



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

MELISSA CUNHA DE RESENDE

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO DA LAGOA DE REJEITO DE UMA
INDÚSTRIA DE CERÂMICAS E APLICAÇÃO COMO POZOLANA

ARAXÁ – MG

2015

MELISSA CUNHA DE RESENDE

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO DA LAGOA DE REJEITO DE UMA
INDÚSTRIA DE CERÂMICAS E APLICAÇÃO COMO POZOLANA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de
Resende.

ARAXÁ – MG

2015

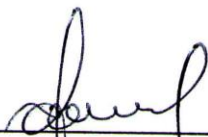
MELISSA CUNHA DE RESENDE

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO DA LAGOA DE REJEITO DE UMA
INDÚSTRIA DE CERÂMICAS E APLICAÇÃO COMO POZOLANA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheira de Minas.

Data de aprovação: 12/08/15

Banca Examinadora:



Domingos Sávio de Resende – Presidente da Banca Examinadora
Professor Doutor – CEFET-MG – Orientador



Hebert Radispiel Filho
Professor – CEFET-MG



Francisco de Castro Valente Neto
Professor Especialista – CEFET-MG

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas,
aos meus amados pais Almirio e Mariângela
e as minhas irmãs Marina e Renata.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais, irmãs, e a toda minha família que, com muito carinho, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e apoio constantes, principalmente à colega Lorenn Machado pela ajuda no projeto quando realizávamos os testes durante nossa bolsa de iniciação.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Domingos Sávio Resende, pela atenção e orientação dedicada o que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho e ao Prof. Francisco de Castro Valente Neto, pela disponibilidade e presteza durante as visitas à empresa.

À gerência da Indústria de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda., por sempre nos atender e por fornecer o resíduo cerâmico que foi pesquisado.

*Só se pode alcançar um grande
êxito quando nos mantemos fiéis a
nós mesmos.*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Atualmente, o aproveitamento de resíduos como material pozolânico na substituição parcial do cimento *Portland* tem sido cada vez mais estudado e estimulado, não somente pela melhoria das propriedades mecânicas que os resíduos podem proporcionar, mas principalmente pelos benefícios ao meio ambiente, visto que o setor da construção civil apresenta-se como um dos maiores consumidores de materiais naturais em seus processos e produtos. O objetivo deste trabalho é caracterizar o resíduo sólido da lagoa de rejeito gerado no processo de esmaltação de louças sanitárias e avaliar o seu potencial como adição mineral em compósitos cimentícios. Este trabalho envolveu a caracterização do resíduo pelas técnicas de granulometria a laser, microscopia eletrônica de varredura (MEV), densidade por picnometria, perda ao fogo, difração de raios-X (EDS) e espectrometria de fluorescência de raios- X. Para avaliar a atividade pozolânica do material foi utilizado o método de condutividade elétrica e para a realização do ensaio de compressão aos 28 dias foram confeccionados corpos de prova de argamassa com substituição de 35% da massa do cimento pelo resíduo. Espera-se com esta pesquisa mostrar um possível caminho para utilização deste resíduo como adição mineral em compósitos cimentícios, visando à diminuição do impacto ambiental.

Palavras-chave: Resíduo cerâmico. Pozolanas. Compósitos cimentícios. Reuso de materiais.

ABSTRACT

Currently, utilization of waste as a pozzolanic material in the partial substitution of Portland cement have been increasingly studied and stimulated not only by the improvement of the mechanical properties that can provide residues, but especially by environmental benefits, since the sector of construction presents itself as one of the largest consumers of natural materials in their processes and products. The objective of this study is to characterize the solid tailings pond waste generated in the enameling process of sanitary ware and evaluate its potential as a mineral addition in cement composites. This work involved the characterization of the residue by laser granulometry techniques, scanning electron microscopy (SEM), by pycnometry density, loss on ignition, X-ray diffraction (EDS) and -ray fluorescence spectrometry X. To assess the Pozzolanic activity of the material was used the electrical conductivity method and to carry out the compression test at 28 days were made of mortar specimens with replacement of 35% of the mass of cement for waste. It is hoped that this research shows a possible way to use this waste as mineral addition in cement composites, aiming at reducing the environmental impact.

Keywords: Ceramic waste. Pozzolan. Cementitious composites. Materials reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Distribuição geográfica da capacidade instalada de produção de revestimentos cerâmicos.....	19
Figura 3.2– Vista aérea da empresa Santa Clara.	21
Figura 3.3 – Ciclo de vida dos materiais.	22
Figura 3.4 – Fluxograma da produção cerâmica.....	25
Figura 3.5 – Construções antigas feitas com pozolanas. A) Coliseu (Roma); B) Panteão (Roma).	28
Figura 3.6 – Barragem e usina de Jupia (MS).....	29
Figura 3.7 – Caso de reação álcali-agregado.....	31
Figura 4.1 – Resíduo originado na limpeza das cabines de esmaltação.....	35
Figura 4.2 – Lagoa de rejeitos da empresa.....	37
Figura 4.3 - Amostra de resíduo cerâmico após a secagem.	38
Figura 4.4 – Amostra moída.....	39
Figura 4.5 – Teste de picnometria.....	41
Figura 4.6 - Amostra no cadinho após a calcinação – Ensaio de Perda ao Fogo.	43
Figura 4.7 – Materiais para a confecção dos corpos de prova com substituição de 35% de cimento pelo resíduo.....	46
Figura 5.1 – Curva da distribuição granulométrica do resíduo.	49
Figura 5.2 – Espectro de difratometria de raios-X da amostra.	50
Figura 5.3 – Fotomicrografia da amostra.	51
Figura 5.4 – Fotomicrografia da amostra em amplitude de aumento.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valor da produção nacional dos diversos setores cerâmicos.....	18
Tabela 3.2 – Estimativa de produção brasileira de louças sanitárias.....	19
Tabela 3.3 – Empresas de louças sanitárias no Brasil.....	20
Tabela 3.4 – Consumo estimado de matérias-primas minerais para sanitários.....	20
Tabela 3.5 – Emissão de CO ₂ na produção de revestimentos cerâmicos.....	21
Tabela 3.6 – Tipos de Cimento Portland.....	27
Tabela 3.7 – Exigências químicas.....	30
Tabela 3.8 – Exigências físicas.....	30
Tabela 3.9 – Principais compostos do cimento Portland.....	33
Tabela 3.10 – Equações de formação dos compósitos.....	33
Tabela 4.1 – Características do cimento utilizado no estudo.....	36
Tabela 4.2 - Frações granulométricas da areia normal.....	36
Tabela 4.3 Proporções de materiais utilizados para confecção dos compósitos cimentícios.....	46
Tabela 4.4 – Classificação dos materiais pozolânicos.....	47
Tabela 5.1 – Diâmetros D ₁₀ , D ₅₀ e D ₉₀ da amostra de resíduo.....	48
Tabela 5.2 – Composição química da amostra de resíduo e seus percentuais.....	49
Tabela 5.3 – Ensaio de determinação de atividade pozolânica – método físico.....	52

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento *Portland*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER - Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos
BH – Belo Horizonte
CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
cm – centímetro
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP – Cimento *Portland*
EDS – Difração de Raios-X
g- grama
g/cm³ - grama por centímetro cúbico
h – hora
Kg- quilograma
Km – quilômetro
Ltda – Limitada
MEV/SEM – Microscopia Eletrônica de Varredura
min – minuto
MG – Minas Gerais
ml – mililitro
mm – milímetro
MPa – megapascal
mS = mili Siemens
NBR – Norma Brasileira
PIB - Produto Interno Bruto
°C – grau Celsius
s – segundo
t – tonelada
µm - micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

- malha de peneiras

% - porcentagem

< - menor

> - maior

~ - aproximadamente

θ – theta

Al- alumínio

Al_2O_3 – óxido de alumínio – alumina

Ca – cálcio

CaO – óxido de cálcio – cal

Ca(OH)_2 – hidróxido de cálcio

Ca^{2+} - íons de cálcio

CO_2 – dióxido de carbono

Fe_2O_3 – óxido de ferro (III) ou óxido férrico

H_2O – água

MgO – óxido de magnésio

O - oxigênio

OH^- - hidroxila

Si - silício

SiO_2 – dióxido de silício – sílica

SO_3 – trióxido de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Indústria cerâmica nacional	18
3.1.1 Louças sanitárias	19
3.2 Resíduos	22
3.2.1 Classificação dos resíduos	24
3.2.2 Resíduos cerâmicos	24
3.2.3 Geração de resíduos na produção de louças sanitárias	26
3.3 Cimento <i>Portland</i>	26
3.3.1 Tipos de cimento	27
3.4 Pozolanas	27
3.4.1 Classificação das pozolanas	29
3.4.2 Composição química	30
3.4.3 Adição pozolânica em substituição parcial no cimento Portland	31
3.4.3 Verificação da atividade pozolânica	34
4 METODOLOGIA	35
4.1 Seleção de materiais	35
4.1.1 Resíduo	35
4.1.2 Cimento	35
4.1.3 Agregado miúdo	36
4.1.4 Água	36
4.2 Métodos	37
4.2.1 Coleta e preparo da amostra de resíduo	37
4.2.2 Ensaios de caracterização do resíduo	39
4.2.2.4 Difração de raios X	44
4.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	44
4.2.2.6 Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico	45
4.2.2.7 Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico	47

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Caracterização do resíduo	48
5.1.1 Granulometria a <i>laser</i>	48
5.1.2 Densidade por Picnometria	48
5.1.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	49
5.1.4 Perda ao Fogo.....	50
5.1.5 Difração de Raios-X	50
5.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	51
5.1.7 Determinação da Atividade Pozolânica – Método Físico.....	52
5.1.8 Determinação da Atividade Pozolânica – Método Químico.....	52
6 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da industrialização em grande escala, o uso de novas tecnologias e a diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos industriais gerados e a escassez de matérias primas vem se tornando um dos grandes problemas urbanos da atualidade.

O ramo de produtos minerais não metálicos da Indústria de Transformação que integra o segmento cerâmico de Louça Sanitária, não foge a essa regra e geram consideráveis volumes de resíduos, lodos minerais, sem uma disposição correta. Dessa maneira, a reciclagem dos resíduos gerados no beneficiamento de matérias-primas minerais e na produção de massa podem ter aplicações economicamente viáveis.

