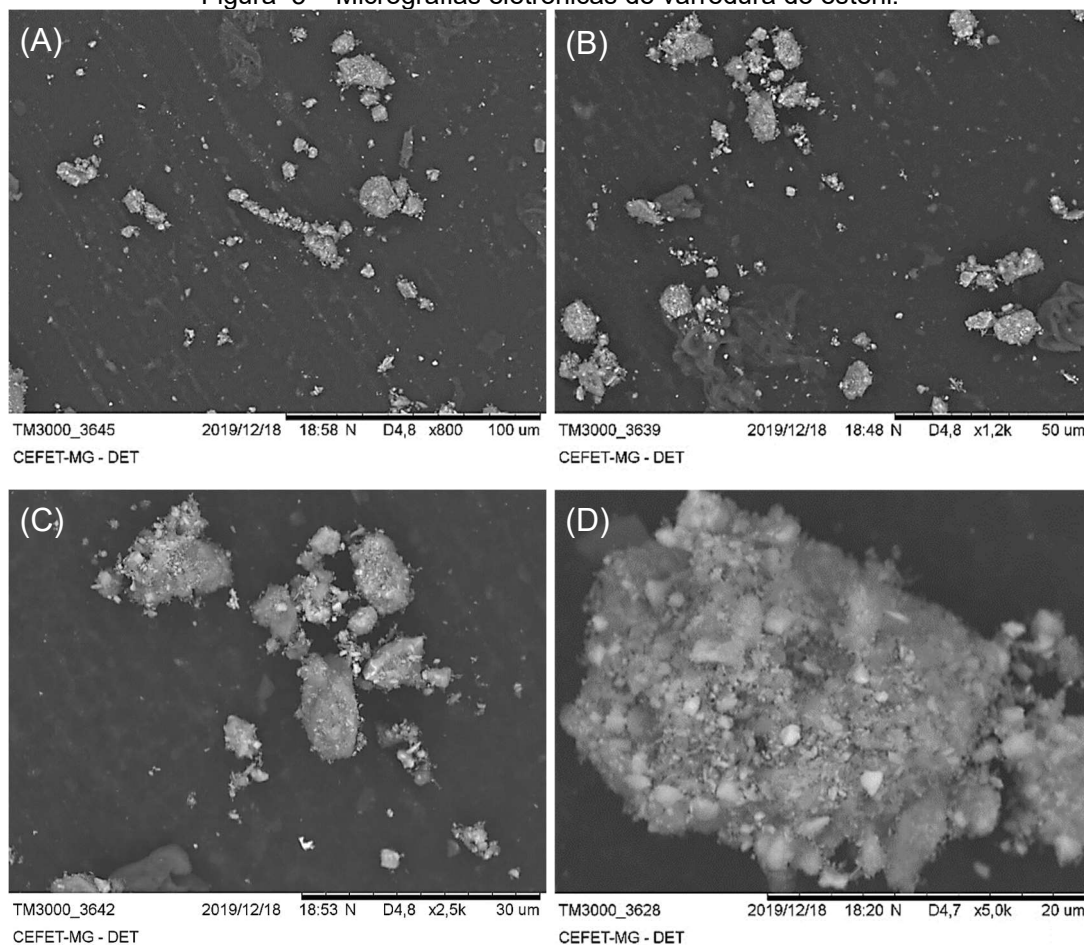
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta a composição química do estéril, o material apresenta alto índice de Fe_2O_3 o que justifica a coloração avermelhada e o poder de pigmentação (FROMENT; TOURNIÉ; COLOMBAN, 2008). É importante destacar a presença de Al_2O_3 e SiO_2 , elementos considerados essenciais para que o material seja considerado pozolânico (SNELLINGS; MERTENS; ELSSEN, 2012). De acordo com a NBR 5752 (2014) a soma desses três elementos deve compor no mínimo 70% da amostra para que o material possa ser considerado pozolânico e a perda ao fogo deve ser de no máximo 10%, no caso do estéril a soma resultou em 76,25% e a perda ao fogo (PF) foi de 8,72%, portanto em ambos os quesitos o material está em conformidade com os limites estabelecidos pela norma.

Pode ser observado na composição química uma quantidade considerável de TiO_2 , esse elemento está associado ao manto de intemperismo do local formado pela alteração de rochas ultramáficas ricas em titânio e fósforo (EBERHARDT, 2014).

A difração de raio X da amostra, representada na Figura 4, indica fases cristalinas variadas e presença de pequenos halos amorfos. Com relação aos picos, pode ser observado minerais de goetita, anatásio e alguns picos de caulinita, em conformidade com a composição química.

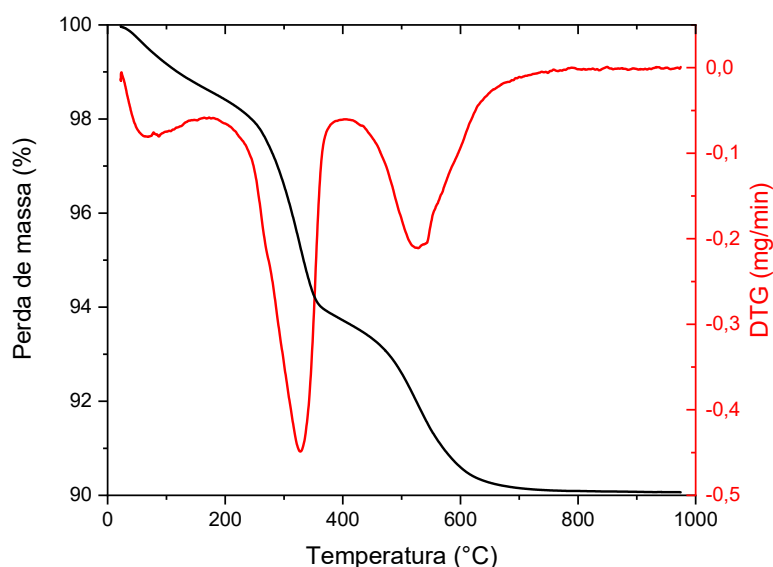
Figura 5 – Micrografias eletrônicas de varredura do estéril.



Fonte: Autoria própria.

A análise termogravimétrica apresenta (Figura 6) três pontos principais de perda de massa, o primeiro ocorre na temperatura inicial até a temperatura de 200°C, ocasionada pela perda de água superficial (ILIC; MITROVIC; MILICIC, 2010). Entre 200 e 400°C é identificada outra perda de massa ocasionada pela desidroxilação da goetita (WALTER; BUXBAUM; LAQUA, 2001; GIANELLA et al., 2010). Por fim, o terceiro ponto está entre 500 e 600°C onde possivelmente ocorre a desidroxilação da caulinita em metacaulinita (YAGUE et al., 2018).

Figura 6 – Análise termogravimétrica do estéril.



Fonte: Autoria própria.

Com base em estudos anteriores os quais as argilas cauliniticas apresentam atividade pozolânica quando são calcinadas em temperaturas entre 500 a 600°C (ALUJAS et al., 2015; CIOFFI; MAFFUCCI; SANTORO, 2003; ILIC; MITROVIC; MILICIC, 2010) e no resultado da análise termogravimétrica, as temperaturas para tratamento térmico foram definidas em 400 e 600°C, com tempo de queima fixado em 120min e taxa de aquecimento de 25°C/min.

3.3.2 Caracterização do estéril como pozolana

a) Método de Luxan

O resultado do ensaio é apresentado na Tabela 5. O estéril apresentou um valor médio na variação de condutividade elétrica de 0,51 portanto foi considerado com pozolanicidade moderada, de acordo com os parâmetros estabelecidos por Luxan, Madruga, Saavedra (1989), já o estéril calcinado em 400°C e 600°C indicaram boa pozolanicidade com valores acima de 1,21 e 1,24 respectivamente. Essa alta variação de condutividade está relacionada a reatividade da amostra com o Ca(OH)_2 , ou seja, o consumo de íons Ca^{2+} e OH^- por partículas do material ensaiado (Luxan, Madruga, Saavedra, 1989).

Tabela 5 – Resultado do ensaio de condutividade elétrica.

