



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**JANAÍNA KRISTINA GOMIDE COSTA**

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO DA  
INDÚSTRIA DE LOUÇA SANITÁRIA NA LINHA DE  
PRODUÇÃO**

**ARAXÁ/MG**

**2017**

**JANAÍNA KRISTINA GOMIDE COSTA**

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO DA  
INDÚSTRIA DE LOUÇA SANITÁRIA NA LINHA DE  
PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Coorientadora: Msc. Maria Aparecida Nessralla.

**ARAXÁ/MG**

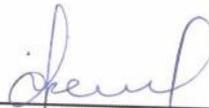
**2017**

JANAÍNA KRISTINA GOMIDE COSTA

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO DA  
INDÚSTRIA DE LOUÇA SANITÁRIA NA LINHA DE  
PRODUÇÃO**

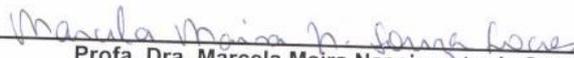
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Minas, do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais –  
CEFET/MG, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia de Minas.

Araxá, 29 de junho de 2017.



**Presidente e Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá.



**Profa. Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares.**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá.



**Prof. Francisco de Castro Valente Neto.**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade  
Araxá.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao CEFET-MG, instituição que me possibilitou a realização de um sonho e a todos professores e funcionários que sempre me trataram com muito carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende, pela orientação, apoio e confiança.

À minha coorientadora Msc. Maria Aparecida Nessralla, pelo incentivo, amizade, disposição e suporte.

Aos professores que ao decorrer da minha jornada fizeram parte da minha vida. Aos meus pais, pelo amor e carinho. À minha mãe em especial que me deu total apoio, incentivo nas horas mais difíceis, de desesperança.

À Profa. Dra. Marcela Maira N. de S. Soares, que me ajudou com as análises dos testes.

À primeira Turma de Engenharia de Minas do CEFET-MG, com os quais cursei maior parte do meu curso, pela amizade, carinho, compreensão, ensinamento, momentos tristes e felizes compartilhados.

A todos colegas com quem tive o prazer de conviver na Engenharia de Minas do CEFET-MG, com os quais pude compartilhar bons momentos de apoio e motivação mútua.

Ao diretor Eduardo Lusvarghi da Indústria de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda., pela confiança e apoio prestado neste trabalho.

Aos meus colegas Patrick e Luís Alberto que me ajudaram na parte escrita e emocional deste trabalho.

Ao meu melhor amigo Thiago Henrique Silva, pelo incentivo, por me ajudar em todos os testes me ensinando e sempre com muita paciência.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

## RESUMO

A crescente demanda por métodos sustentáveis de disposição, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos é uma realidade não somente na indústria cerâmica, mas na indústria em geral. Soluções ecológicas para a geração e controle de resíduos sólidos industriais são exigidas tanto pela legislação ambiental como pela sociedade, que cada vez mais valoriza empresas que se mostrem ambientalmente engajadas. Neste contexto, o presente trabalho de conclusão de curso propôs a caracterização físico-química do resíduo retido na peneira e o desenvolvimento de novas amostras feitas por substituição percentual da matéria prima, de uma indústria de louças sanitárias localizada em Araxá/MG. Para atingir o objetivo, foram estudadas as características físico-químicas do material e o comportamento mecânico de corpos de prova confeccionados com substituição percentual de parte da matéria prima pelo resíduo. Foram realizadas para a caracterização físico-química as técnicas de granulometria a laser, difração de raios-X, fluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV); e para a caracterização mecânica dos corpos de prova, testes laboratoriais padronizados pela indústria cerâmica e ensaios mecânicos. Os testes de reologia, avaliação do destacamento e tato mostraram que as amostras apresentam resultados aceitáveis em comparação aos testes feitos com a barbotina utilizada pela empresa. Quando confrontados com o valor padrão, os valores de tempo obtidos no teste de velocidade de deposição e tempo de secagem foram consideravelmente próximos, no entanto, as massas do molde aferidas apresentaram valores maiores. O peso específico mostrou que apenas AF – 5% está acima do valor padrão de teste da empresa. Na porcentagem de resíduos apenas a amostra AF – 10% excedeu o padrão (que é de no máximo 12%). O teste de retração linear apresentou valores na sua maioria abaixo do padrão. Os testes de módulo de ruptura à flexão, os resultados para a formulação AF ficaram abaixo dos valores de referência da empresa e do mínimo exigido pela indústria cerâmica, já os resultados para a formulação NF não atingiram o valor de referência estipulado pela empresa, mas ficaram acima do limite estipulado pela indústria cerâmica. O teste de deformação piropástica revelou uma maior deformação com as substituições, exceto por NF – 5% (que obteve valor igual ao padrão). Portanto, a pesquisa realizada durante este trabalho de conclusão de curso indica a viabilidade da reutilização do resíduo retido na peneira de 40# da indústria como substituinte parcial da matéria prima na linha de produção. Esta substituição geraria um ganho econômico na redução no uso do filito e atenderia às preocupações em relação à sustentabilidade e à preservação ambiental através da diminuição da quantidade de resíduo a ser descartada.

**Palavras-chave:** Resíduo sólido. Resíduo argiloso. Materiais cerâmicos.

## ABSTRACT

The growing demand for sustainable methods of disposal, recycling and reuse of solid waste is a reality, not only in the ceramic industry, but in the industry as a whole. Ecological solutions for the generation and control of industrial solid waste are required by both environmental legislation and society, which increasingly values companies that are environmentally engaged. In this context, the present work of the course proposed the physical-chemical characterization of the residue retained in the sieve, and the development of new samples made by percentage substitution of the raw material of a sanitary ware industry located in Araxá / MG. In order to reach the objective, the physical-chemical characteristics of the material and the mechanical behavior of test specimens made with percentage replacement of part of the raw material by the residue were studied. The physicochemical characterization of laser granulometry, X-ray diffraction, X-ray fluorescence and scanning electron microscopy (SEM) techniques were performed; And for the mechanical characterization of the test specimens, laboratory tests standardized by the ceramics industry and mechanical tests. The rheology tests, evaluation of detachment and tact showed that the samples present acceptable results in comparison to the tests made with the slip used by the company. When faced with the standard value, the time values obtained in the deposition rate and drying time test were considerably close, however, the measured mold masses presented higher values. The specific weight showed that only AF - 5% is above the standard test value of the company. In the percentage of residues only the AF - 10% sample exceeded the standard (which is at most 12%). The linear retraction test presented values mostly below the standard. The flexural modulus tests, the results for the AF formulation were below the reference values of the company and the minimum required by the ceramics industry, and the results for the NF formulation did not reach the reference value stipulated by the company, but were Above the limit stipulated by the ceramics industry. The piroplastic deformation test revealed a greater deformation with the substitutions, except for NF - 5% (which obtained a value equal to the standard). Therefore, the research conducted during this course completion work indicates the feasibility of reusing the residue retained in the 40 # sieve of the industry as a partial substitute of the raw material in the production line. This substitution would generate an economic gain in the reduction in the use of the phyllite and would attend to the concerns regarding the sustainability and the environmental preservation through the reduction of the amount of waste to be discarded.

**Keywords:** Solid waste. Clay residue. Ceramic materials.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### A) FIGURAS

FIGURA 2.1 – FLUXOGRAMA GENÉRICO DO PROCESSO PRODUTIVO DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS. ....	8
FIGURA 2.2 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE SANITÁRIOS. ....	9
FIGURA 2.3 – PRINCIPAIS PRODUTORES MUNDIAIS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS. ....	13
FIGURA 2.4 – VISTA DA EMPRESA SANTA CLARA. ....	15
FIGURA 2.5 – PROCESSO PRODUTIVO SANTA CLARA SIMPLIFICADO. ....	16
FIGURA 3.1 – PENEIRA DE 40# E RESÍDUO RETIDO NA PENEIRA. ....	17
FIGURA 3.2 – EXEMPLO DE DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA DE QUARTZO. ....	20
FIGURA 3.3 – ESTEREOMICROSCÓPIO. ....	21
FIGURA 3.4 – ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE. ....	22
FIGURA 3.5 – APARELHO DE CASAGRANDE (COM SUA CONCHA), E AS FERRAMENTAS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ. ....	23
FIGURA 3.6 – TESTE DE PERDA AO FOGO, CADINHO DENTRO DA ESTUFA. ....	25
FIGURA 3.7 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O TESTE DE FUNDÊNCIA. ....	26
FIGURA 3.8 – PRODUÇÃO DA BARBOTINA DE SUBSTITUIÇÃO, PESAGEM, MISTURA DAS MATÉRIAS PRIMAS, MOAGEM E BARBOTINA PRONTA TRANSFERIDA PARA O BALDE. ....	28
FIGURA 3.9 – DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO DAS BARBOTINAS. ....	29
FIGURA 3.10 – DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DE RESÍDUOS. ....	30
FIGURA 3.11 – DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA ATRAVÉS DO USO DE VISCOSÍMETRO BROOKFIELD E UM BÉQUER COM BARBOTINA. ....	32
FIGURA 3.12 – PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO E TEMPO DE SECAGEM. ....	33
FIGURA 3.13 – FUNDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA. ....	34
FIGURA 3.14 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RUPTURA. ....	35
FIGURA 3.15 – CORPO APÓS A CONFORMAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE RETRAÇÃO LINEAR. ....	36
FIGURA 3.16 – DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PIROPLÁSTICA. ....	38
FIGURA 4.1 – ESPECTRO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS X DA AMOSTRA DE QUARTZO. ....	40
FIGURA 4.2 – MICROGRAFIA EM AMPLITUDE DE AUMENTO DA AMOSTRA. ....	41
FIGURA 4.3 – IMAGEM DA ANÁLISE TÁTIL VISUAL A PARTIR DO ESTEREOMICROSCÓPIO. ....	43
FIGURA 4.4 – CILINDRO FEITO NO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE COMPARADO COM O GABARITO. ....	44
FIGURA 4.5 – CONES DE QUEIMA: A – ARGILA PADRE LIBÉRIO; B – FILITO; C – GRANITO; D – ARGILA SÃO SIMÃO; E – RESÍDUO. ....	46

### B) GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO CERÂMICO. ....	42
GRÁFICO 4.2 – RESISTÊNCIA À FLEXÃO DOS CORPOS DE PROVA CRU. ....	48

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS CIMENTOS PORTLAND COMERCIALIZADOS NO BRASIL, SEGUNDO A ABNT.....	3
TABELA 2.2 – REQUISITOS QUÍMICOS.....	4
TABELA 2.3 – REQUISITOS FÍSICOS.....	5
TABELA 3.1 – SUBSTITUIÇÃO DO FILITO PELO RESÍDUO EM 5% NA FORMULAÇÃO AF.....	27
TABELA 3.2 – SUBSTITUIÇÃO DO FILITO PELO RESÍDUO EM 10% NA FORMULAÇÃO AF.....	27
TABELA 3.3 – SUBSTITUIÇÃO DO FILITO PELO RESÍDUO EM 5% NA FORMULAÇÃO NF.....	27
TABELA 3.4 – SUBSTITUIÇÃO DO FILITO PELO RESÍDUO EM 10% NA FORMULAÇÃO NF.....	27
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA OBTIDA PELA EDX .....	39
TABELA 4.2 – RESULTADO DO TESTE DE LIMITE DE PLASTICIDADE. ....	44
TABELA 4.3 – RESULTADO DO TESTE DE LIMITE DE LIQUIDEZ.....	45
TABELA 4.4 – RESULTADO DO TESTE DE PESO ESPECÍFICO EM G/CM <sup>3</sup> .....	47
TABELA 4.5 – RESULTADO DO TESTE DE PORCENTAGEM DE RESÍDUOS. ....	47
TABELA 4.6 – RESULTADO DO TESTE DE REOLOGIA.....	47
TABELA 4.7 – RESULTADO DO TESTE DE VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO E TEMPO DE SECAGEM. .....	48
TABELA 4.8 – RESULTADO DO TESTE DE RETRAÇÃO LINEAR.....	49
TABELA 4.9 – RESULTADO DO TESTE DE DEFORMAÇÃO PIROPLÁSTICA.....	49

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Cimento .....</b>	<b>2</b>
2.1.1 Pozzolana .....	3
<b>2.2 Cerâmica .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Processo de produção.....	5
2.2.2 Classificação e composição .....	10
2.2.3 Contexto econômico.....	13
<b>2.3 Indústria Santa Clara.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Aproveitamento de resíduos cerâmicos .....</b>	<b>16</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Coleta da amostra .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Preparação da amostra do resíduo .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Caracterização da amostra.....</b>	<b>18</b>
3.3.1 Caracterização química e morfológica .....	18
3.3.2 Caracterização física .....	20
3.3.3 Caracterização química.....	23
<b>3.4 Análises e testes no laboratório da empresa .....</b>	<b>25</b>
3.4.1 Teste de fundência do material “Cone de queima” .....	25
3.4.2 Produção da barbotina .....	26
3.4.3 Peso Específico.....	28
3.4.4 Determinação da Porcentagem de Resíduos.....	29
3.4.5 Reologia .....	31
3.4.6 Determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem.....	32
3.4.7 Avaliação do destacamento e tato.....	33
3.4.8 Fundição dos corpos de prova .....	34
3.4.9 Determinação do módulo de ruptura à flexão.....	34
3.4.10 Determinação da retração linear .....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (EDX) .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Difração de raios X (DRX).....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Análise granulométrica por difração de laser (DL) .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5 Análise tátil visual .....</b>	<b>42</b>

4.6 Limite de Plasticidade.....	43
4.7 Limite de liquidez .....	44
4.8 Determinação da umidade da amostra.....	45
4.9 Perda ao fogo .....	45
4.10 Testes de fundência.....	45
4.11 Peso específico .....	46
4.12 Porcentagem de resíduos.....	47
4.13 Reologia .....	47
4.14 Velocidade de deposição e tempo de secagem .....	47
4.15 Avaliação do destacamento e tato.....	48
4.16 Módulo de ruptura à flexão.....	48
4.17 Retração linear .....	49
4.18 Deformação pirolástica.....	49
5 CONCLUSÃO .....	50
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52
REFERÊNCIAS.....	53

# 1 INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica no Brasil apresenta crescimento constante, e com o avanço tecnológico e a descoberta de novas técnicas de produção, mais empresas se juntam ao segmento. Como a preocupação em relação à sustentabilidade e à preservação ambiental é cada vez maior, torna-se necessário uma atenção significativa aos resíduos gerados por essas empresas.

A Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda, localizada em Araxá, estado de Minas Gerais, tem como resíduo de sua produção, o material retido na peneira de 40#. Este resíduo não tem uso específico e é descartado pela empresa.

Considerando-se a situação descrita, a empresa procura viabilidade para aplicação deste resíduo, oriundo do início do processo de fabricação de louças sanitárias, que não é utilizado e que é descartado pela empresa.

Assim, a estratégia elaborada para a solução do problema da companhia é empregar esse resíduo como substituição parcial na matéria prima da produção de materiais cerâmicos. No entanto, é preciso realizar uma caracterização deste resíduo e avaliar a possibilidade do seu uso como substituinte na matéria prima da empresa.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da utilização deste resíduo cerâmico na própria linha de produção da empresa. Os objetivos específicos foram: analisar as características físico-químicas do resíduo; verificar as características da barbotina produzida com este resíduo; avaliar o comportamento mecânico de corpos de prova confeccionados com substituição de parte da matéria prima pelo resíduo cerâmico.

Os principais autores consultados para a realização desse trabalho foram: Bauer (2013), Bustamante e Bressiani (2000), Castro (2016) e Motta, Zanardo e Cabral Júnior (2001). Os trabalhos feitos por estes autores ajudaram na construção da revisão bibliográfica e serviram de comparação para os resultados obtidos neste estudo.

Este trabalho está dividido em 3 capítulos, sendo que o primeiro aborda uma revisão bibliográfica apresentando os principais aspectos conceituais, como cimento, cerâmica e o uso do resíduo cerâmico. O segundo capítulo apresenta a metodologia do trabalho apresentando quais os testes executados. E por fim, mostram-se os resultados obtidos nos testes e uma discussão dos mesmos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cimento

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002, p.1), “cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento”.

As obras e construções atuais, sobretudo os grandes centros, empregam o cimento como componente ligante, concretagem e elemento estrutural, dentre outras inúmeras finalidades. O emprego do cimento pode ser visto como uma “marca” da sociedade atual, uma vez que desde o começo do século XX é considerado como a resolução financeira para os obstáculos de moradia, bem como para a edificação de obras de engenharia (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012).

O marco no progresso do cimento foi realizado em 1756, por John Smeaton, pois alcançou um produto com alta resistência através de calcinação de calcários moles e argilosos. Mas, foi em 1818, que Joseph Aspdin criou uma mistura, que após seca, era tão resistente quanto às pedras utilizadas nas edificações. Essa mistura foi oriunda da queima simultânea de pedras calcárias e argila, convertidas num pó fino. O inglês patenteou a mistura nomeando-a de cimento Portland, em virtude da sua cor e das propriedades de durabilidade e solidez equivalentes às rochas da Ilha Portland (MARQUES, 2010).

Assim, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) descreve a partir de tipos e classes o cimento Portland levando em conta os seus constituintes e propriedades. A Tabela 2.1 mostra a classificação dos principais tipos de cimentos comercializados no Brasil (CORDEIRO, 2001).

Tabela 2.1 – Classificação dos cimentos Portland comercializados no Brasil, segundo a ABNT.

Tipo de cimento	Sigla	Composição (percentual em massa)			
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
<b>Comum</b>	CPI	100		-	
	CPI-S	95-99		1-5	
<b>Composto</b>	CP II – E	56-94	6-34	-	0-10
	CP II – Z	76-94	-	6-14	0-10
	CP II – F	90-94	-	-	6-10
<b>Alto-forno</b>	CP III	25-95	35-70	-	0-5
<b>Pozolânico</b>	CP IV	45-85	-	15-50	0-5
<b>Alta res. Inicial</b>	CP V - ARI	95-100	-	-	0-5
<b>Branco estrutural</b>	CPB	75-100*	-	-	0-25

\* No cimento branco é utilizado um clínquer com baixos teores de óxidos de ferro e manganês. Obs.: Se a sigla do cimento vir como sufixo RS quer dizer que o cimento Portland é resistente aos sulfatos (por exemplo: CP III – 40 RS).

Fonte: CORDEIRO (2001, p.11).

As principais matérias-primas na fabricação do cimento são os calcários e as argilas, dos quais há reservas abundantes. Os maiores empecilhos no emprego dessas rochas na produção de cimento são as suas composições químicas e as distâncias entre as jazidas e o mercado de consumo. Assim, mais de 90% do cimento no mundo é consumido nos próprios países em que foi produzido (FILHO; NETO; DANTAS, 2014).

### 2.1.1 Pozolana

De acordo com a Norma Brasileira Registrada – NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos são: “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Usualmente, os materiais pozolânicos são divididos em dois grandes grupos (PINHEIRO, 2008):

a) Pozolanas Naturais: normalmente de origem vulcânica, também podem ser originadas de rochas sedimentares ou fósseis. Tem teor elevado de sílica (dióxido de silício -  $\text{SiO}_2 > 65\%$ );

b) Pozolanas Artificiais: originadas de procedimentos industriais (Ex.: escórias, cinzas volantes, etc.) ou tratamento térmico de algumas variedades de argilas.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) subdivide os materiais pozolânicos em três classes (N, C e E). Essa distinção é feita levando-se em conta sua origem, requisitos químicos e físicos estabelecidos nesta mesma norma. Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis na NBR 12653 (ABNT, 2014), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Os da Classe C são as cinzas volantes oriundas da combustão de carvão mineral em usinas termoelétricas, que seguem também às condições propostas nesta NBR. Por último o material da Classe E é qualquer pozolana cujas características são distintas das classes anteriores, mediante o que está firmado na NBR 12653 (ABNT, 2014). Ainda, segundo a mesma NBR, os materiais pozolânicos devem estar em consonância com as condições químicas e físicas determinadas, respectivamente, nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2 – Requisitos químicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico			Método de Ensaio (*)
	N	C	E	
<b><math>\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3</math> (% min)</b>	≥70	≥70	≥50	ABNT NBR NM 22
<b><math>\text{SO}_3</math> (% máx)</b>	≤4	≤5	≤5	ABNT NBR NM 16
<b>Teor de umidade, (% máx)</b>	≤3	≤3	≤3	ABNT NBR NM 24
<b>Perda ao fogo, (% máx)</b>	≤10	≤6	≤6	ABNT NBR NM 18
<b>Álcalis disponíveis em <math>\text{Na}_2\text{O}</math>, (% máx)</b>	≤1,5	≤1,5	≤1,5	ABNT NBR NM 25

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico

Fonte: NBR 12653 (2014, p.3).

Tabela 2.3 – Requisitos físicos

Propriedades	Classes de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
<b>Material retido na peneira 45µm (% máx)</b>	≤20	≤20	≤20	ABNT NBR 15894-3 (*)
<b>Índice de atividade pozolânica</b>				
<b>Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, (% min)</b>	≥90	≥90	≥90	ABNT NBR 5752
<b>Com o cal aos 7 dias, em Mpa</b>	≥6	≥6	≥6	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.

Fonte: NBR 12653 (2014, p.3).

## 2.2 Cerâmica

Os materiais cerâmicos são inorgânicos e não metais, geralmente formados por ligações entre os elementos metálicos e não metálicos, onde predominam as ligações iônicas, no entanto contendo certo caráter covalente (CALLISTER JUNIOR, 2007).

A definição do termo cerâmica é apontado por Callister Junior (2007, p. 303) como “vem da palavra grega *keramikos*, que significa ‘matéria queimada’, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são atingidas normalmente através de um processo de tratamento térmico à alta temperatura chamado de cozimento”.

Outra definição, apresentada pela Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM (2016), é que “cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas”.

### 2.2.1 Processo de produção

A Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres – ANFACER (2015) menciona que a produção de

cerâmicas no Brasil envolve o uso de dois processos, sendo via seca ou a via úmida. As empresas brasileiras de revestimentos de cerâmica possuem as melhores ferramentas que a tecnologia pode fornecer e estão de acordo com as normas internacionais de qualidade. A qualidade dos produtos depende das características das matérias-primas utilizadas, e por isso vários aspectos devem receber atenção especial, como: composição química, tamanho das partículas, pureza, reatividade, potencialidade de extração e custos (CAVALCANTE, 2005). Castro (2016) classifica estes materiais em duas categorias: plásticas (argila comum, argila plástica, caulim) e não plásticas (feldspato, filito, talco, calcita, quartzo, dentre outros).

Os métodos de produção utilizados pelos diferentes tipos de cerâmicos são parcialmente ou totalmente similares entre si, apenas diferenciando com o tipo de peça ou material previsto (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006). Assim, de maneira geral, a produção é constituída das seguintes fases de acordo com Bauer (2013): extração do barro; preparação da matéria-prima; moldagem; secagem; cozimento; esfriamento, e em vários casos tem-se a vitrificação especial.

#### a) Extração da argila e tratamento inicial da matéria-prima

Os materiais são obtidos das mineradoras, onde já são extraídos, moídos, homogeneizados e posteriormente classificados conforme suas características. Após esse processo o material pode ser mantido em estoque, ou já é enviado para a indústria cerâmica através de ferrovias ou rodovias (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

#### b) Preparo da massa

A massa é preparada com água, aditivos e uma ou mais matérias-primas. Ressalta-se que o uso da água depende do tipo de barro e de moldagem, assim como a dosagem de cada constituinte. De acordo com a relevância da indústria são utilizadas mais ou menos equipamentos, podendo ter funções como quebra de torrões e pedras, por exemplo (BAUER, 2013).

### c) Moldagem

De acordo com Bauer (2013) nesta etapa a cerâmica recebe a forma desejada, podendo ser moldada por diferentes procedimentos, dependendo do tipo de matéria-prima, formato e tipo de forno. Os procedimentos podem ser:

- Moldagem a seco ou semi-seco (4 a 10% de água);
- Moldagem com pasta plástica consistente (20 a 35% de água);
- Moldagem com pasta plástica mole (25 a 40% de água);
- Moldagem com pasta fluída (30 a 50% de água).

### d) Secagem

Após a moldagem as peças apresentam alta quantidade de água. Assim, para se evitar possíveis defeitos por causa da presença do líquido é feita a secagem do material. A água deve ser eliminada gradualmente até que se atinja um grau de umidade residual da ordem de 0,8 a 1,5%. A secagem geralmente é realizada a 170°C e pode ser feita em secadores verticais e horizontais (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

### e) Queima e resfriamento

As mudanças na estrutura cristalina da argila ocorrem na fase da queima, e o modo de aquecimento e resfriamento é específico para cada segmento. A vitrificação acontece em torno de uma temperatura de 1200°C (geração de vidro que preenche os poros do material elevando sua resistência e minimizando sua permeabilidade) (SILVA, 2013).

A seguir podem ser observados alguns fluxogramas comuns na produção de cerâmicos, Figura 2.1 e 2.2, respectivamente.