Há uma grande preocupação dos órgãos ambientais quanto à inviabilidade de lançamento desses resíduos resultantes das atividades industriais, os quais, se armazenados de forma inadequada, podem contaminar solos e corpos d'água. O estudo para o aproveitamento dos resíduos garantirá uma vida útil maior dos recursos naturais não renováveis.

O setor da construção civil é um dos maiores responsáveis pelo consumo dos recursos naturais extraídos e pela destinação dos resíduos, impactando o ambiente e a qualidade de vida da população. Os impactos ambientais ocasionados pela extração de argila e calcário, principais matérias-primas do cimento, o alto consumo energético e a elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera são os efeitos considerados mais danosos dessa indústria. (ALVES, 2002; METHA & MONTEIRO, 2008).

Desse modo, qualquer estudo a respeito de materiais que venham a substituir parcialmente o clínquer (cimento numa fase básica de fabrico), na fabricação do cimento *Portland* ou nos próprios concretos e argamassas por materiais suplementares, traz benefícios quanto à economia e ao meio ambiente. Assim, obter resíduos com aplicabilidade na incorporação de materiais cimentícios é um desafio na busca pelo desenvolvimento sustentável.

A caracterização e o estudo da viabilidade de aproveitamento do resíduo sólido da lagoa de rejeito de uma indústria de cerâmicas, mais precisamente de louças sanitárias, do distrito industrial do município de Araxá/MG, é o objeto de estudo deste trabalho. Esta pesquisa avalia as propriedades do material como

substituto parcial do cimento, propiciando imobilizar este rejeito, agregando-lhe valor econômico, e buscando um menor impacto no meio ambiente e no consumo de recursos naturais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar o resíduo sólido gerado no processo de industrialização de louças sanitárias, do distrito industrial do município de Araxá/MG, e avaliar seu potencial como adição mineral em compósitos cimentícios.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o resíduo da indústria de louças sanitárias;
- Avaliar a atividade pozolânica do resíduo;
- Avaliar a utilização do resíduo na substituição parcial do cimento *Portland*, através da confecção de corpos de prova conferindo o limite de resistência dessa incorporação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria cerâmica nacional

O Brasil devido ao crescimento da economia global, atualmente se coloca entre os cinco principais produtores no setor agropecuário, aviação, eletrodomésticos e revestimentos cerâmicos. Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos – ANFACER, no ano de 2005 o Brasil cresceu cerca de 7% do seu PIB (Produto Interno Bruto) no setor cerâmico e ampliou 25% das exportações, alcançando o segundo lugar como produtor mundial.

Noventa e quatro empresas constituem o setor de revestimentos cerâmicos no Brasil, distribuídas em 18 estados, produzindo 713 milhões de metros quadrados de revestimentos cerâmicos por ano (ANFACER, 2010). A Tabela 3.1 apresenta os valores da produção nacional para os diversos setores cerâmicos atuantes no Brasil.

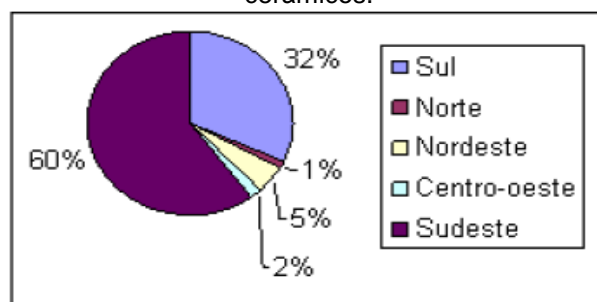
Tabela 3.1 – Valor da produção nacional dos diversos setores cerâmicos.

Segmento	Valor da Produção (1.000 US\$/ano)
Cerâmica Estrutural (Vermelha)	2.500.000
Revestimentos (Pisos e Azulejos)	1.700.000
Matérias Primas Naturais	750.000
Refratários	380.000
Cerâmica Técnica, Especiais, outras	300.000
Sanitários	200.000
Louça de Mesa e Adorno	146.000
Fritas, Vidrados e Corantes	140.000
Matérias Primas Sintéticas	70.000
Cerâmica Elétrica	60.000
Equipamentos para Cerâmica	25.000
Abrasivos	20.000
TOTAL DO SETOR	6.293.000

Fonte: SPRICIGO, 2005 *apud* PAIXÃO, 2011.

A maior concentração das empresas no país está nos estados de São Paulo e Santa Catarina, porém existe uma grande expansão na região nordeste para este seguimento (ANFACER, 2010). A Figura 3.1 mostra a distribuição geográfica da capacidade de produção de revestimentos cerâmicos no Brasil.

Figura 3.1 - Distribuição geográfica da capacidade instalada de produção de revestimentos cerâmicos.



Fonte: ANFACER, 2010.

3.1.1 Louças sanitárias

O ramo de Louças Sanitárias se integra aos produtos minerais não metálicos de transformação e tem como principais produtos de fabricação: bacias, caixas d'águas, bidês, lavatórios, mictórios, tanques de lavar roupas e acessórios.

No ano de 2008 a produção brasileira de louças sanitárias foi de 21 milhões de peças que corresponde a um faturamento de 1,8 bilhões de reais aproximadamente. Se comparado ao ano de 2006, houve um aumento de cerca de 30% no volume de vendas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Estimativa de produção brasileira de louças sanitárias.

Anos	Produção (milhões de peças)
2006	16
2007	18
2008	21

Fonte: COELHO, 2009.

A Tabela 3.3 apresenta as empresas produtoras de louças sanitárias no Brasil.

Tabela 3.3 – Empresas de louças sanitárias no Brasil.

Estado	Unidades - Cidade	Empresas
Paraíba	2 - João Pessoa	Santa Aliança, Elizabeth
	1- Recife	Roca (Celite)
Pernambuco	1- Caruaru	Luzarte
	1- Cabo de Sto. Agostinho	Deca (Monte Carlo)
Espírito Santo	1- Serra	Roca (Logasa)
	1- Santa Luzia	Roca (Celite)
Minas Gerais	2- Andradas	Icasa, Fiori
	1- Poços de Caldas	Togni
	1- Araxá	Santa Clara
Rio de Janeiro	1- Nova Iguaçu (desativ.)	Deca (Ideal Standart/IS)
	3- Jundiaí	Deca, Deca (IS), Roca
São Paulo	1- Taubaté	Hervy
	1- Itupeva	IDT Banheiras
Rio Grande do Sul	1- São Leopoldo	Deca

Fonte: ITP, 2002 *apud* COELHO, 2009.

A produção de cerâmica sanitária demanda uma variedade de matérias-primas naturais e sintéticas. As principais matérias-primas minerais que são utilizadas neste segmento, incluem caulim, argila e fundentes (originalmente compostos por feldspatos, atualmente substituídos por fundentes mais baratos, como as rochas feldspáticas) (Tabela 3.4). A qualidade destes minerais é de grande importância no processo produtivo (COELHO, 2009).

Tabela 3.4 – Consumo estimado de matérias-primas minerais para sanitários.

Matéria – prima	%	t/ano	Consumo por peça (Kg)
Argilas plásticas	20	60.000	2,6
Caulim	15	45.000	1,9
Leucofilito	25	75.000	3,3
Rochas feldspáticas	40	120.000	5,2
Total	100	300.000	13,0

Fonte: ITP, 2002 *apud* COELHO, 2009.

A matriz energética deste segmento é basicamente o consumo de combustível, essencialmente gás natural, nos processos de secagem e queima das peças. Para o funcionamento dos equipamentos na planta de produção, utiliza-se da energia elétrica (COELHO, 2009). Através da queima de gás natural nas indústrias de louças sanitárias, há uma grande emissão de CO₂ (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Emissão de CO₂ na produção de revestimentos cerâmicos.

Emissão de CO₂	/unidade de louça (Kg)	/tonelada de louça (Kg)
Mínimo	4,0	309
Máximo	10,2	784
Média Nacional	8,0	618

Fonte: COELHO, 2009.

3.1.1.1 A Indústria Santa Clara

A Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda. iniciou suas atividades no ano de 2001. Localizada no Distrito Industrial José Honorato da Silva, no Município de Araxá – Minas Gerais (Figura 3.2), a empresa Santa Clara teve como seu primeiro cliente a empresa “Esma Materiais de Construção”, situada no Município de Bambuí – Minas Gerais.

Figura 3.2– Vista aérea da empresa Santa Clara.



Fonte: <<http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>>. Acesso em 15 jul. 2015.

Considerando um raio de 600 km, a escolha do município de Araxá foi estratégica, por se tratar da região de maior concentração populacional do país e contribuinte de 73% do PIB nacional.