Material	Varição da condutividade elétrica ($\Delta mS/cm$)	Classificação
EST-0	0,51	Pozolanicidade moderada
EST-400	1,21	Boa pozolanicidade
EST-600	1,24	Boa pozolanicidade

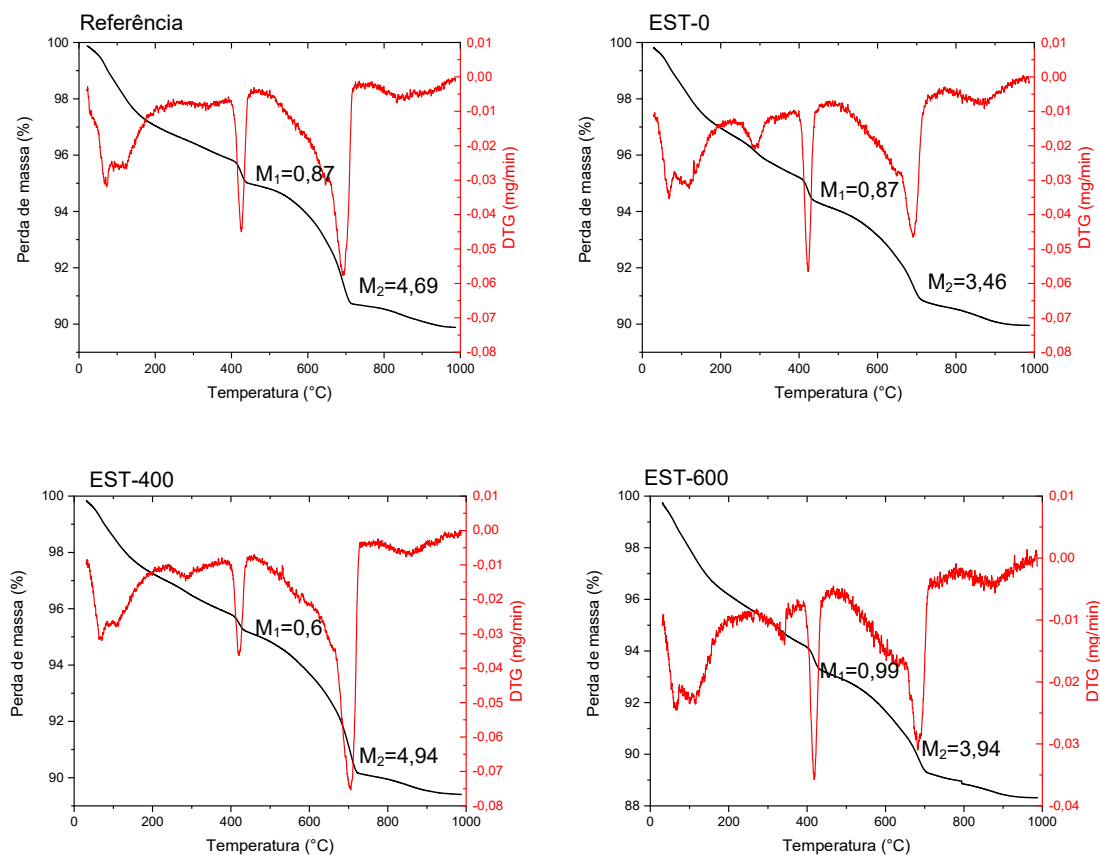
Fonte: Autoria própria.

b) Análise termogravimétrica das pastas

O resultado da análise termogravimétrica (Figura 7) das pastas de cimento apresenta três picos principais. O primeiro pico nas temperaturas entre 70°C e 150°C se refere a água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio relacionado a formação de C-S-H e das fases aluminato hidratadas (YAO et al., 2020). O segundo pico a 400°C a 550°C está associado a desidroxilação do hidróxido de cálcio $CaOH_2$, quando esse valor diminui possivelmente ocorre uma reação de hidratação secundária ocasionada pela reação pozolânica (YUNHONG et al., 2016). A terceira perda de massa na temperatura entre 500 e 750°C representa a decomposição do carbonato de cálcio formado pela carbonatação do hidróxido de cálcio e C-S-H em teor de dióxido de carbono (KAZMI et al., 2017; YAO et al., 2020).

Ao aplicar a Equação (1) obteve-se os seguintes valores: as pastas de referência apresentaram 10,57% de CH, já a amostra de estéril obteve 9,39%, essa queda no valor indica que possivelmente ocorreu uma reação secundária de hidratação, onde partículas super finas induzem a formação de etringita e C-S-H através do consumo de hidróxido de cálcio (YAO et al., 2020). As amostras calcinadas a 400°C e 600°C apresentaram resultados bem próximos a pasta de referência, são eles respectivamente: 10,76% e 10,69%, sugerindo que não houve reação secundária.

Figura 7 – Análise termogravimétrica das pastas.

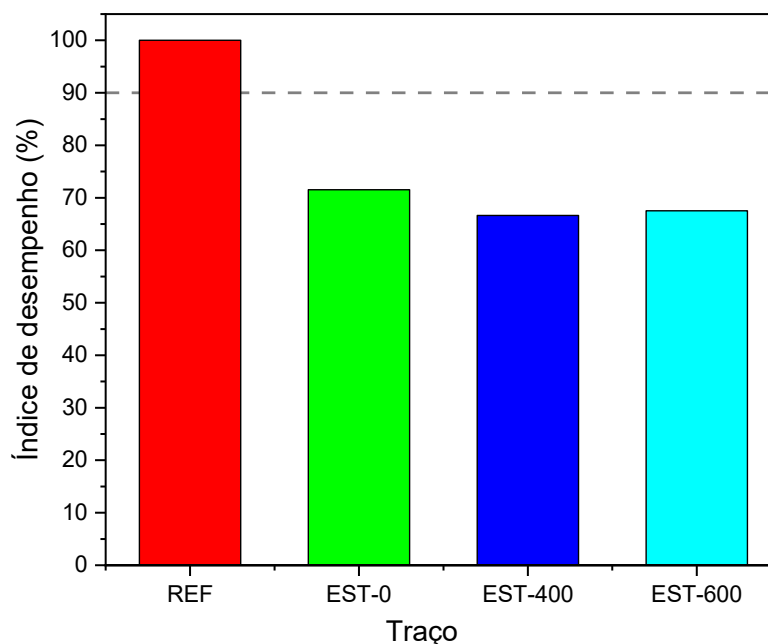


Fonte: Autoria própria.

c) Índice de desempenho com cimento Portland

O Índice de desempenho dos corpos de prova foram calculados de acordo com a Equação (2) e representados na Figura 8. Para cada traço foram rompidos quatro corpos de prova para o cálculo da média.

Figura 8 – Resultado do Índice de atividade pozolânica.



Fonte: Autoria própria.

O resultado do ensaio corrobora com o resultado da análise termogravimétrica das pastas. Os corpos de prova produzidos com estéril foi o que alcançou o melhor resultado, 71,52% da resistência média dos corpos de prova de referência, já as argamassas com estéril a 400°C atingiu 66,64% e com estéril a 600°C obteve 67,53%. Deste modo, nenhuma das amostras atingiu o mínimo de 90% estabelecido pela NBR 5752 (2014) para materiais pozolânicos.

Foi realizada avaliação estatística através da análise de variância pelo método ANOVA Um Fator, ao nível de significância de 5%. Essa análise é capaz de determinar se as médias de determinados conjuntos de dados são estatisticamente iguais. Para isso é analisado o valor P (probabilidade) e o valor F (variabilidade entre grupos), onde $p > 0,05$ entende-se que as médias são todas iguais e $p < 0,05$ nem todas as médias são iguais. Para identificar o(s) grupo(s) de valores distintos foi utilizado o método de Tukey, onde os traços são distribuídos em grupos (A, B, C), considera-se que as médias que não compartilham uma letra são consideradas significativamente diferentes. Dessa forma, foi constatado que a resistência mecânica dos corpos de prova com estéril calcinado a 400°C e 600°C são consideradas estatisticamente iguais, já as os resultados das demais

composições são consideradas estatística diferentes ($p < 0,05$). A Tabela 6 apresenta os dados da análise.

Tabela 6 – Análise de variância e Teste de Tukey.

Variação	Amostras	Valor F	Valor-P
Entre grupos	REF, EST-0, EST-400, EST-600	313,50	0,000

Fator	N	Média	Agrupamento
REF	4	26,830	A
EST-0	4	19,193	B
EST-400	4	17,880	C
EST-600	4	18,120	C

Fonte: Autoria própria.

Portanto pode-se considerar que o tratamento térmico não provocou melhorias na resistência à compressão. Possivelmente o material atuou apenas como efeito de preenchimento, essa condição ocorre quando pequenas partículas inertes preenchem vazios e estimulam fisicamente a hidratação do cimento, além de servir como pontos de nucleação de CSH contribuindo para resistência a compressão (JATURAPITAKKUL et al., 2011; SCRIVENER et al., 2015; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; SNELLINGS; MERTENS; ELSEEN, 2012).

A reação pozolânica pode não ter acontecido no material por diversas causas. O primeiro aspecto a ser considerado é de não ter ocorrido a desidroxilação completa da caulinita na temperatura 600°C, como foi demonstrado em estudos anteriores, onde os autores obtiveram os melhores resultados através do tratamento térmico a temperaturas maiores como 750°C e 800°C (ALUJAS et al., 2015; MAGALHÃES et al, 2020; TIRONI et al., 2012). Outro aspecto a ser considerado é de o material não conter teor de caulinita suficiente para se tornar reativo, já que o teor de caulinita é considerado como principal fator para reatividade pozolânica em materiais argilosos (AVET, SCRIVENER, 2018; AVET et al., 2016). Kang et al (2022) afirmou em seu estudo que para não afetar significante a resistência do cimento, as argilas impuras devem conter no mínimo 40% de caulinita.