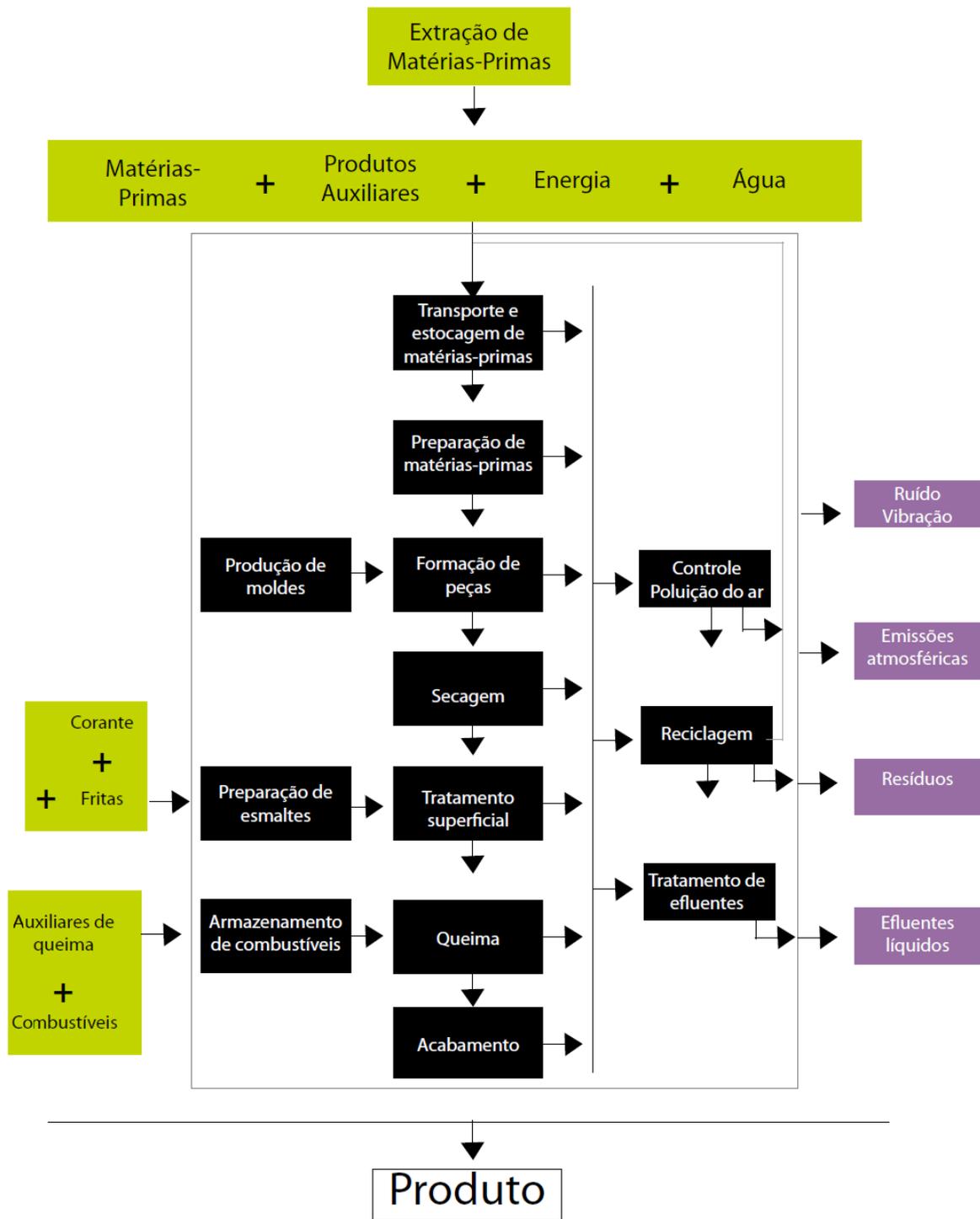


Figura 2.1 – Fluxograma genérico do processo produtivo das indústrias cerâmicas.  
Fonte: OLIVEIRA; MAGANHA (2006, p. 29).

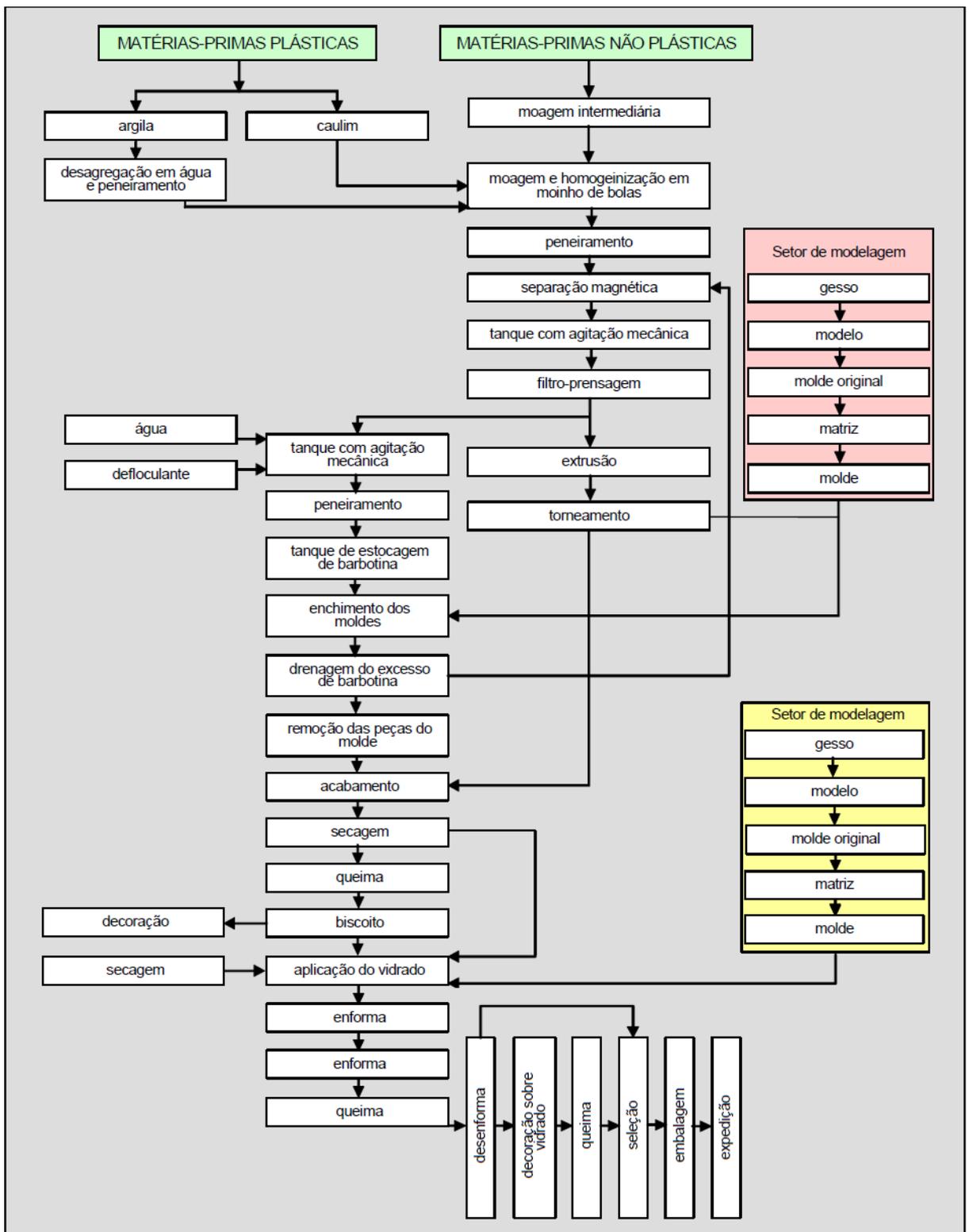


Figura 2.2 – Fluxograma do processo de fabricação de sanitários.  
 Fonte: São Paulo, 1992 apud COELHO (2009, p. 37).

### 2.2.2 Classificação e composição

A classificação dos grupos cerâmicos é feita de acordo com o seu uso na indústria, do tipo de constituintes, das propriedades de textura da massa base e também de outras propriedades cerâmicas e das características técnico-econômicas (MOTTA; ZANARDO; CABRAL JUNIOR, 2001).

A ABCERAM (2016) classifica as cerâmicas em: cerâmica vermelha, materiais de revestimento (placas cerâmicas), cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento e cal e cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada.

#### *2.2.2.1 Cerâmica vermelha*

Geralmente voltada para o uso estrutural, este grupo envolve os materiais cerâmicos avermelhados que gera os tijolos com furos, os maciços, tabelas ou lajes, blocos para vedação, telhas, manilhas e pisos rústicos. Este segmento da indústria move cerca de 60 milhões de toneladas de matérias-primas anualmente no país, gerando cerca de 300 mil empregos (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2000).

#### *2.2.2.2 Cerâmica branca*

Os materiais classificados como cerâmica branca englobam os que constituem-se de um corpo branco, apresentando uma camada vítrea transparente e não possui marcas por questões de estética (CASTRO, 2016).

Podem se dividir em três tipos: as porcelanas, grés e faiança. As porcelanas são feitas de argilas, caulim e feldspato de alta pureza sem poros. O grés é feito a partir de materiais com pureza mais baixa que as porcelanas, podendo conter no lugar de feldspato fundentes como granito, pegmatito ou filito. A faiança é similar ao grés, mas não apresenta fundente carbonatítico (CAVALCANTE, 2005).

### *2.2.2.3 Materiais de revestimento (placas cerâmicas)*

São os materiais que são produzidos em forma de placas e utilizados como revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas. Recebem vários nomes, dentre eles os mais conhecidos são: azulejo, pastilha, porcelanato, grês, lajota e piso (ABCERAM, 2016).

### *2.2.2.4 Materiais refratários*

Os materiais refratários têm o objetivo de suportar altas temperaturas para em situações características de processamento ou operação. O principal uso é em máquinas industriais onde estão sob a ação de forças mecânicas, agressões químicas e mudanças drásticas de temperatura (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

Os materiais refratários constituem 80% da participação nacional no mercado dos cerâmicos, isto devido à existência de 40 empresas envolvidas neste segmento (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2000).

### *2.2.2.5 Isolantes térmicos*

De acordo com Oliveira e Maganha (2006), os isolantes térmicos são classificados em:

- a) refratários isolantes que se encaixam na classificação de refratários;
- b) isolantes térmicos não refratários, abrangendo produtos como vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são produzidos por métodos diferentes do tópico (a) e que suportam até 1100°C de acordo com sua constituição;
- c) fibras ou lãs cerâmicas que possuem propriedades físicas similares as mencionadas no tópico (b), mas que podem suportar até 2000°C ou de acordo com a constituição de sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia.

#### *2.2.2.6 Fritas e corantes*

Esses dois tipos são significativos quando acabamentos específicos são necessários. Fritas são vidros moídos que são empregados na superfície cerâmica depois da queima para dar um aspecto vítreo. Apresenta como características a melhora estética, impermeabilização da peça e acréscimo na resistência mecânica. Os corantes são formados por óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos e adicionados aos corpos cerâmicos para fornecer-lhes cores variadas e efeitos especiais (ABCERAM, 2016).

#### *2.2.2.7 Abrasivos*

A indústria dos abrasivos usa matérias-primas e métodos de produção similares aos da cerâmica, e por isso são classificados como um segmento da indústria cerâmica. Os produtos que se destacam nesse grupo são o óxido de alumínio eletro fundido e o carbetto de silício (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

#### *2.2.2.8 Vidro, cimento e cal*

São segmentos cerâmicos que são importantes devido suas propriedades específicas, e por isso muitas vezes são considerados à parte dos materiais cerâmicos (ABCERAM, 2016).

#### *2.2.2.9 Cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada*

As cerâmicas de alta tecnologia ou também conhecidas como cerâmicas avançadas são produzidas utilizando matérias-primas que possuem pureza altamente elevada, e através de processos que são extremamente supervisionados e agrupados conforme suas aplicações. Os usos destes materiais podem envolver funções em espaçonaves, satélites, usinas nucleares, implantes, eletrodomésticos, encosto de catalisadores em veículos, sensores (umidade, gases e outros) e dispositivos de corte (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

### 2.2.3 Contexto econômico

O Brasil ocupa o segundo lugar (a China ocupa o primeiro lugar) na produção mundial de revestimento cerâmico, em que anualmente são produzidos 899,4 milhões de m<sup>2</sup>, Figura 2.3. O setor brasileiro de revestimentos cerâmicos é formado por 92 empresas, grande parte dessa produção vem das regiões Sudeste e Sul (principalmente dos estados de São Paulo e Santa Catarina), porém a produção em outras regiões, como a Nordeste, é crescente (ANFACER, 2015).

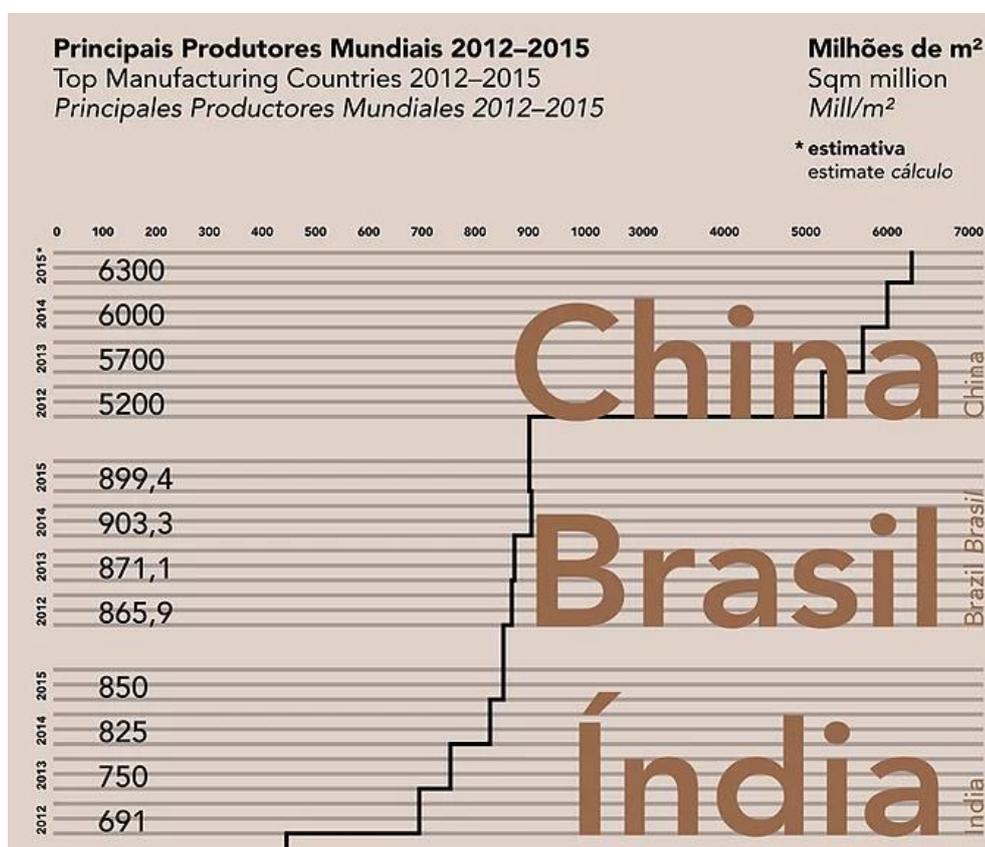


Figura 2.3 – Principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos.  
 Fonte: ANFACER, 2015.