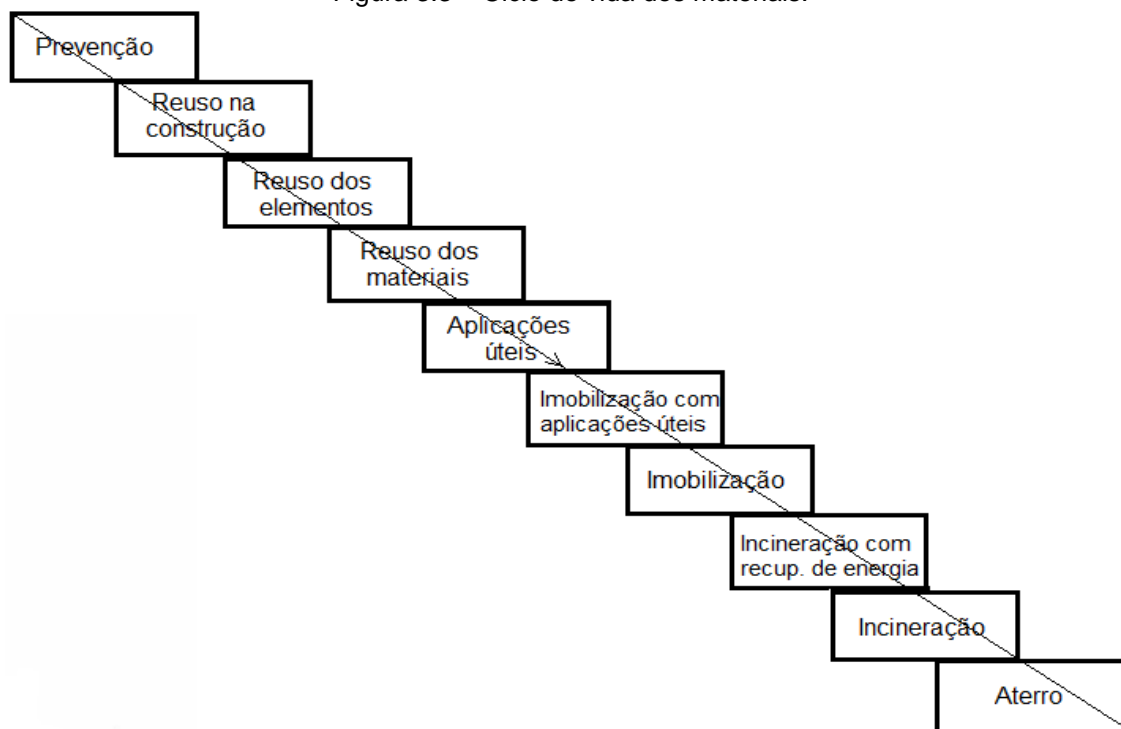
3.2 Resíduos

Os avanços tecnológicos têm demandado uma pressão elevada e crescente sobre os recursos naturais e exigindo uma quantidade considerável de matérias primas e produzindo um grande volume de resíduos. (BUTLLER, 2005 apud AGUILAR, 2008).

Grande parte dos processos de produção e industriais da transformação, possuem um alto potencial para fontes geradoras de resíduos, tanto na forma sólida, como na forma líquida e gasosa. Resíduos que provocam grandes impactos ambientais e colaboram para a degradação ambiental. (ALVES, 2008).

A reutilização destes resíduos em setores como a construção civil ou a utilização de processos que reduzam o volume gerado antes do descarte contribuem para um desenvolvimento sustentável (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Ciclo de vida dos materiais.



Fonte: DORSTHORST e HENDRIKS (2000) apud AGUILAR (2008) – (Adaptada pela autora).

A construção civil não vem medindo esforços para conscientizar os envolvidos na problematização de geração de resíduos e a reciclagem é praticada mundialmente. Na Holanda atinge uma marca surpreendente de 90% de reaproveitamento, se destacando dentro da Comunidade Européia que possui um

aproveitamento de 28% dos resíduos. No Brasil existe uma falta de informações sobre a produção e reciclagem de resíduos da construção civil, estudos apontam que a maior parte destes resíduos é utilizada na confecção de base e sub-base de rodovias. Outras aplicações encontradas através de estudos são na fabricação de argamassas, blocos de concretos e concretos sem fins estruturais (MULLER, 2006 apud AGUILAR, 2008).

Segundo a NBR 10.004 (2004) – Resíduos Sólidos: Classificação, norma brasileira que trata de resíduos sólidos, define resíduo como:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água.”

Já outras entidades, definem o resíduo como tudo que se pode agregar valor, gerando uma nova cadeia produtiva (GAZOLA, 2007).

O processo de reaproveitamento de resíduos pode ser submetido a três operações distintas:

- I. Recuperação: que envolverá a retirada de algumas substâncias presentes nos resíduos;
- II. Reutilização: que implicará a reaplicação do resíduo, sem qualquer transformação ou tratamento do mesmo;
- III. Reciclagem: após um processo de transformação, submeter o resíduo a um reaproveitamento (CONAMA, 2002).

Segundo Alves (2008), as pesquisas que envolvem a caracterização dos resíduos e estudam a viabilidade da utilização destes, promovendo o desenvolvimento tecnológico, tem um impacto positivo tanto no lado econômico quanto social. Porém os resíduos devem preencher alguns requisitos:

- I. Grandes volumes gerados;
- II. Baixo custo de aquisição;
- III. Possuir propriedades de atendam bem à finalidade desejada;
- IV. Problemas ambientais com sua estocagem.

3.2.1 Classificação dos resíduos

A partir da classificação dos resíduos é possível definir o seu aproveitamento. Segundo Rocha e John (2003) *apud* Alves (2008), a aplicação dos resíduos devem ser baseadas nas suas características, suas fases e condições dos mercados locais. As decisões técnicas e econômicas deve levar em consideração o tratamento do qual o resíduo necessita, manipulação, coleta, armazenagem, transporte e disposição final (ALVES, 2008).

No geral, os resíduos poderão ser aplicados em situações nas quais suas características físico-químicas apresentem um bom desempenho, como um todo ou em suas inúmeras fases, gerando um produto novo, com características melhores e gerando menor impacto ambiental do que as soluções tradicionais. Além disso, este novo produto deve ser capaz de competir no mercado ao qual ele pertence (PAIXÃO, 2011).

A NBR 10.004 (2004) classifica os resíduos de acordo com os riscos que eles oferecem ao meio ambiente e à saúde pública, deixando claro como estes devem ser controlados e manuseados. São classificados como:

- I. Classe I – perigosos;
- II. Classe II – não perigosos:
 - i. Classe II A – resíduos não inertes;
 - ii. Classe II B – resíduos inertes.

Segundo o CETEM (1998) *apud* Paixão (2011), alguns ramos da Engenharia (química, tratamento de minérios e metalurgia), possuem técnicas aplicáveis industrialmente que possibilitam separar as fases desejadas nas matérias primas, através do peneiramento, britagem e separação magnética.

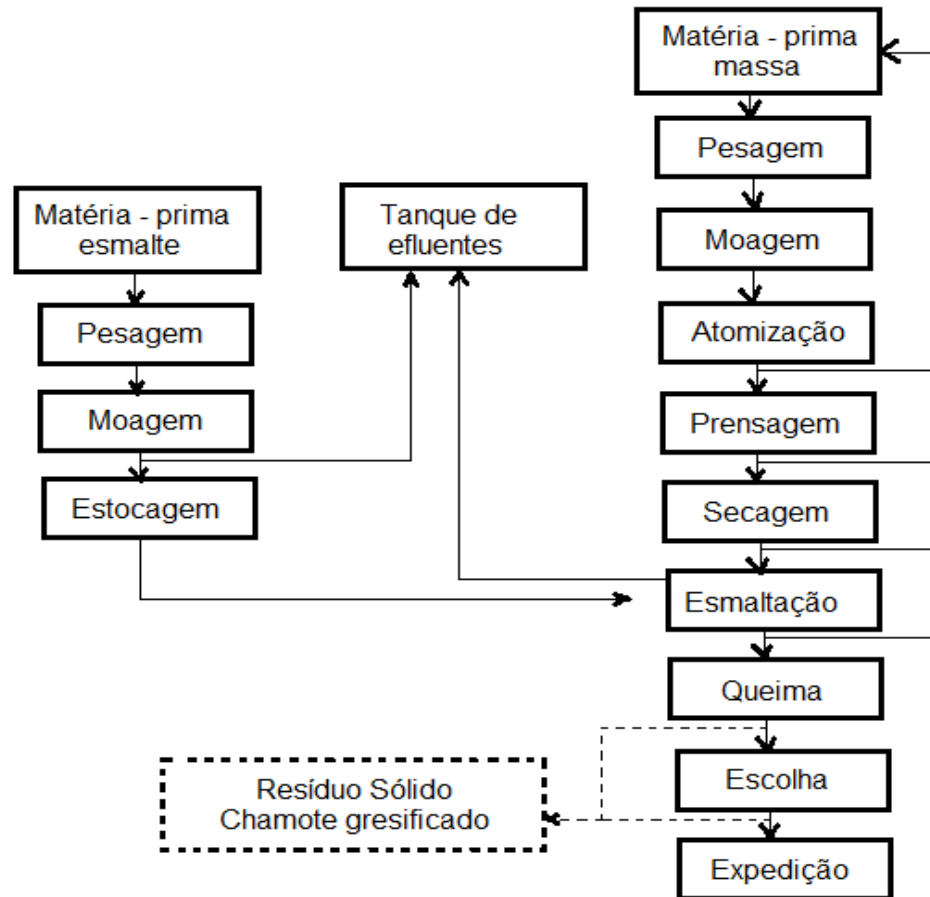
3.2.2 Resíduos cerâmicos

Produzido há mais de 14 mil anos, a cerâmica é o material artificial mais antigo produzido pelo homem. Derivada da palavra grega *kéramos* (“terra queimada”), este material possuem uma grande resistência, sendo constantemente encontrado em escavações (ANFACER, 2010).

A produção de cerâmicos de revestimentos envolve basicamente as etapas de: seleção, dosagem das matérias-primas, moagem, atomização, conformação,

secagem, esmaltação e queima (Figura 3.4). As fases de preparação das matérias-primas ocorrem por duas etapas: uma por via seca e outra úmida (ANFACER, 2010).

Figura 3.4 – Fluxograma da produção cerâmica



Fonte: PAIXÃO, 2011. (Adaptada pela autora)

A primeira etapa do processo envolve a moagem que ocorre por via úmida, seguido pela queima da pasta cerâmica líquida obtida através de um atomizador. Já a segunda etapa ocorre a moagem das matérias-primas a seco e a sucessiva regulagem de umidade através da pulverização. A queima dos revestimentos acontece através dos processos de biqueima (queima da placa cerâmica, quando ocorre a sinterização da placa de cerâmica e a queima do vidrado) e monoqueima (efetuada nas placas cerâmicas secas, seguida de apenas um tratamento térmico) (ANFACER, 2010).

O produto final da produção cerâmica nada mais é do que a transformação de compostos argilominerais, como o quartzo, feldspatos e calcários, todos eles matérias-primas naturais. A vantagem deste tipo de indústria, é que seus resíduos

em grande parte, são sólidos e podem ser manipuláveis e transformados (PAIXÃO, 2011).

3.2.3 Geração de resíduos na produção de louças sanitárias

Na produção das louças sanitárias são gerados basicamente três tipos de resíduos: gesso, lodo mineral e cacos. Os lodos são os resíduos provenientes do processo de beneficiamento das matérias-primas minerais, lavagem dos moldes, da linha de produção e sobras do acabamento das peças moldadas. O reaproveitamento de parte desse lodo é feito após um tratamento e uma prensagem em filtro. Os resíduos de esmaltação recebem uma destinação apropriada em aterros (COELHO, 2009).