3.4 Conclusão

Foi analisada a viabilidade da incorporação do estéril como material cimentício suplementar. Os resultados indicam que apesar dos constituintes do estéril favorecerem a atividade pozolânica, o material não apresentou reatividade quando calcinados a 400°C e 600°C.

Aa argamassa produzida com estéril sem calcinar foi o que apresentou melhor resistência mecânica atingindo 71,52% da resistência dos corpos de prova de referência, no ensaio de análise termogravimétrica o estéril sem calcinar também obteve o melhor resultado, com a menor perda de massa.

Possivelmente o estéril atua apenas como filler no cimento, podendo ser utilizado em aplicações com menores solicitações de esforço.

A incorporação do estéril fosfatado em compósitos cimentícios possibilita a redução do consumo de cimento e consequente redução de impacto ambiental.

3.5 Referências

ALUJAS, A. et al. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 94–101, 2015.

AVET, F., SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement Concrete**. Res 107, 124–135. 2018.

AVET, F. et al. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement Concrete**. Res 85, 1–11. 2016.

ALMEIDA, J. et al. Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. January, p. 101215, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR5752**: Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR7214**: Areia Normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

CIOFFI, R.; MAFFUCCI, L.; SANTORO, L. Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 40, n. 1, p. 27–38, 2003.

EBERHARDT, D. B. **Elementos-Traços Em Minerais Do Complexo Alcalino Carbonatítico De Tapira - MG**. 2014. 111 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília. 2014.

GIALANELLA, S. et al. On the goethite to hematite phase transformation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 102, n. 3, p. 867–873, 2010.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668–675, 2009.

JATURAPITAKKUL, C. et al. Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4287–4293, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Gestão e manejo de Rejeitos de Mineração. 2016. Disponível em: www.ibram.org.br. Acessado em: 06/09/2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília: Ipea, 2012.

ILIĆ, B. R.; MITROVIĆ, A. A.; MILIČIĆ, L. R. Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. **Hemjska Industrija**, v. 64, n. 4, p. 351–356, 2010.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4041–4052, 2016.

KANG, S; KWON Y., MOON J. Influence of calcination temperature of impure kaolinitic clay on hydration and strength development of ultra-high-performance cementitious composite. **Construction and Building Materials**. v. 326. 2022.

KAZMI, S. M. S. et al. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 231–240, 2017.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 1, p. 63–68, 1 jan. 1989.

MÁRMOL, I. et al. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. v. 32, p. 617–622, 2010.

MORAES, L. C. DE; SEER, H. J. Titânio. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; CUNHA, E. C. (Eds.) **Recursos Minerais de Minas Gerais Online**. 1st. ed. [s.l.] Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), 2018. p. 1–21.

PENG, K.; YANG, H.; OUYANG, J. Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material. **Powder Technology**, v. 286, p. 678–683, 2015.

REIS, R. C. **Estudo da Estabilidade de Taludes da mina de Tapira-MG**. 2010. 145f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

SANTOS, M. L. L. DE O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 165f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do rio Grande do Norte, Natal, RN.

SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S.; ARAÚJO, R. V. V. **PRODUÇÃO DE FOSFATO NO BRASIL: COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA / FOSFERTIL**. XIX ENTMME. **Anais...**Pernambuco: 2002. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2002/CAC00500002.pdf>>. Acesso em: 06/09/2019.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38–56, 2015.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSSEN, J. Supplementary cementitious materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. Blezard 2001, p. 211–278, 2012.

SILVA, F. B. R. **Análise das principais variáveis na flotação industrial do Complexo de Mineração de Tapira-MG**. 2016. 198f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SILVA, T. H. **Potencial Descontaminante de material álcali-ativados a partir de sistema misto de estéril de mineração de rochas fosfáticas e cinza volante de alto carbono**. 2019. 160f. Dissertação de Mestrado. CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SIMONSEN, A. M. T. et al. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. **Waste Management**, v. 102, p. 710–721, 2020.

SINTHAWORN, S.; NIMITYONGSKUL, P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 622–627, 2011.

SUN, T. et al. Comparing pozzolanic activity from thermal-activated water-washed and coal-series kaolin in Portland cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 117092, 2019

SCRIVENER, K. L. et al. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018.

TIRONI, A. et al. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 276-281, 2012.

YAO, G. et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement. **Powder Technology**, v. 360, p. 863–871, 2020.

YUNHONG C. et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 164–170, 2016.

WALTER, D.; BUXBAUM, G.; LAQUA, W. The mechanism of the thermal transformation from goethite to hematite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 63, n. 3, p. 733–748, 2001.

WANG, X. et al. Effect of silica fume and nano-silica on hydration behavior and mechanism of high sulfate resistance Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122481, 2021.

YAGÜE, S. et al. Coal-mining tailings as a pozzolanic material in cements industry. **Minerals**, v. 8, n. 2, p. 1–13, 2018.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 19–28, 2016.

4. SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR ESTÉRIL DE FOSFATADO NA PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

4.1 Introdução

O ladrilho hidráulico é um dos mais antigos objetos da construção civil, restos de pedras coloridas eram utilizados para aplicação em castelos, palácios e outros feitos da arquitetura do século XVII. A partir da metade do século XIX com o emprego do cimento Portland, ganhou expressividade na Europa, África e posteriormente nas Américas. No Brasil, seu auge ocorreu nas décadas de 1930 e 1940 e após esse período houve um declínio devido à inserção e popularização dos pisos cerâmicos no mercado. Atualmente voltou a ganhar expressividade como forma de personalização de projetos, através de seu caráter singular proporcionando um meio para expressão artística de artesãos e designers (WAMZER, 2011).

A retomada dos ladrilhos hidráulicos retrata uma forma de manter a cultura material e imaterial através de ressignificações, uma vez que o artesanato retoma sua importância em oposição a produção industrial, em busca de produtos diferenciado e dessa forma contribui para preservação da memória e identidade dos locais. Além de possuir valor simbólico, com características artesanais, possui valor estético, através de diversas composições e desenhos possibilitando adaptar a diversos estilos arquitetônicos e criando ambientes únicos e personalizados. Atualmente seus usos variam entre artístico, funcional e decorativo. Além disso, sua utilização abrange a reprodução de peças em edificações construídas tombadas pelo patrimônio que passaram por reformas e restaurações (CAMPOS, 2011; CORTES, 2015). As fábricas de ladrilhos hidráulicos no Brasil situam-se principalmente em lojas de artesanato na região Sudeste. O investimento inicial é baixo, já que não é necessário mão de obra qualificada, e os equipamentos são de baixo custo. A retomada desses materiais ao mercado brasileiro traz a possibilidade de aprimoramento da tecnologia da produção e desenvolvimento de novas estampas de acordo com a necessidade atual (FONTES et al., 2018).

A produção dos ladrilhos hidráulicos continua da mesma forma em que ocorria há cem anos. A mistura é colocada sob uma fôrma de aço em duas camadas, para a base é utilizada uma argamassa de areia e cimento Portland, já a camada da superfície é a que recebe a coloração, tem aproximadamente 3 a 5mm de espessura e consiste em uma mistura de cimento branco, mármore branco triturado ou areia fina e pigmentos a base de óxidos de ferro, essa camada é responsável pela cor, brilho e resistência à abrasão, em contrapartida a camada da base fornece resistência mecânica. As cores variam em função do pigmento, do tipo de cimento, do pó de mármore e do quartzo, assim a mistura adquire a tonalidade desejada (FONTES et al., 2018; LAMAS; LONGO; SOUZA, 2018).

Os pigmentos utilizados na produção dos ladrilhos hidráulicos são derivados de óxido de ferro, para as cores amarela, marrom, vermelha e preta, e dióxido de manganês e óxido de cromo para as cores verde e azul cobalto. As cores podem sofrer alteração devido aos processos de calcinação (CAMPOS, 2011).

Diferentes resíduos podem ser utilizados para produção de pigmentos, pois além de reduzir o custo de produção ainda fornece um destino aos mesmos (FIUZA et al., 2018). Alguns tipos de resíduos podem ser usados sem qualquer pré-tratamento, diminuindo assim o tempo de produção e custos. Portanto a valorização desses materiais, principalmente aqueles com problemas na disposição final consiste em uma alternativa atraente no meio a exploração de recursos naturais (CARNEIRO et al., 2018). Dentre os diversos resíduos utilizados em estudos para produção de pigmentos e corantes pode-se mencionar: resíduos de pó de combustão de alto forno e rejeitos cianetos (DENGXIN et al., 2008; SHEN et al., 2010), resíduos de mineração (GALVÃO et al., 2018; PEREIRA; BERNARDIM, 2012, TAVARES, 2012) e resíduos de aço e ferro (FIUZA et al., 2018, PRIM et al., 2011).

