



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

AVALIAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE LOUÇA SANITÁRIA EM
COMPÓSITOS CERÂMICOS

ANA CLARA MESQUITA CASTRO

ORIENTADOR

PROF. Dr. DOMINGOS SÁVIO DE RESENDE

ARAXÁ

2016

C355a Castro, Ana Clara Mesquita

Avaliação da reutilização do resíduo de louça sanitária em compósitos cerâmicos / Ana Clara Mesquita Castro. -- 2016.

79 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) -- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

1. Cerâmica. 2. Resíduos sólidos. I. Resende, Domingos Sávio de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 666.3

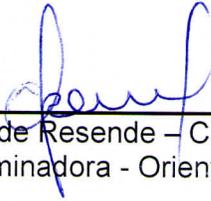
ANA CLARA MESQUITA CASTRO

AVALIAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE LOUÇA SANITÁRIA EM
COMPÓSITOS CERÂMICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro de Educação tecnológica de Minas
Gerais, Unidade Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro
de Minas.

Data de aprovação: 04 / 08 / 2016

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende – CEFET/ARAXÁ
Presidente da Banca Examinadora - Orientador



Profa. Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares - CEFET/ARAXÁ



Prof. Francisco de Castro Valente Neto - CEFET/ARAXÁ

Para a minha mãe que sempre esteve ao meu lado e hoje me ilumina do céu, seu brilho sempre me guiará.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma, e se tornaram especial cada um à sua maneira.

Aos meus pais e minha irmã que com muito carinho não mediram esforços para que essa etapa se concretizasse.

Ao meu orientador Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende, pela orientação, ensinamentos, dedicação que possibilitou a realização deste trabalho. Aos professores Francisco de C. Valente Neto e Dra. Delma Pereira Caixeta pela ajuda prestada.

Aos meus amigos que convivi diariamente e tornaram essa jornada mais fácil e divertida.

Ao diretor Eduardo Lusvarghi da Indústria de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda., pelo o apoio nas pesquisas e trabalho em conjunto. Um agradecimento em especial aos responsáveis pelo laboratório da empresa, Leandro e Lucas, que foi de grande ajuda para a realização dos testes.

Muito obrigado a todos, essa conquista é de todos nós!

A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original. Albert Einstein

RESUMO

A exploração dos recursos naturais, o crescimento populacional e, conseqüentemente, a alta demanda de produtos industriais fazem com que os estudos e pesquisas relacionadas à reciclagem e inclusão de resíduos em geral em produtos novos ou como componentes vêm ganhando destaque significativo. Este trabalho caracterizou o resíduo de louças sanitárias descartadas por não atenderem aos requisitos de produção ou possuírem quebras produzidas pela indústria Cerâmica Santa Clara, localizada no Distrito Industrial do município de Araxá – MG. O material descartado é depositado em um pátio da própria empresa e em seguida é “quebrado”, com o auxílio de equipamentos de grande porte, para a redução do volume, gerando um enorme passivo ambiental. Amostras deste resíduo foram coletadas in natura e passaram por um processo de britagem e moagem em laboratório, sendo caracterizadas por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura, espectrometria de fluorescência de raios X em energia dispersiva, difração de raios X e granulometria por peneiramento. Verificou-se que o resíduo de cerâmica atende as exigências químicas e f da NBR-12653(2014) para utilização como pozolana do tipo E. Foi realizada a substituição do granito São Jerônimo, por resíduo cerâmico moído na composição da massa cerâmica (barbotina), nos percentuais de 5, 10, 25, 50 e 100% para confecção de louça sanitária. As misturas foram caracterizadas mecanicamente por ensaio de ruptura na flexão, retração linear na queima e na secagem, perda ao fogo, deformação após a queima e absorção de água. Os resultados obtidos, excetuando se as substituições de 50 e 100% para módulo de ruptura na flexão, foram superiores ao valor mínimo previsto pela norma utilizada na indústria cerâmica. Os resultados deste trabalho de conclusão de curso indicam a reutilização deste resíduo na linha de produção cerâmica ou em compósitos cimentícios, o que contribui para um aumento da vida útil dos aterros sanitários e para o descarte correto de um passivo ambiental.

Palavras-chave: resíduos; barbotina; adição mineral; pozolana.

ABSTRACT

The exploitation of natural resources, population growth, and consequently, the high demand for industrial products lead to studies and research related to recycling and inclusion of general waste into new products or as components. This study characterized the sanitary ware waste discarded by not meeting the production requirements or have breaks produced by the Ceramic Santa Clara industry, located in the industrial district of the city of Araxá - MG. The waste material is deposited at the company's yard and then it is "broken", with the aid of large equipment, to reduce the volume, generating enormous environmental liability. Samples of this waste were collected in nature and went through a process of crushing and grinding in laboratory. It was characterized by the techniques of scanning electron microscopy, fluorescence spectrometry of X-ray in dispersive energy, X-ray diffraction and particle size by sieving. It has been found that the ceramic residue meet the chemical requirements of ISO-12653 (2014) for use as pozzolana type E. The granite São Jerônimo was replaced by crushed ceramic waste in the composition of the ceramic mass. It was used five percentage of replacemet for the production of sanitary war, 5, 10, 25, 50 and 100%. The mixtures were mechanically characterized by rupture test in flexion, linear shrinkage on drying and burning, loss on ignition, deformation after burning and water absorption. The results, except for the replacement of 50 and 100%, for the modulus of rupture in bending were higher than the minimum amount set by the regulation in ceramics industry. The results of this work indicate that the reusing of this waste in ceramic production line or cement composites is viable, which contributes to an increase in the useful life of landfills and for the proper disposal of an environmental liability.

Keywords: waste; barbotine; mineral addition; pozzolan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fabricação de sanitários, de acordo com Coelho (2009).....	9
Figura 2.2 - Fluxograma de preparação da barbotina segundo Cavalcante (2005). .	12
Figura 2.3 - Vista da empresa Santa Clara segundo http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm	17
Figura 2.4 – Linha de produção automatizada para caixas acopladas e tampas segundo http://jornalaraxa.com.br/app/pub/santa/santa.html	17
Figura 2.5 - Matérias primas in natura dispostas no pátio da empresa.	18
Figura 2.6 - Processo produtivo Santa Clara simplificado.	19
Figura 2.7 - Caracterização e classificação dos resíduos sólidos	22
Figura 2.8 - (A) Panteon de Roma; (B) Aqueduto de Pont du Gard na França, de acordo com Vieira (2005).	25
Figura 2.9 - Reação pozolânica segundo Vieira (2005).	26
Figura 2.10 - Construção da usina hidrelétrica de Jupia – MS segundo http://www.3lagoas.com.br/turismo/arquitetonico/usina-hidreletrica-de-jupia	27
Figura 3.1 - Amostra disposta no pátio da empresa.....	32
Figura 3.2 - Lupa Binocular.	34
Figura 3.3 - Peneira vibratória suspensa.....	35
Figura 3.4 - (A) 200 gramas de material para o ensaio; (B) Água destilada utilizada no ensaio; (C) Mistura com consistência plástica.....	36
Figura 3.6 - Ensaio de Limite de Liquidez (Casagrande).	37
Figura 3.7 - Calcinação da amostra em forno mufla.....	39
Figura 4.1 - Moinho de bolas laboratorial.	43

Figura 4.2 - (A) 100 ml utilizados para o peso específico para determinar a % de resíduos; (B) material passando pela peneira de 325# (0,044 mm) com a ajuda de água corrente e uma baqueta de madeira. (C) material retido na peneira sendo transferido para uma cápsula com auxílio de uma piceta.	47
Figura 4.4 - Fator do Viscosímetro.	49
Figura 4.8 - Corpos de provas já confeccionados.	52
Figura 4.10 - Como o corpo de prova é colocada para queima.....	57
Figura 4.11 - Corpo de prova após a queima sendo medido o ângulo de deformação.	57
Figura 4.12 - Obtenção dos corpos de prova para a determinação de absorção de água.	58
Figura 4.13 - Corpos de prova em cozedura.	59
Figura 5.1 - Amostra vista através da lupa binocular.	60
Figura 5.2 - Curva de Distribuição granulométrica.	61
Figura 5.4 - Espectro de difratometria de raios x da amostra segundo Laboratório de materiais – CEFET MG.	66
Figura 5.5 - Micrografia em amplitude de aumento da amostra.	67
Figura 5.6 - Determinação do modulo de ruptura cru.....	71
Figura 5.7 - Teste de fundência da amostra.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais produtos de cerâmica branca segundo Cavalcante (2005).....	6
Tabela 2.2 - Produção mundial de louça sanitária segundo Albuquerque (2009) adaptado da Associação Brasileira de Cerâmica (2009).....	8
Tabela 2.3 - Valor da produção nacional dos setores cerâmicos atuantes no Brasil segundo Paixão (2011).	14
Tabela 2.4 - Estados brasileiros produtores de matérias-primas minerais, de acordo com Albuquerque (2009).	15
Tabela 2.5 - Empresas de louça sanitária no Brasil segundo Coelho (2009).	16
Tabela 2.6 – Formulação da barbotina segundo Industria de Louças Sanitárias Santa Clara.....	18
Tabela 2.7 - Requisitos químicos pela NBR 12653 (2014).	28
Tabela 2.8 - Requisitos físicos pela ABNT NBR 12653 (2014).	29
Tabela 4.1 - Formulação da barbotina segundo Industria de Louças Sanitárias Santa Clara.....	42
Tabela 4.2 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova padrão.	43
Tabela 4.3 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 100% de substituição do granito.....	44
Tabela 4.4 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 50% de substituição do granito.....	44
Tabela 4.5 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 25% de substituição do granito.....	45
Tabela 4.6 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 10% de substituição do granito.....	45
Tabela 4.7 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 5% de substituição do granito.....	45
Tabela 5.1 - Análise Granulométrica	61
Tabela 5.2 - Resultado do teste de Limite de Plasticidade.....	62
Tabela 5.3 - Resultado do teste de Limite de Liquidez.....	63
Tabela 5.4 - Teor de umidade das amostras.....	63
Tabela 5.5 - Testes de Perda ao fogo.	64

Tabela 5.6 - Composição química obtida pela espectrometria de fluorescência de raio-X.	65
Tabela 5.7 - Resultados dos experimentos obtidos para avaliação do índice de pozolanicidade da amostra e resultado esperados.	67
Tabela 5.8 - Resultado dos pesos específicos.	68
Tabela 5.9 - Resultado da determinação da porcentagem de resíduos.	68
Tabela 5.10 - Resultado da padronização da reologia.	69
Tabela 5.11 - Resultado da determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem.	69
Tabela 5.12 - Resultado da determinação da porcentagem de resíduos.	70
Tabela 5.13 - Resultado da determinação do módulo de ruptura cru.	70
Tabela 5.14 - Resultado da determinação linear de secagem, queima e total.	71
Tabela 5.16 - Resultado da absorção de água.	72

ABREVIATURAS E SÍGLAS

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CRQ - Conselho Regional de Química.

IP - Índice de Plasticidade.

LL - Limite de Liquidez.

LP - Limite de Plasticidade.

Fb – Fator Brookfield.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

VD – Velocidade de Deposição.

LL – Limite de Liquidez.

LP – Limite de Plasticidade.

NP – Não apresenta limite de Plasticidade.

NL – Não apresenta limite de Liquidez.

– Mesh.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Justificava	1
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo geral	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Materiais Cerâmicos	4
2.1.1. Classificação dos materiais cerâmicos.....	4
2.1.1.1. Cerâmica branca.....	5
2.2. Considerações sobre louças sanitárias.....	7
2.2.1. As matérias primas.....	8
2.2.1.1. Argilas.....	9
2.2.1.2. Caulins	10
2.2.1.3. Feldspatos	10
2.2.1.4. Quartzo.....	10
2.2.1.5. Filito.....	11
2.2.1.6. Produção da massa	11
2.2.1.7. Reologia da Massa.....	12
2.2.1.8. Produção de esmalte.....	12
2.2.1.9. Fundição	13
2.2.1.10. Sinterização	13
2.3. Panorama da indústria de cerâmicos e sanitários nacionais	13
2.3.1. Cerâmica Santa Clara	16
2.4. Resíduos Sólidos	20
2.4.1. Resíduos de louças cerâmicas.....	23
2.5. Aproveitamento de resíduos cerâmicos	24
2.5.1. Aproveitamento de resíduos cerâmicos como Adições Minerais	24
2.5.2. Pozolanas.....	24

2.5.3. Reutilização de resíduos em cerâmicos	29
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Amostra.....	32
3.2. Caracterização Física	33
3.2.1. Análise tátil visual	33
3.2.2. Análise granulométrica	34
3.2.3. Limite de Plasticidade.....	35
3.2.4. Limite de Liquidez.....	37
3.3. Caracterização química e morfológica	38
3.3.1. Determinação de umidade	38
3.3.2. Perda ao fogo.....	39
3.3.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios X.....	40
3.3.4. Difração de Raios X.....	41
3.3.5. Microscopia Eletrônica de varredura – MEV	41
4. MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA	42
4.1. Produção da Massa	42
4.1.1. Peso Específico.....	46
4.1.2. Determinação da Porcentagem de Resíduos.....	46
4.1.3. Reologia (Viscosímetro Brookfield)	48
4.1.4. Determinação da Velocidade de Deposição (VD) e tempo de secagem.	50
4.1.5. Avaliação do Destacamento e Tato.....	51
4.1.6. Fundição dos Corpos de prova.....	52
4.1.7. Determinação do Módulo de Ruptura a Flexão	53
4.1.8. Determinação da Retração Linear.....	54
4.1.8.1. Determinação da Retração Linear após secagem	54
4.1.8.2. Determinação da Retração Linear após queima	55
4.1.8.3. Determinação da Retração Linear Total.....	55
4.1.9. Determinação da deformação dos corpos de prova após queima	56
4.1.10. Determinação da Absorção de Água.....	57
4.1.11. Teste de fundência do material	59

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1. Caracterização física.....	60
5.1.1. Análise Tátil Visual	60
5.1.2. Análise granulométrica	60
5.1.3. Limite de Plasticidade (LP).....	62
5.1.4. Limite de Liquidez (LL)	63
5.2. Caracterização química	63
5.2.1. Determinação de umidade	63
5.2.2. Perda ao fogo	64
5.2.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios X.....	64
5.2.4. Difração de Raios X.....	65
5.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	66
5.3. Avaliação do índice de pozolanicidade	67
5.4. Modelagem dos corpos de prova.....	68
5.4.1. Peso específico	68
5.4.2. Determinação da Porcentagem de Resíduos.....	68
5.4.3. Reologia	69
5.4.4. Determinação da Velocidade de Deposição (VD) e tempo de secagem	69
5.4.5. Avaliação do destacamento e tato.....	70
5.4.6. Determinação do Módulo de ruptura à flexão cru.....	70
5.4.7. Determinação da Retração Linear.....	71
5.4.8. Determinação da deformação dos corpos de prova após queima	72
5.4.9. Determinação da Absorção de Água.....	72
5.4.10. Teste de fundência do material	72
6. CONCLUSÃO.....	74
7. REFERÊNCIAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Este é o Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas do CEFET/ARAXA da aluna Ana Clara Mesquita Castro sob a orientação do Prof. Dr. Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende, desenvolvido no Departamento de Minas e Construção Civil, no âmbito das disciplinas TTC I e II, ministrada pelo Prof. Dr. Maurício Antônio Carneiro. O material de estudo foi o resíduo de louça sanitária, proveniente da Cerâmica Santa Clara em Araxá, visando a sua reutilização em compósitos cerâmicos.