O resíduo de gesso é oriundo do descarte dos moldes, que com a sua utilização contínua, perdem a eficiência. São produzidos em torno de 80 kg de resíduo de gesso por tonelada de peça produzida e praticamente todo esse resíduo é reaproveitado pela indústria cimenteira. Já os cacos, que são gerados nas perdas após a queima, são resíduos inertes e são descartados em aterros (COELHO, 2009).

3.3 Cimento *Portland*

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Este pó quando misturado à água, após secar, tornava-se tão duro quanto as pedras da ilha de *Portland*, muito usada na época nas construções da Grã-Bretanha. A mistura então foi patenteada e recebeu o nome de Cimento *Portland*, por apresentar cor e propriedades de dureza e solidez semelhantes das rochas da ilha britânica de *Portland* (BATTAGIN, 2010 apud NETO, 2013)

De acordo com a ABCP (2010), Cimento *Portland* pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Aglomerante, pois, é o material ligante que quando hidratado forma uma pasta resistente capaz de promover a união dos grãos de agregados.

3.3.1 Tipos de cimento

De acordo com Paixão (2011) diversos tipos de cimento são fabricados no Brasil, que correspondem à maior ou menor exaltação das propriedades dos seus principais componentes e resultam no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas. A Tabela 3.6 apresenta os tipos de cimentos e suas respectivas normas.

Tabela 3.6 – Tipos de Cimento *Portland*.

Tipo de Cimentos		Classe de Resistência (MPa)	Norma Brasileira
CP I	Cimento Portland Comum	25	NBR 5732
CP I – S	Cimento Portland Comum com Adição	32 a 40	
CP II – E	Cimento Portland composto com Escória de Alto Forno	25	NBR 11578
CP II – Z	Cimento Portland composto com Pozolana	32	
CP II – F	Cimento Portland composto com Filer (Calcário)	40	
CP III	Cimento Portland de Alto Forno	25 32 40	NBR 5735
CP IV	Cimento Portland Pozolânico	25 32	NBR 5736
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial		NBR 5733
RS	Cimentos Portland Resistente a Sulfatos		

Fonte: SOUZA e RIPPER, 1998 *apud* PAIXÃO, 2011

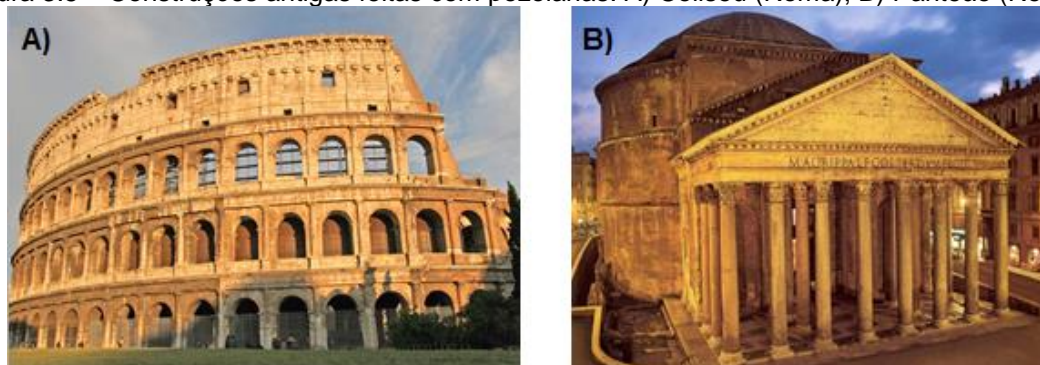
3.4 Pozolanas

O nome pozolana deriva da Roma antiga, em que a rocha vulcânica Zeolita (nome genérico para os silicatos hidratados de alumínio ou de cálcio) era utilizada pelos romanos. Segundo Massazza (1993) *apud* Oliveira (2012), eram chamados de pozolanas aqueles materiais de origem vulcânica, que reagem com a cal em presença de água, à temperatura ambiente, típico dos materiais da cidade italiana

de Pozzuoli. Através dos tempos, esta denominação estendeu-se a outros materiais que possuíam as mesmas características.

Ainda no século XIX, a pozolana era utilizada nas construções de estruturas hidráulicas e de alvenarias, antes mesmo do surgimento do cimento *Portland*. Porém, após o surgimento do cimento, a pozolana foi perdendo cada vez mais espaço, quando se compara as características entre ambos (OLIVEIRA, 2012). A durabilidade e resistência das pozolanas podem ser apreciadas em obras construídas há milhares de anos, como por exemplo: Coliseu (Figura 3.5A), basílicas, Panteão (templo dos Deuses) (Figura 3.5B), pontes, entre outros.

Figura 3.5 – Construções antigas feitas com pozolanas. A) Coliseu (Roma); B) Panteão (Roma).

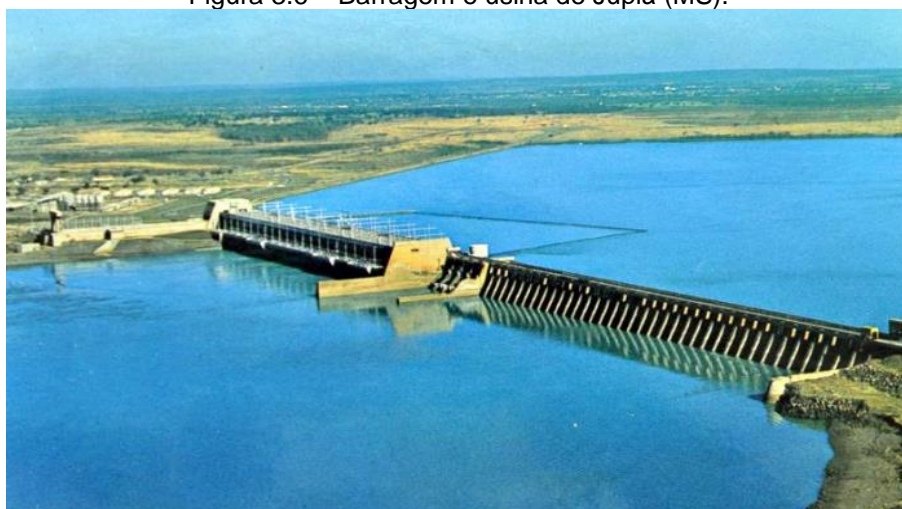


Fonte: http://www.fotosefotos.com/page_img/19663/coliseu;
[http://www.gsbrazil.net/forum/viewtopic.php?f=139&t=12356.](http://www.gsbrazil.net/forum/viewtopic.php?f=139&t=12356)

Devido às necessidades do mercado consumidor em relação à utilização de materiais sustentáveis e econômicos, com o decorrer do tempo, se fez necessário o uso da pozolana como substituição parcial do cimento (OLIVEIRA, 2012). A própria indústria cimentícia adotou o uso das pozolanas na formulação do cimento reduzindo a emissão de CO₂ e o consumo de matéria prima tornando o processo de fabricação do cimento mais sustentável.

As primeiras pozolanas artificiais surgiram por volta de 3.600 anos atrás, a partir de fragmentos de materiais cerâmicos moídos e que deram origem ao primeiro cimento hidráulico quando misturado à cal (FARIAS, 2000 apud VIEIRA, 2005). No Brasil, o primeiro registro do uso de pozolana remete ao período de construção da barragem de Jupia (Mato Grosso do Sul) em 1964 (Figura 3.6). Já em 1969, iniciou-se a comercialização do chamado cimento *Portland* pozolânico, que era composto por cinzas volantes da termelétrica de Charqueadas no Rio Grande do Sul.

Figura 3.6 – Barragem e usina de Jupιά (MS).



Fonte: <http://jmartins.org/>.

3.4.1 Classificação das pozolanas

Os materiais pozolânicos são aqueles que em temperatura ambiente, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos cimentícios de boa dureza. Existe uma ampla diversidade de materiais que fazem parte dessa composição e estão agrupados de forma a avaliar seu desempenho e características mineralógicas e químicas. Estas podem ser divididas em dois grupos (OLIVEIRA, 2012):

- I. Pozolanas naturais: material geralmente de origem vulcânica, mas também pode ter origem sedimentar ou fóssil. São exemplos de pozolanas naturais: tufo vulcânico, vidros vulcânicos, sílicas opalinas, terras diatomáceas.
- II. Pozolanas artificiais: são aqueles materiais oriundos de processos industriais ou subprodutos. Estão inclusos telhas e tijolos moídos. São pozolanas artificiais: argilas calcinadas, cinzas volantes (formados na combustão do carvão pulverizado ou granulado), sílica ativa, escória de alto-forno e outros (cinzas de resíduos vegetais, de rejeito de carvão mineral e rejeito sílico-aluminoso de craqueamento de petróleo).

Tanto as pozolanas naturais quanto as pozolanas artificiais necessitam de uma etapa de britagem e moagem para se adequarem aos requisitos como materiais pozolânicos para uso em concretos e cimentos (ALVES, 2008).

3.4.2 Composição química

Existe uma multiplicidade de constituintes ativos da pozolana, e os processos físico-químicos que envolvem suas reações são bastante complexos. É devido a isso a variedade de materiais pozolânicos, diversos em suas características (OLIVEIRA, 2012).

Segundo a ABNT NBR 12.653 (1992) – Materiais pozolânicos – Especificações, os materiais pozolânicos devem preencher os requisitos de exigências químicas e físicas, apresentadas nas tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente.

Tabela 3.7 – Exigências químicas.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Alcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12.653/1992

Tabela 3.8 – Exigências físicas.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
▯ com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
▯ com o cal aos 7 dias, em Mpa	6	6	6
▯ água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR 12.653/1992

Pozolanas “N” são certos materiais vulcânicos ácidos, argilas calcinadas, terras diatomáceas e “cherts” silicosos. Já as pozolanas “C”, são as cinzas provenientes da queima do carvão mineral em usinas. Os materiais da Classe “N” e “C” são pozolanas que obedecem aos requisitos aplicáveis na NBR 12.653/1992. A Classe “E” pertencem aquelas pozolanas que se diferem das outras duas classes (NETTO, 2006).