Uma outra abordagem é a incorporação de resíduos para pigmentação e como material cimentício suplementar em argamassas e elementos decorativos, como Mármol et al. (2010) usaram resíduos de lodo de granito em argamassa de cimento, o material foi considerado pozolânico e também agiu como pigmento através da calcinação nas temperaturas de 700 a 900°C. Li et al (2016) produziram

gesso decorativo vermelho a partir de resíduos de tijolos vermelhos, como resultado obtiveram melhorias no desempenho mecânico devido as propriedades pozolânicas do resíduo e ajuste de cor semelhante a utilização de pigmentos comerciais. Tavares (2012) incorporou resíduo fino proveniente da deslamagem de itabirito para pigmentação de blocos intertravados, os blocos apresentaram pigmentação adequada e maior resistência mecânica devido ao autoadensamento das partículas. Magalhães et al., (2020) utilizou rejeito de minério de ferro na produção de argamassas coloridas, a temperatura de 750°C ativou a pozolanicidade do material e pigmentou adequadamente.

O estéril proveniente de rochas fosfáticas apresenta cor avermelhada devido ao alto teor de óxido de ferro, com isso sua cor pode sofrer alteração de acordo com as condições de calcinação. Além da sua possibilidade de utilização como material cimentício suplementar, pode ainda ser uma alternativa seu uso como pigmento na produção elementos cimentícios. O objetivo desse estudo foi de avaliar a possibilidade da incorporação de estéril de fosfatado na produção de ladrilhos hidráulicos como substituição parcial de cimento Portland e avaliar os efeitos de sua pigmentação nas peças decorativas, para isso foram avaliados os parâmetros físicos, mecânicos, visuais e durabilidade. A aplicação desse resíduo traz a possibilidade de resgatar a tradição da técnica de fabricação com característica artesanal, apropriando um valor simbólico e estético em uma região ainda rica em processos artesanais.

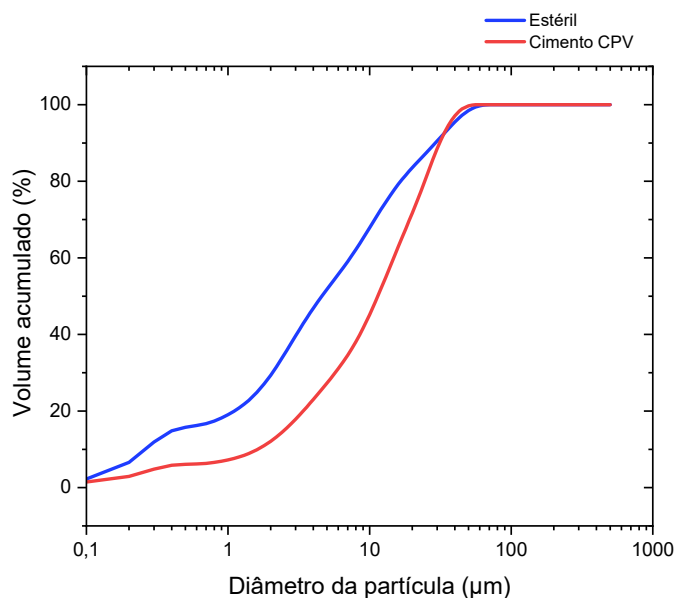
4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Materiais

Para a produção dos ladrilhos hidráulicos foi utilizado como aglomerante o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), esse tipo de cimento foi escolhido por ser o mais utilizado em peças pré-moldadas. Como substituto parcial do cimento foi utilizado o estéril de fosfatado proveniente do CMT em Minas Gerais. Os agregados utilizados foram a areia média lavada e o pó de pedra fino. A água utilizada no trabalho foi fornecida pela concessionária de rede de abastecimento local (Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA). As características dos materiais são apresentadas na Tabela 7 e as curvas granulométricas nas Figuras 9 e 10. O estéril apresentou um diâmetro médio de

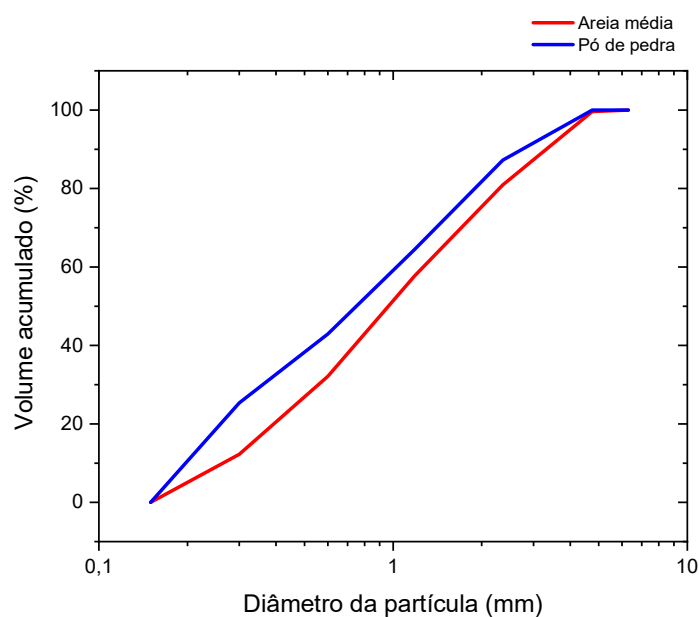
9,97 μ m, enquanto o cimento CPV-ARI obteve a média de 14,19 μ m. Conforme demonstrado em estudos anteriores, o tamanho das partículas afeta diretamente a reatividade do material, a moagem pode induzir a amorfização dos minerais constituintes, portanto quanto menor o tamanho da partícula maior sua reatividade (YAO et al, 2020; PARK; CHOI, 2022).

Figura 9 – Curva granulométrica do estéril e cimento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Curva granulométrica da areia e pó de pedra.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Massa específica dos materiais utilizados.

Material	Massa específica (g/cm³)
Cimento CPV	3,10
Estéril	3,26
Areia média	2,96
Pó de pedra	2,60

Fonte: Autoria própria.

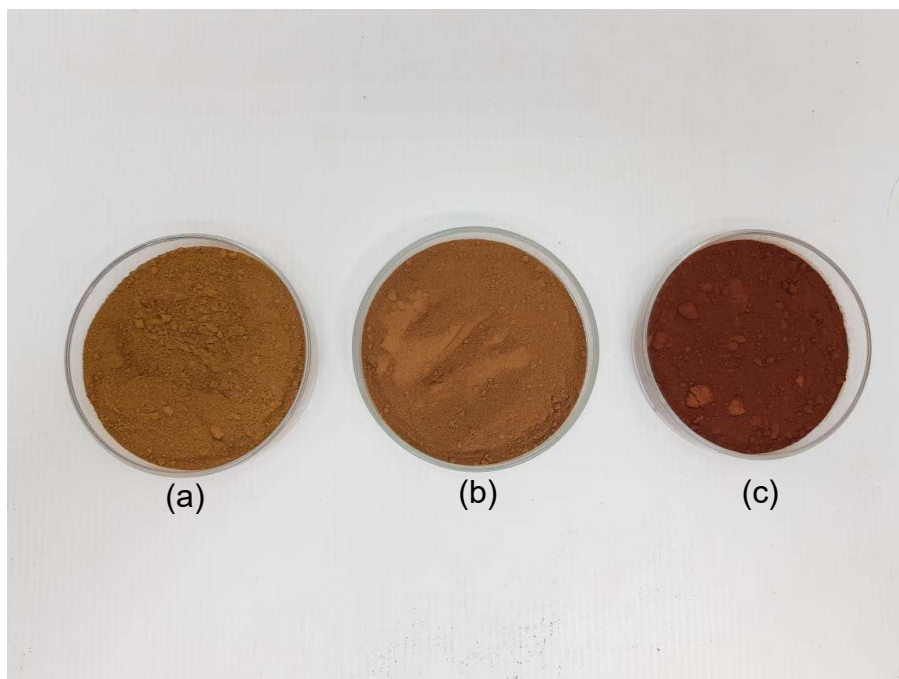
4.2.2 Produção do ladrilho hidráulico

Após a homogeneização e caracterização do estéril, foi realizado o tratamento térmico nas temperaturas de 400°C e 600°C, com a finalidade de obter três cores distintas. Após a calcinação, o material passou pelo processo de moagem a fim de chegar na granulometria de 0,075mm. O processo de moagem contribui de forma significativa para melhoria da pigmentação, quanto mais fino o material maior a superfície específica, o que contribui também para maior reatividade (FONTES, 2018).

A Figura 11 apresenta a coloração do material nas três condições, a amostra sem calcinar apresenta tonalidade marrom claro (a), o material calcinado a 400°C apresenta o tom marrom mais escuro (b) e na calcinação a 600°C observa-se uma coloração marrom avermelhado (c). A mudança de tonalidade ocorreu possivelmente pela desidroxilação da goetita em hematita (FONTES, 2018).

Foi utilizado o teor de substituição do cimento pelo estéril em 25% de volume de cimento, com o estéril nas três condições (EST-0, EST-400, EST-600). Esse teor de substituição foi escolhido por ser considerado a porcentagem máxima que um material considerado como carbonático ou pozolânico pode ser substituído no cimento Portland de acordo com a norma (ABNT NBR 16697, 2018). A Tabela 8 apresenta as formulações para a produção dos ladrilhos.