Bustamante e Bressiani (2000) apontam que participação da indústria cerâmica no PIB brasileiro é de cerca de 1%. A produção nacional dos setores cerâmicos apresenta valores satisfatórios, e são mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valor da produção nacional dos setores cerâmicos atuantes no Brasil.

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
<b>Total do Setor</b>	<b>6.293.000</b>

Fonte: BUSTAMANTE; BRESSIANI (2000, p. 31).

De acordo com a Tabela 2.4, nota-se que a produção nacional dos setores cerâmicos é dominada pelos segmentos da cerâmica estrutural (vermelha) e de revestimentos (pisos e azulejos) totalizando cerca de 4.200.000 US\$ por ano, sendo aproximadamente 67% do valor total.

### 2.3 Indústria Santa Clara

A Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda, mostrada na Figura 2.4, está localizada no município de Araxá, no estado de Minas Gerais, e é produtora de louças sanitárias. A indústria utiliza como matéria-prima a barbotina, nome dado à massa cerâmica, composta por 64,0% de filito Bambuí, 8,5% de argila São Simão, 5 % de argila Padre Libério e 22,5% de granito.



Figura 2.4 – Vista da empresa Santa Clara.  
Fonte: SANTA CLARA LOUÇAS SANITÁRIAS.

Disponível em: <http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>>

Segundo Castro (2016, p.19),

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.

A Figura 2.5 evidencia o processo produtivo da empresa simplificada (CASTRO, 2016).

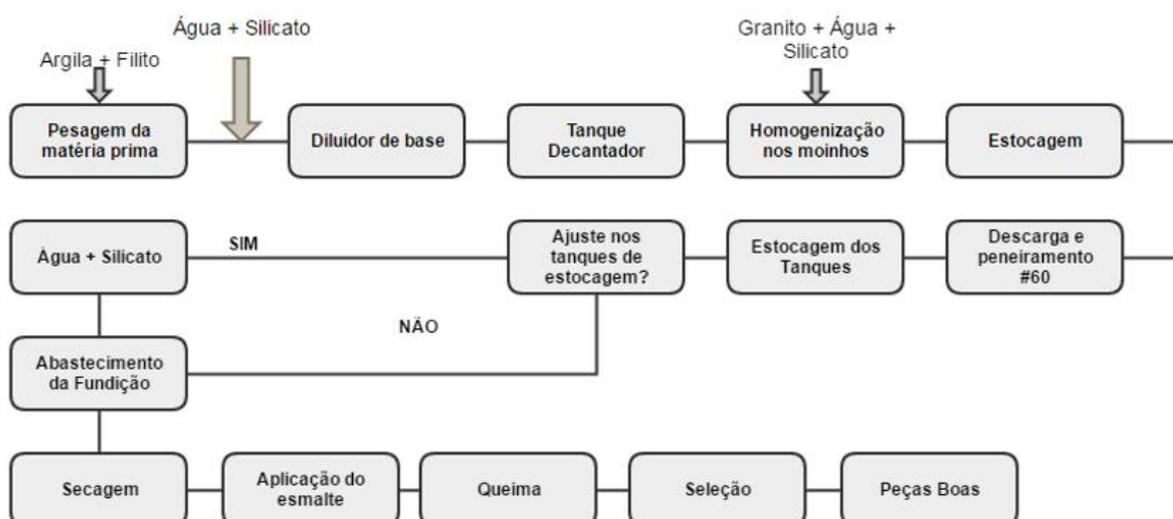


Figura 2.5 – Processo produtivo Santa Clara simplificado.  
Fonte: CASTRO (2016, p. 19).

## 2.4 Aproveitamento de resíduos cerâmicos

O interesse em se preservar o meio ambiente e a questão da sustentabilidade é cada vez mais frequente na indústria, e no setor dos cerâmicos não é diferente. As empresas que produzem ou transformam os materiais geram quantidades de matérias residuais que muitas vezes não são utilizadas e, por isso, seu descarte pode causar dano ao meio ambiente. Deste modo buscam-se processos que reaproveitem esses resíduos, empregando-os como matéria-prima na indústria (CASAGRANDE et al., 2008).

Como visto nos fluxogramas dos processos de produção dos produtos cerâmicos, grande parte dos produtos são reaproveitados em outras etapas. No entanto existem os resíduos que são gerados na etapa final do processo, conhecidos como “chamote”, que geralmente não são utilizados. Por já ter sido queimado, o resíduo cerâmico apresenta dureza elevada e assim não pode ser redirecionado para o processo imediatamente sem que seja feito um tratamento prévio (CASAGRANDE et al., 2008).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Coleta da amostra

O resíduo utilizado no trabalho foi coletado do material retido da peneira de abertura de 40# (0,420 mm). A Figura 3.1 mostra a peneira (seta vermelha) e o resíduo retido (seta azul) da produção de cerâmica na Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda.

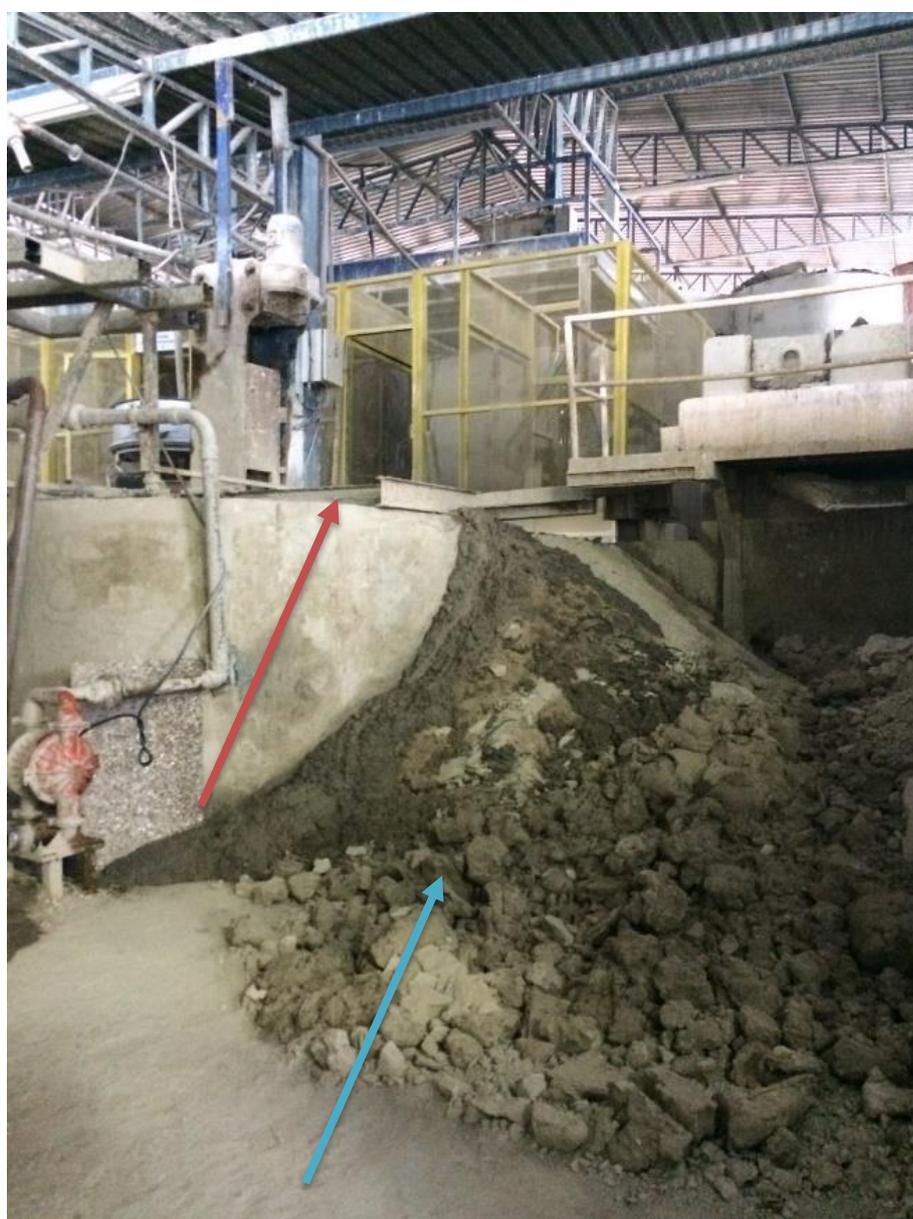


Figura 3.1 – Peneira de 40# e resíduo retido na peneira.

### 3.2 Preparação da amostra do resíduo

Após a coleta da amostra na empresa, a amostra foi levada ao laboratório do CEFET-MG campus Araxá. Em seguida, colocou-a na estufa com temperatura entre 100°C para a retirada da umidade. Após a secagem do resíduo, realizou-se a homogeneização do mesmo. Posteriormente, realizou-se o peneiramento até adequar a granulometria desejada de 0,297 mm, para maior precisão na análise onde, foi separada alíquota de 200 gramas.

### 3.3 Caracterização da amostra

Os testes de caracterização química e morfológica da amostra foram feitos nos Laboratórios de Caracterização de Materiais do Campus Belo Horizonte do CEFET – MG. Já os testes de caracterização física da amostra foram feitos no laboratório de Materiais de Construção Civil do CEFET – MG – Campus Araxá.

#### 3.3.1 Caracterização química e morfológica

Foram executados os seguintes testes:

- Espectrometria de Fluorescência de Raios X (EDX);
- Difração de Raios X (DRX);
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);

##### *3.3.1.1 Espectrometria de fluorescência de raio-X*

A espectrometria por fluorescência de raios X possibilita a identificação dos elementos de um material e estabelece a porcentagem de cada um em relação a totalidade da amostra. O ensaio tem a vantagem de não ser destrutivo, cujo procedimento é descrito por Beckhoff (2006 apud CASTRO, 2016, p. 56):

“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. 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”.

A Equação 1 descreve a Lei de Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen } \theta \quad (1)$$

Onde:

$n$  = é um número inteiro;

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação;

$d$  = distância interplanar;

$\theta$  = complemento do ângulo de incidência.

### 3.3.1.2 Difração de raio-X

A difração de raios X determina as fases cristalinas dos materiais e é bastante utilizada em materiais cerâmicos. O equipamento emite um raio na amostra e quando entra em contato com cada átomo gera determinado ângulo, onde cada variação é um tipo de material que compõe a amostra. O resultado é apresentado em um gráfico de picos, em que estes apresentam os principais elementos que constituem a amostra (CALLISTER JUNIOR, 2007). A Figura 3.2 mostra um exemplo deste tipo de difratograma da amostra de quartzo.

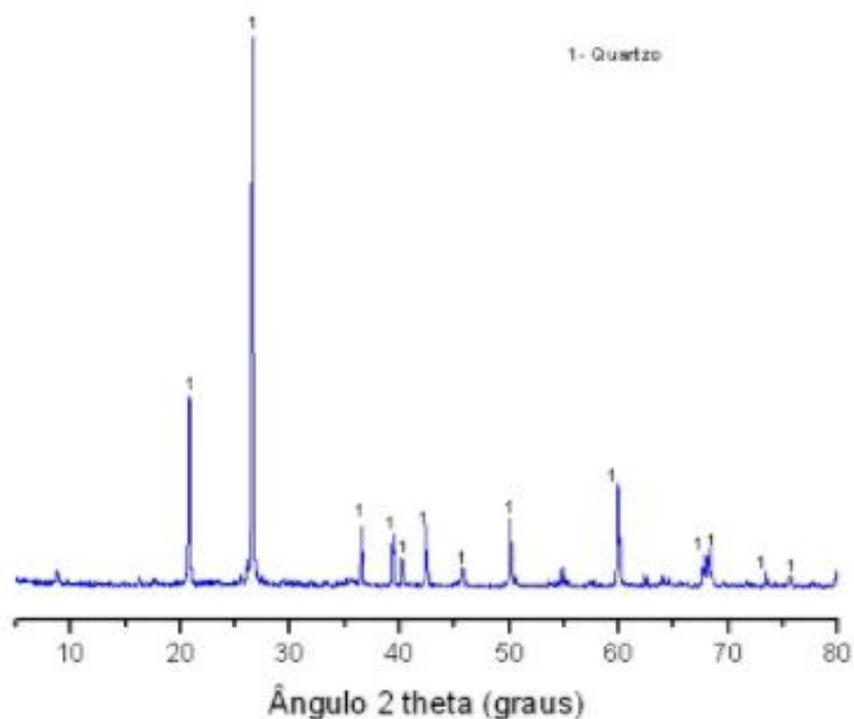


Figura 3.2 – Exemplo de difratograma da amostra de quartzo.  
Fonte: SANTOS; DALLA VALENTINA; SOUZA (2015, p.3).