1.2. Justificava

Com os avanços tecnológicos, aumento do número de indústrias, o alto consumo de bens, além de promover o crescimento econômico, ocasiona o aumento da produção de lodos e resíduos industriais (Hansen *et al.* 2015). A forma incorreta de disposição destes resíduos acaba por produzir efeitos negativos de poluição visual e ambiental (Medeiros *et al.* 2010).

Segundo a ABNT NBR 10004 (2004), resíduos sólidos são todos aqueles resíduos encontrados na forma sólida ou semissólida, oriundos de atividades industriais, domésticas, agrícolas, hospitalares, comerciais, de serviços e de varrições, bem como lodos provenientes de sistemas de tratamento das águas, resíduos gerados por equipamentos de controle de poluição e determinados líquidos que por suas particularidades se tornam inviáveis de serem lançados em redes públicas de esgoto.

Após o ciclo produtivo de louças sanitárias, aquelas que apresentam algum defeito de fabricação ou que não apresentam as condições exigidas para a sua comercialização, são estocadas e apresentam uma destinação incerta. Aquelas peças que apresentam a mínima condição de segurança e qualidade são vendidas como

produtos de segunda mão para países menos desenvolvidos, enquanto que as demais permanecem estocadas por um longo período, até serem compactadas por rolos compressores e se tornam parte do “calçamento” da empresa fabricante.

Em vista disso, vem sendo desenvolvidos estudos no sentido de valorizar esse tipo de resíduo, utilizando-o como matéria prima para produção da massa cerâmica (barbotina), substituindo parcialmente o granito pelo resíduo moído ou aplicando-o como pozolana. Tais soluções são interessantes no ponto de vista ambiental. Uma vantagem adicional da incorporação desse resíduo no processo de produção é a diminuição do uso de recursos naturais e o aumento da vida útil dos aterros sanitários.

Segundo a ABNT NBR 5736 (1991), materiais pozolânicos são ricos em sílica ou sílica/alumina que apresentam quase nenhuma atividade aglomerante por si só, porém quando reduzidos a granulometria devidamente fina, ao entrar em contato com a água, em temperatura ambiente, reage com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias. As pozolanas apresentam duas aplicações: podem ser utilizadas como substituinte parcial do cimento *Portland* ou como adição frações variáveis em relação à massa ou volume de cimento (Santos 2006).

A vantagem do reaproveitamento e a aplicação do resíduo como pozolana estão relacionados à redução do consumo de matérias-primas e no consumo de energia gasta para a fabricação do cimento e na redução dos impactos ambientais e atmosféricos. Além disso, a conversão de um pátio lotado de resíduos de louças sanitárias, que com o passar do tempo vai se tornar inviável apenas a trituração e compactação deste material, se transforma em lucro para a empresa através da reutilização do resíduo em argamassas e concretos.

De outra forma, se o material estudado apresentar características técnicas suficientes para substituir parcialmente ou totalmente o granito na confecção da barbotina (massa cerâmica) será necessário avaliar os custos como moagem e gastos com consumo de energia elétrica o que não foram objetivos de estudo neste trabalho.

Assim, o desenvolvimento deste trabalho almeja caracterizar os resíduos de louças sanitárias descartadas após o processo produtivo de uma indústria de cerâmicas localizada no distrito industrial do município de Araxá – MG, buscando uma aplicação economicamente viável deste rejeito, através da avaliação das propriedades físicas e químicas do material.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização dos resíduos de louças sanitárias descartadas após o processo produtivo de uma indústria de cerâmicas do município de Araxá – MG.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados neste trabalho são:

- ✓ Caracterização das matérias primas utilizadas na produção das louças sanitárias;
- ✓ Avaliar características químicas e físicas do resíduo para classificação como pozolana;
- ✓ Estudo do efeito da substituição do resíduo como substituinte do granito na produção da massa cerâmica (barbotina) e avaliação do seu comportamento mecânico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos contêm fases compostas por elementos metálicos e não metálicos, e graças às inúmeras combinações dos seus átomos e arranjos estruturais dos átomos, é possível uma diversidade dos tipos de fases cerâmicas, conseqüentemente, as mais variadas propriedades possíveis para os cerâmicos (Cavalcante 2005).

As características de identidade das fases constituintes, arranjo das fases componentes e grau de perfeição das fases, conferem aos cerâmicos as suas propriedades físico-químicas como: elevada rigidez, dureza mecânica, alta fragilidade, alta temperatura de fusão, alta resistência à abrasão e elevada resistência ao calor. A variedade dessas propriedades físicas e mecânicas permite que sejam aplicados em diferentes campos como: tijolos, refratários, dispositivos eletrônicos, fibras, louças, componentes aeroespaciais e abrasivos. A alta dureza e elevada temperatura de fusão, são duas características que diferem os cerâmicos das outras demais classes de materiais (Caram 2016).

2.1.1. Classificação dos materiais cerâmicos

O que usualmente são chamadas de “cerâmica tradicional” e “cerâmica avançadas”, antigamente eram classificadas como “*Heavy Clay Products*” e “*Pottery Products*”. As cerâmicas ditas tradicionais são aquelas que englobam produtos à base de silicatos, enquanto que as cerâmicas avançadas englobam os materiais cerâmicos de alto desempenho (CRQ 2016).

Segundo Cavalcante (2005), a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC) divide o setor cerâmico devido a sua heterogeneidade em vários seguimentos em função de fatores como matéria-prima, propriedades e áreas de utilização:

- ✓ Cerâmica vermelha: são materiais com coloração avermelhada e usualmente empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, tubos cerâmicos, argilas expandidas, etc.);
- ✓ Cerâmica branca: geralmente divide-se este grupo por utilização dos produtos em: louças sanitárias, louças de mesa, isoladores elétricos, cerâmicas de adorno, etc.;
- ✓ Revestimentos cerâmicos: materiais utilizados para revestimento de paredes, pisos e bancadas;
- ✓ Refratários: variedade de produtos que tem por objetivo suportar altas temperaturas, ou processos que envolvem variações bruscas de temperatura;
- ✓ Abrasivos: por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes ao da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico, por exemplo, o óxido de alumínio eletro fundido.
- ✓ Cerâmica avançada: são produtos obtidos com matérias-primas sintéticas e que possuem alta pureza e seu processo de fabricação é rigidamente controlado. Tem a sua classificação dada a partir de suas funções como os magnéticos, ópticos, térmicos, nucleares, mecânicos, químicas e biológicas.

2.1.1.1. Cerâmica branca

As louças, as porcelanas, os sanitários e porcelanas elétricas são os produtos que compõem o setor de cerâmicas brancas. Expressão oriunda do passado, pelo fato dos materiais serem constituídos por um corpo branco e envoltos por uma camada vítrea transparente, sem a presença de manchas por razões estéticas.

As cerâmicas brancas são agrupadas em três categorias dentro do setor cerâmico, são elas: as porcelanas, grés e faiança (Tabela 2.1). As porcelanas são fabricadas a partir de argilas, caulim e feldspato com alta pureza e a sua porosidade

é praticamente nula. O grés é fabricado a partir de matérias-primas com um menor grau de pureza se comparado às porcelanas, podendo conter granito, pegmatito e filito como fundentes ao invés do feldspato puro. Apresenta uma baixa absorção de água. A faiança possui composição semelhante ao grés, por exceção da presença de fundentes carbonatíticos. São peças mais porosas e menos resistentes que a porcelana e o grés (Franco 2008).

Tabela 2.1 - Principais produtos de cerâmica branca segundo Cavalcante (2005).

Principais produtos	
Porcelana	Porcelana doméstica e de hotelaria, porcelana elétrica e técnica.
Grés	Louças sanitárias (lavatórios e higiene).
Faiança	Aparelhos de jantar, de chá, xícaras e peças decorativas.

O termo argila é empregado na designação de materiais inorgânicos naturais, com granulometria fina e possui propriedade plástica quando em contato com a água. A argila é composta por um grupo de argilominerais, sendo os principais: caulinita, mica e clorita. O caulim tem seu termo derivado do local chinês Kao Ling, onde foi explorado por vários séculos. Este é um minério formado por aluminossilicatos hidratados, como a caulinita e a haloisita. Outra matéria-prima é o feldspato, derivado do alemão *feld* (campo) + *spath* (pedra). Um dos minerais mais importantes e abundantes na crosta terrestre (cerca de 60%), os feldspatos são aluminossilicatos de potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca) e bário (Ba). Já o filito é uma rocha metamórfica e granulação fina composta por quartzo, caulinita e sericita (Cruz 2008).

Usualmente, são as empresas de pequeno e médio porte nacional as responsáveis pela produção de matérias-primas cerâmicas, além das empresas multinacionais que possuem um sistema de organização e produção de qualidade e

regularidade bem diferente das empresas nacionais. Diante do quadro de escassez dos recursos naturais, provocado por minerações irregulares e desenfreadas, muitas empresas vêm realizando parceria com Universidades, fornecendo resíduos para serem pesquisados e estudados em busca de materiais alternativos e similares, com propriedades mecânicas aceitáveis (Albuquerque 2009).

2.2. Considerações sobre louças sanitárias

As louças sanitárias se agrupam aos produtos minerais não metálicos de transformação. Os principais produtos gerados neste ramo são lavatórios, tanques de lavar roupas, caixas d'água, bacias e mictórios.

No mundo todo o processo de fabricação das louças sanitárias segue um padrão (Figura 2.1) e parte do processo ainda conta com importante participação de mão-de-obra artesanal.

As louças sanitárias são confeccionadas a partir de uma pasta feita com pó de argilas brancas, feldspato, areia e outros constituintes em menores frações. Como resultado, tem-se um produto resistente, de granulometria fina e uniforme (Albuquerque 2009).

Os grandes destaques na produção de louças sanitárias são a China, o Brasil e a Itália (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Produção mundial de louça sanitária segundo Albuquerque (2009)
adaptado da Associação Brasileira de Cerâmica (2009).

POSIÇÃO	PAÍS	PEÇAS GRANDES
1	China	32.000.000
2	Brasil	12.500.000
3	Itália	10.100.000
4	EUA	9.000.000
5	Espanha	7.600.000
6	Japão	7.500.000
7	Grã-Bretanha	7.300.000
8	França	7.150.000
9	Turquia	7.150.000
10	Portugal	7.150.000
11	Outros	7.150.000
TOTAL		150.000.000

2.2.1. As matérias primas

A qualidade de um produto cerâmicos depende do controle da matéria prima que entra na fábrica. Quando se dá a escolha das matérias primas para a fabricação da massa cerâmica vários fatores são levados em conta, como: composição química, tamanho das partículas, pureza, reatividade, potencialidade de extração e custos (Cavalcante 2005). As matérias primas estão classificadas em dois grupos: Plásticas (argila comum, argila plástica, caulim) e não plásticas (feldspato, filito, talco, calcita, quartzo, dentre outros).

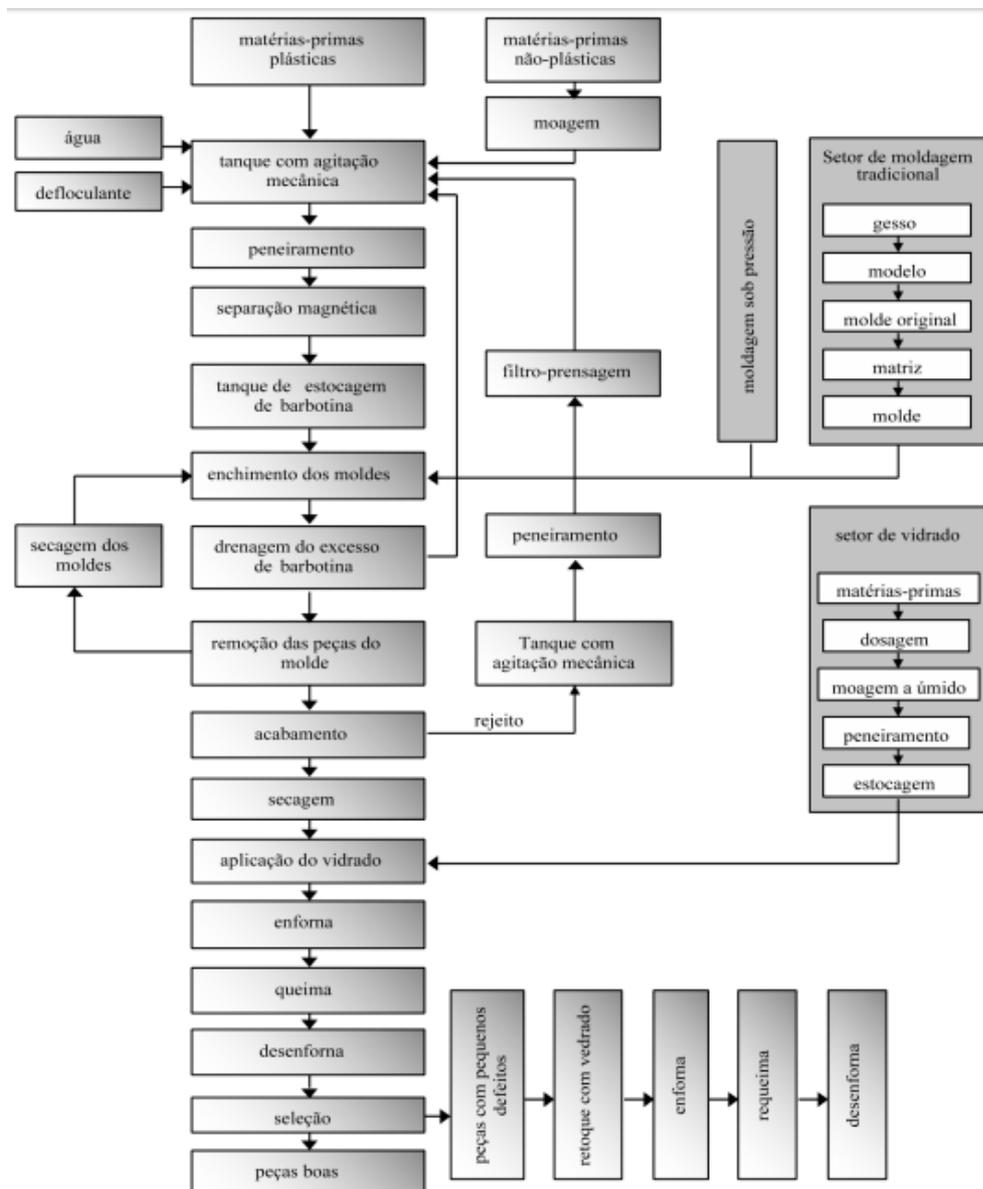


Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fabricação de sanitários, de acordo com Coelho (2009).

2.2.1.1. Argilas

As matérias primas plásticas são compostas quase em sua maioria pelas argilas. As argilas são resultado de intemperismo, ação hidrotermal ou se depositaram como algum tipo de sedimento. As argilas são basicamente compostas por caulinitas,

muito rica em matéria orgânica e sais húmicos, as vezes ainda contém outros minerais (gibbsita, mica, quartzo e argilominerais; Cavalcante 2005).

2.2.1.2. Caulins

Os caulins são argilas que tem sua constituição formada principalmente de caulinita e/ou haloisita, que queimam em cores brancas/claras. Além da caulinita podem conter outros minerais como quartzo, feldspato, mica e outros minerais acessórios em menor escala. Os caulins sedimentares em geral possuem teores elevados de TiO_2 (dióxido de titânio) e Fe_2O_3 (óxido de ferro) em relação aos caulins residuais.

2.2.1.3. Feldspatos

Os feldspatos são aluminossilicatos de potássio, sódio, cálcio e bário, as principais fontes de feldspato são os granitos e os pegmatitos ácidos. Para a indústria cerâmica os feldspatos de maior valor são o potássico e o sódico, por conterem temperatura de fusão relativamente baixa. Essa matéria prima tem a função de diminuir a temperatura da formação de fase líquida durante a etapa de sinterização, são utilizados como materiais fundentes.