3.4.3 Adição pozolânica em substituição parcial no cimento Portland

De um modo geral as adições ao cimento melhoram certas características do concreto e preservam o ambiente ao aproveitar resíduos e diminuir a extração de matéria-prima.

Segundo Silveira (1996) *apud* Santos (2006), as pozolanas podem ser utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento, ou como aditivo em diferentes teores à massa.

Algumas características são conferidas ao concreto e argamassas quando se adiciona um material pozolânico ao cimento (GUEDERT, 1989 *apud* SANTOS, 2006):

- I. Menor calor de hidratação devido às trocas exotérmicas e reações atérmicas;
- II. Maior resistência ao ataque ácido devido a estabilização do hidróxido de cálcio e a menor relação de basicidade de CaO/SiO_2 .
- III. Maior durabilidade, evitando a formação de reações álcali-agregados e redução do diâmetro dos poros na pasta hidratada, reduzindo os ataques por cloretos e sulfatos (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Caso de reação álcali-agregado.



Fonte: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285390-2.aspx>.

Consegue-se ainda uma economia nos custos de energia e produção do cimento, conseqüentemente expandindo o tempo de exploração das jazidas de calcário e argilas e o período de produção da fábrica (SANTOS, 2006). A redução dos custos provavelmente foi um dos principais motivos do desenvolvimento de tecnologias para adição de minerais em cimentos *Portland*. Além disso, a necessidade de uma destinação ambientalmente correta para os resíduos, melhor desempenho mecânico de concretos e argamassas, redução da exploração de

recursos não-renováveis, e a redução da emissão de gás carbônico na atmosfera (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Mehta & Monteiro (2008), devido ao fato das pozolanas possuírem partículas finas, com elevada área superficial e tenderem ao maior consumo de água, elas contribuem para a redução dos espaços vazios gerados em concretos frescos que são formados devido à tendência de exsudação¹ e segregação². As pozolanas ainda oferecem a vantagem de reduzir a quantidade de calor liberado. Com isso as variações de volume são menores, reduzindo o aparecimento de fissuras no concreto (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993 *apud* NASCIMENTO 2011).

O uso de concretos com adição de pozolanas é bastante estudado atualmente, principalmente pelo aumento de compacidade e resistência do material, proporcionado pelas partículas finas que colaboram para o efeito *filler*³. O material cerâmico moído é um dos principais causadores deste efeito (NASCIMENTO, 2011).

As pequenas partículas da pozolana, menos reativas do que o cimento Portland, quando dispersas na pasta de cimento, gera um grande número de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Além do mais, este mecanismo torna a pasta mais homogênea e densa com respeito à distribuição dos poros devido às reações pozolânicas que ocorrem entre a sílica amorfa da adição mineral e o hidróxido de cálcio pelas relações de hidratação do cimento. Em adição, o efeito físico dos grãos mais finos permite um empacotamento mais denso com o cimento e reduz os problemas na zona de transição entre a pasta e o agregado. Como resultado, esta zona mais fraca é reforçada devido a maior aderência entre essas duas fases, promovendo melhoras na microestrutura e nas propriedades do concreto de um modo geral (MEHTA e AÏTCIN, 1990 *apud* NASCIMENTO, 2011).

O cimento *Portland* é um material mundialmente conhecido, comumente utilizado na construção civil. É um aglomerante hidráulico, gerado através da moagem do clínquer (material sinterizado rico em silicato de cálcio), com adição de 5% de gipsita (MEHTA & MONTEIRO, 1994 *apud* OLIVEIRA, 2012). A composição fundamental do cimento *Portland* é: cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), frações de magnésia (MgO), água (H₂O), e uma quantidade inferior

¹ Separação da pasta de concreto da mistura devido ao excesso de água (NASCIMENTO, 2011).

² Separação dos componentes do concreto fresco, na qual as partículas maiores de agregados têm maior tendência à sedimentação do que as partículas menores (NASCIMENTO, 2011).

³ Preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento por grãos de resíduos (HANNA, 2010 *apud* NASCIMENTO, 2011).

de anidrido sulfúrico (SO_3) adicionado após a calcinação. Existem ainda alguns compostos de cimento *Portland*, os principais estão demonstrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Principais compostos do cimento Portland.

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviações
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2008.

A hidratação do cimento ocorre com a formação de três compostos (MEHTA e MONTEIRO, 1994 *apud* OLIVEIRA, 2012):

- I. C – S – H: representam 50% a 60% dos sólidos da pasta hidratada do cimento, responsáveis pela resistência mecânica após o endurecimento.
- II. CH: 20% a 25% dos sólidos ocupados e pouco contribui para a resistência da pasta endurecida e pode oferecer efeito desfavorável para a durabilidade da pasta.
- III. Sulfoaluminatos de cálcio: correspondem 15% a 20% do volume da pasta endurecida. Apresenta pouca importância no processo de desenvolvimento das propriedades.

As pozolanas por apresentarem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e se rearranjar, formam produtos aglomerantes com maior durabilidade: o silicato de cálcio hidratado (C – S – H) e o aluminato de cálcio hidratado (C – A – H) (Tabela 3.10). Quando o hidróxido de cálcio que se desprende na hidratação do silicato reage com a pozolana, há uma produção extra de silicatos hidratados de cálcio, que por sua vez é o produto mais estável do cimento hidratado (OLIVEIRA, 2012).

Tabela 3.10 – Equações de formação dos compósitos.

Cimento Portland	Reação Pozolânica
Rápida	Lenta
$\text{C}_3\text{S} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$	$\text{Pozolana} + \text{CH} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H}$
$\text{C}_2\text{S} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$	

Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2008.

Apesar das claras vantagens apresentadas pela adição da pozolana no cimento, esta ainda apresenta algumas desvantagens, entre elas a necessidade do uso de um aditivo redutor de água, pois nesta mistura exige-se uma demanda maior de água, além da cura adequada para que ocorra a reação pozolânica (NETTO, 2006).

3.4.3 Verificação da atividade pozolânica

A atividade pozolânica é um método que permite avaliar a reatividade do material ou resíduo estudado e suas melhores qualidades quando empregado juntamente com o cimento *Portland*, melhorando significativamente as propriedades dos produtos frescos e pastas endurecidas (OLIVEIRA, 2012).

O termo atividade pozolânica compreende todas as reações que envolvem os constituintes dos componentes ativos da pozolana, hidróxido de cálcio e água; em geral este termo está relacionado a dois fatores, que são: quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a pozolana e a taxa com que tal combinação se processa (MASSAZZA, 1993 *apud* OLIVEIRA, 2012).

A determinação das características físicas e mineralógicas do material pozolânico, a dosagem adequada, condições de cura, temperatura, relação água/ (aglomerante + aditivo), é essencial para que haja um real benefício da adição (OLIVEIRA, 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 Seleção de materiais

4.1.1 Resíduo

O resíduo estudado neste trabalho é procedente de uma indústria cerâmica de médio porte, localizada no distrito industrial de Araxá.

Este resíduo é gerado pela empresa de industrialização de louças sanitárias, especificamente, originado com a esmaltação das peças e a limpeza das cabines para tal finalidade (Figura 4.1). Este material é disposto na lagoa de rejeito própria da empresa, que após ser decantado possui uma característica de uma lama densa com partículas finas e uma tonalidade cinza.

Figura 4.1 – Resíduo originado na limpeza das cabines de esmaltação.



Fonte: Acervo da autora.

4.1.2 Cimento

Neste estudo foi utilizado o cimento CP IV-32 RS, produzido pela empresa Cimentos LIZ com 35% de substituição de cimento por resíduo. As características do material estão apresentadas na Tabela 4.1 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4.1 – Características do cimento utilizado no estudo.

Cimento CP IV – 32 RS	
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20 °C
Massa Específica Absoluta	2,8 a 3,2 g/cm ³ a 20 °C
<u>Resistência à Compressão (MPa)</u>	
1 dia	7,5
3 dias	17,6
7 dias	25,0
28 dias	38,9

Fonte: Cimentos LIZ, 2015.

4.1.3 Agregado miúdo

A areia utilizada na produção dos corpos de prova envolvidos neste estudo possui a seguinte definição de acordo com a norma NBR 7214 (1992) – Areia normal para ensaio de cimento: Material natural quartzoso, extraído do Rio Tietê, na região do município de São Paulo, em direção à nascente, produzido e fornecido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e que satisfaz as condições específicas do capítulo 5 da norma citada anteriormente.

A areia normal recebe quatro diferentes denominações de acordo com as frações granulométricas descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Frações granulométricas da areia normal.

Areia Normal	
Denominação	Abertura (mm)
Grossa	2,4 a 1,2
Média grossa	1,2 a 0,6
Média Fina	0,6 a 0,3
Fina	0,3 a 0,15

Fonte: NBR 7214 (1992)

4.1.4 Água

A água empregada foi proveniente de abastecimento local, fornecida pela concessionária da cidade (COPASA). Para manter um padrão em todos os ensaios

a água utilizada foi submetida a um processo de destilação Laboratório de Edificações do Departamento de Minas e Construção Civil – CEFET/Araxá.

4.2 Métodos

Este tópico apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho: a coleta da amostra do resíduo, as proporções utilizadas e os ensaios realizados.

4.2.1 Coleta e preparo da amostra de resíduo

A coleta das amostras do resíduo foi feita na Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda. em Araxá/MG. A Figura 4.2 mostra a lagoa de rejeitos da empresa onde o resíduo é descartado em um primeiro momento.

Figura 4.2 – Lagoa de rejeitos da empresa.



Fonte: Acervo da autora.

Na etapa de amostragem do resíduo, tomou-se o cuidado de coletar uma amostra contendo somente resíduo e não solo. Porque a mesma tinha sido retirada da lagoa e disposta em um pátio nas instalações da empresa.

Após a coleta, o resíduo foi encaminhado ao Laboratório de Edificações do Departamento de Minas e Construção Civil – CEFET/Araxá, e posteriormente, seco em estufa a uma temperatura de aproximadamente 60°C durante 24h. A Figura 4.3 mostra parte da amostra seca.