Figura 11 – EST-0 (a), EST-400 (b) e EST-600 (c).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Formulações para produção dos ladrilhos.

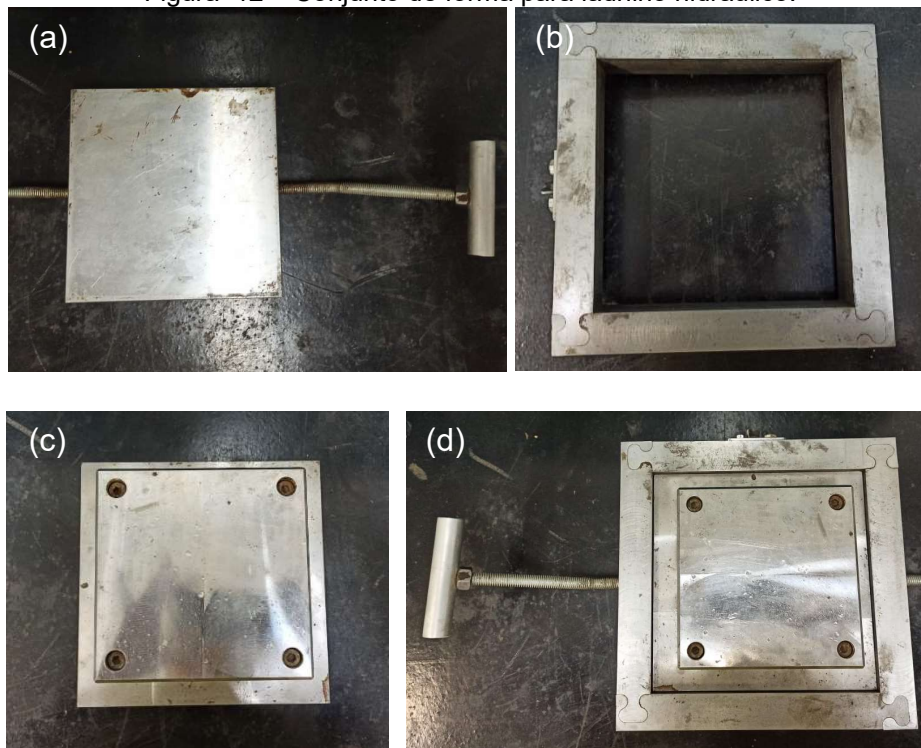
Identificação da amostra	Componentes	Tratamento térmico	Porcentagem de substituição
LAD-CPV	CPV	-	
LAD-0	CPV + estéril de fosfatado	-	25%
LAD-400	CPV + estéril de 400°C fosfatado		25%
LAD-600	CPV + estéril de 600°C fosfatado		25%

O ladrilho foi produzido em três camadas. A primeira delas corresponde a superfície da peça, composta basicamente por uma calda de cimento. A camada intermediária é responsável por absorver parte da água da camada superior, constituída de uma mistura seca de cimento e pó de pedra, denominada de pó secante. A camada inferior, a que entrará em contato com o contrapiso, possui textura áspera, produzida com uma argamassa de cimento, areia e água.

A forma utilizada é própria para fabricação de ladrilho hidráulico com as seguintes dimensões: 20x20x5cm. O conjunto da forma é composto por uma base, tampo e quadro. Na base é encaixada duas peças que formam o quadro, onde é colocado o molde que contém os desenhos e a tampa é fixada acima para

o processo de prensagem. A Figura 12 apresenta o conjunto de forma para ladrilho: base (a), quadro (b), tampo (c), conjunto (d).

Figura 12 – Conjunto de forma para ladrilho hidráulico.



Fonte: Autoria própria.

Baseado em estudos anteriores (MARQUES, 2012; REIS, 2008), o procedimento para produção das camadas foi realizado da seguinte forma: os materiais secos da primeira camada foram homogeneizados e misturados a água de forma mecânica. Primeiramente a água foi vertida no recipiente e em seguida os materiais secos já homogeneizados foram adicionados. A segunda camada foi obtida misturando os materiais por reviramento de sacos, já que consiste em uma mistura seca. Por fim, a terceira camada foi misturada manualmente, homogeneizando os materiais secos e adicionando água vagarosamente. Como desmoldante foi utilizado óleo mineral no fundo, nas laterais e na tampa.

Para o preenchimento das camadas, inicialmente a forma foi lubrificada e em seguida a camada foi preenchida vertendo a calda da camada superior na forma. No caso dos ladrilhos decorativos foi utilizado um molde o qual foi preenchido com as três cores obtidas pela pigmentação do estéril.

Após esse processo foi preenchida a camada intermediária, denominada de pó secante. Posteriormente a camada da base foi preenchida. A primeira camada compreendeu cerca de 5mm da espessura da forma, a camada intermediária ocupou cerca de 10mm de espessura e a última camada atingiu uma espessura de 10mm, após a prensagem a espessura obtida foi de 21mm.

A Tabela 9 apresenta os traços que foram utilizados em cada camada dos ladrilhos hidráulicos. Por ser um método artesanal e com poucos dados na literatura, os traços foram obtidos através de tentativas, onde foi escolhido aquele que obteve a consistência mais adequada em cada camada.

Tabela 9 – Traços para produção de ladrilho hidráulico.

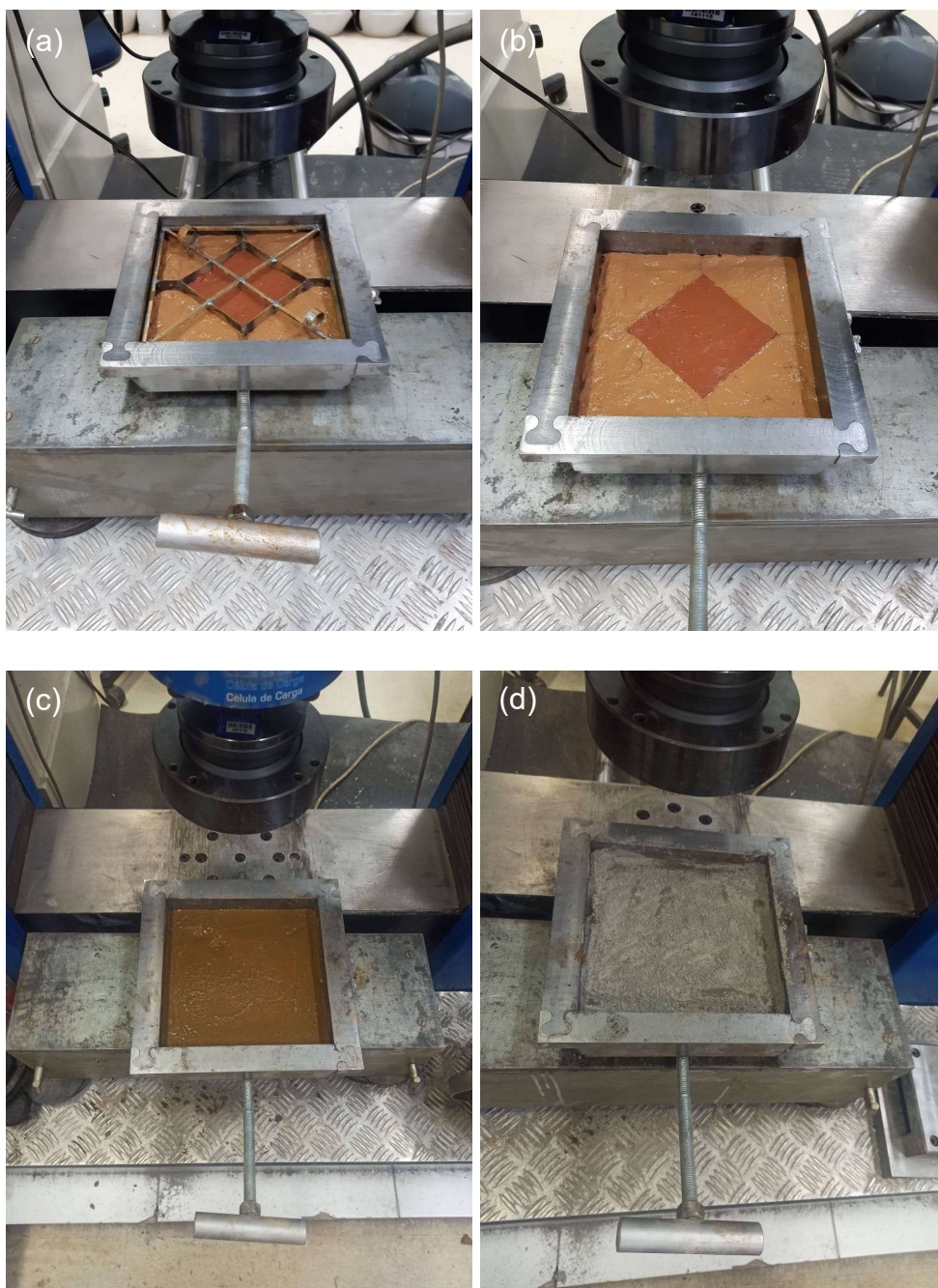
Camada	Materiais	Quantidades
Camada 1 (Superior)	Cimento + estéril de fosfatado	1
	Pó de pedra	1
	Água	0,5
Camada 2 (Intermediária)	Cimento + estéril de fosfatado	1
	Pó de pedra	1
Camada 3 (Inferior)	Cimento + estéril de fosfatado	1
	Areia média	3
	Água	0,5