### 3.3.1.3 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura fornece imagens com elevada ampliação e resolução. Feixes de elétrons são incididos no material varrendo sua superfície. Parte desses feixes é refletida e captada por um detector que converte o sinal em imagem (ALVES, 2008).

### 3.3.2 Caracterização física

Foram feitos os seguintes testes:

- Análise granulométrica por difração de laser (DL);
- Análise tátil visual;
- Limite de plasticidade;
- Limite de liquidez.

### 3.3.2.1 *Análise granulométrica*

A análise granulométrica foi realizada utilizando-se p equipamento granulômetro a laser, marca Cilas, modelo 1090, para a determinação das dimensões das partículas que constituem a amostra do resíduo da peneira de 40#.

### 3.3.2.2 *Análise tátil visual*

Através do uso de um estereomicroscópio (Figura 3.3), foi realizada a análise visual onde foram avaliadas as características de fácil reconhecimento visual e, através do tato, a característica como textura.



Figura 3.3 – Estereomicroscópio.

### 3.3.2.3 *Limite de plasticidade*

O limite de plasticidade foi verificado conforme a norma NBR 7180 (ABNT, 1984). Para a execução do teste foi usado uma alíquota de 200 gramas de amostra,

passante na peneira de abertura 0,42 mm (35#), como determina a NBR 6457 (ABNT, 1986).

A amostra foi colocada em um recipiente de porcelana, adicionou-se água destilada gradualmente e com uma espátula se homogeneizou o material até a formação de uma pasta homogênea e de consistência plástica. Cerca de 10 gramas foram retiradas da pasta e moldou-se uma pequena esfera (Figura 3.4), depois rolou-se essa pequena esfera sobre uma placa de vidro até que se obteve uma forma de cilindro.

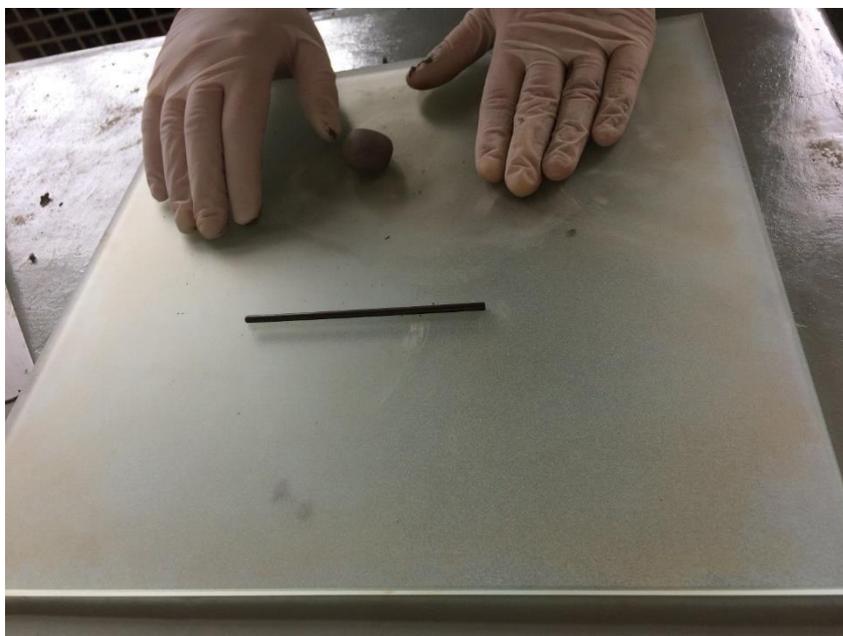


Figura 3.4 – Ensaio de limite de plasticidade.

Se a amostra se fragmentasse antes de se obter as medidas estabelecidas (de 3 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento, verifica-se com o gabarito de comparação), retornava-se a amostra para o recipiente de porcelana e adicionava-se mais água e homogeneizava-se novamente. Repetiu-se o procedimento até conseguir um cilindro dentro das medidas. Posteriormente, colocou-se o cilindro em cápsulas metálicas e secou-se em estufa a uma temperatura de 60°C à 65°C para determinação da umidade da amostra.

### 3.3.2.4 Limite de Liquidez

Colocou-se 100 g de amostra preparada no teste de limite de plasticidade na concha do aparelho de Casagrande até que na parte central a espessura seja da ordem de 10 mm e retornou-se todo excesso de amostra para o recipiente de porcelana. A amostra inserida no equipamento foi separada em duas partes com a ajuda de um cinzel, abrindo uma ranhura na parte central de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984). Girou-se a manivela do dispositivo, golpeando a concha contra a base, girou-se a manivela à razão de duas voltas por segundo, até que as bordas se unissem ao longo de 13 mm de comprimento, aproximadamente. Depois do processo transferiu-se, uma pequena quantidade da amostra de junto das bordas que se uniram para cápsulas metálicas para secagem em estufa a uma temperatura de 60°C à 65°C.

A Figura 3.5 mostra os materiais usados para realizar o ensaio de limite de liquidez.



Figura 3.5 – Aparelho de Casagrande (com sua concha), e as ferramentas e utensílios utilizados na determinação do Limite de Liquidez.

### 3.3.3 Caracterização química

Foram realizados os seguintes testes:

- Determinação da umidade da amostra;
- Perda ao fogo.

### 3.3.3.1 Determinação da umidade da amostra

Para determinação da umidade da amostra do resíduo pesou-se 1 g de amostra do mesmo, registrando-se a massa utilizada com aproximação de 0,001 g, em um cadinho de massa conhecida. Colocou-se o cadinho com a amostra de resíduo na estufa a temperatura de 100°C e socou-se até que a diferença entre duas determinações sucessivas de massa fossem menor que 0,001 g. O processo de secagem com o período inicial de no mínimo 30 minutos e os períodos subsequentes de pelo menos 10 minutos, até que não houvesse variação da massa maior que 0,001 g. Calculou-se o teor umidade de acordo com a Equação 2:

$$U_{\%} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

U = Umidade da amostra, em porcentagem;

m<sub>1</sub> = Massa da amostra, antes da secagem, em gramas;

m<sub>2</sub> = Massa da amostra, após a secagem, em gramas.

### 3.3.3.2 Perda ao fogo

A perda ao fogo é a determinação da quantidade de amostra que foi perdida durante o processo de queima. O método é estabelecido pela NBR NM 18 (ABNT, 2004) e foi feito em triplicata para maior precisão dos resultados.

A metodologia realizada foi a seguinte: pesou-se 1 ± 0,001 g de material em um cadinho de massa conhecida, colocou-se o cadinho para calcinar em forno mufla a uma temperatura entre 900°C-1000°C por cerca de 10 minutos (Figura 3.6). Esfriou-se o material em temperatura ambiente realizando pesagem e depois calcinou-se o material novamente por 5 minutos. Repetiu-se o procedimento até que a massa se mantivesse constante (não variou mais que 0,001 g). A perda de fogo é determinada de acordo com a Equação 3:

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

PF = Perda ao fogo, em porcentagem;

$m_1$  = Massa do cadinho mais a massa da amostra ensaiada, em gramas;

$m_2$  = Massa do cadinho mais amostra, após a calcinação, em gramas;

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



Figura 3.6 – Teste de perda ao fogo, cadinho dentro da estufa.

### **3.4 Análises e testes no laboratório da empresa**

#### **3.4.1 Teste de fundência do material “Cone de queima”**

O teste de fundência foi realizado da seguinte maneira: misturou-se o material a uma quantidade de cola orgânica até que o mesmo atingisse uma consistência adequada a passar na peneira de 40# (0,420 mm). O material passante foi modelado em pequenos cones de porcelana (Figura 3.7) e, em seguida, levado ao alto forno por aproximadamente 12 horas.



Figura 3.7 – Processo de produção dos corpos de prova para o teste de fundência.

### 3.4.2 Produção da barbotina

A empresa adota dois tipos de formulação para produção de barbotina a antiga formulação (AF) e a nova formulação (NF). A diferença entre as duas formulações são as quantidades distintas de matérias primas para a produção da barbotina. A produção da barbotina foi feita a partir da substituição percentual de uma das matérias primas, no caso o filito, pelo resíduo da peneira de 40#. A produção da barbotina foi proporcional à utilizada na produção industrial, porém em escala laboratorial. Foram feitos testes de substituição do filito pelo resíduo em 5% e 10%. A quantidade de material usado na produção das barbotinas é vista de acordo com a Tabela 3.1, substituição do filito pelo resíduo em 5% na formulação AF; Tabela 3.2, substituição do filito pelo resíduo em 10% na formulação AF; Tabela 3.3, substituição do filito pelo resíduo em 5% na formulação NF e Tabela 3.4, substituição do filito pelo resíduo em 10% na formulação NF.

Tabela 3.1 – Substituição do filito pelo resíduo em 5% na formulação AF.

<b>Material</b>	<b>Argila São Simão</b>	<b>Argila Padre Libério</b>	<b>Filito (BambuÍ)</b>	<b>Granito São Jerônimo</b>	<b>ResÍduo</b>
<b>(g)</b>	340	200	2432	900	128

Tabela 3.2 – Substituição do filito pelo resÍduo em 10% na formulação AF.

<b>Material</b>	<b>Argila São Simão</b>	<b>Argila Padre Libério</b>	<b>Filito (BambuÍ)</b>	<b>Granito São Jerônimo</b>	<b>ResÍduo</b>
<b>(g)</b>	340	200	2304	900	256

Tabela 3.3 – Substituição do filito pelo resÍduo em 5% na formulação NF.

<b>Material</b>	<b>Argila São Simão</b>	<b>Argila Padre Libério</b>	<b>Filito (BambuÍ)</b>	<b>Granito São Jerônimo</b>	<b>ResÍduo</b>
<b>(g)</b>	340	200	2432	780	128

Tabela 3.4 – Substituição do filito pelo resÍduo em 10% na formulação NF.

<b>Material</b>	<b>Argila São Simão</b>	<b>Argila Padre Libério</b>	<b>Filito (BambuÍ)</b>	<b>Granito São Jerônimo</b>	<b>ResÍduo</b>
<b>(g)</b>	340	200	2304	780	256

E após a adição das massas para a produção de cada barbotina foram também adicionados 1100 mL de água e como flocculante adicionou-se silicato de sódio, 13,5 mL para as substituições de 5% e 14,5 mL para as substituições de 10%. Após essas adições, as massas de barbotina foram encaminhadas para o processo de moagem em moinho de bolas, operando por mais ou menos 2 horas, com velocidade de 70 rpm. A Figura 3.8 mostra a produção da barbotina de substituição, pesagem, mistura das matérias primas, moagem e barbotina pronta transferida para o balde.



Figura 3.8 – Produção da barbotina de substituição, pesagem, mistura das matérias primas, moagem e barbotina pronta transferida para o balde.

Após a moagem, as barbotinas passaram uma peneira de 40#, e em seguida foram realizados testes com esse material passante.

### 3.4.3 Peso Específico

A determinação do peso específico foi realizada primeiramente pela tara do valor de massa na balança do balão volumétrico de 100 mL. Depois, adicionou-se 100 mL de amostra em suspensão neste balão volumétrico. Logo após, pesou-se o

mesmo e adquiriu-se o valor do peso específico (Figura 3.9). O cálculo do peso específico foi realizado através da Equação 4:

$$d = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Onde:

d = Peso específico;

m = Massa em gramas do balão volumétrico cheio de barbotina, em gramas;

v = Volume do balão, em cm<sup>3</sup>.



Figura 3.9 – Determinação do Peso específico das barbotinas.

#### 3.4.4 Determinação da Porcentagem de Resíduos

A determinação da porcentagem do resíduo foi feita pela pesagem do material retido na peneira da massa contida no balão volumétrico usado na determinação do

peso específico. Realizou-se um peneiramento com auxílio de água corrente, em que o material retido na peneira de 325# (0,044mm) é colocado em um recipiente e levado até a estufa para a retirada de toda umidade do material (Figura 3.10). Após a secagem, o material retido é pesado. O cálculo da porcentagem de resíduos é feito seguindo a Equação 5:

$$\text{Resíduo} = \frac{R \times 100}{P} \quad (5)$$

Onde:

R = Peso do resíduo seco;

P = Peso do material em 100 ml da amostra.



Figura 3.10 – Determinação da porcentagem de resíduos.