2.2.1.4. Quartzo

O quartzo (SiO_2) é um dos minerais que mais se encontra em abundância na crosta terrestre, é considerado um elemento indispensável em uma massa cerâmica, pois é a fonte de introdução de sílica. As principais fontes de se obter quartzo são a partir de arenitos e quartzitos. O Arenito é a rocha formada pela compactação de sedimentos arenosos e quartzito é a rocha de composição semelhante, que sofreu metamorfismo. Nas massas de cerâmica branca essa matéria prima é um dos componentes fundamentais para controle da dilatação e para ajuste da viscosidade da fase líquida formada durante a queima, além de facilitar a secagem e a liberação dos gases durante a queima.

2.2.1.5. Filito

O filito é uma rocha metamórfica de granulação fina composta basicamente por quartzo, caulinita e mica (sericita). Essa matéria prima é utilizada na indústria cerâmica como fundente na fusão da barbotina, aumentando a resistência mecânica dos revestimentos cerâmicos e também em alguns casos, é responsável pela cor de queima.

2.2.1.6. Produção da massa

O preparo da massa (barbotina; Figura 2.2) é o destaque principal para a determinação do nível de qualidade das peças na linha de produção de louças sanitárias. Dentre as etapas envolvidas na preparação da massa, a moagem (seca ou úmida) tem ganhado mais atenção, uma vez que o objetivo do processo é a redução do tamanho das partículas, elevando a área de superfície específica.

Outra etapa importante do processo é o peneiramento, responsável pela retenção da fração granulométrica mais grosseira (fora do tamanho desejado), garantindo maior homogeneidade da suspensão, facilitando os parâmetros de reologia e a sinterização durante a queima. O acerto reológico é a última etapa da preparação da massa, onde são realizados os ajustes finais de reologia da massa antes de ser enviada para a produção (Cavalcante 2005).

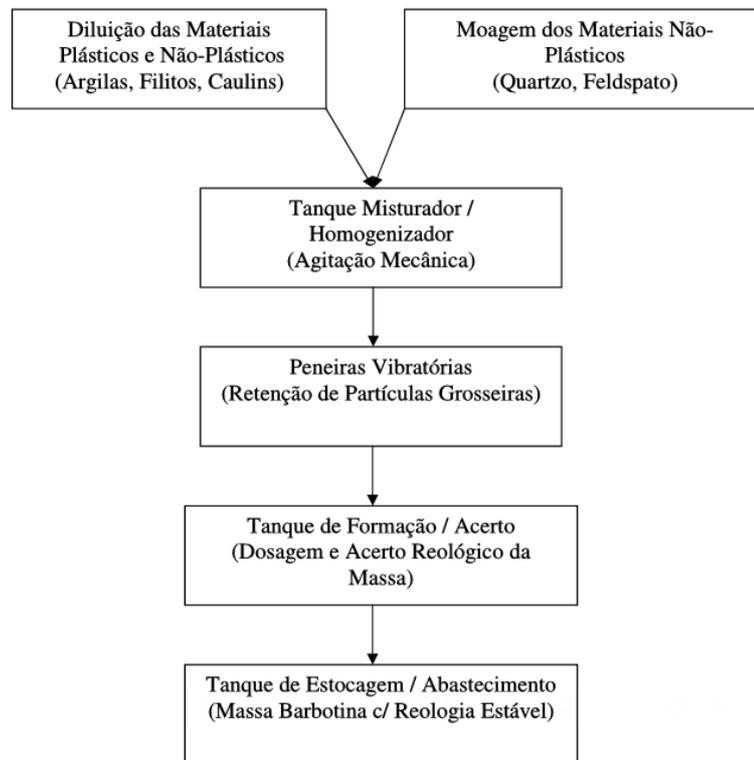


Figura 2.2 - Fluxograma de preparação da barbotina segundo Cavalcante (2005).

2.2.1.7. Reologia da Massa

A reologia está relacionada com o estudo do escoamento e da deformação decorrente da aplicação de uma pressão externa ou uma tensão. Nesse sentido, está associada a todo comportamento de fluxo. O controle reológico nas massas cerâmicas é de suma importância, uma vez que afeta o comportamento das suspensões durante a mistura assim como o bombeamento e transporte da mesma.

2.2.1.8. Produção de esmalte

O esmalte é a fina camada vítrea (adicionada após a queima) que envolve a massa argilosa das louças sanitárias. Os esmaltes são responsáveis por tornar a peça impermeável à umidade e os gases. Geralmente o esmalte é produzido por uma mistura de caulim, feldspato, quartzo, corante e aditivo complementar.

Algumas exigências são feitas para atender as características do esmalte após a queima: matéria-prima livre de ferro, controle rigoroso dos parâmetros de moagem, conhecimento dos radicais presentes no corante que pigmentam o esmalte, controle reológico, conhecimento da curva de queima que as peças serão submetidas e do tipo de atmosfera (Zappelini 2009).

2.2.1.9. Fundição

A fundição nada mais é do que verter a massa cerâmica em moldes de gesso, onde permanecem um certo tempo para que a água contida na suspensão seja submergida pelo gesso. Assim, as partículas sólidas se adaptam a parede do molde, o produto formado reproduz a forma do molde. Após a fundição as peças são levadas para secagem, para retirada do resto de umidade presente.

2.2.1.10. Sinterização

Sinterização é um processo de tratamento térmico de elevadas temperaturas, onde um corpo poroso sofre mudanças significativas de suas propriedades (físico-químicas), dentre eles: diminuição da porosidade (partículas se juntam e torna-se o corpo mais coeso) e o aumento da resistência mecânica, variação da estrutura química, dentre outros.

2.3. Panorama da indústria de cerâmicos e sanitários nacionais

A produção de sanitários no Brasil surgiu a partir da fusão de duas empresas na década de 1920, formando a Companhia Cerâmica Jundiaense. Até então, todas as louças sanitárias eram importadas no mercado europeu.

O setor de produção de revestidos cerâmicos no Brasil é constituído por 93 empresas, sendo que estas estão em maior concentração nas regiões Sul e Sudeste do país, com uma crescente expansão na região Nordeste, produzindo 713 milhões de metros quadrados de revestimento cerâmico por ano. O Produto Interno Bruto

(PIB) no ano de 2005 cresceu cerca de 7% no setor cerâmico, ampliando em 25% sua exportação (ANFACER 2010). A tabela 2.3 expõe os valores da produção nacional entre os setores cerâmicos no Brasil.

Tabela 2.3 - Valor da produção nacional dos setores cerâmicos atuantes no Brasil segundo Paixão (2011).

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	148.000
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

Devido ao grande número de jazidas de argila encontradas no Brasil, o país é consideravelmente rico em matérias-primas cerâmicas. Segundo o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), o cadastro de empresas responsáveis pelo suprimento de minerais industriais ou minerais não metálicos gira em torno de 200 empresas. De forma incomum, muitas das reservas naturais das matérias primas

são exploradas de forma errônea, desencadeando um mau aproveitamento destes recursos (Albuquerque 2009).

A utilização das matérias-primas minerais para a confecção dos produtos do setor cerâmico pode se dar de duas formas: natural ou processada (Albuquerque 2009). As fontes destas matérias estão distribuídas em diversas regiões do país, como disposto na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Estados brasileiros produtores de matérias-primas minerais, de acordo com Albuquerque (2009).

Matéria-prima mineral	Estados produtores
Agalmatolito	MG
Argilas plásticas e comuns	SP, RJ, MG, RS, PR, BA, SC, PE
Argilas refratárias	MG, SP, RS
Bauxita refratária	PA, MG
Calcita	ES, RJ
Calcários (calcíticos e dolomíticos)	MG, SP, PR, RJ, RS, GO, MT, PB, ES, BA
Caulim	AP, PA, MG, SP, RS, SC
Cianita	GO, MG
Cromita	BA, AP
Feldspatos (nefelina sienito e leucita)	MG, SP, PR, BA, RN, SC
Filito	SP, MS, MG
Gipsita	PE, MA, CE, BA
Grafita	MG, BA
Magnesita	BA, CE
Quartzo (areia silicosa e quartzito)	SC, SP, MG, RS, BA
Talco	PR, SP, BA, MG

O que vem tomando destaque nos últimos anos é o surgimento das empresas de pequeno porte, voltadas à fabricação de louças sanitárias a baixo custo (três fábricas em Minas Gerais e quatro na região Nordeste). Apesar de representar uma pequena porcentagem no mercado interno (inferior a 10%), a significância deste mercado é enorme, visando atingir as classes de menor renda (Albuquerque 2009).

A tabela 2.5 apresenta a distribuição de empresas destinadas a produção de louças sanitárias no Brasil.

Tabela 2.5 - Empresas de louça sanitária no Brasil segundo Coelho (2009).

ESTADO	UNIDADES, CIDADE	EMPRESAS
Ceará	1 em Fortaleza	Santa Luzia
Paraíba	2 em João Pessoa	Santa Aliança, Elizabeth
Pernambuco	1 em Recife	Celite
	1 em Caruaru	Luzart
	1 em Cabo de Sto. Agostinho	Monte Carlo
Espírito Santo	1 em Vitória	Logasa
Minas Gerais	1 em Santa Luzia	Celite
	2 em Andradas	Icasa, Fiori
	1 em Poços de Caldas	Togni
Rio de Janeiro	1 em Araxá	Santa Clara
	1 em Nova Iguaçu	Ideal Standard
São Paulo	4 em Jundiaí	Deca 1 e 2, Ideal Standard, Incepa
	1 em Taubaté	Hervy
	1 em Itupeva	IDT Banheiras
Rio Grande do Sul	1 em São Leopoldo	Deca

2.3.1. Cerâmica Santa Clara

A Indústria de cerâmicas Santa Clara (Figura 2.3) é uma empresa do segmento de cerâmicos, oferecendo produtos de alta qualidade. A empresa está situada no Distrito Industrial do município de Araxá em Minas Gerais e teve suas atividades iniciada em 2001. Atualmente a empresa possui uma vasta carteira de clientes em todo o país.



Figura 2.3 - Vista da empresa Santa Clara segundo <http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>.

Em 2013 a empresa iniciou operações em novas plataformas de carregamento, ampliando os processos de despacho e consequentemente reduzindo o tempo de entrega dos produtos (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Linha de produção automatizada para caixas acopladas e tampas segundo <http://jornalaraxa.com.br/app/pub/santa/santa.html>.

Na produção da massa cerâmica na Santa Clara, são utilizadas as matérias primas: Filito Bambuí, Argila São Simão, Argila Padre Libério e Granito. Todas as matérias primas são recebidas in natura (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Matérias primas in natura dispostas no pátio da empresa.

A partir da formulação como podemos ver na tabela 2.6, é feita a dosagem de cada matéria para a produção da massa (barbotina).

Tabela 2.6 – Formulação da barbotina segundo Industria de Louças Sanitárias Santa Clara.

Argila São Simão	Argila Padre Libério	Filito (Bambuí)	Granito São Jerônimo
8,5%	5,0%	64,0%	22,5%

Na figura a seguir (Figura 2.6) temos o processo produtivo da empresa simplificado:

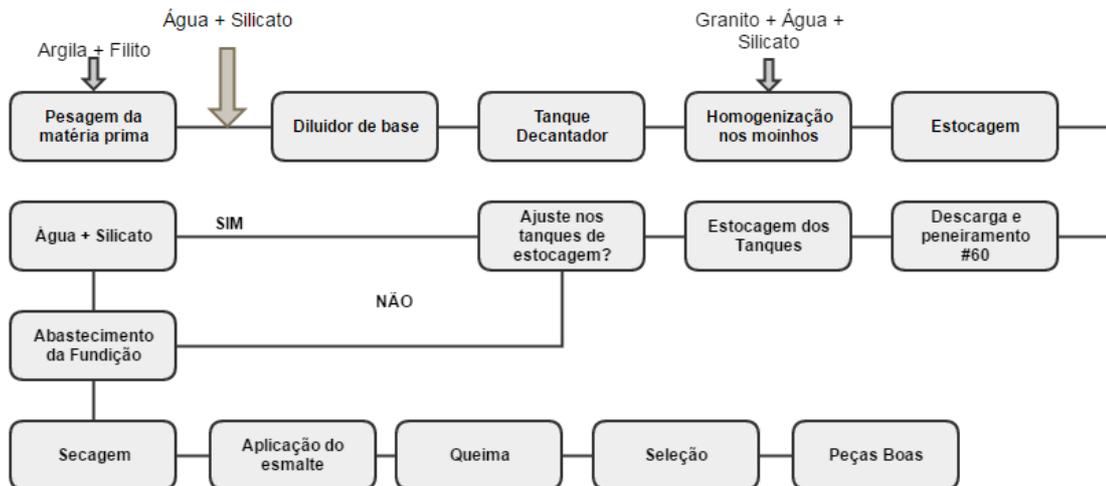


Figura 2.6 - Processo produtivo Santa Clara simplificado.

As matérias primas argila e filito são pesadas em uma balança por um trator previamente tarado e colocadas em um diluidor de base para composição da carga (matérias primas + água + silicato). Em seguida a massa segue para um tanque decantador, onde todas as partículas grosseiras e densas vão ser depositadas, após a decantação a base é transportada para os moinhos onde entra a matéria prima não plástica, mais uma quantidade de água e silicato e são homogeneizadas com a base. A barbotina segue para tanques de estocagem, desses tanques é bombeada para peneiramento, na peneira de #60 (0,250 mm), em seguida a massa segue para estocagem nos tanques. No tanque pega-se uma amostra para avaliar a necessidade de ajuste da massa, se sim é feito um acerto com defloculante e água, nesse tanque é feito o bombeamento para abastecimento da fundição. Após o material ser removido dos moldes, é levado para secagem em estufas, após a secagem é feita a aplicação do esmalte (composição do esmalte: feldspato, quartzo, óxido de zinco, bentonita, caulim e calcita). Finalmente o material é levado para queima em alto forno, após a queima é feita a seleção das peças.

2.4. Resíduos Sólidos

Os resíduos são consequências praticamente inevitáveis dos processos de produção industrial. São fontes de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que colaboram para a degradação ambiental (Alves 2008).

A definição de resíduos está relacionada a tudo aquilo que não é aproveitado pelas atividades desenvolvidas pelo homem, sendo elas domésticas ou industriais. Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas torna a definição de resíduos, mais restritiva (ABNT NBR 10.004, 2004): resíduos em estado sólido ou semissólido oriundos de atividades industriais, comerciais, hospitalares, agrícolas ou até mesmo atividades domésticas que exijam um tratamento técnico para sua disposição e são economicamente inviáveis mesmo sendo submetidos aos melhores processos tecnológicos existentes.

A sua classificação é feita respeitando as normas estabelecidas pela ABNT NBR 10.004 (2004) e estão codificadas de acordo com a matéria-prima, os insumos e o processo que originou o resíduo (Figura 2.7), da seguinte forma:

- ✓ Resíduos classe I: são aqueles classificados como perigosos;
- ✓ Resíduos classe II: são aqueles classificados como não perigosos;
- ✓ Ainda na classe II apresentam-se duas subclasses:
- ✓ Resíduos classe II A: não inertes;
- ✓ Resíduos classe II B: inertes.

A periculosidade dos resíduos é caracterizada pela inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade das matérias-primas que constituem o resíduo. Os resíduos não inertes são aqueles que não se enquadram na classificação como resíduos perigosos ou como resíduos inertes (resíduos que em contato com água destilada em temperatura ambiente, não tem nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de água potável) e podem apresentar algumas propriedades como: combustibilidade, solubilidade em água ou biodegradabilidade (ABNT NBR 10.004, 2004).