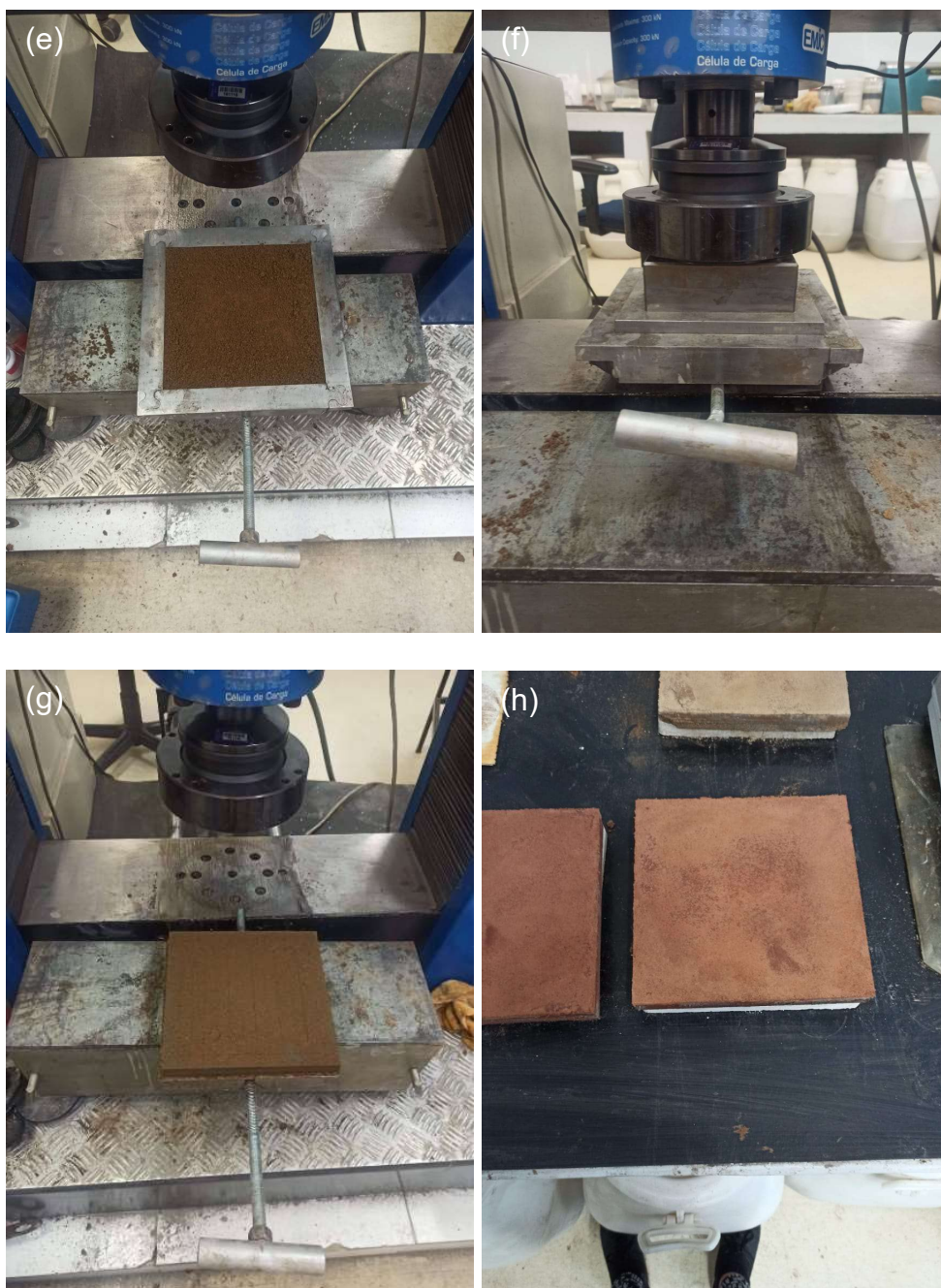
Sobre as três camadas a tampa da forma foi devidamente encaixada para o processo de prensagem. Nesta etapa foi utilizada a máquina universal de ensaios (EMIC DL-30000). A carga de prensagem utilizada foi de 250Kg/cm², valor baseado em trabalhos anteriores (CAMPOS, 2011; REIS, 2008). Para o desforme do ladrilho foi retirada primeiramente as laterais da forma em seguida a tampa, e por fim ele foi retirado da base.

Após desenformados, os ladrilhos foram mantidos por 24h em temperatura ambiente, em seguida foram imersos em água pelo período de 24h e por fim estocados ao ar em temperatura ambiente até a idade de 28 dias.

A Figura ilustra as etapas na fabricação do ladrilho: primeira camada com o auxílio do molde (a), após a retirada do molde (b), primeira camada dos ladrilhos monocromáticos (c), segunda camada (d), terceira camada (e), prensagem (f), desenforme (g), cura (h).

Figura 13 – Processo de produção do ladrilho hidráulico.





Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Caracterização do ladrilho hidráulico com adição de estéril

a) Análise visual e dimensional

A avaliação dimensional foi realizada segundo a NBR 9457 (ABNT, 2013), foi verificado se houve variação nas dimensões e o paralelismo entre as superfícies opostas, a avaliação foi executada com o auxílio de um paquímetro. As dimensões de cada um dos lados foram medidas e em seguida calculada a

média dos quatro lados, o valor calculado foi considerado como o valor da dimensão de cada corpo de prova.

Na análise visual foi verificada a uniformidade da superfície aparente. De acordo com a ABNT NBR 9457 (2013), as peças devem apresentar aspecto homogêneo, arestas vivas, ângulos retos, livres de defeitos.

A ortogonalidade das faces foi avaliada através de um esquadro retificado, o esquadro foi fixado no ladrilho e dessa forma verificado o alinhamento da peça com o esquadro a olho nu. Os ladrilhos foram analisados na idade de 28 dias. A Tabela 10 apresenta os requisitos e a quantidade de peças ensaiadas para cada parâmetro conforme a ABNT NBR 9457 (2013).

Tabela 10 – Requisitos, dimensões e tolerância das peças.				
Propriedade	Quantidade peças ensaiadas	Limite	Tolerância	Número de rejeição admissível
Comprimento	9	Máx. 400mm	$\pm 3\text{mm}$	0
Largura	9	Mínimo 100mm	$\pm 3\text{mm}$	0
Espessura	9	Mínimo 18mm	$\pm 1\text{mm}$	0
Ortogonalidade	6	Não podem ser perceptíveis desvios a olho nu.		1
Inspeção visual	Todas as peças			0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9457 (2013).

b) Absorção de água e índice de vazios

Com relação aos parâmetros físicos foram realizados o ensaio de determinação da absorção de água e índice de vazios de acordo com a ABNT NBR 9778 (2005), os ladrilhos foram ensaiados na idade de 28 dias. Para os cálculos a massa foi determinada em três situações: massa seca (m_s), massa saturada (m_{sat}) e massa saturada imersa em água (m_i), a partir desses valores foi possível calcular A (absorção de água) e o I_v (Índice de vazios).

Para a realização deste ensaio, os ladrilhos foram cortados na medida de 20x20mm, foram utilizadas quatro placas para cada traço. Inicialmente os corpos de prova secaram por 72h na estufa em temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, em seguida foram submersos em água na temperatura ambiente por um período de 72h, logo após os ladrilhos foram colocados em banho maria com água aquecida até a

fervura pelo período de 5h (Figura 14), e então foram pesados na balança hidrostática para obter o valor da massa imersa em água, em seguida as amostras foram enxugadas e a massa saturada foi obtida através da pesagem convencional.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (6)$$

Figura 14 – Ensaio de absorção de água.



Fonte: Autoria própria.

c) Ensaio de ataque ácido

Uma das principais vantagens da utilização de MSC em compósitos cimentícios é a melhora da resistência química. O contato de compostos de cimento com ácido sulfúrico pode ocasionar em rachaduras e até eventual falha na estrutura. O processo ocorre devido a reação do sulfato com Ca(OH)_2 , resultando na formação de compostos expansivos. A melhor durabilidade permite prolongar a vida útil do cimento além de reduzir custos para possíveis substituições (SNELLINGS; MERTENS; ELSEEN, 2012; GLANDCLERC et al., 2018).