### 3.4.5 Reologia

A reologia das suspensões é avaliada em função da viscosidade aparente, uma vez que esta tem forte atuação no procedimento. O ajuste da reologia pode acarretar em um escoamento ideal levando a suspensão a um menor grau de rigidez e viscosidade, uma vez que sem essa adequação ela pode se tornar indesejável, provocando entupimento por endurecimento em tanques e tubulações. O ensaio de determinação da Viscosidade foi realizado no viscosímetro Brookfield.

Primeiramente, foram coletados 1000 ml de amostra e adicionados em um béquer. Adequou-se o viscosímetro para a velocidade de 50 rpm e, em seguida, colocou-se o spindle de nº 2. A amostra foi agitada durante 1 minuto com uma baqueta de madeira, com o intuito de evitar a sedimentação parcial dos sólidos. Em seguida, o béquer foi colocado com a amostra sob o viscosímetro e aguardou-se 15 segundos até que estabilização ocorresse, para que fosse feita a primeira leitura (B50). Em seguida, desligou-se o aparelho. Posteriormente, a massa descansou durante 5 minutos e, após o descanso foi realizada a segunda leitura (B2,5). Então, ajustou-se a velocidade para 2,5 rpm e, depois de 2 minutos uma nova leitura foi realizada (Figura 3.11). O viscosímetro Brookfield determina um fator Brookfield (FB), variando entre 4 e 6, que está ligado a fatores como o spindle, a velocidade e as leituras realizadas durante o experimento. Para o cálculo do fator é utilizada a Equação 6:

$$FB = \frac{\textit{segunda leitura} \cdot 160 (B2,5)}{\textit{primeira leitura} \cdot 8 (B50)} \quad (6)$$



Figura 3.11 – Determinação da reologia através do uso de viscosímetro Brookfield e um béquer com barbotina.

#### 3.4.6 Determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem

A determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem consiste em descobrir a velocidade com que a barbotina se deposita na superfície porosa do molde de gesso e também o tempo necessário para que após a drenagem do excesso, a mesma perda o brilho (Figura 3.12). Assim a amostra foi agitada durante 1 minuto com o intuito de acabar com a sedimentação parcial de sólidos em suspensão. Posteriormente, a massa foi entornada em um molde de gesso até seu completo enchimento. Neste instante, acionou-se o cronômetro. O tempo de permanência em contato com o molde foi de 2 minutos e, então, realizou-se a drenagem da barbotina em abundância. Quando se completou a drenagem da barbotina, essa apresentou-se brilhante e tornou-se lentamente fosca e então foi retirado o material do molde de gesso e pesada a massa. O tempo de secagem foi determinado como o intervalo decorrido entre o término da drenagem e a perda do brilho da calota depositada.



Figura 3.12 – Procedimento para a determinação da velocidade de deposição e tempo de secagem.

#### 3.4.7 Avaliação do destacamento e tato

Este experimento tem o intuito de determinar o quão fácil ou difícil é a remoção dos corpos de provas criados através do ensaio de velocidade de deposição, bem como, apurando-se subjetivamente o tato.

Segundo Castro (2016, p. 51), 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.

#### 3.4.8 Fundição dos corpos de prova

A fundição dos corpos de prova foi feita com a barbotina depois de todos os testes anteriores. A barbotina foi adicionada em moldes de gesso (Figura 3.13) e, depois de 2 a 3 horas, retirou-se o material e esperou-se secar a temperatura ambiente. Após seco, o material foi levado para a estufa a 110°C durante aproximadamente 24 horas.



Figura 3.13 – Fundição dos corpos de prova.

#### 3.4.9 Determinação do módulo de ruptura à flexão

O ensaio de determinação do módulo de ruptura à flexão revela a medida de coesão interna do material, como verificado na Figura 3.14, consistiu em adicionar um corpo de prova sob dois cutelos de apoio e aplicou-se uma carga gradativamente no ponto medido da distância entre os dois apoios. Observou-se atentamente para que o corpo de prova não estivesse entortado e que se assentasse excelentemente sobre os cutelos. O teste foi realizado em triplicata para cada massa proposta, através da Equação 7.

$$MRF = \frac{P.L}{\pi(D^3)} \quad (7)$$

Onde,

MRF = Módulo de ruptura à flexão, em kgf/cm<sup>3</sup>;

P = Carga de ruptura, em kgf;

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

D = Diâmetro do corpo de prova em cm.



Figura 3.14 – 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 à ruptura. E então, a carga foi cessada e pesada.

#### 3.4.10 Determinação da retração linear

O ensaio de retração linear de secagem e queima tem como objetivo determinar o percentual de diminuição do comprimento dos corpos de provas sob um estado de temperatura (secagem e queima). Ambos os testes tiveram a mesma exposição ao calor. A finalidade de se avaliar a retração é determinar a plasticidade após a eliminação da água, estabelecer as dimensões iniciais dos produtos tomando como base a retração em condições de trabalho, determinar as dimensões dos moldes e controlar os produtos durante o processamento. A figura 3.15, mostra distância entre os pontos referenciais no corpo de prova após a conformação para determinação de retração linear.

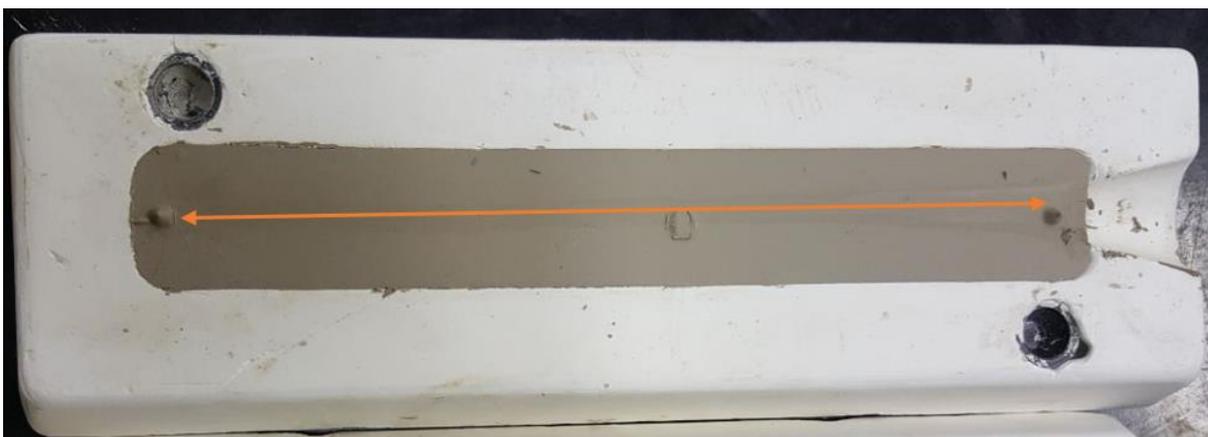


Figura 3.15 – Corpo após a conformação para determinação de retração linear.

#### 3.4.10.1 Determinação da retração linear após secagem

Segundo Castro (2016, p. 54)

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 Equação 8 descreve o que foi explicitado anteriormente:

$$\%RS = \frac{C_i - C_s}{C_i} \times 100 \quad (8)$$

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.

#### 3.4.10.2 Determinação da retração linear após queima

A retração linear após queima pode ser calculada através do comprimento após secagem e o comprimento após a queima de acordo com a Equação 9:

$$\%RQ = \frac{C_s - C_q}{C_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

%RQ = Porcentagem de retração linear após queima;

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

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

#### 3.4.10.3 Determinação da retração linear total

A retração linear total pode ser calculada através do comprimento inicial e o comprimento após a queima de acordo com a Equação 10:

$$\%RT = \frac{C_i - C_q}{C_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

%RT = Porcentagem de retração linear total;

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

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

#### 3.4.10.4 Determinação da deformação piropiástica dos corpos de prova

A deformação piropiástica dos corpos de prova 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 foi levado para queima, durante cerca de 12 horas. Em seguida, mediu-se o ponto máximo de deformação do corpo de prova e anotou-se o valor obtido. Para medir a deformação pegou-se um papel como referência de alinhamento e então mediu-se a deformação com uma régua. É importante não ter uma deformação alta para que durante a queima as peças possam continuar no seu alinhamento original.

A deformação piropiástica foi medida pelo ângulo formado pela deformação dos corpos de prova como visto na Figura 3.16.

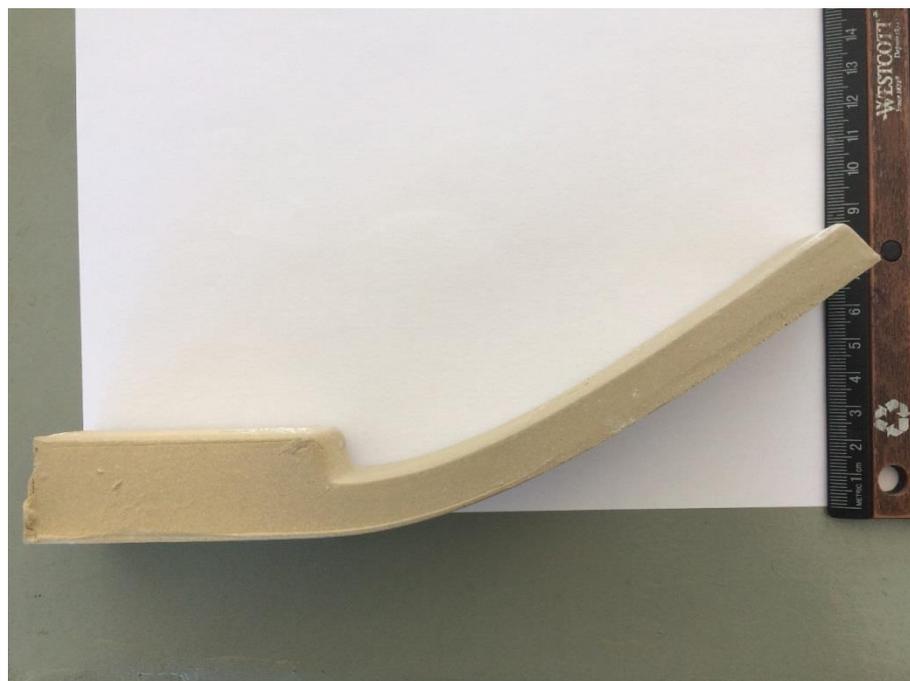


Figura 3.16 – Determinação da deformação pirolástica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (EDX)

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), os resultados dos experimentos obtidos para avaliação das características da pozolana da amostra, apresentaram resultados satisfatórios quanto à porcentagem de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 92,07\%$  sendo  $\geq 50\%$  e quanto à porcentagem de  $\text{SO}_3 = 0,212\%$  sendo  $\leq 5\%$ , como é possível observar na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química obtida pela EDX

<b>Composição</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	66.274
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	23.336
<b>K<sub>2</sub>O</b>	5.336
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.462
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1.286
<b>MgO</b>	0.726
<b>BaO</b>	0.247
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.212
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0.039
<b>MnO</b>	0.030
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0.027
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.010
<b>ZnO</b>	0.009
<b>SrO</b>	0.006
<b>Total</b>	100

### 4.2 Difração de raios X (DRX)

A partir do gráfico de difração de raios X é possível avaliar a presença predominante de óxido de sílica na forma de quartzo, conclusão semelhante ao trabalho feito por Santos, Dalla Valentina e Souza (2015), como visto na Figura 4.1.

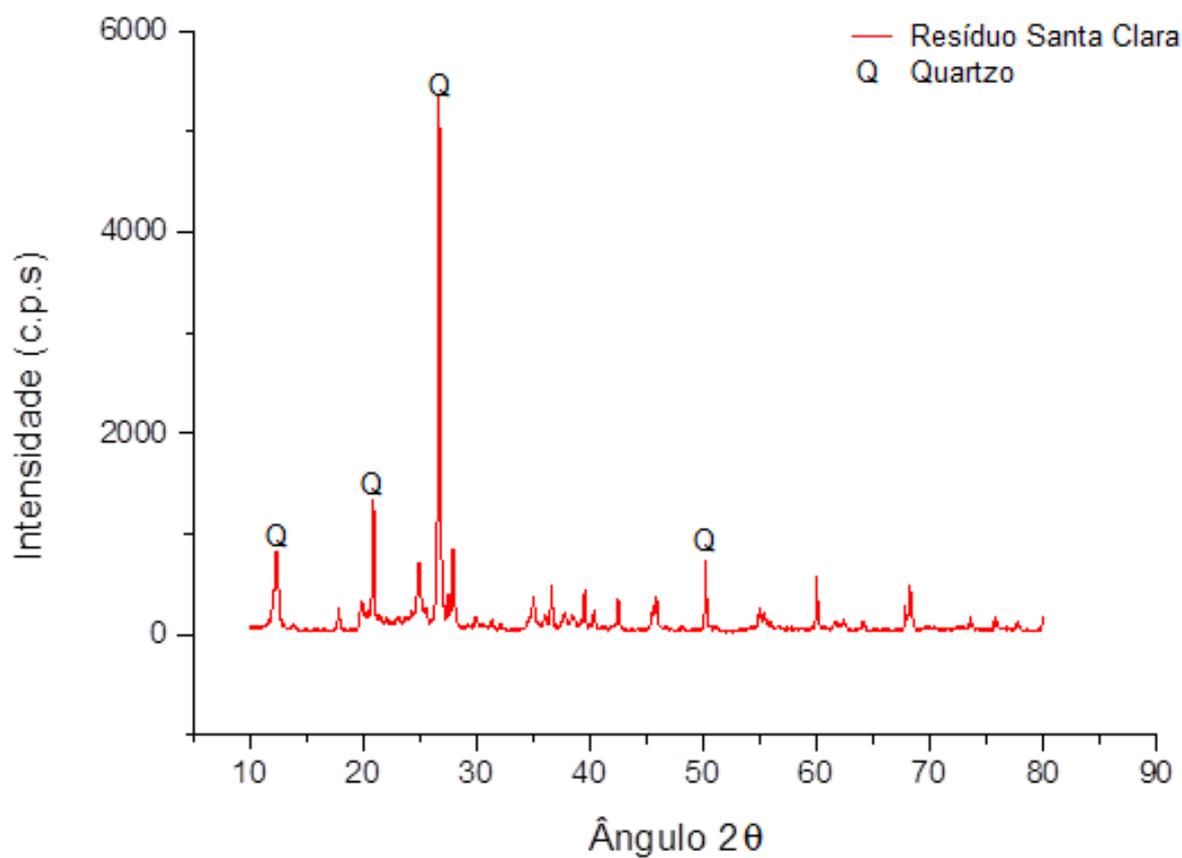
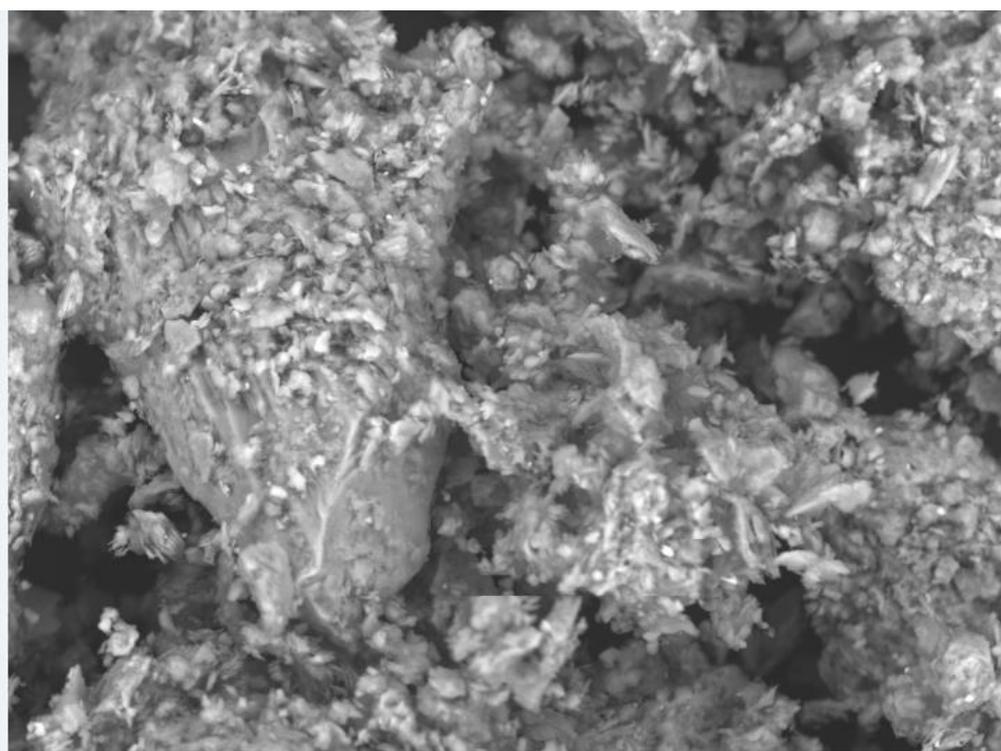


Figura 4.1 – Espectro de difratometria de raios X da amostra de quartzo.

### 4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

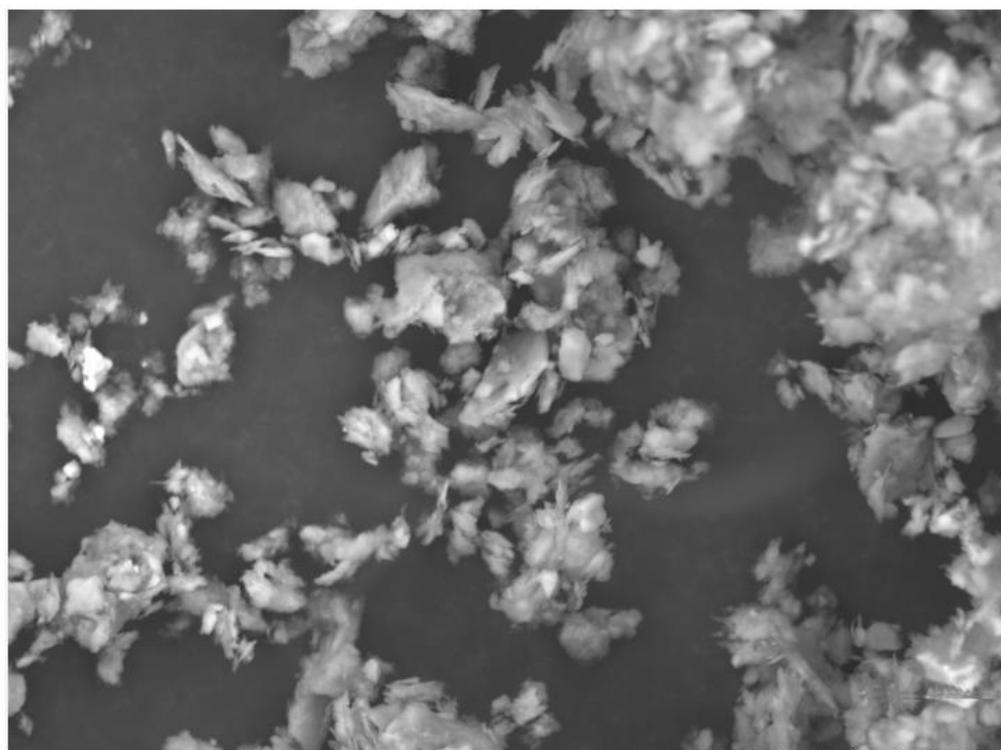
Através da análise dos resultados de MEV é possível observar a forma relativamente lamelar e a dimensão dos grãos uniforme, como visto na Figura 4.2.



TM3000\_8129

H D4,6 x1,2k 50 um

CEFET-MG - DET



TM3000\_8130

H D4,6 x2,0k 30 um

CEFET-MG - DET

Figura 4.2 – Micrografia em amplitude de aumento da amostra.

#### 4.4 Análise granulométrica por difração de laser (DL)

O resultado da análise granulométrica pode ser visualizado na no Gráfico 4.1. Através da análise granulométrica por difração de laser, observando a curva vermelha, é possível perceber que 10% do passante possui 2 $\mu\text{m}$  de diâmetro, 50% do passante 11,78  $\mu\text{m}$  de diâmetro, 90% do passante 95,25  $\mu\text{m}$  de diâmetro e a média dos diâmetros é de 39,25  $\mu\text{m}$ .

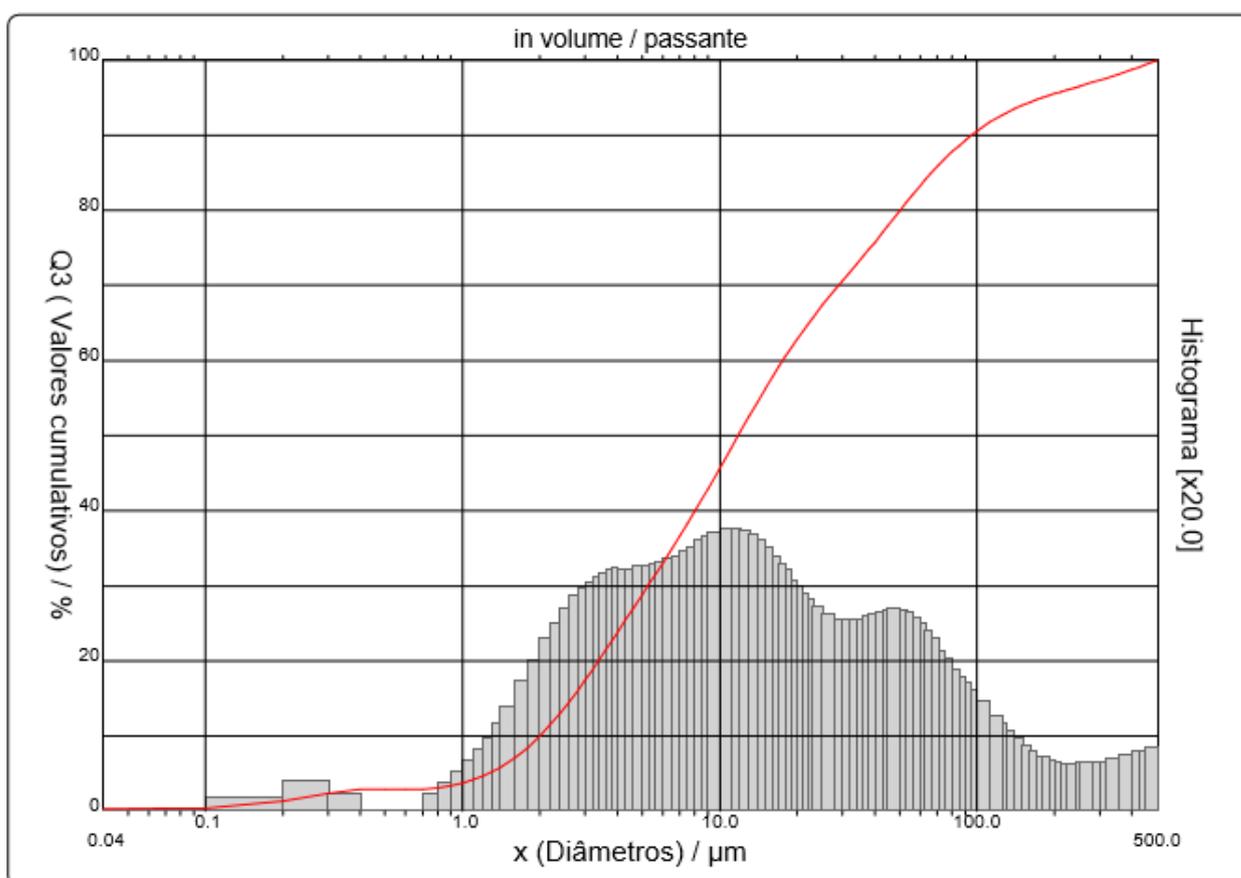


Gráfico 4.1 – Análise granulométrica do resíduo cerâmico.

#### 4.5 Análise tátil visual

A partir da análise é possível dizer que a amostra apresenta coloração bege clara, com algumas partículas não identificadas, porém demonstra bastante homogeneidade e suavidade ao tato como visto na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Imagem da análise tátil visual a partir do estereomicroscópio.

#### **4.6 Limite de Plasticidade**

O ensaio de limite de plasticidade realizado foi considerado satisfatório, pois foi possível obter cilindros de 3 mm de diâmetro (Figura 4.4). Isso mostra que o material apresenta limite de plasticidade.



Figura 4.4 – Cilindro feito no ensaio de limite de plasticidade comparado com o gabarito.

Porém, um dos resultados de porcentagem de umidade, apresentou valor que diferem da média de mais de 5% de acordo com NBR 7180 (ABNT, 1984) como visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultado do teste de limite de plasticidade.

<b>Amostra</b>	<b>Material úmido (g)</b>	<b>Material seco (g)</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>1</b>	2,42	1,99	17,77
<b>2</b>	1,81	1,36	24,86
<b>3</b>	1,62	1,23	24,07
<b>4</b>	3,37	2,94	12,76

#### 4.7 Limite de liquidez

De acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984), deve-se conseguir o fechamento da rachura com mais de 25 golpes para considerar a amostra como apresentando limite de liquidez. O resultado do ensaio realizado foi considerado insatisfatório, uma vez que conseguiu o fechamento da rachura com menos de 25 golpes. Além, de apenas um dos resultados de porcentagem de umidade, apresentar valor que não difere da média, os demais resultados apresentaram valores que diferem da média de mais de 5%, como visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado do teste de limite de liquidez.

<b>Amostra</b>	<b>Número de golpes</b>	<b>Material úmido (g)</b>	<b>Material seco (g)</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>1</b>	20	3,48	2,71	22,13
<b>2</b>	31	2,89	1,72	40,48
<b>3</b>	20	4,62	3,89	15,80
<b>4</b>	24	3,96	3,35	15,40

#### **4.8 Determinação da umidade da amostra**

De acordo com o resultado de 0,56% de teor de umidade, o resíduo se enquadra na exigência para uso como material pozolânico, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

#### **4.9 Perda ao fogo**

O resultado do teste mostrou que o resíduo possui 4% de perda ao fogo. Tal perda para materiais pozolânicos deve ser  $\leq 6\%$  de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014).