Alguns pesquisadores definem ainda o resíduo como algo que possa agregar valor, e assim iniciar uma nova cadeia produtiva através da recuperação, reutilização ou a reciclagem (Alves 2008). A recuperação envolve a extração e remoção de alguns tipos de material do resíduo, como os metais, por exemplo. A reutilização é a reaplicação do resíduo sem que nele não tenha passado por nenhum processo de transformação ou beneficiamento. Enquanto que a reciclagem é a reaplicação do resíduo já transformado.

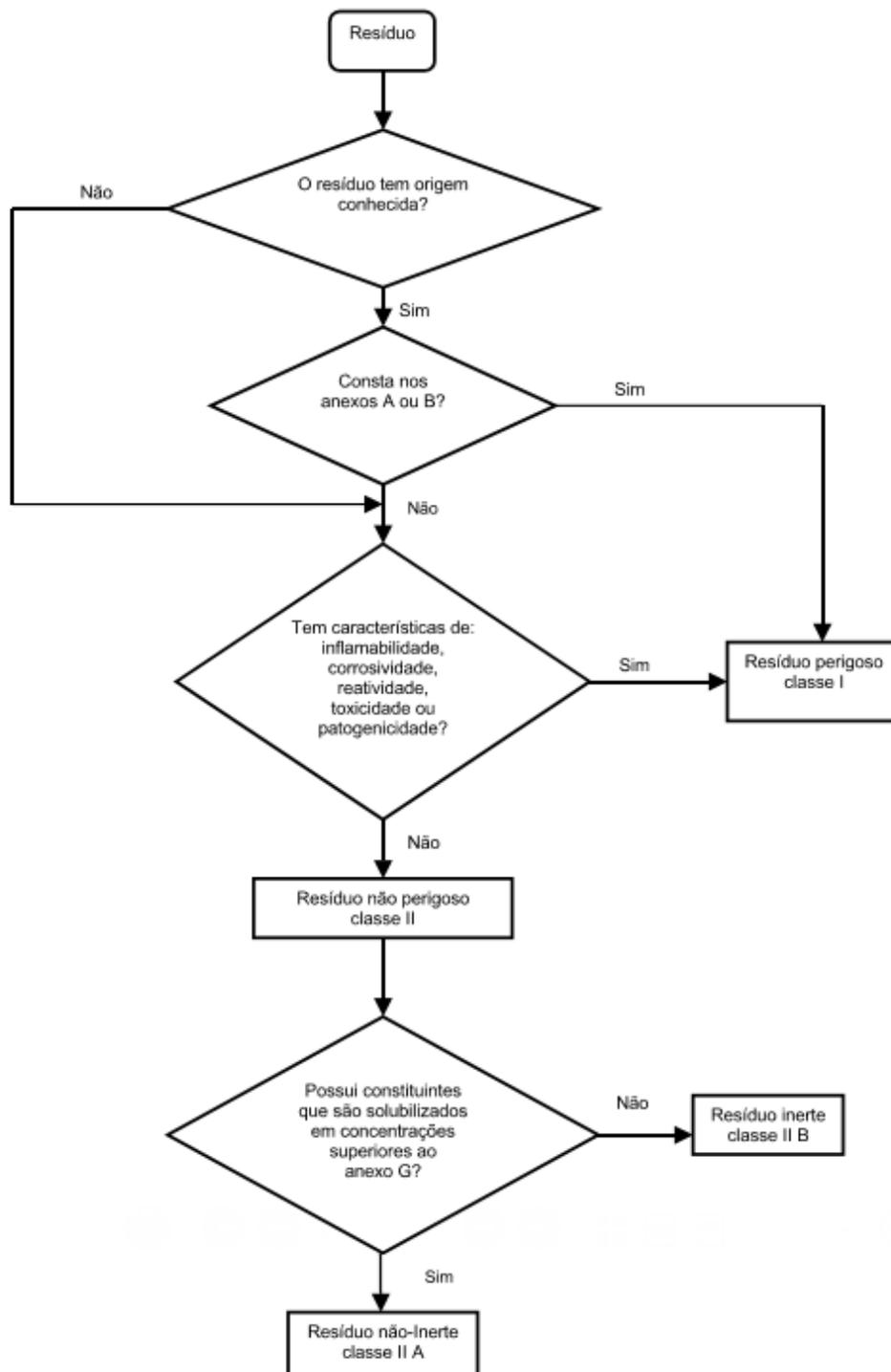


Figura 2.7 - Caracterização e classificação dos resíduos sólidos, de acordo com ABNT NBR 10.004 (2004).

Para este novo seguimento da cadeia produtiva, o resíduo deve preencher alguns requisitos:

- ✓ Devem ser gerados em grande volume;
- ✓ Possuir baixo custo de aquisição;
- ✓ Atender as propriedades exigidas pela sua nova aplicação;
- ✓ Causar problemas relacionados à sua estocagem.

A partir dessas características, é estudada a viabilidade da aplicação deste resíduo, promovendo o desenvolvimento tecnológico e reduzindo a demanda de bens naturais. É importante ressaltar que os resíduos podem ser aplicados onde suas características físicas e químicas apresentem um bom desempenho, e o novo produto gerado possua características superiores, redução dos impactos ambientais e ainda possua capacidade de competir no mercado (Paixão 2011).

2.4.1. Resíduos de louças cerâmicas

Durante o processo industrial de fabricação de louças sanitárias são gerados resíduos sólidos de três tipos: lodo, gesso e cacos cerâmicos. Os lodos são resultantes dos processos de beneficiamento das matérias-primas, da lavagem dos moldes e sobra do acabamento das peças moldadas. Quando são tratados e passam por um filtro de prensa, parte é reincorporada às massas na produção. Os resíduos de gesso provem do descarte dos moldes, quando os mesmos perdem sua eficiência. A maior parte deste tipo de resíduo é reutilizada em cimenteiras. O principal problema encontrado pela indústria cerâmica são os resíduos de cacos, que resultam das perdas após a queima da cerâmica. Esses resíduos são classificados como inertes, ou seja, não são solúveis e a sua maioria são descartados em aterros (Coelho 2009).

2.5. Aproveitamento de resíduos cerâmicos

2.5.1. Aproveitamento de resíduos cerâmicos como Adições Minerais

As indústrias de transformação de materiais produzem uma quantidade de resíduos considerável que nem sempre são reaproveitados e tem um destino que seja ecologicamente correto. Obter um destino adequado a estes resíduos é um amplo desafio, a ser estudado. Em alguns casos já existentes estes produtos podem ser aproveitados como matéria prima no próprio processo ou em outros processos industriais.

Na indústria de cerâmicos, grande parte dos resíduos gerados tem uma destinação ou um estudo já sendo feito. Já as peças que são classificadas como quebra e são destinadas a aterros é o principal resíduo o qual ainda não tem uma destinação correta. Por isso são desenvolvidos estudos neste trabalho para que se possa ser feita adição desse resíduo no próprio processo. Através dos estudos do processo da indústria e análises laboratoriais químicas e físicas do resíduo, houve a possibilidade de aplicação como substituinte parcial na formação da barbotina pois o resíduo se apresentava características parecidas com a do granito.

2.5.2. Pozolanas

Materiais pozolânicos são aqueles que possuem sílica reativa em sua composição, sendo estes materiais naturais ou artificiais. Por definição da ABNT NBR 12653/1992, as pozolanas recebem a seguinte definição: materiais silicosos ou silicoaluminosos, que oferecem pouca ou nenhuma atividade aglomerante quando se encontra sozinho, porém quando este tem sua granulometria devidamente reduzida e entra em contato com a água, reage com o hidróxido de cálcio formando compostos com capacidade aglomerante.

Estudos indicam que os primeiros relatos de uso de pozolanas foram por Gregos e Romanos em suas construções, cerca de 2000 anos A.C (Figura 2.8). Uma terra

argilosa foi o primeiro material ligante utilizado por essas civilizações, e posteriormente os gregos iniciaram a utilização da cal como aglomerante, difundindo essa prática em Creta, onde há evidências de estruturas Minoanas contendo fragmentos de cerâmica em argamassas (Netto 2006).

A principal propriedade da pozolana é a sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio, assim formando compostos com poder aglomerante estável.

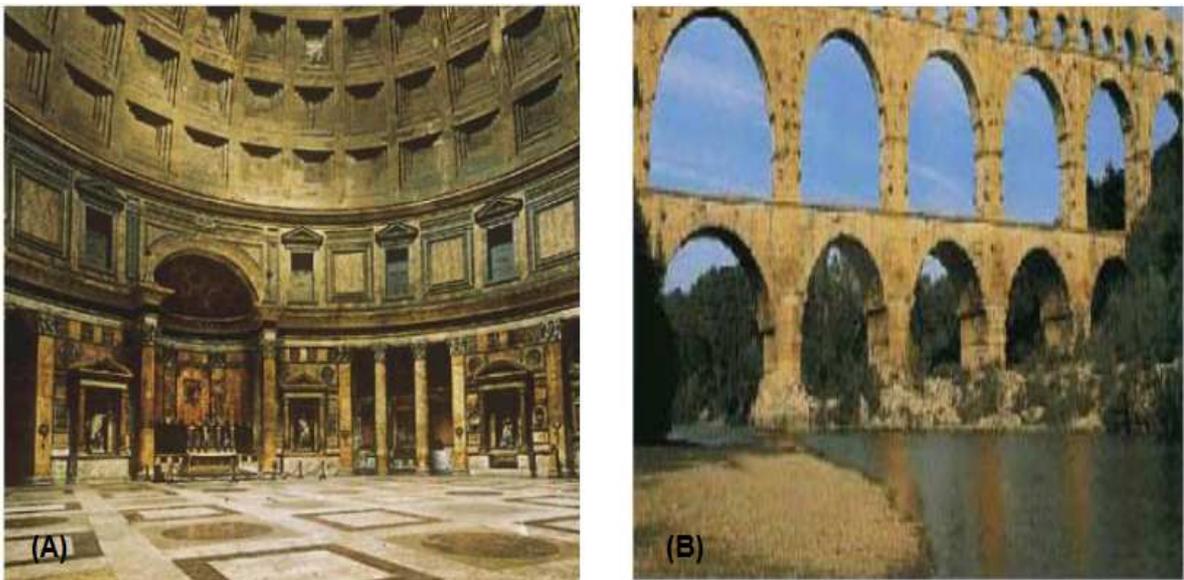


Figura 2.8 - (A) Panteon de Roma; (B) Aqueduto de Pont du Gard na França, de acordo com Vieira (2005).

Tanto as civilizações gregas e romanas sabiam que a mistura de materiais vulcânicos, finamente moídos com cal e areia, resultava em argamassas mais resistentes, que endureciam sob a ação da água.

O cimento *Portland* tem como principal composição os silicatos, que quando hidratados produzem silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que tem por função conferir resistência ao concreto, e o hidróxido de cálcio que não possui características cimentícias (Figura 2.9). Assim, quando se utiliza compostos à base de cimento *Portland*, o hidróxido de cálcio liberado reage com a pozolana, resultando em uma

produção extra de silicatos de cálcio hidratado, tornando o produto mais estável. Dessa forma, o material pozolânico, assim como a escória de alto forno, oferece uma vantagem quando adicionada ao cimento *Portland* (Netto 2006).

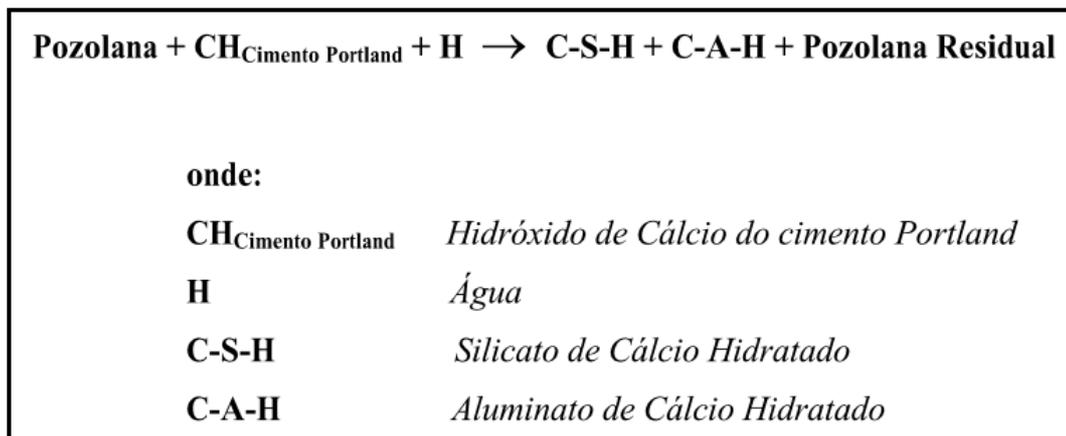


Figura 2.9 - Reação pozolânica segundo Vieira (2005).

O uso das pozolanas em meio ao cimento se dá de duas formas: substituindo parcialmente o cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento. A capacidade de a pozolana reagir com a cal e produzir compostos com propriedades aglomerantes decorrem do fato do silício e o alumínio de sua composição estar desordenados atômicamente e em estruturas amorfas. Assim sendo, quanto maior for a desordem estrutural e a sua instabilidade em meio básico, maior será a interação. Independentemente de como a pozolana for utilizada, a reação pozolânica e as vantagens serão as mesmas. Porém, cada material pozolânico possui suas características próprias, resultando em valores variáveis (Netto 2006).

De acordo com Gonçalves (2005), o desempenho da pozolana no concreto irá depender de fatores como: composição química, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, diâmetro médio, forma e densidade específica do material pozolânico, e ainda das proporções da pozolana em relação à quantidade de água e cimento, o tipo do cimento utilizado, quais os tipos de agregados que estão sendo utilizados, a presença de aditivos químicos, a idade e o grau de hidratação do concreto.

Vieira (2005) define que as interações que ocorrem entre o material pozolânico e o cimento *Portland* são pontos de nucleações geradas por partículas pequenas de pozolana (menos reativa do que o cimento), quando são dispersas na pasta de cimento promovendo a precipitação dos produtos de hidratação. Além disso, os grãos mais finos permitem que haja um empacotamento mais denso com o cimento, reduzindo os problemas de transição entre a pasta e o agregado, resultando em melhorias micro estruturais e nas propriedades do concreto. Ou seja, devido à existência de partículas mais finas na pozolana, com elevada área superficial, essas tendem a absorver maior quantidade de água e a reduzir os espaços vazios gerados em concretos ainda frescos, formados por exsudação (separação da pasta de concreto da mistura devido ao excesso de água) e segregação (separação dos componentes do cimento fresco, na qual as partículas maiores de agregados possuem maior tendência de se sedimentar do que as menores partículas).

No Brasil, o primeiro relato da utilização de material pozolânico foi na construção da barragem de Jupuíá (MS) (Figura 2.10) no ano de 1964. Entretanto, a comercialização do cimento *Portland* pozolânico ocorreu somente em 1969, quando eram utilizadas cinzas volantes coletadas da usina termelétrica de Charqueadas (RS).



Figura 2.10 - Construção da usina hidrelétrica de Jupuíá – MS segundo <http://www.3lagoas.com.br/turismo/arquitetonico/usina-hidreletrica-de-jupia>.

As pozolanas podem ser divididas em dois grupos (Oliveira 2012):

- i. Pozolanas naturais: é de origem vulcânica, origem sedimentar ou fóssil. São exemplos de pozolanas naturais: tufos vulcânicos, vidros vulcânicos, sílicas opalinas, terras diatomáceas.
- ii. Pozolanas artificiais: são oriundos de processos industriais ou seus subprodutos: telhas, tijolos moídos, 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).