Figura 4.3 - Amostra de resíduo cerâmico após a secagem.



Fonte: Acervo da autora.

Em seguida, o material foi encaminhado para o Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Minas e Construção Civil – CEFET/Araxá e moído em um moinho de bolas, com tempo de moagem de 20 minutos.

Esta etapa é necessária para proporcionar maior compacidade à mistura, além disso, segundo Cordeiro (2006) *apud* Resende (2013), o processo de cominuição de materiais cimentícios e aditivos minerais, mesmo sendo uma operação dispendiosa, é extremamente necessário para ativar as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material que, por sua vez, é inversamente proporcional ao tamanho das partículas. O aumento desta superfície específica está diretamente relacionado à cinética das reações pozolânicas. A Figura 4.4 representa parte da amostra após a etapa de moagem.

Após a moagem, o material foi passado na peneira de 9# para retirada de algumas impurezas grosseiras, tais como, pequenas folhas, grãos grandes do material que se destacaram, entre outras impurezas adquiridas durante o armazenamento do resíduo na lagoa ou no pátio.

Figura 4.4 – Amostra moída.



Fonte: Acervo da autora.

Posteriormente o peneiramento, o resíduo foi acondicionado em sacos plásticos, armazenados em local fresco, protegido do sol e da umidade até o momento de sua utilização.

4.2.2 Ensaios de caracterização do resíduo

Alguns ensaios de caracterização são necessários para se conhecer as características físicas e químicas de um determinado material, onde cada ensaio é específico de uma determinada característica. Para um conhecimento satisfatório das características do resíduo em estudo, submeteu-se o mesmo aos seguintes ensaios de caracterização:

- I. Granulometria a Laser;
- II. Densidade por Picnometria;
- III. Espectrometria de Fluorescência de Raios- X;
- IV. Perda ao Fogo;
- V. Difração de Raios-X;
- VI. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV;
- VII. Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico;
- VIII. Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico.

4.2.2.1 Granulometria a laser

Para a determinação das dimensões das partículas que constituem a amostra é necessário fazer a análise granulométrica.

O ensaio foi realizado em soluções líquidas, contendo a amostra do resíduo homogeneizado com uma pequena quantidade de dispersante hexametáfosfato. A solução foi dispersa por um agitador com o objetivo de separar as partículas agregadas, para que o resultado das dimensões reais das partículas fosse o mais satisfatório.

Para a contagem das partículas utilizou-se de um programa de computador, acoplado ao equipamento. A faixa de leitura do equipamento varia de 0,04 a 500 μm , possibilitando uma leitura de partículas bastante reduzidas. Os resultados são expressos em curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) versus diâmetro das partículas (μm) e em tabelas dos diâmetros D_{10} , D_{50} , D_{90} .

Esta análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH, com o auxílio de um equipamento denominado granulômetro a laser, da marca CILAS, modelo 1090.

4.2.2.2 Densidade por picnometria

Para a determinação da densidade real do material fez-se o teste de densidade por picnometria, utilizando a amostra em estado de pó, ou seja, após a moagem.

As atividades para a realização do teste foram pesar o picnômetro ausente de qualquer material ou umidade (A_1), encher o aparato com água até transbordar, atentando na secagem da água externa do picnômetro e, em seguida, pesar o picnômetro com água. A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água foi a massa utilizada. Conhecido o volume de água colocada no picnômetro, determinou-se a densidade da água.

Adicionou-se a amostra de resíduo no picnômetro e, em seguida, pesou-se o conjunto, obtendo-se A_2 . A massa de resíduo foi determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com a amostra e sem a amostra.

A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra foi determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com o resíduo + água (A_3) e a massa do picnômetro + resíduo (A_2).

O volume de água adicionado foi calculado pela relação entre a densidade da água e a massa de água adicionada no picnômetro e o volume do resíduo foi determinado pela diferença entre o volume do picnômetro e o volume de água adicionada (A_4). A densidade do resíduo foi obtida pela relação entre a massa da amostra adicionada e o volume desta.

Com os dados obtidos, foi possível realizar os cálculos a partir da seguinte fórmula:

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)}$$

onde:

d_s – densidade dos sólidos;

A_1 – massa do picnômetro;

A_2 – massa do picnômetro + amostra;

A_3 – massa do picnômetro + amostra + água;

A_4 – massa do picnômetro + água.

Figura 4.5 – Teste de picnometria.
a) picnômetro vazio; b) picnômetro + resíduo;
c) picnômetro + resíduo + água; d) picnômetro + água.



Fonte: Acervo da autora.

Este teste foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Minas e Construção Civil do CEFET/ Araxá.

4.2.2.3 Espectrometria por fluorescência de raios-X

A análise química por fluorescência de raios-X é um método não destrutivo e baseia-se na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada.

A energia dos raios-X incidentes relaciona-se com a diferença de energia entre os níveis envolvidos nas transições e tem valores característicos para cada elemento. Então, por comparação dentro de um banco de dados disponível no *software* do equipamento, identificam-se os elementos presentes nas amostras analisadas. (ALVES, 2008)

Os raios-X característicos são selecionados por um cristal difrator de acordo com seus comprimentos de onda, obedecendo à lei de Bragg da difração. Neste caso, o comprimento de onda selecionado ou difratado pode ser calculado pela equação da lei de Bragg a seguir:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin \theta$$

onde:

n – ordem de difração (representado por um n° inteiro);

λ – comprimento de onda da radiação;

d – distância interplanar;

θ – complemento do ângulo de incidência.

Além disso, é preciso moldar uma pastilha que é composta pela amostra sobre um leito de ácido bórico. A análise é considerada semiquantitativa, pois não se consegue a quantidade exata de cada um dos elementos, mas sim, as proporções destes por comparação.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH, utilizando um equipamento SHIMADZU.

4.2.2.4 Perda ao fogo

O ensaio químico de perda ao fogo demonstra a perda de massa do resíduo após aquecimento em mufla a 950°C.

No cimento, parte dessa perda de massa é referente ao dióxido de carbono (CO₂) presente no *filler* calcário, servindo como parâmetro para estimar o teor desta adição. A outra parte da perda ao fogo é a água evaporada do gesso, se o valor de perda ao fogo apresentar alteração indica uma hidratação maior do cimento. De acordo com o tipo de cimento, os valores máximos ficam entre 2,0 e 4,5%.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 5743 (1989) - Cimento *Portland* - Determinação de Perda ao Fogo. As atividades para realização do teste foram colocar 1g de amostra em cadinho de porcelana tarado e calcinar em forno mufla à temperatura de 950°C por 20 minutos. Após, esperar por aproximadamente 1 hora até o esfriamento do cadinho para o manuseio seguro e pesar o cadinho com a amostra calcinado. A Figura 4.6 representa a amostra de resíduo após a calcinação.

Figura 4.6 - Amostra no cadinho após a calcinação – Ensaio de Perda ao Fogo.



Fonte: Acervo da autora.

Com os dados obtidos, foi possível realizar os cálculos a partir da seguinte fórmula:

$$\%P.F. = \left(\frac{M1-M2}{M} \right) \times 100$$

onde:

$M1$ – tara do cadinho + massa de amostra ensaiada,

$M2$ – massa do cadinho + amostra, após a calcinação,

M – massa de amostra utilizada no ensaio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Fundição e Soldagem do Departamento de Eletromecânica do CEFET/Araxá.

4.2.2.5 Difração de raios X

A difração de raios-X é um dos principais métodos de caracterização microestrutural de materiais cristalinos. O resultado se apresenta em um gráfico que indica os picos característicos de cada espécie mineral. O equipamento lança um raio laser na amostra que, dependendo do tipo de cristal de cada mineral, devolve o raio a um determinado ângulo. Cada ângulo caracteriza um mineral presente na amostra, já que cada mineral apresenta composição mineralógica diferente. Qualitativamente, os picos caracterizam os principais minerais presentes na amostra.

Na análise difratométrica, realizada no resíduo em estudo, utilizou-se o difratômetro da marca SHIMADZU – XRD 7000 e foi feita no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH.

4.2.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A microscopia de varredura de feixes de elétrons não fornece apenas a imagem da amostra. Este ensaio também é capaz de fazer uma micro-análise e identificar a constituição química da amostra, através dos óxidos mais prováveis de serem formados. Nessa análise de caracterização microestrutural, um feixe de

elétrons é convertido a um ponto que incide na superfície da amostra. Parte do feixe é refletida e coletada por um detector, que converte este sinal em imagem. (ALVES, 2008)

No experimento em estudo, foi utilizado o detector de elétrons retro-espalhados, responsáveis pela geração de uma imagem de média resolução, mas com um bom contraste, tendo em vista a irregularidade na superfície da amostra. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/BH com um equipamento da marca SHIMADZU – SSX 550.

As amostras foram espalhadas sobre uma fita de carbono previamente colada a um porta amostra. Em seguida, foi feita a metalização da amostra, que consiste na precipitação de uma película de material condutor (carbono) sobre a superfície da mesma, possibilitando a condução de corrente elétrica.

4.2.2.7 Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico

O ensaio de pozolanicidade foi realizado para verificar se o resíduo em estudo possui características pozolânicas, de acordo com a norma NBR 5752 (1992) – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento *Portland* – índice de atividade pozolânica com cimento.

Seis corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram moldados com argamassa padrão, utilizando agregados com frações granulométricas normalizadas, de acordo com a norma NBR 7214 (1992) e cimento CP IV-32 RS.

Após, foram moldados outros seis corpos de prova de mesmas dimensões e mesmos agregados, porém foram substituídos 35% do volume do cimento pelo resíduo cerâmico, material este com perspectiva de apresentar características de pozolana. Os percentuais e quantidades para a confecção dos compósitos cimentícios estão apresentadas na Tabela 4.3 e na Figura 4.7 representa os materiais e quantidades para a confecção dos corpos de prova com substituição do cimento pelo resíduo.

Tabela 4.3 Proporções de materiais utilizados para confecção dos compósitos cimentícios.

Materiais	Massa necessária (g)	
	Referência (0%)	Resíduo (35%)
Cimento <i>Portland</i>	624	405,6
Resíduo Cerâmico	-	93,6
Areia	1872	1872
Água	300	300

Fonte: Acervo da autora.