O ensaio foi realizado em 5 corpos de prova quadrados de 20mm, onde foram previamente secos em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e em seguida mergulhados e mantidos na solução de ácido sulfúrico a 5% por 07 dias, após esse período os

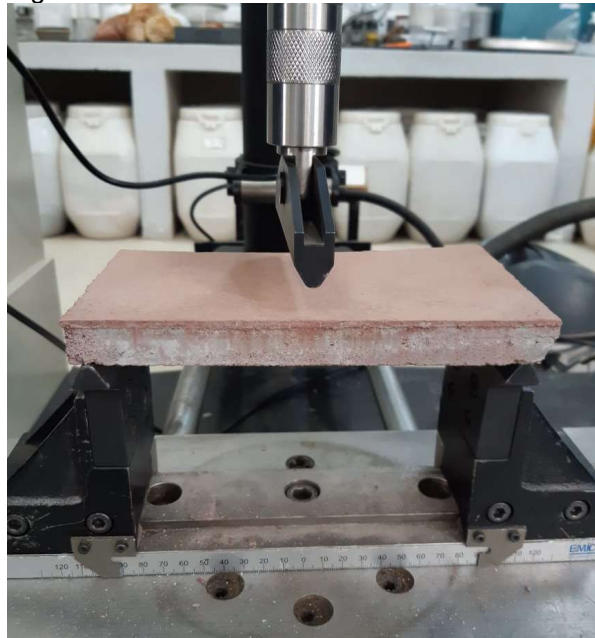
ladrilhos foram lavados com água, secos em estufa e pesados para determinação da perda de massa.

d) Ensaio de resistência à flexão

Para determinação da resistência mecânica, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica à tração na flexão. A ruptura foi realizada na máquina universal de ensaios (EMIC DL-30000), com o auxílio de dois apoios metálicos, uma barra cilíndrica central e duas nas extremidades, com distância entre elas de 180mm, e aplicação de carga no ponto intermediário. A Figura 15 ilustra o procedimento de ensaio de resistência à flexão de um ladrilho hidráulico.

Os ladrilhos foram previamente limpos e secos para remoção de qualquer impureza, o carregamento foi aplicado gradativamente com razão de $1 \pm 0,2$ MPa por segundo. Para cada traço foram rompidos 5 ladrilhos. O módulo de resistência à flexão deverá satisfazer o valor de 3,5MPa, conforme preconizado na NBR 9457 (ABNT, 2013). As peças foram rompidas aos 28 dias após a produção.

Figura 15 – Ladrilho hidráulico solicitado à flexão.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados

a) Análise visual e dimensional

Os ladrilhos apresentaram variação dimensional de até 0,8mm entre eles, já a espessura variou entre 0 a 1mm. Ambos os valores são considerados aceitos pela norma (NBR 9457, 2013). As peças não apresentaram variação na ortogonalidade. A Tabela 11 apresenta os resultados da análise.

Tabela 11 – Avaliação dimensional dos ladrilhos.

Propriedade	Quantidade peças ensaiadas	Resultado	Tolerância	Avaliação
Variação dimensional	5 peças para cada traço	0,8mm	± 3mm	Aceito
Variação espessura		0,9mm	± 1mm	Aceito
Ortogonalidade		0mm		Aceito

Fonte: Autoria própria.

Com relação ao ensaio de análise visual (Figura 16), a superfície manteve-se inalterada durante todo o processo de cura. Pode-se notar que a cor não ficou totalmente homogênea nas peças, uma das causas pode ser por falhas no processo de lubrificação. O poder de pigmentação foi mais eficiente nas peças produzidas pelo estéril a 600°C, dessa forma pode-se notar que o tratamento térmico influencia de forma positiva no potencial de pigmentação, o mesmo ocorreu no estudo de Fontes (2018), onde a autora utilizou a ativação térmica em rejeitos para pigmentação de ladrilhos hidráulicos, foi constatado que quanto maior a temperatura de calcinação melhor foi a capacidade de pigmentação e homogeneidade das peças.

Figura 16 – Ladrilhos produzidos.



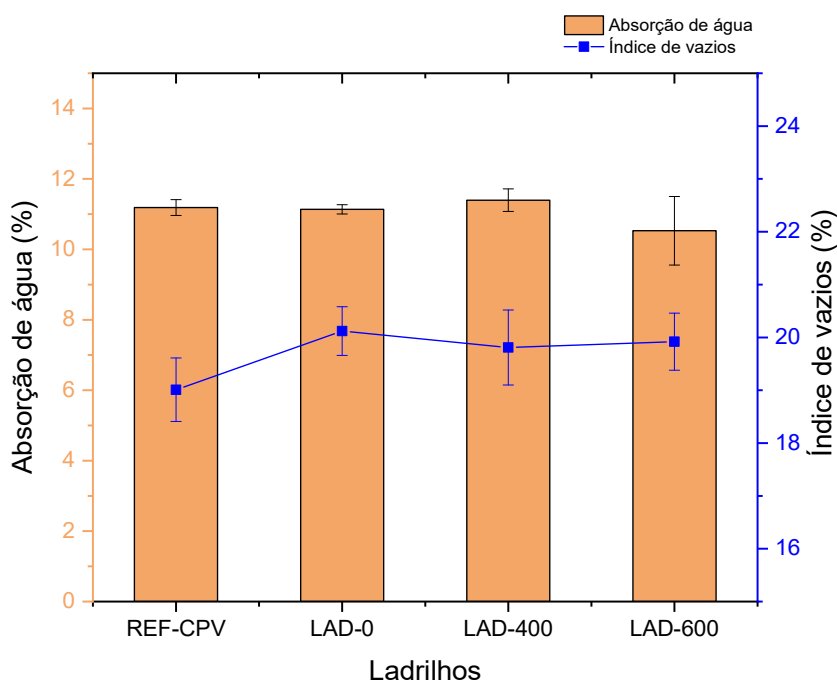
Fonte: Autoria própria.

b) Absorção de água e Índice de vazios

O resultado do ensaio de absorção de água e índice de vazios está ilustrado na Figura 17. A absorção de água média das amostras de referência foi de 11,18%, as peças produzidas com estéril sem calcinar apresentaram valor médio de 11,13%, já as amostras calcinadas obtiveram os valores médios de 11,39% para 400°C e 10,52% para 600°C.

A NBR 9457 (2013) não especifica o valor máximo de absorção de água para ladrilhos. Em trabalhos anteriores, Reis e Tristão (2010) apresentou valores médios de absorção de água de ladrilhos produzidos em fábricas, são eles: 12,06%, 13,73% e 11,62%. Marques (2012) em seu estudo produziu ladrilhos de referência com absorção média de 8,10%. Já Cavalli e Valduga (2006) obtiveram absorção média nos seus ladrilhos de 10,99%. Portanto em análise comparativa, os resultados apresentados estão em conformidade com estudos anteriores.

Figura 17 – Absorção de água e índice de vazios.



Fonte: Autoria própria.

Ao aplicar a análise de variância ANOVA Um Fator considerando 5% de erro, tem-se que $p > 0,05$ (Tabela 12) portanto entende-se que todos os resultados são estatisticamente iguais. Portanto a substituição do cimento e o tratamento térmico no estéril não influenciaram na absorção de água das peças.

Tabela 12 – Análise de variância.

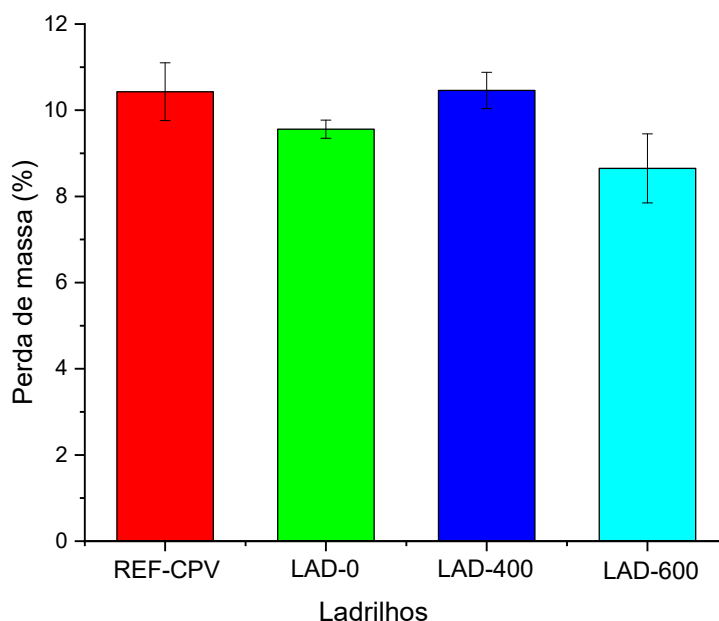
Variação	Amostras	Valor F	Valor-P
Entre grupos	REF CPV, LAD-0, LAD-400, LAD-600	0,40	0,756

Fonte: Autoria própria.

c) Ensaio de ataque ácido

O resultado do ensaio de ataque ácido é apresentado na Figura 18. Os ladrilhos de referência tiveram uma perda de massa média de 10,42%, enquanto as peças com estéril obtiveram 9,56%, os ladrilhos com estéril a 400°C apresentaram média de 10,46%, já as peças tratadas termicamente a 600°C tiveram o menor valor entre eles, com 8,64% de perda de massa.