A classificação das pozolanas é realizada em função da sua origem, requisitos químicos (Tabela 2.7) e físicos (Tabela 2.8), estabelecidos pela NBR 12653/2014, e são agrupadas em três classes: classe N, classe C e classe E.

Tabela 2.7 - Requisitos químicos pela NBR 12653 (2014).

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25
(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.				

Tabela 2.8 - Requisitos físicos pela ABNT NBR 12653 (2014).

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751
(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.				

A classe das pozolana N é representada por materiais artificiais e naturais, como alguns elementos vulcânicos ácidos, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. As cinzas volantes produzidas em pela queima do carvão em alto forno representam a classe C. Já a classe E engloba os materiais pozolânicos que diferem das classes anteriores (Netto, 2006).

2.5.3. Reutilização de resíduos em cerâmicos

Atualmente como avanço da tecnologia, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos, na área de reaproveitamento de resíduos. Um dos estudos desenvolvidos atualmente é aplicação de destes em massas cerâmicas.

Segundo Melo *et al.* (2009) foram realizados estudos do reaproveitamento de resíduo de telhas em formulações cerâmicas para produção de grés. Primeiramente foram desenvolvidas duas formulações de massas conhecidas, uma para grés porcelanato e outra para grés, com a adição do resíduo estudado em diferentes porcentagens (10%, 20% e 30%). Foram avaliadas três temperaturas de queima, e amostras com e sem resíduos foram analisadas quanto a absorção de água, microestrutura e porosidade aparente. Obtiveram resultados satisfatórios como a redução da absorção de água para as duas massas.

O lodo de estação de tratamento de efluentes é um resíduo sólido considerado não inerte de indústrias cerâmicas, geralmente depositado em aterros sem algum aproveitamento. De acordo com Fernandes et al. (2003) foi desenvolvido uma forma de reutilização do lodo da estação de tratamento de efluentes, por meio da adição a massa de grés. Foram realizados testes em laboratório para avaliação da reutilização em escala de produção de uma indústria. Em laboratório foi formulada uma mistura do resíduo a massa, em percentuais diferentes. Para avaliar a viabilidade do aproveitamento, foram realizados testes de absorção de água, retração linear e resistência mecânica de peças queimadas. Comparado ao padrão alcançaram um resultado para a incorporação de até 5%.

Em 2014, Zaccaron *et al.* desenvolveram estudos para verificar a viabilidade de incorporação do resíduo proveniente do processo de pós-queima da cerâmica vermelha na massa cerâmica em escala laboratorial. Foram feitos ensaios de caracterização química e física, mineralógica e de classificação do resíduo. Além disso foi desenvolvida formulações de massas com diferentes percentuais para serem incorporados a massa de uma cerâmica. Para avaliar o efeito do resíduo na massa, foram confeccionados corpos de prova. Para avaliar se a massa não perderia suas propriedades com a adição do resíduo, foram feitos ensaios: retração térmica linear de secagem e de queima, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa e aparente e tensão de ruptura à flexão. Eles obtiveram um resultado positivo para adição de até 20% de resíduo no processo cerâmico em escala laboratorial.

A reutilização do resíduo cerâmico moído, quando adicionado ao concreto, pode vir a apresentar propriedades pozolânicas. Realizando a substituição do cimento pelo resíduo cerâmico, ocorre uma redução de hidróxido de cálcio disponível para a reação pozolânica. Assim, as partículas de pozolana que não aderem ao hidróxido de cálcio, atuam como partículas inertes, reduzindo a quantidade de produtos hidratados na mistura (Nascimento 2011).

Hoje em dia com a alta demanda que as indústrias recebem, aumenta a produção de lodos e resíduos industriais. A grande vantagem da aplicação em processos cerâmicos é a redução da geração de resíduos e seu reaproveitamento, contribuindo assim, para a diminuição dos impactos ambientais negativos.

3. METODOLOGIA

3.1. Amostra

O material coletado são louças sanitárias descartadas por não atenderem aos requisitos de produção, ficam previamente dispostas em um pátio onde já se encontram em cacos, como podemos observar na figura 3.1. Estas louças são produzidas por uma indústria de cerâmicas localizada no Distrito Industrial do município de Araxá – MG. Após a coleta a amostra foi encaminhada ao CEFET/MG - Campus Belo Horizonte, a qual foi moída em moinho de bola, para homogeneidade da amostra, e possibilitar uma melhor análise e seu reaproveitamento. Em seguida foram retiradas alíquotas para testes de distribuição granulométrica, análises físicas e químicas, modelagem de corpo de provas.



Figura 3.1 - Amostra disposta no pátio da empresa.

3.2. Caracterização Física

A caracterização física do material foi realizada no CEFET/MG - Campus Araxá. Os testes para caracterização física foram definidos de acordo com os requisitos necessário para que esse material possa ser considerado um material pozolânico destinado ao uso como cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Sendo os testes:

- i. Análise tátil visual;
- ii. Análise granulométrica;
- iii. Limite de Plasticidade;
- iv. Limite de Liquidez.

3.2.1. Análise tátil visual

Foi realizada a análise visual sobre o material com a ajuda de uma Lupa binocular (Figura 3.2), onde conseguimos concluir alguns aspectos sobre o material como textura e granulometria.



Figura 3.2 - Lupa Binocular.

3.2.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento a úmido devido ao material apresentar uma granulometria muito fina, então adicionou-se água com o propósito de facilitar a passagem dos finos através da tela de peneiramento.

Para análise utilizou-se uma alíquota de 100 g de amostra, então foi realizado com o auxílio de uma peneira vibratória suspensa como podemos ver na figura 3.3. A determinação das faixas de tamanho das partículas é determinada por meio de uma série de aberturas de peneiras que mantém entre si uma relação constante, as peneiras escolhidas para este teste foram 150# (0,105 mm), 170# (0,090 mm), 200# (0,074 mm), 230# (0,063 mm), 270# (0,053 mm), 325# (0,044 mm) e 400# (0,037 mm).

Após o peneiramento, o material que ficou retido em cada peneira foi levado para secagem em estufa para que posteriormente pudesse ser pesado, assim como o passante na última peneira.



Figura 3.3 - Peneira vibratória suspensa.

3.2.3. Limite de Plasticidade

O índice de plasticidade foi determinado de acordo com a norma NBR 7180. Para a análise do limite foi utilizado uma alíquota de 200 gramas de amostra, passante na peneira de abertura 0,42 mm (35#), como determina a NBR 6457 (ABNT 1986).

Colocou-se a amostra em um recipiente de porcelana, adicionando água aos poucos a amostra e homogeneizando o material com auxílio de uma espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica (Figura 3.4).



Figura 3.4 - (A) 200 gramas de material para o ensaio; (B) Água destilada utilizada no ensaio; (C) Mistura com consistência plástica.

Tomou-se cerca de 10 gramas de amostra, assim preparada e moldando-a manualmente até formar uma pequena bola. Posteriormente a bola é rolada sobre uma placa de vidro esmerilada até que se forme um cilindro que deve ter a espessura de 3 mm e 10 cm de comprimento (figura 3.5). Se amostra se fragmentar antes de 3 mm, a amostra é retornada a capsula de porcelana e adiciona-se mais água e a homogeneizando-a com a espátula. Em seguida o material foi colocado em capsulas metálicas em estufa a temperatura de 60°C para determinação da umidade do material.

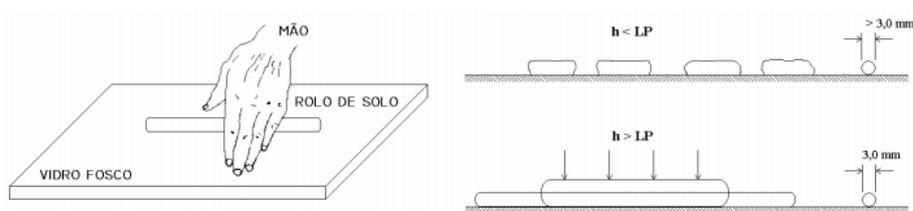


Figura 3.5 - Ensaio de Limite de Plasticidade segundo <https://www.teconconcursos.com.br/conteudo/questoes/94521>.

3.2.4. Limite de Liquidez

O material utilizado no limite de liquidez foi o restante do utilizado no teste de limite de plasticidade.

O material foi adicionado a concha do aparelho de Casagrande até que a parte central atingisse a espessura de 10 mm. A massa colocada no aparelho foi dividida em duas partes com o auxílio de um cinzel, abrindo uma ranhura na parte central de acordo com a NBR 6459 (ABNT 1984) (Figura 3.6). Girou-se a manivela do equipamento casa-grande, golpeando a concha contra a base, até que a borda se unissem ao longo de 13 mm e aproximadamente 9 golpes. Posteriormente o material foi retirado da concha e colocado em cápsulas metálicas da mesma forma que o teste anterior para secagem.



Figura 3.6 - Ensaio de Limite de Liquidez (Casagrande).

3.3. Caracterização química e morfológica

As análises da caracterização química foram realizadas no CEFET-MG – Campus Belo Horizonte, devido à falta de equipamentos no Campus de Araxá. Os testes de caracterização química realizados foram:

- i. Determinação da umidade da amostra;
- ii. Perda ao fogo;
- iii. Espectrometria de Fluorescência de Raio-X;
- iv. Difração de Raio-X;
- v. Microscopia Eletrônica de varredura – MEV.

3.3.1. Determinação de umidade

Segundo a NBR 12653 (ABNT 2014), o teor de umidade é uma das exigências químicas para que esse material possa ser utilizado como adição pozolânica.

A umidade foi determinada segundo o método de ensaio NBR NM 24 (ABNT 2002). O teste foi realizado em triplicata para obter melhor avaliação dos resultados, de acordo com a norma o teor máximo que um material pode apresentar é de 3%.

Pesou-se 1 g de amostra em um cadinho de massa conhecida, em seguida o cadinho com amostra foi colocado na estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. O período inicial de secagem é de 30 minutos e os períodos subsequentes foram de pelo menos 10 min, até que não houvesse mais variação entre duas determinações sucessivas de massa sendo menor que 0,001 g. Antes da determinação de massa, o cadinho é resfriado a temperatura ambiente em um dessecador. A determinação de umidade foi realizada de acordo com a equação 3.1.

$$\text{Equação 3.1} \quad U = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Onde:

U = Umidade da amostra, em porcentagem;

m_1 = Massa da amostra, antes da secagem, em gramas;

m_2 = Massa da amostra, após a secagem, em gramas;

3.3.2. Perda ao fogo

A perda ao fogo consiste em avaliar o percentual matéria orgânica que foi perdido da amostra durante a queima. A determinação de perda ao fogo foi realizada de acordo com a NBR NM 18 (ABNT 2004). O teste foi realizado em triplicata para melhor avaliação dos resultados.

Pesou-se $1 \pm 0,001$ g de amostra que foi colocada em um cadinho de porcelana de massa conhecida. Em seguida calcinou-se o material em forno mufla (Figura 3.7) à temperatura entre 900°C e 1000°C como, durante aproximadamente 10 minutos, a amostra foi levada para ser resfriada em um dessecador a temperatura ambiente, logo após o material foi pesado e levado para calcinar novamente em períodos de aproximadamente 5 minutos até que se obtivesse uma massa constante.



Figura 3.7 - Calcinação da amostra em forno mufla.

A perda ao fogo foi calculada pela equação (3.2).

Equação 3.2
$$PF = \frac{m1 - m2}{m} \times 100$$

Onde,

PF = Perda ao fogo, em porcentagem;

m1 = Massa do cadinho mais a massa da amostra ensaiada, em gramas;

m2 = Massa do cadinho mais amostra, após a calcinação, em gramas;

m = Massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

3.3.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios X

A espectrometria por fluorescência de raios X é considerada uma técnica não destrutiva, tal técnica permite identificar os elementos de um material como estabelecer a proporção que esses elementos apresentam no material em questão. O fundamento de funcionamento do aparelho se baseia em uma fonte de radiação elevada energia (radiação X) que provoca uma excitação dos átomos presentes na amostra. Quando um átomo no estado fundamental é exposto a ação de uma fonte externa, ele absorve a energia, promovendo os elétrons da amostra a níveis mais energéticos, ficando em um estado dito “Estado Excitado”. Como na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, então ele retorna ao seu estado fundamental, onde podemos captar uma emissão de energia. Então a energia que estava envolvida na absorção é a característica específica de cada elemento, podendo assim ter uma análise a qual conseguimos identificar os elementos e suas quantidades. (Beckhoff 2006).

Um cristal difrator seleciona os raios X de acordo com seus comprimentos de onda, correspondendo à lei de Bragg da difração. O comprimento de onda que foi difratado ou selecionado pelo cristal poderá ser calculado pela equação da Lei de Bragg (Equação 3.3)

$$\text{Equação 3.3} \quad n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

Onde,

n = é um número inteiro;

λ = comprimento de onda da radiação;

d = distância interplanar;

θ = complemento do ângulo de incidência.

3.3.4. *Difração de Raios X*

A técnica de difração de raios X tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em materiais cerâmicos. O equipamento incide um raio laser no material, onde para cada espécie contida no material ela devolve o raio a um determinado ângulo. Cada ângulo representa um mineral na amostra, já que a amostra apresenta diferentes composições. O resultado é apresentado em um gráfico com picos, estes caracterizam os principais elementos presentes na amostra.

3.3.5. *Microscopia Eletrônica de varredura – MEV*

O microscópio eletrônico de varredura nos oferece imagens de alta ampliação e resolução. A técnica consiste em incidir um feixe de elétrons que varrem a superfície da amostra, parte desses feixes são refletidos e podendo ser captados por um detector que converte o sinal em imagem. Há dois tipos de detectores, os de elétrons secundários e o de elétrons retro espalhados (Alves 2008).

No experimento foi utilizado o detector de elétrons retro espalhados, este detector nos oferece uma imagem de média resolução, porém um bom contraste. O contraste depende da massa específica dos elementos presentes na amostra, da topografia e da composição química.

4. MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Através dos resultados obtidos das análises químicas, conseguimos propor a substituição parcial da barbotina pelo o resíduo cerâmico. Como as características do resíduo estudado se aproxima a do granito, foram formuladas massas utilizando percentuais diferentes de substituição na parte que engloba o granito e uma massa padrão. Os corpos de provas foram obtidos através do processo de fundição em moldes de gesso.

Foram feitas substituições de 5%, 10%, 25%, 50% e 100% do granito. Para avaliar a proposta, foram feitos também ensaios cerâmicos, sendo eles: peso específico, retração linear de secagem e queima, absorção de água, tensão de ruptura à flexão crua, perda ao fogo, verificação de fundência do material, determinação da % de resíduos, reologia, determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem, avaliação do tato e destacamento. As massas e os testes foram desenvolvidos no laboratório da Industria de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda.

4.1. Produção da Massa

A formulação da massa é baseada no que se utiliza na escala industrial, então foi desenvolvida na mesma proporção, mas em escala laboratorial, podemos observar a formulação da massa utilizada pela indústria na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Formulação da barbotina segundo Industria de Louças Sanitárias Santa Clara.

Argila São Simão	Argila Padre Libério	Filito (Bambuí)	Granito São Jerônimo
8,5%	5,0%	64,0%	22,5%

Foram feitos os cálculos para o preparo de cinco massas propostas e além dessas a massa padrão, foram produzidas cargas inicialmente de 3 kg e 4kg (base seca). Através dos cálculos foram determinadas as proporções para cada material, as matérias primas são pesadas em um balança de precisão e colocadas em um moinho

de bolas (Figura 4.1) para compor a carga. Em seguida é feita a adição de água e silicato (floculante) que também são calculadas por proporção.



Figura 4.1 - Moinho de bolas laboratorial.

O tempo de moagem da massa foi de 1 a 2 horas, logo após a produção da massa é feito o acerto do peso específico.