Figura 4.7 – Materiais para a confecção dos corpos de prova com substituição de 35% de cimento pelo resíduo.



Fonte: Acervo da autora.

No dia seguinte, os corpos de provas foram retirados da forma e armazenados em uma bacia com água para permanecerem em cura durante 28 dias.

Após os 28 dias, os corpos de prova foram capeados com enxofre no topo e na base. A seguir os corpos de prova foram encaminhados para o Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Estradas e Transporte do CEFET/BH e submetidos ao ensaio de compressão axial para determinação de suas resistências mecânicas.

A resistência média dos corpos de prova da argamassa padrão foi comparada com a resistência média dos corpos de prova da argamassa com presença do resíduo. E para que o resíduo seja considerado pozolânico, é preciso que a

resistência média dos corpos de prova seja maior ou igual à 75% da resistência média daqueles com argamassa padrão.

As quantidades de água necessárias para produzir argamassas com índice de consistência de (225 ± 5) mm, de acordo com o estabelecido pela NBR 5752 (1992), foram determinados conforme a NBR 7215 (1996) – Cimento *Portland* – Determinação da resistência à compressão.

4.2.2.8 Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico

O ensaio para determinação de atividade pozolânica pelo método químico também foi realizado. Os métodos químicos baseiam-se, essencialmente, na quantidade de hidróxido de cálcio que o material consegue fixar.

Luxan *et. al* (1989), propuseram que a atividade pozolânica pode ser medida pela condutividade elétrica. Neste método, é definido um índice de atividade pozolânica baseado na variação da condutividade elétrica de 200 ml de solução saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , a 40°C , sob agitação constante de 5,0 g de pozolana. Após adição a condutividade decresce, pois existe uma menor quantidade de íons de cálcio Ca^{+2} e hidroxilas OH^- na solução, sendo o índice de atividade pozolânica definido como a relação entre a condutividade elétrica antes da adição do resíduo e a obtida após decorridos 120s da adição. Quanto maior a diferença de condutividade iônica da solução após a mistura de Ca(OH)_2 , maior a reatividade pozolânica do material.

A Tabela 4.4 traz a classificação de materiais pozolânicos proposta por Luxan *et. al* (1989).

Tabela 4.4 – Classificação dos materiais pozolânicos.

Pozolanicidade do material	Condutividade (mS) = mili siemens
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanicidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanicidade	> 1,2

Fonte: LUXAN, 1989.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Edificações do Departamento de Minas e Construção Civil do CEFET/ Araxá.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do resíduo

5.1.1 Granulometria a laser

O resultado do ensaio de granulometria a laser apresentou os diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , representando que, respectivamente, 10%, 50% e 90% do total da massa do material analisado possuem grãos com diâmetros abaixo dos valores indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} da amostra de resíduo.

Amostra	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm
Resíduo cerâmico	1,94	9,05	31,81

Fonte: Acervo da autora.

O ensaio mostrou que o material é bastante fino, sendo que 90% da massa total da amostra possui grãos com diâmetros inferiores a 31,81 μm e com 50% da amostra possuindo grãos com diâmetros inferiores a 9,05 μm . Estas dimensões de partículas conferem ao resíduo condições de atuar como adições minerais. A Figura 5.1 mostra a curva de distribuição granulométrica do resíduo.

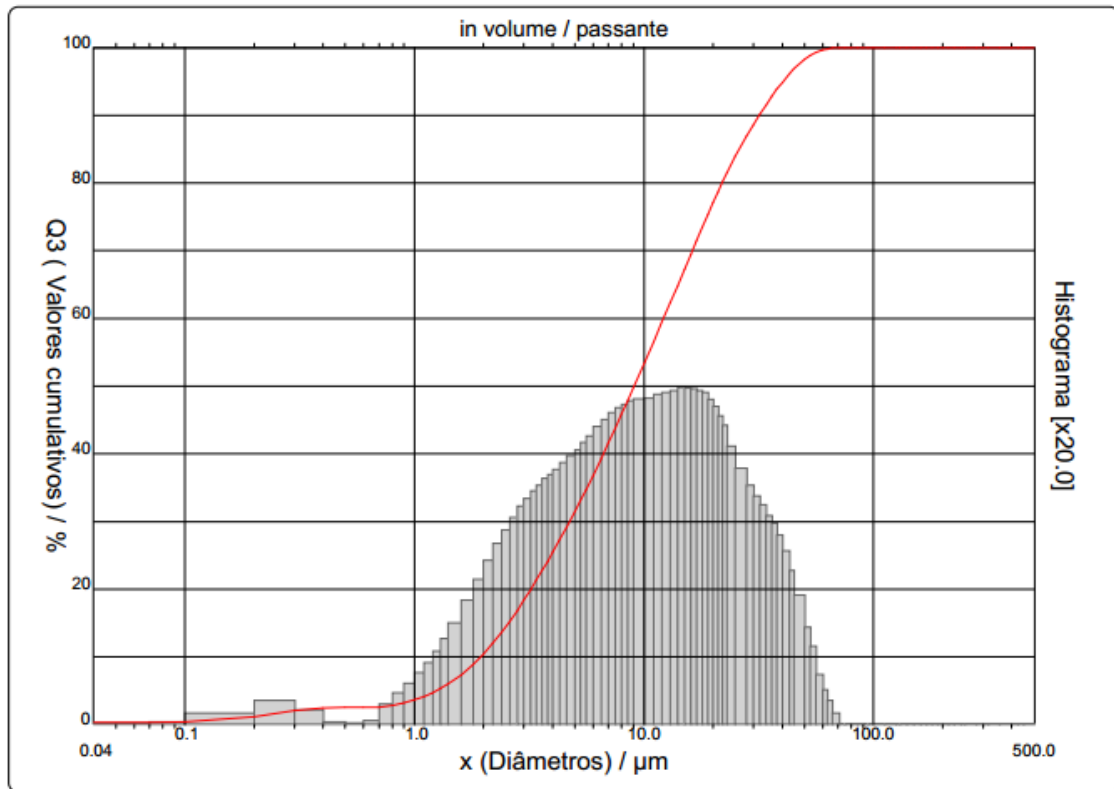
Notando a Figura 5.1 pode-se dizer que o resíduo tem uma granulometria bem graduada, possuindo uma variação no tamanho das partículas, principalmente, entre 0,70 e 70,00 μm , com uma distribuição bem uniforme dessas partículas.

De acordo com a norma NBR 12653 (1992), a amostra classe “E” necessita apresentar material retido na peneira 45 μm menor que 20%. Os resultados mostram que a ~90% do material passante na peneira de 45 μm .

5.1.2 Densidade por Picnometria

O resultado do ensaio de densidade por picnometria apresentou uma densidade de 2,63 g/cm^3 para o resíduo. O resultado confirmou o valor já esperado para as principais matérias primas do esmalte, feldspato e quartzo, as quais possuem densidades em torno de 2,62 g/cm^3 e 2,65 g/cm^3 , respectivamente.

Figura 5.1 – Curva da distribuição granulométrica do resíduo.



Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

5.1.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

A análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X determina a composição dos principais elementos químicos que compõem a amostra analisada, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição química da amostra de resíduo e seus percentuais.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	ZrO ₂	K ₂ O	ZnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	BaO	HfO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO
%	52,974	13,041	10,921	8,716	4,987	4,014	2,721	1,560	0,576	0,263	0,101	0,063	0,049	0,014

Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG

Os principais elementos químicos encontrados na amostra foram Silício (Si), Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Oxigênio (O), estes, encontrados em altos e médios percentuais.

De acordo com a norma NBR 12653 (1992), o requisito químico mínimo para ser considerada pozolana da classe “E” é que a amostra deve apresentar um

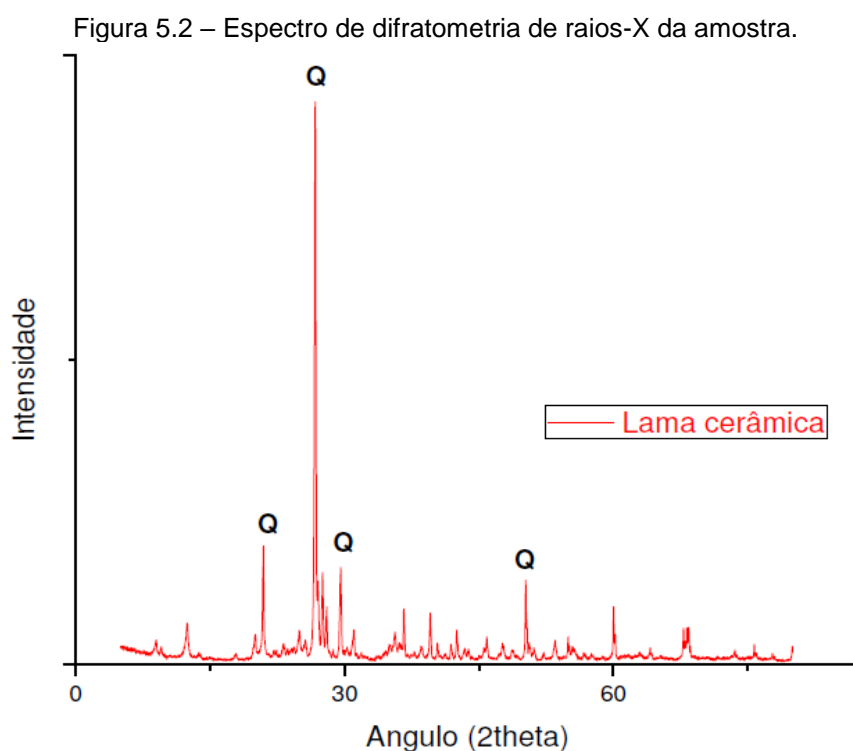
somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ maior ou igual 50. A amostra analisada apresenta um valor de ~ 65%, isto indica que a mesma pode ter comportamento de pozolana.

5.1.4 Perda ao Fogo

A perda ao fogo foi de 9,5%, sendo considerada relativamente alta. De acordo com a norma NBR 12653 (1992), uma outra exigência química para ser considerado um material pozolânico da classe “E” é que a amostra deve apresentar um percentual máximo de 6% após este ensaio. Entretanto, a amostra apresentou valor superior, indicando que o material não tenha propriedade de pozolana.

5.1.5 Difração de Raios-X

A difração de raios-X mostrou a composição mineralógica da amostra, apresentando um padrão de difração característico de material cristalino. Provavelmente a sílica presente na amostra seja sílica cristalina, indicando que o material apresentará pouca reatividade. O difratograma do resíduo está apresentado na Figura 5.2.



Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

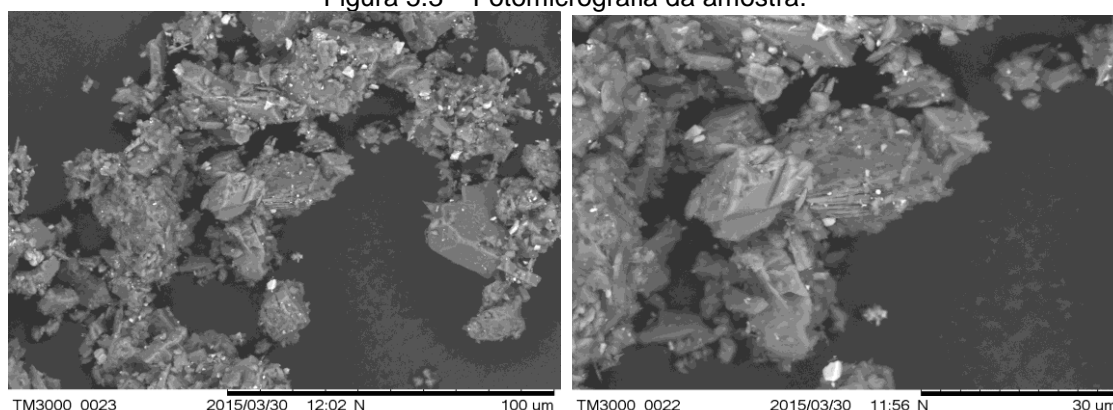
De acordo com o espectro apresentado na Figura 5.2, observa-se a presença de picos bem definidos de minerais como o Quartzo.

5.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A partir da análise realizada pelo MEV foi possível observar a morfologia das partículas do resíduo, com o auxílio de fotomicrografias capturadas na superfície da amostra.

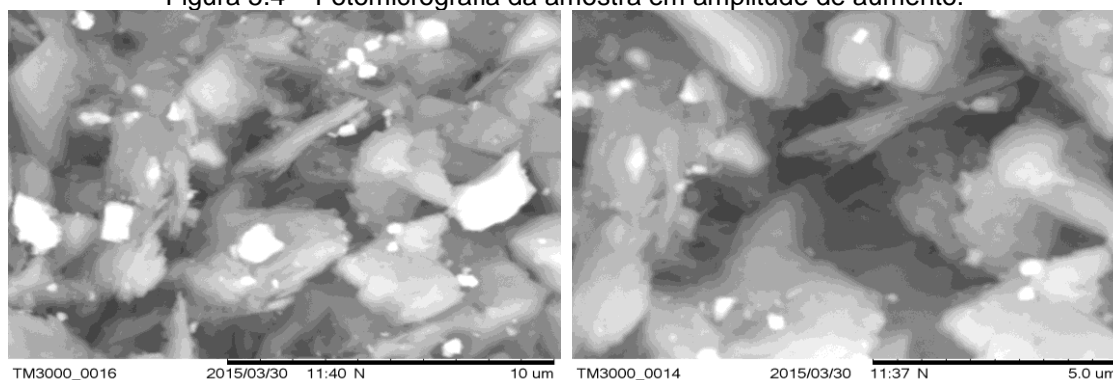
Avaliando a Figura 5.3, percebe-se que o material possui grãos de tamanhos heterogêneos com ângulos retos e arestas vivas. É possível observar partículas visivelmente nos tons de cinza mais claro que o restante da amostra. Tendo em vista que a imagem foi realizada com detectores de elétrons retroespalhados, pode afirmar que estas partículas possuem massa específica superior ao restante da amostra.

Figura 5.3 – Fotomicrografia da amostra.



Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

Figura 5.4 – Fotomicrografia da amostra em amplitude de aumento.



Fonte: Laboratório de Materiais – CEFET-MG.

Em amplitudes de aumento superiores é possível observar na Figura 5.4 partículas formadas por lamelas, de formas parecidas com as que ocorrem em argilas.

5.1.7 Determinação da Atividade Pozolânica – Método Físico

Para a determinação da atividade pozolânica, os resultados de resistências mecânicas dos corpos de prova submetidos à compressão axial aos 28 dias de idade, estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Ensaio de determinação de atividade pozolânica – método físico.

Argamassa	Resistência média à compressão axial (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
Referência 100% cimento	32	100
35% resíduo + 65% cimento	23	71,8

Fonte: Acervo da autora

Para que o material seja considerado pozolânico, deve possuir um índice de pozolanidade igual ou superior a 75%, ou seja, a média das resistências da argamassa constituída de 35% de resíduo e 65% de cimento (em volume) deve ter valor superior a 75% do valor médio das resistências da argamassa padrão, constituída apenas de cimento *Portland*. A argamassa padrão apresentou resistência média de 32 MPa, enquanto que a argamassa com resíduo apresentou média de resistência de 23 MPa, o que confere um índice de pozolanidade de 71,8%, índice este, inferior ao estabelecido pela NBR 5752 (1992), indicando, portanto, que o resíduo não possui atividade pozolânica, quando avaliado pelo método físico.

5.1.8 Determinação da Atividade Pozolânica – Método Químico

O ensaio de condutividade elétrica realizado de acordo com o método proposto por Luxan *et al.*, mostra que o resíduo não apresenta atividade pozolânica, pois a média do resultado foi de ~0,10, ou seja, a variação da condutividade foi < 0,4.

6 CONCLUSÃO

A caracterização química pelo método da fluorescência de raios-X mostrou que o resíduo apresenta, em sua composição, um somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ acima de 50%, valor mínimo estabelecido pela norma NBR 12.653 (1992) para que o material possa ser pozolânico. Contudo, a análise pela difração de raios-X mostrou que o resíduo possui uma estrutura cristalina, o que impede que o material seja pozolânico, tendo em vista que todas as pozolanas conhecidas possuem, pelo menos, parte da estrutura amorfa, ou seja, sem apresentar picos evidentes no difratograma de raios-X.

A análise granulométrica mostrou condições do resíduo de atuar como adições minerais devido a sua granulometria bem reduzida, porém com os resultados dos ensaios de determinação de atividade pozolânica, realizados pelos métodos físico e químico, pode-se concluir que o resíduo estudado não é um material pozolânico, além disso, o alto teor de perda ao fogo de acordo com a norma comprova que o resíduo nessas condições não pode ser considerado pozolânico.

A substituição de 35% de resíduo cerâmico por cimento diminui a resistência do material cimentício em relação à amostra referência. É necessário então, avaliar porcentagens menores de substituição.

Nessas condições o resíduo não pode ser utilizado como material pozolânico, mas caso o material passe por um processo de queima (tratamento térmico) que diminua o teor de matéria orgânica e modifique sua estrutura cristalina o material poderá ser utilizado como adição pozolânica. Outra consideração a ser feita, é que com esta granulometria, o resíduo não possui característica de pozolana, o que não impede que, com uma granulometria mais reduzida, ele possa apresentar atividade pozolânica.

REFERÊNCIAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Básico sobre cimento. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento>. Acesso em: 23 jul. 2015.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732 - Cimento *Portland* comum**. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5743 - Cimento *Portland* - Determinação de Perda ao Fogo**. Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento *Portland* – índice de atividade pozolânica com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 - Cimento *Portland* – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Especificação**. Rio de Janeiro, 1992.
- AGUILAR, M.T.P.; ZUZA, C.O.G.; PÁDUA, P.G.L.; BEZERRA, A.C.S. **O reuso de materiais de construção: a experiência de Uberlândia**. In: Falcão Bauer, 15, 2008, Uberlândia, MG.
- ALVES, M.S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia de UFMG, 2008. 132p. (Dissertação, Mestrado, Materiais de Construção Civil).
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br>. Acesso em: 13 de jul. 2015.
- BANCO DE IMAGENS. Disponível em: http://www.fotosefotos.com/page_img/19663/coliseu. Acesso em: 13 de jul. 2015.
- BANCO DE IMAGENS. Disponível em: <http://www.gsbrasil.net/forum/viewtopic.php?f=139&t=12356>. Acesso em: 13 de jul. 2015.

BANCO DE IMAGENS. Disponível em: <http://jmartins.org/>. Acesso em: 13 de jul. 2015.

BANCO DE IMAGENS. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285390-2.aspx>. Acesso em: 13 de jul. 2015.

COELHO, J.M. **Perfil de Louças Sanitárias e de Mesa**. In: Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Ministério de Minas e Energia, 2009.

INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE LOUÇAS SANITÁRIAS SANTA CLARA LTDA. Disponível em: <http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>. Acesso em: 13 de julho. 2015

GAZOLA, A.P. **Argamassa de assentamento e revestimento fabricadas com compósitos de cimento-madeira: Serragem da madeira de Pinus Taeda**. 110f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. Cement and Concrete Research 19, p. 63 – 68. Pergamon, 1989.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 573p.

NASCIMENTO, A.J. **Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha**. 65f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

NETO, J.A.M. **Caracterização de Estéril Argiloso para Utilização como Pozolana**. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2013. 21p.

NETTO, R.M. **Materiais pozolânicos**. 147f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

OLIVEIRA, A.N. **Estudo da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha**. 62f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2012.

PAIXÃO. C.A.B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2011. 62p. (Dissertação, Mestrado, Ciência e Tecnologia de Materiais).

Resolução CONAMA 307. **Dispõe sobre gestão de resíduos da construção civil**. Julho, 2002.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto**

desempenho. Florianópolis: Centro Tecnológico da Universidade de Santa Catarina, 2006. 267p. (Tese, Doutorado, Construção Civil).

VIEIRA, A.A.P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.** João Pessoa: Centro de Tecnologia de Universidade Federal de Paraíba, 2005. 107p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia Urbana).