#### **4.10 Testes de fundência**

Após a Espectrometria de Fluorescência de Raios X do resíduo da peneira de 40#, foi feita a análise de comparação entre as composições químicas das matérias primas utilizadas na produção da barbotina, termo usado para designar a massa de produção para formar materiais cerâmicos e o resíduo. Porém, para que fosse definido a matéria prima de substituição parcial foi também analisado os testes de fundência das 4 matérias primas utilizadas na produção da borbotina em comparação com o teste de fundência do resíduo da peneira de 40# (Figura 4.5).

A matéria prima que apresentou o teste de fundência com maior semelhança com o teste de fundência do resíduo da peneira de 40# foi o material escolhido a ser substituído parcialmente pelo parcial resíduo.

As matérias primas usadas na produção da barbotina na empresa são: a argila São Simão, a argila, Padre Libério, no Filito (Bambuí) e o granito São Jerônimo. E o filito foi a matéria prima escolhida para substituir parcialmente pelo resíduo, uma vez

que o resíduo não possui características semelhantes ao granito e que as argilas provavelmente diminuiriam a plasticidade da massa, como é possível ver na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Cones de queima: a – argila Padre Libério; b – Filito; c – granito; d – argila São Simão; e – Resíduo.

#### 4.11 Peso específico

O valor encontrado para a AF – 5% foi de 10,22% de aumento do peso específico pode ser comparado com o padrão de teste da empresa, que é de 180,0

g/cm<sup>3</sup> a 181,5 g/cm<sup>3</sup>. Já AF – 10%, NF – 5% e AF – 10% apresentaram um aumento de 9,73%, 9,37% e 9,36% respectivamente, como visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado do teste de peso específico em g/cm<sup>3</sup>.

<b>Padrão</b>	<b>AF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>	<b>NF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>
<b>1,807</b>	1,848	1,757	1,694	1,691

#### 4.12 Porcentagem de resíduos

De acordo com a Tabela 4.5, apenas AF – 10% excedeu o padrão estabelecido pela empresa, que é de no máximo 12%, para a porcentagem de resíduos.

Tabela 4.5 – Resultado do teste de porcentagem de resíduos.

	<b>AF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>	<b>NF - 5%</b>	<b>NF - 10%</b>
<b>% de resíduos</b>	5,58	20,60	6,48	7,63

#### 4.13 Reologia

Como visto na tabela 4.6, o padrão de Fator Brookfield (FB) estabelecido pela empresa é de 4 a 6,5, logo, os resultados estão satisfatórios.

Tabela 4.6 – Resultado do teste de reologia.

<b>Leitura</b>	<b>AF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>	<b>NF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>
<b>1<sup>a</sup></b>	50,6	59,5	67,6	62,4
<b>2<sup>a</sup></b>	15,8	16,1	19,1	18,5
<b>FB</b>	6,24	5,41	5,65	5,93

#### 4.14 Velocidade de deposição e tempo de secagem

Os resultados de tempo de secagem de AF – 5% e NF – 5% variaram de dois minutos a menos e a mais, respectivamente, enquanto AF – 10% variou apenas um minuto em relação ao valor de testes padrão. Já os valores de massa do molde foram todos maiores que o valor de teste padrão de 155 g, como pode ser visto na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultado do teste de velocidade de deposição e tempo de secagem.

	Padrão	AF - 5%	AF - 10%	NF - 5%	AF - 10%
Tempo de secagem (min)	1,40	1,38	1,43	1,40	1,42
Massa do molde (g)	155	184,8	175,75	169,39	169,15

#### 4.15 Avaliação do destacamento e tato

Avaliaram-se as massas dos moldes e as mesmas apresentaram resultados semelhantes, como facilidade de destacamento de corpos de prova, obtido através do ensaio de velocidade de deposição. Às vezes as massas saíam inteiras do molde e às vezes saíam aos pedaços. Quanto à avaliação ao tato, as massas apresentaram boa plasticidade, sem ficarem mole, pastosas ou secas.

#### 4.16 Módulo de ruptura à flexão

Os testes foram feitos em triplicata e os resultados obtidos estão abaixo do valor de teste padrão utilizado na empresa (Gráfico 4.2).

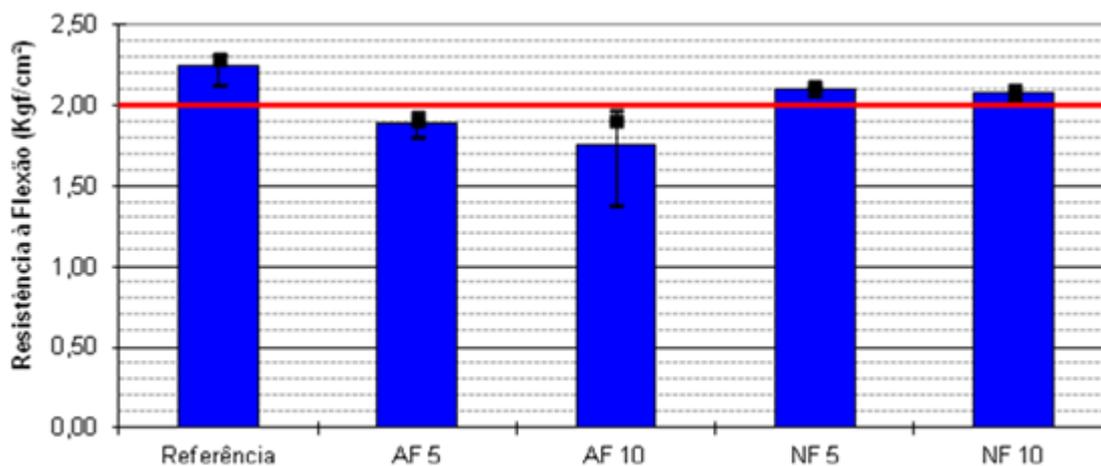


Gráfico 4.2 – Resistência à flexão dos corpos de prova cru.

Analisando-se o gráfico acima para o ensaio de flexão, nota-se que as resistências à flexão das formulações AF – 5% e AF – 10% ficaram abaixo de 2,00 kgf/cm<sup>2</sup>, limite considerado ideal pela indústria cerâmica. Já para as formulações NF – 5% e NF – 10%, o resultado obtido foi maior que o limite ideal e próximo do resultado obtido com a formulação de referência.

#### 4.17 Retração linear

De acordo com a tabela 4.8 os resultados obtidos na determinação da retração linear foram comparados com os valores usados como padrão de teste. Na determinação da retração linear após a secagem (%RS) todos os valores de AF – 5%, AF – 10%, NF – 5%, NF – 10%, estão respectivamente abaixo do padrão em 19,04%, 28,57%, 21,90% e 23,81%. Já na determinação da retração linear após queima apenas o AF – 10% adquiriu valor maior, de 3,15%, já os demais AF – 5%, NF – 5%, NF – 10% apresentaram valores abaixo, respectivamente em, 6,31%, 9,47% e 4,74%. E na determinação da retração linear total os resultados de AF – 5%, AF – 10%, NF – 5%, NF – 10% foram abaixo do padrão usado, respectivamente em 7,89%, 1,75%, 0,87% e 7,89%.

Tabela 4.8 – Resultado do teste de retração linear.

<b>Retração Linear</b>	<b>Padrão</b>	<b>AF - 5%</b>	<b>AF - 10%</b>	<b>NF - 5%</b>	<b>NF - 10%</b>
<b>(%RS)</b>	2,1	1,7	1,5	1,64	1,6
<b>(%RQ)</b>	9,5	8,9	9,8	8,6	9,05
<b>(%RT)</b>	11,4	10,5	11,2	11,3	10,5

#### 4.18 Deformação pirolástica

Os resultados representados na Tabela 4.9, em mm, foram feitos em triplicata e o único que apresentou valor igual ao valor padrão é resultado NF – 5%. Já os demais resultados apresentaram valores maiores de deformação pirolástica.

Tabela 4.9 – Resultado do teste de deformação pirolástica.

<b>Padrão</b>	<b>AF – 5%</b>	<b>AF – 10%</b>	<b>NF – 5%</b>	<b>NF – 10%</b>
<b>64</b>	81,67	70	64	67

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a possibilidade de utilização do resíduo do material cerâmico da Indústria e Comércio de Louças Sanitárias Santa Clara Ltda como substituição percentual de um dos componentes da matéria prima da produção de cerâmica.

Através do resultado de Espectrometria de Fluorescência de Raios X foi possível verificar que o resíduo apresenta o somatório dos óxidos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ , a porcentagem de  $\text{SO}_3 \leq 5\%$  e se enquadram nos valores estipulados para o uso como material pozolânico pela NBR 12653 (ABNT, 2014), bem como os resultados das porcentagens de umidade e de perda ao fogo da amostra.

A difração de raios X mostrou a presença predominante de óxido de sílica na forma de quartzo.

Através da análise tátil visual verificou-se a coloração bege clara da amostra e sua suavidade ao tato. Com a análise granulométrica por difração de laser verificou que 90% do passante possui diâmetro menor que  $95.25 \mu\text{m}$ .

Os testes de plasticidade e de liquidez permitiram constatar que a amostra apresenta limite de plasticidade, porém não apresenta limite de liquidez, dentro dos valores previstos pela NBR 6459 (ABNT, 1984).

Os testes de reologia, avaliação do destacamento e tato mostraram que as amostras apresentam resultados aceitáveis em comparação aos testes feitos com a barbotina utilizada pela empresa. Quando confrontados com o valor padrão, os valores de tempo obtidos no teste de velocidade de deposição e tempo de secagem foram consideravelmente próximos, no entanto, as massas do molde aferidas apresentaram valores maiores.

O teste de peso específico mostrou que apenas AF – 5% está acima do valor padrão de teste da empresa. No teste de porcentagem de resíduos apenas a amostra AF – 10% excedeu o padrão (que é de no máximo 12%).

O teste de retração linear apresentou valores na sua maioria abaixo do padrão. O mesmo ocorreu nos testes de módulo de ruptura à flexão, demonstrando perda na resistência em comparação a barbotina da empresa. O teste de deformação pirolástica revelou uma maior deformação com as substituições, exceto por NF – 5% (que obteve valor igual ao padrão).

Os ensaios de resistência à flexão os valores são inferiores a 2,00 kgf/cm<sup>2</sup> para as formulações AF – 5% e AF – 10%, respectivamente. Em contrapartida, para as formulações NF – 5% e NF – 10% os valores apresentaram-se maiores que o limite ideal (2,00 kgf/cm<sup>2</sup>), e próximos aos resultados obtidos pela formulação de referência.

Portanto, a pesquisa realizada durante este trabalho de conclusão de curso indica a viabilidade da reutilização do resíduo retido na peneira de 40# da indústria como substituinte parcial da matéria prima na linha de produção. Esta substituição geraria um ganho econômico na redução no uso do filito e atenderia às preocupações em relação à sustentabilidade e à preservação ambiental através da diminuição da quantidade de resíduo a ser descartada.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliar o módulo de ruptura x flexão em corpos de provas queimados;
- Realizar ensaios de absorção de água;
- Fazer testes de conformação massa-esmalte.

## REFERÊNCIAS

ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). **Informações Técnicas - Definição E Classificação**. 2016. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 18 de Mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6457. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 18. Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES (ANFACER). **Banco de dados de 2015**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>>. Acesso em: 18 de Mai. 2017.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 538 p.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**. v. 5, n. 3, p. 31-36, Mai/Jun, 2000.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M. N.; GOMES, V.; DELLA, V. P.; HOTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais: Processamento e Aplicações no Setor Cerâmico. **Cerâmica Industrial**. v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

CASTRO, A. C. M. **Avaliação da reutilização do resíduo de louça sanitária em compósitos cerâmicos**. 2016. 79 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

CAVALCANTE W. F. V. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico**. 2005. 63 p. Dissertação (Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

COELHO J. M. **Perfil de Louças Sanitárias e de Mesa**. Projeto de assistência técnica ao setor de energia. Ministério de Minas e Energia, 2009. 50 p.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. 2001. 123 p. Dissertação (Mestrado, Centro de Ciência e Tecnologia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001.

FILHO, A. A. Q.; NETO, A. A. A.; DANTAS, J. O. C. Cimento. In: SOUSA, S. A. D. Sumário Mineral 2014. v. 34. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/cimento-sumario-mineral-2014>>. Acesso em 17 mai. 2017.

MARQUES, S. J. K. **Estudo da incorporação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo em formulações para tijolos de solo-cimento**. 2010. 109 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós Graduação do Centro de Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**. v.3, p.75, 2012.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**. v. 6, n. 2, p. 28-39, Mar/Abr, 2001.

OLIVEIRA, M. C.; MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos**. São Paulo: CETESB, 2006. 90p.

PINHEIRO, I S. **Beneficiamento e Caracterização de Resíduos Gerados na Produção de Blocos Cerâmicos Visando à Aplicação Como Adição Pozolânica**. 2008. 152 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SANTA CLARA LOUCAS SANITÁRIAS. 2017. **Localização**. Disponível em: <<http://www.ceramicasantaclara.ind.br/novo/paginas/local.htm>>. Acesso em: 18 de Mai. 2017.

SANTOS, C. D.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; SOUZA, R. O. Caracterização do resíduo do pó de exaustão de fundição na indústria da construção civil. **Espacios (Caracas)**. v. 36, p. 9, 2015.

SILVA, G. J. B. **Fabricação de produtos cerâmicos**. Notas de aula. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. 54 p.