MASSA PADRÃO (Referência)

Inicialmente foram calculadas as matérias primas para 3 Kg de massa (Tabela 4.2):

Tabela 4.2 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova padrão.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambu) (g)	Granito São Jerônimo (g)	Total (g)
255	150	1920	675	3000

Foram colocados inicialmente 3 mL de silicato e 1 L e 200 mL de água. Em seguida foram colocados mais 3 mL de silicato para ajuste da viscosidade e mais 2 Kg de material para ajuste do peso.

100% DE SUBSTITUIÇÃO DO GRANITO POR RESÍDUO

Inicialmente foram calculadas matérias primas para 3Kg de massa (Tabela 4.3):

Tabela 4.3 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 100% de substituição do granito.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambuì) (g)	Resíduo (g)	Total (g)
255	150	1920	675	3000

Foram colocados inicialmente 3 mL de silicato e 800 mL de água. Em seguida foram colocados mais 1 mL de silicato para ajuste da viscosidade e mais 1 Kg de material para ajuste do peso.

50% DE SUBSTITUIÇÃO DO GRANITO POR RESÍDUO

Inicialmente foram calculadas matérias primas para 3Kg de massa (Tabela 4.4):

Tabela 4.4 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 50% de substituição do granito.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambuì) (g)	Granito São Jerônimo (g)	Resíduo (g)	Total (g)
255	150	1920	337,5	337,5	3000

Foram colocados inicialmente 4 mL de silicato e 1L e 100 mL de água. Em seguida foram colocados mais 1 mL de silicato para ajuste da viscosidade e mais 40mL de água para ajuste do peso.

25% DE SUBSTITUIÇÃO DO GRANITO POR RESÍDUO

Inicialmente foram calculadas matérias primas para 4Kg de massa (Tabela 4.5):

Tabela 4.5 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 25% de substituição do granito.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambuí) (g)	Granito São Jerônimo (g)	Resíduo (g)	Total (g)
340	200	2560	676	255	4000

Foram colocados inicialmente 5 ml de silicato e 870 ml de água. Em seguida foram colocados mais 2 mL de silicato para ajuste da viscosidade e mais 40mL de água para ajuste do peso.

10% DE SUBSTITUIÇÃO DO GRANITO POR RESÍDUO

Inicialmente foram calculadas matérias primas para 4Kg de massa (Tabela 4.6):

Tabela 4.6 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 10% de substituição do granito.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambuí) (g)	Granito São Jerônimo (g)	Resíduo (g)	Total (g)
340	200	2560	810	90	4000

Foram colocados inicialmente 4 mL de silicato e 840 mL de água. Em seguida foram colocados mais 1,2 mL de silicato para ajuste da viscosidade.

5% DE SUBSTITUIÇÃO DO GRANITO POR RESÍDUO

Inicialmente foram calculadas matérias primas para 4Kg de massa (Tabela 4.7):

Tabela 4.7 - Quantidade de matérias primas necessárias para confecção do corpo de prova com 5% de substituição do granito.

Argila São Simão (g)	Argila Padre Libério (g)	Filito (Bambuí) (g)	Granito São Jerônimo (g)	Resíduo (g)	Total (g)
340	200	2560	855	45	4000

Foram colocados inicialmente 6 mL de silicato e 800 mL de água. Em seguida foram colocados mais 1 mL de silicato para ajuste da viscosidade e mais 15mL de água para ajuste do peso.

Foi observado que o silicato reage mais facilmente com o pó de louça.

4.1.1. Peso Específico

O peso específico é a massa por coluna aparente que inclui o material e os poros fechados além da suspensão. É realizado para padronização das massas, o utilizado pela empresa de 1800 a 1815. É coletada uma amostra de 100 ml de suspensão, o material é colocado em um balão volumétrico, então pesa-se o balão com o material em uma balança de precisão e anota-se o resultado.

Para o cálculo do peso específico temos a equação 4.1:

$$\text{Equação 4.1 } PE = (P - T) \cdot F \cdot 100$$

Onde,

P = Peso obtido na leitura da balança;

T = Tara do balão volumétrico;

F = Fator.

O resultado é expresso em gramas por litro (g/l).

Caso o peso específico precise de acerto, se ficar muito abaixo do esperado é colocado mais matérias primas a barbotina. Já se ficar muito acima do esperado é adicionado mais água. Após a realização da determinação do peso específico, é feito o cálculo para a determinação da porcentagem de resíduos.

4.1.2. Determinação da Porcentagem de Resíduos

A porcentagem de Resíduos é a quantidade de sólidos de uma suspensão que ficam retidos devido a passagem do mesmo, por uma peneira. O retido são partículas maiores. Para a realização deste teste é necessário coletar uma amostra de 100 ml de suspensão com peso específico conhecido, por isso é utilizado o material que já se encontra no balão volumétrico utilizado para determinação do peso específico, todo

esse material é passado pela peneira de 325# (0,044) com a ajuda de água corrente e uma baqueta de madeira.

O material retido pela peneira é transferido para uma cápsula tarada com auxílio de uma piceta, como podemos observar na Figura 4.2, e então esta é levada para estufa por um período de 45 minutos para secagem. Após a secagem, pesa-se o material com auxílio de um pincel. O resíduo máximo admitido pela empresa é de 12%.



Figura 4.2 - (A) 100 ml utilizados para o peso específico para determinar a % de resíduos; (B) material passando pela peneira de 325# (0,044 mm) com a ajuda de água corrente e uma baqueta de madeira. (C) material retido na peneira sendo transferido para uma cápsula com auxílio de uma piceta.

Para cálculo da porcentagem de resíduos temos a seguinte fórmula (equação 4.2):

$$\text{Equação 4.2} \quad \text{Resíduo} = \frac{R \cdot 100}{P}$$

Onde,

R = Peso do resíduo seco;

P = Peso do material seco em 100 ml da amostra.

Os resultados são expressos em porcentagem.

Após a realização deste teste toda a massa é passada por uma peneira de #60 (0,250 mm) (Figura 4.3), visando padronizar o tamanho das partículas presentes na suspensão, é realizada a determinação do ensaio da Viscosidade da barbotina (reologia).



Figura 4.3 - Peneira de #60 (0,250 mm).

4.1.3. Reologia (Viscosímetro Brookfield)

A reologia das suspensões é analisada em função da viscosidade aparente. Esta pode influenciar no processo, a adequação pode vir a obter um bom escoamento tornando a suspensão menos rígida e viscosa tendo em vista que sem este ajuste ela pode vir a ser indesejável, podendo ocorrer entupimento por endurecimento em tanques e tubulações. O ensaio de determinação da Viscosidade é realizado no viscosímetro Brookfield.

Inicialmente são coletados 1000 ml de material (barbotina) e colocados em um becker, o viscosímetro é ajustado para a velocidade de 50 RPM e é colocado o spindle de nº2. A amostra é agitada durante um minuto com uma baqueta de madeira, afim de evitar a sedimentação parcial dos sólidos, o becker é posicionado com amostra sob o viscosímetro e são aguardados 15 segundos para que se estabilize (Figura 4.5), para que seja feita a primeira leitura (B50) a seguir o aparelho é desligado. Em seguida, a massa fica em descanso durante 5 minutos, após o descanso é realizada a segunda leitura (B2,5), então a velocidade é ajustada para 2,5 RPM, após um tempo de 2 minutos uma nova leitura é realizada.

O viscosímetro Brookfield possui um fator (Fb), de valor entre 4 e 6, que depende da spindle (Figura 4.4), da velocidade e das leituras realizadas durante o experimento. Para o cálculo do fator é utilizada a equação 4.3:

Equação 4.3
$$Fb = \frac{\text{segunda leitura} \cdot 8 (B_{2,5})}{\text{primeira leitura} \cdot 160 (B_{50})}$$

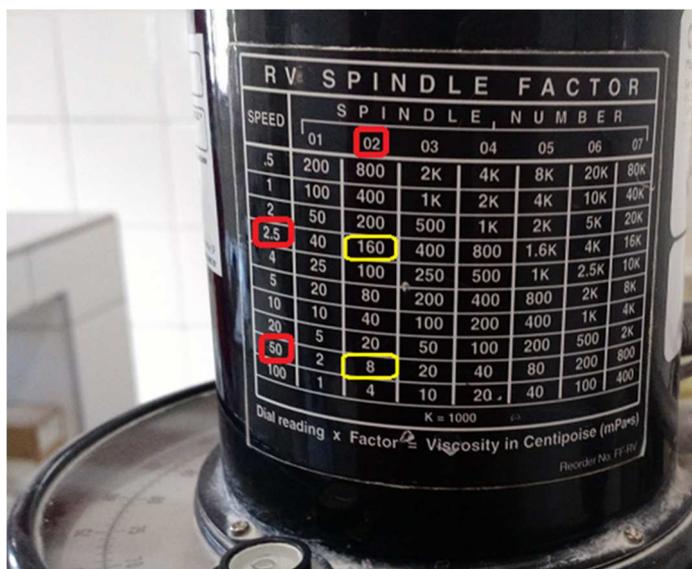


Figura 4.4 - Fator do Viscosímetro.

Caso a reologia dê abaixo ou acima do padrão é necessário ajuste, para este são utilizados silicatos para diminuir a viscosidade ou sulfato para aumentar.



Figura 4.5 - (A) A amostra sendo agitada por minuto, afim de evitar a sedimentação parcial dos sólidos; (B) Onde é realizada a leitura no viscosímetro de Brookfield; (C) Becker posicionado com amostra sob o viscosímetro.

4.1.4. Determinação da Velocidade de Deposição (VD) e tempo de secagem.

Este ensaio consiste em determinar a velocidade com que uma barbotina se deposita na superfície porosa do molde de gesso e também o tempo necessário para que após a drenagem do excesso, perca o brilho.

Inicialmente a amostra é agitada durante 1 minuto a fim de eliminar a sedimentação parcial de sólidos em suspensão. Em seguida a massa é vertida em um molde de gesso (Figura 4.6) até seu completo enchimento, neste instante é acionado o cronômetro. O tempo de permanência em contato com o molde é de 2 minutos, então é feita a drenagem do excesso de barbotina. Quando completada a drenagem da barbotina, essa se apresenta brilhante e torna-se lentamente fosca. O tempo de

secagem é determinado como o intervalo decorrido entre o término da drenagem e a perda do brilho da calota depositada (Figura 4.6). É anotado o valor do tempo de secagem e a massa destacada do molde é pesada.



Figura 4.6 - (A) Massa vertida no molde de gesso; (B) Drenagem do excesso de barbotina; (C) Calota já sem brilho; (D) Massa destacada sendo pesada.

4.1.5. Avaliação do Destacamento e Tato

Este experimento tem como objetivo avaliar a dificuldade ou facilidade do destacamento de corpos de prova obtido através do ensaio de velocidade de deposição, bem como, apurando subjetivamente o tato.

O destacamento pode ser avaliado nos seguintes termos:

- ✓ Fácil/ Bom: sai inteiro do molde;
- ✓ Difícil/ ruim: Sai aos pedaços, ou fica grudado no molde.
- ✓ O tato pode ser avaliado nos seguintes termos:
- ✓ Empapado: quando a camada se apresenta excessivamente pastosa.
- ✓ Mole: quando a camada se apresenta mole.
- ✓ Dura: quando a camada se apresenta seca.
- ✓ Bom: quando se apresenta com boa plasticidade, sem ficar mole, pastosa ou seca.

4.1.6. Fundição dos Corpos de prova

Após todo o processo de padronização da massa e testes prévios, ela segue para ser fundida em moldes de gesso, onde obteremos nossos corpos de prova. Serão feitos 3 tipos de corpos de prova como podemos ver na Figura 4.7. Os moldes de ensaios de deformação e retração permanecem nos moldes de 2 a 3 horas para poderem ser desenformados, já o ensaio de ruptura durante 1 hora. Após os corpos de prova serem desenformados (Figura 4.8), foram levados para secagem em estufa.



Figura 4.7 - Moldes de gesso para a confecção dos corpos de prova.



Figura 4.8 - Corpos de provas já confeccionados.

4.1.7. Determinação do Módulo de Ruptura a Flexão

A tensão de ruptura é a força por unidade de área necessária para romper o corpo. Essa tensão pode ser compressão, tração, flexão, etc. A resistência mecânica a flexão é aplicada para todos os materiais cerâmicos com finalidade de controlar a uniformidade dos produtos no processo de conformação.

O ensaio consiste em colocar um corpo de prova apoiada sobre dois cutelos de apoio aplicando uma carga progressivamente, no ponto medido da distância entre dois apoios (Figura 4.9). Deve-se tomar cuidado para que o corpo de prova não esteja empenado e que assente perfeitamente sobre os cutelos. O teste foi realizado em triplicata para cada massa proposta.



Figura 4.9 - Ensaio de Determinação do Módulo de Ruptura.

O aparelho utilizado tem um contrapeso para tarar o peso do balde e avaliar somente o peso que fez o corpo de prova chegar a ruptura, então a carga é cessada e pesada.

O cálculo da tensão do módulo de ruptura se dá pela Equação X: D^3

Equação 4.4

$$MRF = \frac{P \cdot L}{\pi D^3} \cdot 100$$

Onde,

P = Carga de ruptura, em N;

L =Distância entre apoios do corpo de prova em cm;

D= Diâmetro do corpo de prova em cm.

4.1.8. Determinação da Retração Linear

O ensaio de retração linear de secagem e queima tem como objetivo avaliar o percentual de redução do comprimento dos corpos de provas sob uma condição de temperatura (secagem e queima), todos os testes tiveram a mesma exposição ao calor. A finalidade de se determinar a retração é: Avaliar a plasticidade após a eliminação da água de amassamento, estabelecer as dimensões iniciais dos produtos tomando como base a retração em condições de trabalho e conseqüentemente estabelecer as dimensões dos moldes e controlar os produtos durante o processamento.

4.1.8.1. Determinação da Retração Linear após secagem

Durante o processo de secagem, a retração é devida a remoção dos filmes de água entre as partículas (água de conformação). Desde que o número de partículas aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, corpos preparados com um ligante líquido e com materiais finos, tem uma alta retração durante a secagem, apresentando empeno e distorção.

A retração de secagem é determinada pela Equação 4.4:

$$\text{Equação 4.4} \quad \%RS = \frac{Ci - Cs}{Ci} \cdot 100$$

Onde:

%RS = porcentagem de retração linear após secagem;

C_i = Comprimento inicial do corpo de prova medido após a conformação;

C_s = Comprimento do corpo de prova, medido após secagem em 100°C.

4.1.8.2. Determinação da Retração Linear após queima

Durante o processo de queima, a retração é devida pela eliminação de água de constituição, pela eliminação de matéria orgânica e pela eliminação do CO₂ quando de composição dos carbonatos. Neste caso não é considerada a água de conformação do material sendo que a mesma é eliminada durante a secagem. Calculada pela Equação 4.5.

$$\text{Equação 4.5} \quad \%RQ = \frac{C_s - C_q}{C_s} \cdot 100$$

Onde,

%RQ = porcentagem de retração linear após queima;

C_q = Comprimento final do corpo de prova queimado (1200°C);

C_s = Comprimento do corpo de prova, medido após secagem em 100°C.

Na Santa Clara é utilizado um padrão de 10 a 12%.

4.1.8.3. Determinação da Retração Linear Total

A retração total pode ser calculada através do comprimento inicial e o comprimento após a queima (Equação 4.6).

Equação 4.6
$$\%RT = \frac{Ci - Cq}{Ci} \cdot 100$$

Onde,

%RT = Porcentagem de retração linear total;

Ci = Comprimento inicial do corpo de prova medido após a conformação;

Cq = Comprimento final do corpo de prova queimado (1200°C);

4.1.9. Determinação da deformação dos corpos de prova após queima

A deformação dos corpos de prova após queima é a deformação sofrida pelo corpo ao ser submetido ao ciclo de queima. Consiste também na determinação da fusibilidade da massa.

O corpo de prova previamente preparado é levado para queima (Figura 4.10), a queima dura cerca de 12 horas. Em seguida, deve-se medir o ponto máximo de deformação do corpo de prova e anotar o valor obtido. Para medir a deformação pega-se um papel como referência de alinhamento e então mede-se a deformação com uma régua (Figura 4.11). É importante não ter uma deformação alta para que durante a queima as peças possam continuar no seu alinhamento original.

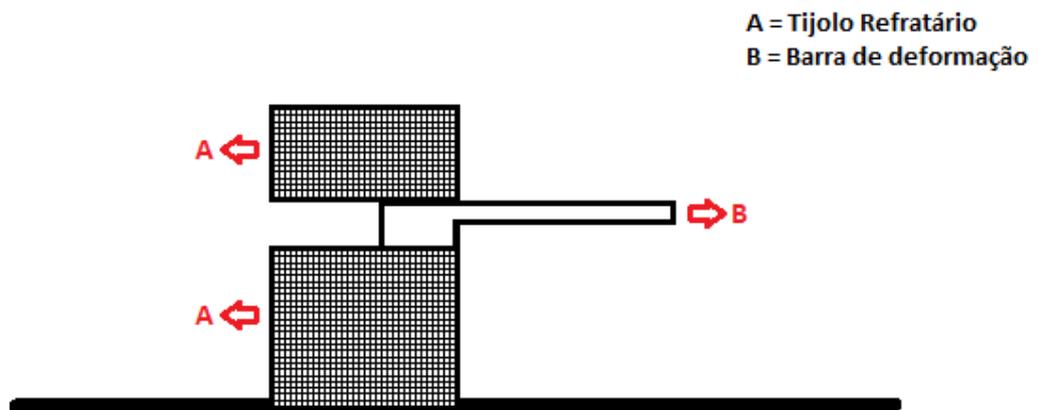


Figura 4.10 - Como o corpo de prova é colocada para queima.



Figura 4.11 - Corpo de prova após a queima sendo medido o ângulo de deformação.

4.1.10. Determinação da Absorção de Água

A Absorção de água tem como objetivo estimar o nível de sinterização do material (menos poros e vazios na amostra). O ensaio é feito utilizando aproximadamente 8mm do mesmo corpo de prova que foi utilizado para determinação da deformação (Figura 4.12).



Figura 4.12 - Obtenção dos corpos de prova para a determinação de absorção de água.

Os corpos de prova foram pesados secos e submetidos a 2 horas de cozedura em água e repouso na mesma durante 24 horas (Figura 4.13), em seguida remove-se a água excedente da superfície e pesa-se novamente. Para encontrar o valor de absorção de água (A_a), aplica-se a equação 4.7.

Equação 4.7
$$\%A_a = \frac{M_u - M_s}{M_s}$$

Onde,

$\%A_a$ = porcentagem de absorção de água;

M_u = Massa úmida;

Ms = Massa seca;



Figura 4.13 - Corpos de prova em cozedura.

4.1.11. Teste de fundência do material

Esse teste é realizado para verificar se o resíduo é fundente, assim como o granito. Pega-se uma quantidade de material que é misturada a uma pequena quantidade de uma cola orgânica, em seguida essa mistura é passada em uma peneira de #40 (0,420 mm). São modelados pequenos cones em um molde, em seguida levados para o alto forno (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Fabricação dos corpos de prova para a determinação da fundência do material.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização física

5.1.1. Análise Tátil Visual

A amostra apresenta uma coloração clara, não apresentando nenhuma partícula visível, de granulometria homogênea e bem fina. A amostra é sedosa ao tato, como podemos observar na figura 5.1.

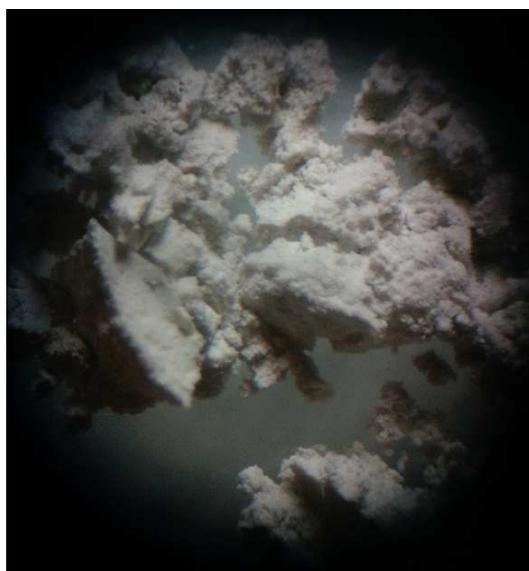


Figura 5.1 - Amostra vista através da lupa binocular.

5.1.2. Análise granulométrica

A partir do peneiramento da amostra foi elaborada uma curva granulométrica (Figura 5.2) a partir dos dados obtidos (tabela 5.1).

Durante a execução do peneiramento houve perdas, de 100 gramas utilizadas no processo obtivemos uma perda de 1,48 gramas. Uma perda de aproximadamente 1,48% da massa total.

Tabela 5.1 - Análise Granulométrica

Peneira (#)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retido Simples (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
150	0,106	0,94	0,95	0,95	99,05
170	0,090	0,56	0,57	1,52	98,48
200	0,075	1,10	1,12	2,64	97,36
230	0,063	0,56	0,57	3,21	96,79
270	0,053	1,97	1,99	5,2	94,8
325	0,045	2,32	2,35	7,55	92,45
400	0,038	5,88	5,97	13,52	86,48
<400		85,19	86,47	100	0,00
TOTAL		98,52	100		

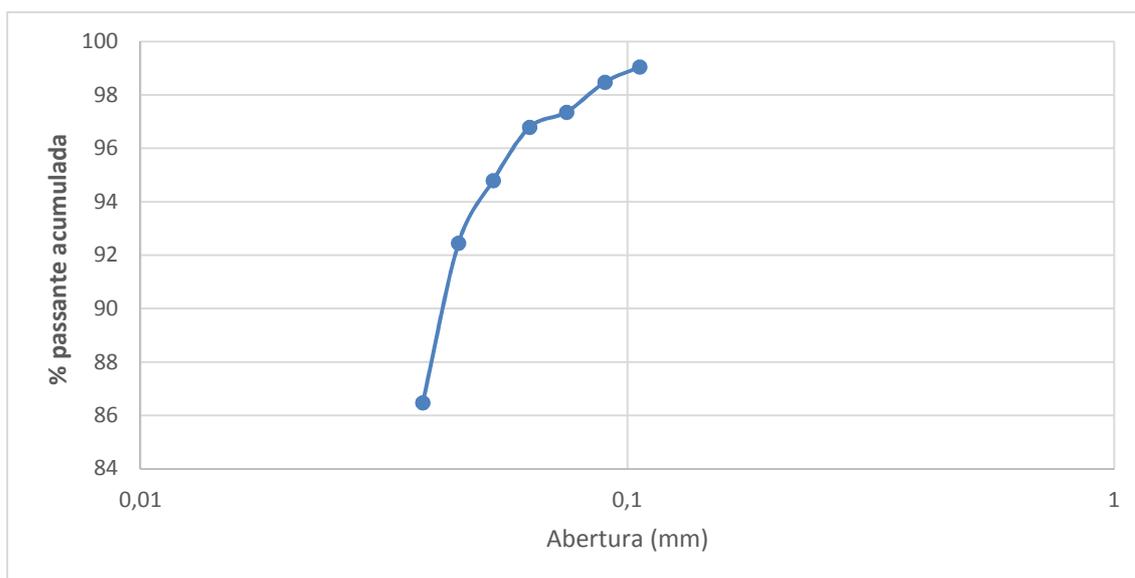


Figura 5.2 - Curva de Distribuição granulométrica.

Analisando a curva de distribuição granulométrica percebemos que amostra é muito fina e 86,47% é passante na menor peneira 400# (0,038mm), é um material homogêneo. Estas dimensões estão de acordo com o padrão utilizado pela indústria. Podemos também observar que os resultados se encaixa nas exigências físicas para

ser um material pozolânico, pois segundo a NBR 12653 (2014) o material retido na peneira 45µm é no máximo de 34%. A amostra não apresenta material retido na peneira de 45 µm.

5.1.3. Limite de Plasticidade (LP)

Tabela 5.2 - Resultado do teste de Limite de Plasticidade

Amostra	Cápsula vazia (g)	Cápsula + material úmido (g)	Capsula + material seco (g)	Umidade (%)
1	20,78	23,93	23,29	25,5
2	19,16	21,58	21,09	25,4
3	17,75	19,82	19,39	26,2

Foram considerados satisfatórios os valores de umidade obtidos (Tabela 5.2), pois nenhum difere da média de mais que 5%. Porém de acordo com o ensaio realizado, conseguimos concluir que a amostra não apresenta limite de plasticidade (NP), pois foi impossível de se obter o cilindro de 3 mm de diâmetro (Figura 5.3). Isso ocorre porque a amostra não apresenta mais característica de solo, já que na sua preparação prévia, ela passa por calcinação.



Figura 5.3 - Cilindro para o ensaio do limite de plasticidade.

5.1.4. Limite de Liquidez (LL)

Foram considerados satisfatórios os valores de umidade obtidos (Tabela 5.3), pois nenhum difere da média de mais que 5%. No ensaio de limite de liquidez foi impossível de se conseguir a o fechamento da ranhura com mais de 25 golpes, foi obtido 9 golpes, então considera-se a amostra como não apresentando limite de liquidez (NL).

Tabela 5.3 - Resultado do teste de Limite de Liquidez.

Amostra	Cápsula vazia (g)	Cápsula + material úmido (g)	Capsula + material seco (g)	Umidade (%)
1	16,17	23,68	22,04	27,9
2	10,83	19,40	17,51	28,3
3	10,45	20,69	18,46	27,2

5.2. Caracterização química

5.2.1. Determinação de umidade

Após a execução do ensaio, foi calculada a umidade de cada material, os resultados são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Teor de umidade das amostras

Umidade (%)			
Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média
0,092	0,050	0	0,47

Para todos os testes a amostra apresenta um teor de umidade baixo. Assim a amostra se enquadra na exigência para uso como material pozolânico de acordo com NBR 12653 (2014).

5.2.2. Perda ao fogo

Após os experimentos, calculou-se a perda ao fogo percentual, podemos ver os resultados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Testes de Perda ao fogo.

Teste	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho + Amostra (g)	Cadinho + amostra após queima (g)	% de Perda ao Fogo
1	48,30	1,00	49,30	49,29	1
2	40,85	1,00	41,85	41,83	2
3	40,85	1,00	41,85	41,83	2

A amostra atende a exigência da norma para que possa ser utilizada como pozolana, já que de acordo com a NBR 12653 (ABNT 2014) a perda ao fogo máxima para utilização é de 10%, e amostra apresentada apresenta em média 1,7%.

5.2.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Os resultados obtidos para espectrometria de fluorescência de raios X estão representados na tabela 5.6, onde podemos analisar os elementos e suas quantidades.

De acordo com a análise, observa-se que o material é composto por sílica em sua maior parte e alumina. Verifica-se que o somatório de SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 e ZrO_2 , perfaz 98,95% da amostra. Os altos valores de SiO_2 e Al_2O_3 obtidos são típicos de rochas ígneas graníticas, que nos leva a acreditar que a substituição do granito pelo resíduo na barbotina é viável.

Tabela 5.6 - Composição química obtida pela espectrometria de fluorescência de raio-x.

Composição	Porcentagem (%)
SiO ₂	64.534
Al ₂ O ₃	21.473
K ₂ O	5.420
Fe ₂ O ₃	3.512
CaO	1.503
TiO ₂	1.434
ZrO ₂	1.075
ZnO	0.583
BaO	0.271
Cr ₂ O ₃	0.064
MnO	0.054
Rb ₂ O	0.049
SrO	0.015
CuO	0.015
TOTAL	100

5.2.4. Difração de Raios X

A difração de raios X nos mostrou a composição mineralógica do resíduo, apresentando uma difração característica de material cristalino. Na Figura 5.4 podemos observar no difratograma da amostra, a presença bem definida de fases cristalinas de quartzo, o que confirma os resultados obtidos na análise de fluorescência.

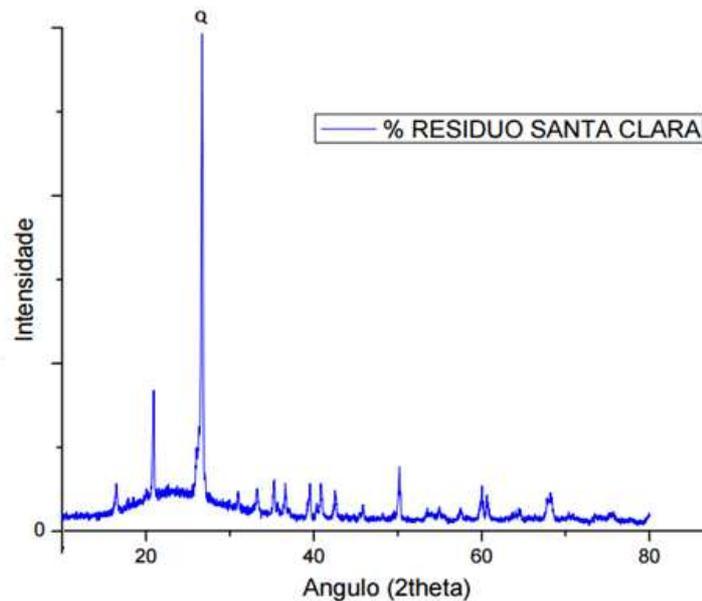


Figura 5.4 - Espectro de difratometria de raios x da amostra segundo Laboratório de materiais – CEFET MG.

5.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

De acordo com análise obtida pelo MEV foi possível observar a morfologia das partículas. Podemos perceber que o material possui granulometria heterogênea (Figura 5.5), as partículas possuem ângulos retos, aparentemente não foram encontradas estruturas que indiquem a presença de matéria orgânica na sua composição química.

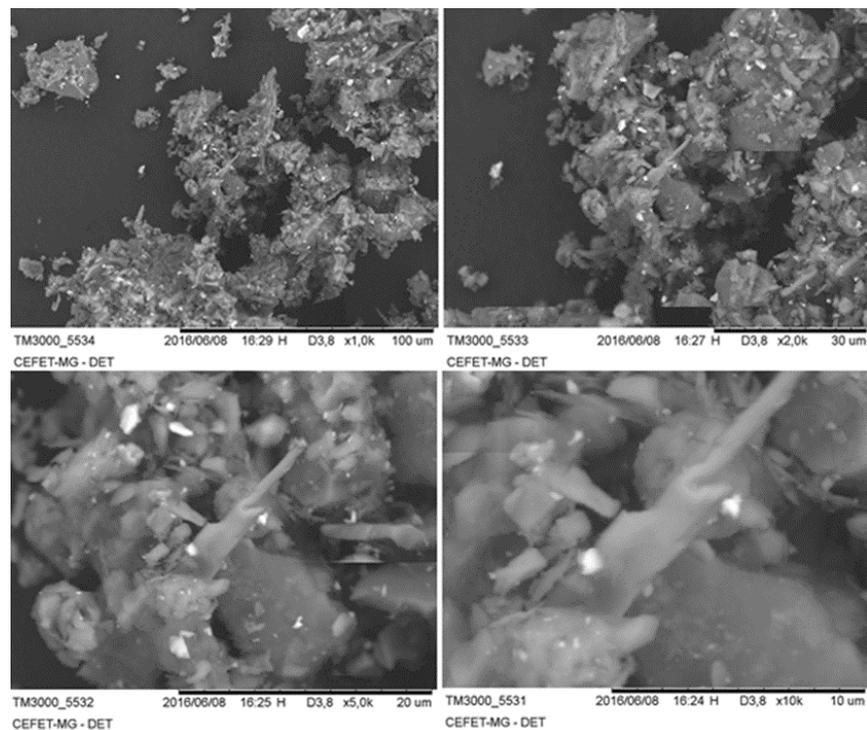


Figura 5.5 - Micrografia em amplitude de aumento da amostra.

5.3. Avaliação de características pozolânicas

A partir da tabela 5.7 conseguimos avaliar os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados para avaliar se amostra possui características de material pozolânico, e assim como os resultados esperados.

O requisito químico mínimo para ser considerado pozolana da classe “E” a amostra deve apresentar um somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é no mínimo 50%. O resíduo analisado apresenta um valor de ~ 89,5%. O teor de umidade, a perda ao fogo e o percentual de material retido na peneira 45µm são propriedades que também foram atendidas pelo resíduo de louça sanitária indicando a sua utilização como pozolana. É obvio que os ensaios mecânicos para avaliação da pozolanicidade do resíduo devem ser realizados para confirmar essa tendência, estes ensaios não fazem parte do objetivo inicial deste estudo, serão estudados posteriormente na continuidade desta pesquisa.

Tabela 5.7 - Resultados dos experimentos obtidos para avaliação do índice de pozolanicidade da amostra e resultado esperados.

Propriedades – Classe de material pozolânico E	Resultados Esperados	Resultados Obtidos
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	50	~89,5
Teor de umidade, % máx.	3	0,047
Perda ao fogo, % máx.	6	1,7
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	0

5.4. Modelagem dos corpos de prova

5.4.1. Peso específico

De acordo com a tabela 5.8 podemos observar que todos os pesos específicos estão dentro do padrão estabelecido pela empresa, que é 1800 a 1815.

Tabela 5.8 - Resultado dos pesos específicos.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Peso Específico	1807	1809	1811	1802	1811	1800

5.4.2. Determinação da Porcentagem de Resíduos

Através da tabela 5.9 podemos analisar que em nenhuma massa o resíduo excedeu o padrão estabelecido que é de no máximo 12%.

Tabela 5.9 - Resultado da determinação da porcentagem de resíduos.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Resíduos (%)	9,07	6,7	8,5	4,7	5,6	4,88

É importante salientar que quando há substituição pelo resíduo, a quantidade de resíduo presente nas massas com substituição é menor comparada a massa

padrão. Isso pode ocorrer devido ao fato do resíduo em substituição, ser um material já calcinado.

5.4.3. Reologia

A reologia nada mais é, que o acerto da viscosidade chamado Fator Brookfield. Podemos ver na tabela 5.10 a padronização deste sendo ela de 4 a 6,5.

Tabela 5.10 - Resultado da padronização da reologia.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
B₅₀	80	53,7	60	62,1	58,1	90,6
B_{2,5}	25	11,1	15,6	15,1	13	19,3
Reologia (Fb)	6,3	4,1	5,2	4,8	4,4	4,3

5.4.4. Determinação da Velocidade de Deposição (VD) e tempo de secagem

Se comparadas as Velocidades de Deposição (VD) na Tabela 5.11 que é a quantidade de massa destacada do molde, elas são relativamente parecidas com ressalva a 100% que aumentou a quantidade consideravelmente. Já os tempos de secagem se mostraram todos muito parecidos e dentro do padrão estabelecido pela empresa.

Tabela 5.11 - Resultado da determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
VD (g)	155	156	166	160	161	197
Tempo de secagem (min)	1'40"	1'35"	1'25"	1'25"	1'29"	1'39"

5.4.5. Avaliação do destacamento e tato

O tato de todos foi considerado bom para firme (Tabela 5.12), o que significa que a massa não fica mole, pastosa ou/e seca e há alguma plasticidade presente. Vale salientar que a massa que mais se assemelha a padrão é a de 5%.

Tabela 5.12 - Resultado da determinação da porcentagem de resíduos.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Tato e Destacamento	Bom p/ firme	Bom p/ firme	Bom p/ firme	Bom p/ firme	Bom p/ firme	Bom p/ firme
	Bom (Plástico)	Bom (Plástico)	Ruim (Pouco Plástico)	Ruim (Pouco Plástico)	Difícil (Pouco Plástico)	Ruim (Pouco Plástico)

O destacamento considerado bom ocorre quando, a massa que é destacada do molde sai por inteiro. Já o ruim e difícil é quando temos um destacamento quebradiço, ou fica grudado no molde. A massa de 5% que mais se enquadrou nos padrões estabelecidos pela indústria.

5.4.6. Determinação do Módulo de ruptura à flexão (antes da queima)

Os testes foram realizados em triplicata e o resultado obtido é uma média destes resultados. Foi calculado o desvio padrão para cada um dos testes como podemos observar na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Resultado da determinação do módulo de ruptura cru.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Módulo de Ruptura (Kgf/cm³)	45,83	42,59	40,25	41,73	37,88	34,51
Desvio Padrão (σ)	0,025	1,61	0,80	0,32	2,73	0,67

Algumas das massas apresentaram uma resistência maior do considerado padrão pela empresa, acima de 40 kgf/cm³, sendo elas STD, 5%, 10% e 25%. Houve

perda da resistência quando feita a substituição do granito acima de 50% podemos melhor analisar no gráfico da Figura 5.6.

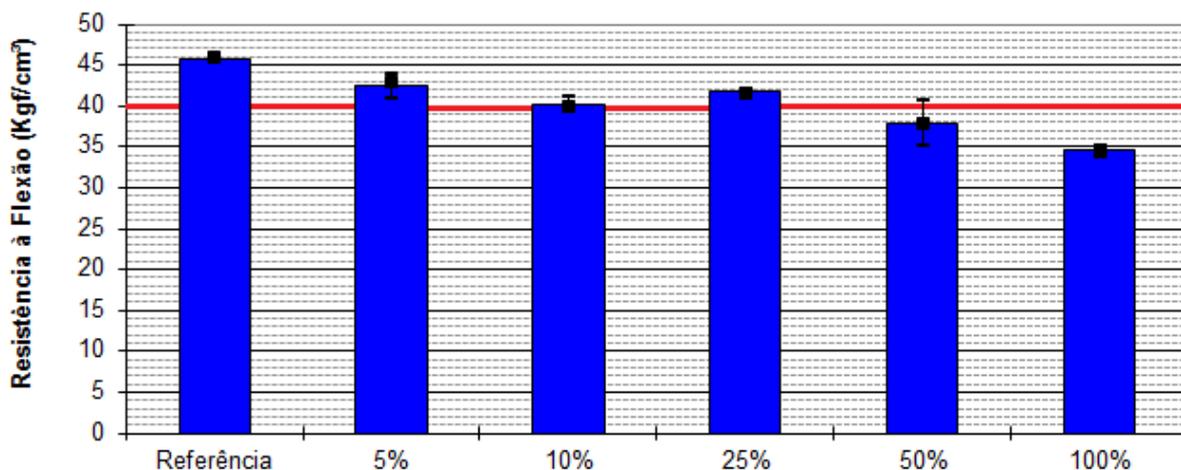


Figura 5.6 - Determinação do modulo de ruptura cru.

5.4.7. Determinação da Retração Linear

As retrações estão dentro dos padrões estabelecidos pela fábrica, podemos avaliar a partir da tabela 5.14. Sendo eles: retração de secagem até 2,5%, retração de queima até 11% e retração total até 13%.

Tabela 5.14 - Resultado da retração linear de secagem, queima e total.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Retração de Secagem (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Retração de queima (%)	9,5	10,2	10,2	10,2	10,6	10,6
Retração Total (%)	11,4	12,1	12,1	12,1	12,4	12,4

5.4.8. Determinação da deformação dos corpos de prova após queima

Todos os testes se encontram dentro do padrão estabelecido pela fábrica, ainda podemos evidenciar que quanto maior a quantidade de resíduos, menor é a deformação sofrida (Tabela 5.15).

Tabela 5.15 - Resultado da deformação após a queima

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Deformação (mm)	63	64	66	58	57	55

5.4.9. Determinação da Absorção de Água

O que influencia na absorção de água é a temperatura de queima e a quantidade de resíduos presentes. Todos os testes estão dentro de um padrão seguido pela indústria cerâmica, sendo ele de 0,2 a 0,12% como podemos ver na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Resultado da absorção de água.

Massas	Padrão (STD)	5% de substituição	10% de substituição	25% de substituição	50% de substituição	100% de substituição
Absorção de Água (%)	0,09	0,05	0,10	0,11	0,06	0,11

5.4.10. Teste de fundência do material

Através do teste, verificou-se que ele é fundente assim como o granito, porém não apresenta um brilho vítreo como tal (Figura 5.7), mas somente essa característica, segundo o técnico de laboratório da empresa não influencia no processo.



Figura 5.7 - Teste de fundência da amostra.

6. CONCLUSÃO

A caracterização química do resíduo pelo método fluorescência de raios x nos possibilitou um possível reaproveitamento no processo de produção de massa cerâmica, como substituinte do granito em diferentes proporções.

Nos experimentos realizados foi averiguada alguma variação, diante as diferentes proporções de resíduos introduzidas. É interessante ressaltar que os resultados dos testes para tempo de secagem, % de resíduos, deformação, retração linear (secagem, queima e total), perda ao fogo e absorção de água obtiveram valores considerados semelhante ao padrão. Já no ensaio de módulo de ruptura, as massas que continham 50 e 100% de resíduos obtiveram desempenho inferior ao limite padrão da empresa, 40Kgf/cm³. Conforme os resultados obtidos nos experimentos, é conferida a viabilidade da utilização do resíduo no processo em até 25% de material incorporado a massa.

Foi conferida também a viabilidade da utilização do resíduo como pozolana tipo E, segundo as exigências químicas da NBR-12653(2014). A caracterização química pelo método de fluorescência de raios X apontou que o resíduo apresenta em sua composição, um somatório de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ superior ao esperado de 50%. Nos ensaios de teor de umidade, perda ao fogo e percentual de material retido na peneira de 45 µm, o resíduo mostrou resultados dentro do esperado. Neste trabalho não foram realizados os ensaios mecânicos para avaliação da pozolanicidade, pela falta de tempo. Podemos afirmar que o material tem algumas características pozolânicas e uma possível utilização em compósitos cimentícios, porém deve-se realizar mais estudos para a confirmação dessa intenção. Fica como uma sugestão para trabalhos futuros a realização de ensaios mecânicos para avaliação da pozolanicidade.

Na atividade industrial em especial, os resíduos sólidos gerados são originados de ineficiência ou de desperdício no processo produtivo. Um resíduo pode ser considerado uma matéria-prima que não se transformou em produto final na atividade

produtiva. Assim, o reaproveitamento destes, trazem benefícios como: diminuição de resíduos enviados para aterros industriais, aumentando assim a vida útil dos destes. Podemos citar também a diminuição do uso dos recursos naturais, a melhoria da imagem da empresa frente ao mercado e para o fim diminuição dos impactos visuais e ambientais causados.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 10.004 – Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1991. NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1986. NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992. NBR 12.653 – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR NM 18 – Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2002. NBR NM 24 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade.
- ALBUQUERQUE L. M. C. 2009. *Reciclagem e estudo de reaproveitamento de resíduos cerâmicos de indústria de louça sanitária*. (Dissertação, Mestrado, Materiais e Fabricação), Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 62 p.
- ALVES M. S. 2008. *Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos*. (Dissertação, Mestrado, Materiais de Construção Civil), Escola de Engenharia de UFMG, Belo Horizonte. 132 p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br>. Acesso em: 20 de fevereiro. 2016.
- BANCO DE IMAGENS. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285390-3.aspx>. Acesso em: 19 de março. 2016.
- BANCO DE IMAGENS. Disponível em: <http://www.3lagoas.com.br/turismo/arquitetonico/usina-hidreletrica-de-jupia>. Acesso em: 20 de fevereiro. 2016.
- BECKHOFF B.; KANNGIEBER B.; LANGHOOF N.; WEDELL R.; WOLFF H. 2006. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. 1 ed. Berlin-London: Springer. 433p.

- CARAM R. Materiais cerâmicos: estrutura e propriedades dos materiais. Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~caram/6.%20MATERIAIS%20CERAMICO S%20GRAD.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~caram/6.%20MATERIAIS%20CERAMICO%20S%20GRAD.pdf). Acesso em: 15 de maio. 2016.
- CAVALCANTE W. F. V. 2005. *Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico*. (Dissertação, Mestrado, Materiais e Fabricação), Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 63 p.
- COELHO J. M. 2009. Perfil de Louças Sanitárias e de Mesa. *Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Ministério de Minas e Energia*. 1- 50.
- CRQ-IV - CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA IV REGIÃO. *Cerâmicas*. Disponível em: http://www.crq4.org.br/quimica_viva__ceramicas_. Acesso em: 15 de maio, 2016.
- CRUZ V. F. 2008. *Desenvolvimento de um método de caracterização de matérias-primas para revestimentos cerâmicos utilizando composições de massa padrão*. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 88 p.
- FERNANDES P. F.; OLIVEIRA A. P. N.; HOTZA D. 2003. Reciclagem do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos. Parte 1: Ensaio Laboratoriais. *Cerâmica Industrial*, **8**:24-34.
- FRANCO A. L. C. 2008. *Revestimentos cerâmicos de fachada: composição, patologias e técnicas de aplicação*. Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 80 p.
- GONÇALVES J. P. 2005. *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial*. (Tese, Doutorado, Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 273 p.
- HANSEN D. M.; BREHM, F. A.; MORAES, C. A. M.; KULAKOWSKI, M. P. 2015. Aplicação de resíduo cerâmico calcinado como pozolana: uma revisão bibliográfica. *6º Fórum internacional de resíduos sólidos*, 1-10.
- INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE LOUÇAS SANITÁRIAS SANTA CLARA LDTA. Disponível em: <http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>. Acesso em: 19 de março. 2016.
- JORNAL ARAXÁ. Disponível em: (<http://jornalaraxa.com.br/app/pub/santa/santa.html>). Acesso em: 19 de março. 2016.
- MEDEIROS E. N. M.; SPOSTO R. M.; NEVES G. A.; MENEZES R. R. 2010. Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento. *Cerâmica*, **56**:399-404.

- MELO M. M.; PINHEIRO A. S.; NASCIMENTO R. M.; MARTINELLI A. E.; DUTRA R. P. S.; MELO, M. A. F. 2009. Análise microestrutural de misturas cerâmicas de grés Porcelanato com adição de chamote de telhas cerâmicas. *Cerâmica (São Paulo. Impresso)*, **55**:356-364.
- NASCIMENTO A. J. 2011. *Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 65 p.
- NETTO R. M. 2006. *Materiais pozolânicos*. Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 147p.
- OLIVEIRA A. N. 2012. *Estudo da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha*. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 62 p.
- PAIXÃO C. A. B. 2011. *Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias*. (Dissertação, Mestrado, Ciência e Tecnologia de Materiais), Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre. 62 p.
- SANTOS S. 2006. *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*. (Tese, Doutorado, Construção Civil), Centro Tecnológico da Universidade de Santa Catarina, Florianópolis. 267 p.
- VIEIRA A. A. P. 2005. *Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos*. (Dissertação, Mestrado), Centro de tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 107 p.
- ZACCARON A.; GALATTO S. L.; NANDI V. S.; FERNANDES P. 2014. Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. *Cerâmica Industrial*. **19**:333-339.
- ZAPPELINI E. 2009. *Reaproveitamento de resíduos industriais na produção de placas cerâmicas*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma. 73p.