Figura 18 – Perda de massa após ataque ácido.



Fonte: Autoria própria.

Essa perda de massa pode ter ocorrido pois a utilização de material cimentício suplementar pode reduzir ou eliminar a eliminação de compostos expansivos prejudicial ao cimento, dessa forma ocorre a diminuição de Ca(OH)_2 , assim reduzindo a taxa de difusão no poro e consequentemente provocando melhorias na resistência química da fase CSH (SNELLINGS; MERTENS; ELSSEN, 2012).

De acordo com a análise de variância ANOVA Um Fator, apenas o estéril de 600°C apresentou diferença significativa entre os demais (Tabela 13). Portanto a incorporação do estéril calcinado a 600°C proporcionou melhorias na perda de massa dos corpos de prova quando em contato com ácido sulfúrico.

Tabela 13 – Análise de variância e teste de Tukey.

Varição	Amostras	Valor F	Valor-P
Entre grupos	REF CPV, LAD-0, LAD-400, LAD-600	6,78	0,014

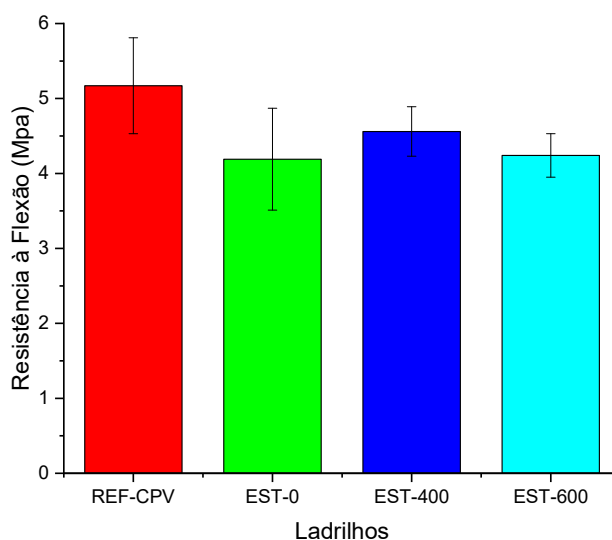
Fator	N	Média	Agrupamento
Referência	4	10,427	A
Sem calcinar	4	9,560	A B
400°C	4	10,463	A
600°C	4	8,647	B

Fonte: Autoria própria.

d) Ensaio de resistência à flexão

O resultado do ensaio de resistência a flexão (Figura 19) indica que todas as peças produzidas atingiram a resistência mínima indicada pela norma (NBR 9457, 2013). Os ladrilhos de referência com CPV obtiveram os melhores resultados com média de 5,17Mpa. As peças produzidas com o estéril não apresentaram diferenças significativas, o que demonstra mais uma vez o tratamento térmico não influenciou nas reações de hidratação do cimento. Os ladrilhos com estéril apresentaram resistência média de 4,19Mpa, já as peças com estéril a 400°C obtiveram 4,56Mpa e a 600°C 4,24Mpa.

Figura 19 – Ensaio de resistência a flexão dos ladrilhos.



Fonte: Autoria própria.

O resultado apresentou de acordo com a análise de variância ANOVA que todos os valores se apresentaram estatisticamente semelhantes (Tabela 14).

Tabela 14 – Análise de variância e teste de Tukey.

Variação	Amostras	Valor F	Valor-P
Entre grupos	REF CPV, LAD-0, LAD-400, LAD-600	0,81	0,523

4.4 Conclusão

A pesquisa avaliou a incorporação de estéril nos ladrilhos hidráulicos.

Em análise visual os ladrilhos apresentaram cores distintas, o maior poder de pigmentação e melhor homogeneidade foi verificado nos ladrilhos com estéril a 600°C.

A absorção de água e porosidade dos ladrilhos produzidos com estéril foram compatíveis com os ladrilhos de referência produzidos apenas com cimento, portanto não houve influência da incorporação do estéril nesse parâmetro.

No ensaio de ataque ácido, os ladrilhos calcinados a 600°C apresentaram a menor perda de massa, com média 8,64%. Portanto o tratamento térmico contribuiu para inibição de formação de fases nocivas e consequente melhoria na durabilidade.

Todas os ladrilhos produzidos com estéril apresentaram resistência mecânica satisfatória, acima do valor estabelecido pela norma (ABNT NBR 9457, 2013). As peças de referência apresentaram resistência média de 5,17Mpa, os ladrilhos com estéril obtiveram média de 4,19Mpa, e os ladrilhos com estéril tratados a 400°C e 600°C apresentaram respectivamente, 4,56Mpa e 4,24Mpa. O melhor desempenho das peças de referência já era esperado, visto que foi produzido com cimento sem adição mineral. No entanto, os ladrilhos com estéril chegaram a obter 88,20% da resistência das peças de referência, resultado satisfatório no que diz respeito a materiais cimentício suplementar.

Apesar do tratamento térmico não influenciar na resistência mecânica das peças, é importante salientar que a utilização como pigmento se mostra viável e mais vantajoso com relação a utilização de pigmento comercial, uma vez que

possibilita o reaproveitamento do material e consequente redução de custo na produção.

O uso do estéril como substituto parcial do cimento na produção de ladrilhos hidráulicos se mostrou viável, como uma forma de agregar valor em um material sem finalidade, diminuir o consumo de cimento e ainda contribuir com a metodologia de produção de ladrilhos hidráulicos.

4.5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR9457**: Ladrilhos Hidráulicos para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

CAMPOS, C. F. **Trajetória e significado do ladrilho hidráulico em Belo Horizonte**. 2011. 201f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

CARNEIRO, J. et al. Synthesis of ceramic pigments from industrial wastes : Red mud and electroplating sludge. **Waste Management**, v. 80, p. 371–378, 2018.

CAVALLI, A. F.; VALDUGA, L. Ladrilhos Hidráulicos: Reconstituição e Caracterização. In: XI Encontro Nacional de tecnologia no ambiente construído, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 2006, p. 4042–4050.

CORTES, M. D. F. **Valorização e identificação de padronagens de ladrilhos hidráulicos de 1920 a 1940, período art deco brasileiro, presentes em prédios e casas do centro histórico de Santa Maria/RS**. 2015. 153f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

DENGXIN, L. et al. Preparation of nano-iron oxide red pigment powders by use of cyanided tailings. **Journal of Hazardous Materials**, v. 155, n. 1–2, p. 369–377, 2008.

FIUZA, T. E. R. et al. Iron-based inorganic pigments from residue : Preparation and application in ceramic , polymer , and paint. **Dyes and Pigments**. v. 148, p. 319-328. 2018.

FONTES, W. C. et al. Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 395–412, 2018.

GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412–422, 2018.

GRANDCLERC, A. et al. Modelling of the sulfuric acid attack on different types of

cementitious materials. **Cement and Concrete Research**. v. 105, p. 126-133, 2018.

LAMAS, M. L.; LONGO, O. C.; SOUZA, V. C. A produção de ladrilho e o ofício de ladrilhar: método de produção de ladrilhos do século XVIII aos nossos dias. **Anais do Museu Paulista**. São Paulo, n. 26, p. 1-22, 2018.

LI, H. et al. Application of dry composite electroplating sludge into preparation of cement-based decorative mortar as green pigment. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 101–106, 2014.

LI, H. et al. Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1017–1026, 2016.

MAGALHÃES, L. F. DE et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020.

MÁRMOL, I. et al. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. v. 32, p. 617–622, 2010.

MARQUES, J. S. **Estudo do processo de produção de ladrilhos hidráulicos visando à incorporação de resíduos sólidos**. 2012. 119f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná.

PARK, B; CHOI, Y. C. Effects of fineness and chemical activators on the hydration and physical properties of high-volume fly-ash cement pastes. *Journal of Building Engineering*, v. 51, p.104-274, 2022.

PEREIRA, O. C.; BERNARDIN, A. M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 233–234, p. 103–111, 2012.

PRIM, S. R. et al. Synthesis and characterization of hematite pigment obtained from a steel waste industry. **Journal of Hazardous Materials**, v.192, p.1307-1313. 2011.

REIS, A. S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil**. 2008. 222f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.

Reis A. S., Tristão F. A. Tactile-floor tile hydraulic with addition residue improvement dimension stones. **IBRACON Structures and Materials Journal**. 2010; 3(4): 390-419.

SHEN, L. et al. Preparation of nanometer-sized black iron oxide pigment by recycling of blast furnace flue dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 177, n. 1–3, p. 495–500, 2010.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSSEN, J. **Supplementary cementitious materials**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 74, n. Blezard 2001, p. 211–278, 2012.

TAVARES, P. H. C. P. T. **Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito**. 2012. 153f. Tese de Doutorado -

Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, MG.

WAMZER, R. L. K. **O ladrilho hidráulico em interface com a arte e o design em Mato Grosso**. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT.