



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

THIAGO HENRIQUE SILVA

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA LINHA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE
CERÂMICA SANITÁRIA

ARAXÁ/MG

2017

THIAGO HENRIQUE SILVA

**REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA LINHA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE
CERÂMICA SANITÁRIA**

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

ARAXÁ/MG

2017

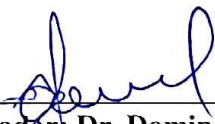
FOLHA DE APROVAÇÃO

THIAGO HENRIQUE SILVA

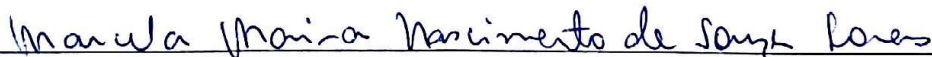
REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA LINHA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA SANITÁRIA

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, 21 de Junho de 2017.



Presidente e Orientador: Dr. Domingos Sávio de Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Dra. Marcela M. N. de Souza Soares
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Esp. Francisco de Castro Valente Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Dr. Mário Guimarães Júnior
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

À minha futura sobrinha Sofia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por seu amor e suporte por toda a minha vida. Obrigado a vocês por me concederem forças para alcançar as estrelas e por me ensinarem o ceticismo e a admiração, dois pensamentos de tão difícil convivência, porém centrais ao método científico;

Ao meu orientador, por ter me convidado a participar do projeto de pesquisa que deu origem a este trabalho de conclusão de curso, bem como toda a ajuda dele com este;

Aos meus amigos, pelo companheirismo, por moldarem a pessoa que sou hoje e por compreenderem minha ausência, para que o estudo fosse realizado;

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG onde estudei desde o ensino médio-técnico e criei um vínculo muito forte, visto que é uma instituição que sempre forneceu a estrutura necessária para meus estudos e pesquisas que participei ao longo dos anos;

A todos os professores que tive por me tornarem cientificamente apto à realização deste estudo;

Ao diretor de produção Eduardo Lusvarghi, da Indústria Cerâmica Santa Clara de Araxá, e a todos os seus colaboradores, pela abertura e apoio técnico oferecido pela empresa para que os testes fossem realizados;

Aos técnicos de laboratório do CEFET-MG, particularmente ao meu amigo João Victor, pela disposição em ajudar na organização dos testes;

À FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo suporte financeiro ao projeto inicial;

“Para mim, é muito melhor compreender o Universo como ele realmente é do que persistir em uma ilusão, por mais satisfatória e tranquilizadora que possa ser”.

Carl Sagan

RESUMO

Um dos sérios problemas que a sociedade atual enfrenta, e que se agravará com o passar dos anos, está ligado à deposição de resíduos industriais. Esta, quando feita de forma inadequada, provoca a degradação do meio ambiente através da contaminação dos mananciais de água e do solo. Além disso, representantes das indústrias cerâmicas e de mineração enfrentam a escassez de reservas de matérias-primas de boa qualidade em locais economicamente viáveis para exploração. Contudo, paralelo aos processos de produção industriais, tem-se a geração de resíduos, os quais muitas vezes podem ser reutilizados no processo, como é o caso da produção de cerâmicas. A indústria de cerâmica sanitária Santa Clara, de Araxá-MG, é uma das várias empresas que compõem esse cenário, com resíduo produzido constantemente durante a fabricação dos produtos, porém sem os estudos preliminares sobre o potencial de reutilização do mesmo. Assim, estudar as possibilidades de reaproveitamento e reutilização destes resíduos acumulados na lagoa de decantação, transformando-os em matéria-prima alternativa na forma de massas cerâmicas para produção de novos utensílios, foi o objetivo deste trabalho. Dessa forma, foram elaborados dois grupos de formulações de massa idênticos àqueles utilizados pela empresa, denominados de formulação A (AF) e formulação N (NF) com seis proporções diferentes de resíduos (100, 75, 50, 25, 10 e 5%) em substituição a matéria-prima original na confecção de corpos de prova que foram ensaiados e analisados segundo as propriedades de reologia, massa específica, cor de secagem e queima, retração linear, ruptura por flexão, deformação pirolástica, absorção de água, e produção de peças grandes segundo as recomendações do manual de práticas cerâmicas e da NBR 15097:2011. Os resultados obtidos mostraram que o resíduo possui alto potencial de reutilização no processo de produção da empresa, pois o grupo NF, principalmente a formulação de 100% de substituição (NF-100%) apresentou, para todos os parâmetros avaliados, valores dentro dos intervalos utilizados pela empresa.

Palavras-chave: resíduo cerâmico; reutilização; louça sanitária.

ABSTRACT

One of the serious problems that our society faces, and that will worsen overtime, is linked to industrial residue disposal. This, when done improperly, causes environmental degradation through water-spring and soil contaminations. Besides, representatives from ceramic and mining industries face the dearth of good quality resources in places economically feasible to exploit. Nevertheless, adjacent to the industrial productions there is the creation of industrial waste, this in many cases could be recycled into the process, as it is the situation of ceramic production. The sanitary ceramics industry Santa Clara, in Araxá-MG, is one of the many companies that make up this scenario, with residue constantly being generated through the production line, but without the previous studies regarding its potential to be recycled. In this sense, the main goal in this study was to study the possibilities of recycling this ceramic residue accumulated in the settling pond, turning it into an alternative raw material for ceramic slurries to produce new sanitary ware. Hence, two groups of formulation for ceramic slurries were elaborated, those being identical to the ones applied by the company, called formulation A (AF) and formulation N (NF) with six different residue proportion in it (100, 75, 50, 20, 10 and 5%) replacing one of the original raw materials in producing specimens that were tested for rheology, specific mass, drying and burning color, linear retraction, flexural strength, pyro-plastic deformation, water absorption and production of large ware, all following the recommendation of and the NBR 15097:2011. The obtained results showed that the residue has a high potential to be recycled into the production line of the company, as the NF group, especially the formulation with 100% residue proportion (NF-100%), indicated for all evaluated parameters, results within the interval used by the industry.

Keywords: ceramic residue; recycling; sanitary ware

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Distribuição de louça sanitária por tipo de produto.	22
Figura 2.2 – Pilha de filito utilizado para compor a barbotina	23
Figura 2.3 – Argila Padre Libério.....	23
Figura 2.4 – Argila São Simão	24
Figura 2.5 – Granito pré-moído.....	24
Figura 2.6 – Granito moído (abaixo 300µm) em bags de 1t	25
Figura 2.7 – Fluxograma do processo de fabricação de louças sanitárias.....	26
Figura 2.8 – Vista superior de um dos tanques misturadores.....	28
Figura 2.9 – À direita, conjunto de moinhos de seixo em espaço protegido e à esquerda, peneira metálica circular.....	28
Figura 2.10 – Tanques de acerto e armazenamento da barbotina.....	29
Figura 2.11 – Estação de conformação de caixas acopladas	30
Figura 2.12 – Galpão de secagem lenta das peças.....	32
Figura 2.13 – Estufa de secagem.....	32
Figura 2.14 – Processo de acabamento executado por técnico em tampa de caixa acoplada ..	33
Figura 2.15 – Casa de esmaltes (detalhe de produção de esmalte à direita).....	33
Figura 2.16 – Processo de esmaltação executado por operador	35
Figura 2.17 - Processo de esmaltação automatizado em carrossel.....	35
Figura 2.18 – Peças em forno contínuo (entrada do forno à esquerda e saída do forno à direita)	36
Figura 2.19 - Forno intermitente (antes da queima à esquerda e após a queima à direita)	37
Figura 2.20 – Setor de classificação de peças	38
Figura 2.21 - Curva da distribuição granulométrica do resíduo.....	42
Figura 2.22 - Espectro de difratometria de raios-X da amostra.....	43
Figura 2.23 - Fotomicrografias da amostra.	44
Figura 3.1 – Saída do efluente líquido para a lagoa de decantação.....	45
Figura 3.2 – Lagoa artificial de decantação.....	45
Figura 3.3 – Teste de turbidez	46
Figura 3.4 – Medição de pH	47
Figura 3.5 – Elaboração dos cones de queima.....	48
Figura 3.6 – Material utilizado e moinho laboratorial de cerâmica.....	49
Figura 3.7 – Moinho sobre roletes.....	50
Figura 3.8 – Barbotina sendo passada em peneira de 40#.....	51

Figura 3.9 – Determinação da massa específica.....	52
Figura 3.10 – Medição de viscosidade	53
Figura 3.11 – Teste de tempo de secagem.....	55
Figura 3.12 – Análise de plasticidade da massa	55
Figura 3.13 – Moldes de gesso com tubos em PVC para auxiliar a conformação de corpos de prova	56
Figura 3.14 – Corpos de prova fundidos	57
Figura 3.15 – Corpos de prova secos.....	57
Figura 3.16 – Corpos de prova para determinação de MRF.....	60
Figura 3.17 – Medição do diâmetro dos corpos de prova de MRF	60
Figura 3.18 – Disposição dos corpos de prova de deformação no forno.....	61
Figura 3.19 – Exemplo de deformação sofrida pelo corpo de prova.....	62
Figura 3.20 – Medição da deformação sofrida pelo corpo de prova	62
Figura 3.21 – Corpos de prova de deformação marcados para quebra.....	63
Figura 3.22 – Corpos de prova de absorção de água	63
Figura 3.23 – Testes submersos em água aquecida por chapa elétrica.....	64
Figura 3.24 – Moldes de gesso e processo de espongeamento de barbotina diluída.....	65
Figura 3.25 – Detalhe de falha na fundição do cobogó	66
Figura 3.26 – Enchimento, drenagem e detalhe da drenagem na fundição dos cobogós	67
Figura 3.27 – Cobogó destacado da forma após o tempo de fundição	67
Figura 3.28 – Cobogó cortado para medição de espessura das paredes	68
Figura 3.29 – Cobogós esmaltados.....	68
Figura 4.1 – Medição de pH do efluente da esmaltação.....	69
Figura 4.2 – Cones de queima do resíduo da lagoa (à esquerda) e do granito (à direita).....	70
Figura 4.3 – Cones de queima das argilas São Simão (à esquerda inferior) e Padre Libério (à direita).....	71
Figura 4.4 – Cones de queima do Filito	71
Figura 4.5 – Gráfico dos valores de RLS do grupo AF comparados à STD	75
Figura 4.6 – Gráfico dos valores de RLS do grupo NF comparados à STD	75
Figura 4.7 – Gráfico dos valores de RLQ do grupo AF comparados à STD	76
Figura 4.8 – Gráfico dos valores RLQ do grupo NF comparados à STD	76
Figura 4.9 – Resultados de Perda ao Fogo do grupo AF em comparação à STD	77
Figura 4.10 – Resultados de Perda ao Fogo do grupo NF em comparação à STD	78
Figura 4.11 – Corpos de prova secos.....	79

Figura 4.12 – Cor de queima dos corpos de prova	79
Figura 4.13 – Gráfico de MRF dos corpos de prova crus do grupo AF	80
Figura 4.14 – Gráfico de MRF dos corpos de prova crus do grupo NF	80
Figura 4.15 – Gráfico de MRF dos corpos de prova queimados do grupo AF	81
Figura 4.16 - Gráfico de MRF dos corpos de prova queimados do grupo AF	81
Figura 4.17 – Defeito na estrutura do corpo de prova de MRF	82
Figura 4.18 – Deformação Piroplástica do grupo AF comparados à STD	83
Figura 4.19 – Deformação Piroplástica do grupo NF comparados à STD	84
Figura 4.20 – Resultados de absorção de água do grupo AF comparados à STD	85
Figura 4.21 – Resultados de absorção de água do grupo AF comparados à STD	85
Figura 4.22 – Elementos vazados esmaltados	86
Figura 4.23 – Detalhe nos defeitos estruturais encontrados nos cobogós do grupo AF	87

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 – Porcentagem de Caráter Iônico para vários materiais cerâmicos	19
Quadro 2.1 – Óxidos utilizados nos esmaltes e suas limitações.....	34
Tabela 2.3 – Composição química da amostra de resíduo e seus percentuais.....	43
Quadro 3.1 – Lista das materiais utilizados na confecção das barbotinas.....	41
Tabela 3.1 – Formulações propostas	49
Tabela 3.2 – Fatores de conversão do viscosímetro analógico Brookfield	54
Quadro 3.1 – Tipos de Ensaio Mecânicos.....	58
Tabela 4.1 – Valores de pH e turbidez encontrados para a lagoa de decantação	69
Tabela 4.2 – Valores de massa específica das massas AF e STD em duplicata.....	71
Tabela 4.3 – Valores de massa específica das massas NF e STD em duplicata.....	72
Tabela 4.4 – Volume de silicato de sódio adicionado às massas do grupo AF em relação à STD.....	72
Tabela 4.5 – Volume de silicato de sódio adicionado às massas do grupo NF em relação à STD.....	73
Tabela 4.6 – Viscosidade e tixotropia para as massas AF e STD	73
Tabela 4.7 – Viscosidade e tixotropia para as massas NF e STD	73
Tabela 4.8 – Valores de TS e VD para as formulações AF	74
Tabela 4.9 – Valores de TS e VD para as formulações NF	74
Tabela 4.7 – Espessura da parede dos cobogós do grupo AF e STD	85
Tabela 4.8 – Espessura da parede dos cobogós do grupo NF e STD	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Antes da Era Comum
AF	Formulação A
BMJ	British Medical Journal
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CI	Comprimento inicial
CQ	Comprimento queimado
CS	Comprimento seco
cP	Centipoise – Unidade de Viscosidade em milipascal segundo (mPa*s)
EC	Era Comum
MME	Ministério de Minas e Energia
MI	Massa Inicial
MQ	Massa Queimada
MS	Massa Seca
MU	Massa Úmida
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NF	Formulação N
PF	Perda ao fogo
RLQ	Retração linear de queima
RLS	Retração linear de secagem
RLT	Retração linear total
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
STD	Formulação de massa padrão
TS	Tempo de secagem
VD	Velocidade de deposição

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Mesh (Número de aberturas por polegada linear)
μm	Micrômetro
°C	Graus Celsius
R\$	Reais (Moeda Brasileira)
±	Mais ou menos (erro variável)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Características dos Mateiras Cerâmicos	19
2.2	História da Cerâmica Sanitária	20
2.3	Perfil do Setor Produtivo	21
2.4	Processo de Fabricação.....	22
2.4.1	Preparação da Massa	27
2.4.2	Reologia da Barbotina	29
2.4.3	Conformação (ou Fundição).....	30
2.4.4	Secagem.....	31
2.4.5	Acabamento	32
2.4.6	Esmaltação.....	33
2.4.7	Queima ou Cozimento	36
2.4.8	Classificação	37
2.5	Geração de Efluente Líquido	38
2.6	Impacto Ambiental	39
2.7	Caracterização do Resíduo Sólido	42
2.7.1	Granulometria.....	42
2.7.2	Composição Química e Mineralógica	43
2.7.3	Morfologia	44
2.7.4	Perda ao fogo	44
2.8	Estudos de Reutilização.....	39
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	Materiais e Equipamentos	41
3.2	Desenvolvimento	Erro! Indicador não definido.
3.2.1	Turbidez e pH	45
3.2.2	Cone de queima	47
3.2.3	Preparação das Massas	48
3.2.4	Massa específica aparente	51
3.2.5	Reologia das Massas.....	52
3.2.6	Tempo de Secagem (TS) e Velocidade de Deposição (VD)	54
3.2.7	Conformação dos Corpos de Prova	56
3.2.8	Ensaio Mecânicos	57

3.2.8.1	Retração Linear.....	58
3.2.8.2	Perda ao Fogo	59
3.2.8.3	Cor de Secagem e Queima.....	59
3.2.8.4	Módulo de Ruptura à Flexão (M.R.F.)	59
3.2.8.5	Deformação pirolástica.....	61
3.2.8.6	Absorção de água	62
3.2.9	Produção de Elementos Vazados.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	Turbidez e pH.....	69
4.2	Cone de Queima	70
4.3	Massa específica aparente	71
4.4	Reologia.....	72
4.5	Tempo de secagem (TS) e Velocidade de deposição (VD).....	74
4.6	Retração Linear.....	74
4.7	Perda ao fogo (PF).....	77
4.8	Cor de secagem e cor de queima	78
4.9	Módulo de Ruptura à flexão (MRF).....	80
4.10	Deformação pirolástica.....	82
4.11	Absorção de água	84
4.12	Produção de elementos vazados	85
5	CONCLUSÕES.....	88
6	SUGESTÕES	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – Tabelas de retração linear e perda ao fogo	94
	APÊNDICE B – Tabelas de MRF	97
	APÊNDICE C – Tabelas de Deformação Pirolástica.....	98
	APÊNDICE D – Tabelas de absorção de água	103

INTRODUÇÃO

As indústrias de cerâmicas nacionais têm-se destacado cada vez mais nos cenários interno e global. No Brasil, elas já são responsáveis por cerca de 1% do PIB (Produto Interno Bruto) e convencionou-se dividir o setor cerâmico em diferentes segmentos de acordo com o produto obtido e os mercados em que estão inseridos. Um desses setores é o de cerâmicas sanitárias, cujos produtos possuem boa qualidade e há muito são exportados para países da América do Sul e Central, (Bustamante e Bressiani, 2000).

O consumo dos produtos da indústria de louça sanitária tem relação direta com o desempenho da construção civil, pois as peças produzidas constituem componentes essenciais para habitações residenciais e edificações. Apesar de existirem no mercado produtos de materiais alternativos (por exemplo cubas em resinas e metais), a versatilidade (cores, design, preços) e desempenho (inércia química e durabilidade) dos materiais cerâmicos garantem um mercado consolidado no Brasil e internacionalmente (Cabral et al., 2010).

No cenário ambiental, com as novas leis de proteção do meio ambiente, e a crescente e progressiva implantação de diretrizes mais exigentes na gestão de lodos e resíduos para as sociedades industrializadas na perspectiva de um desenvolvimento sustentável, faz-se necessário desenvolver métodos alternativos e eficazes em substituição ao simples descarte desses em aterros sanitários. Por representar economias nos custos, melhoria na moral dos funcionários e no rendimento da produção, mas principalmente a garantia da existência de muitos ecossistemas naturais para as gerações futuras do planeta, a reutilização de resíduos têm sido cada vez mais estudada por pesquisadores para tornar sua aplicação possível em indústrias (Ramos et al., 2009).

Uma grande quantidade e variedade de matérias-primas naturais (plásticas e não plásticas) são consumidas pela indústria de cerâmicas sanitárias. Dessas, as principais matérias-primas minerais utilizadas incluem argilas, filitos, caulim, e granitos. Além disso, estima-se o consumo de matérias-primas em cerca de 300 mil toneladas por ano, calculados com base em uma produção anual de 21 milhões de peças grandes (Ministério de Minas e Energia, 2009).

Destaca-se ainda o elevado consumo de água, a qual é utilizada como parte integrante do processo, nas operações de limpeza de pisos e de lavagem de máquinas, equipamentos e demais instalações industriais, bem como em sistemas de controle de poluição via úmida. Consequentemente, a geração de efluentes líquidos nos processos cerâmicos advém

principalmente das águas de limpeza das unidades de preparação, dos moldes de fundição e das cabines de esmaltação (Oliveira e Maganha, 2006).

Com o acelerado e contínuo desenvolvimento tecnológico, o número de indústrias no mundo vem crescendo a cada dia e com elas a quantidade de resíduos industriais. Quando se fala em indústrias cerâmicas, a maioria de seus resíduos tem destino incorreto, o que causa um desperdício de matérias primas, além de muitas vezes esses resíduos ficarem expostos ao meio ambiente, contaminando-o. Contudo, por ser proveniente do processo produtivo, este resíduo muitas vezes apresenta composição e condições adequadas para ser reutilizado na própria indústria ou em empreendimentos relacionados.

A indústria de cerâmicas sanitárias, Santa Clara, em Araxá-MG, também faz parte desse cenário. Na empresa, resíduos do processo de produção são gerados constantemente, o que além de perda de matérias-primas, também origina custos para a empresa. Dentro desse panorama, a empresa anseia em reutilizar os resíduos gerados, e com isso abriu espaço para que o estudo fosse desenvolvido.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi de avaliar o potencial de reutilização deste resíduo acumulado na lagoa de decantação, transformando-o em matéria-prima alternativa na forma de massas cerâmicas para produção de novos utensílios.

O trabalho está dividido em quatro capítulos principais e traz uma análise sobre o potencial de reutilização do resíduo da lagoa de decantação da empresa. O primeiro capítulo mostra a revisão bibliográfica realizada, já o segundo demonstra como os testes foram realizados, o terceiro apresenta os resultados obtidos e as discussões acerca desses, e por último as conclusões e sugestões retiradas da realização do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Características dos Mateiras Cerâmicos

Segundo Callister (2008), os cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos e o termo “cerâmica” vem de *kerameikos* uma palavra grega que significa “matéria queimada”, o que indica que as características desejadas para estes materiais são normalmente atingidas através de tratamento térmico a altas temperaturas, o qual pode ser denominado cozimento, queima, ou sinterização.

Uma vez que as cerâmicas são compostas por pelo menos dois elementos, e frequentemente mais do que isso, as suas estruturas cristalinas são, em geral, mais complexas do que aquelas para os metais. A ligação atômica nesses materiais vai desde puramente iônica até totalmente covalente (CALLISTER, 2008, p. 303).

Em relação a essas ligações atômicas, de acordo com Padilha (1997) os materiais cerâmicos apresentam caráter duplo (iônico e covalente). Segundo ele, isso se deve ao fato da sílica (SiO_2), agente principal da maioria dos cerâmicos, ser um composto que possui caráter duplo de ligação, como pode ser visto na tabela 2.1 em que é mostrado que a sílica tem 51% de caráter iônico e consequentemente 49% de caráter covalente, sendo um dos materiais com a dualidade mais nítida.

Tabela 2.1 – Porcentagem de Caráter Iônico para vários materiais cerâmicos

Material	Porcentagem de Caráter Iônico
CaF_2	89
MgO	73
NaCl	67
Al_2O_3	63
SiO_2	51
Si_3N_4	30
ZnS	18
SiC	12

Fonte: Adaptado de Callister (2008, p.304).

Já quanto à fabricação, Fonseca et al. (1999) afirma que independente do processo a ser utilizado para a produção de qualquer produto cerâmico, inicialmente se tem uma mistura de matérias primas, as quais sofrem várias transformações físico-químicas ao longo do processo até que se alcancem as características requeridas ao produto.

Essas propriedades químicas e físicas dos materiais cerâmicos são os principais motivos de sua grande utilização e conforme Silva (2008, p.12): “as propriedades que mais se destacam nos cerâmicos são: resistência elétrica e térmica; fácil modelagem a várias formas; baixa perda dielétrica; baixo coeficiente de expansão térmica; ótima resistência a choques térmicos, alta porosidade e boa flexibilidade”.

Portanto, devido às diferenças nas propriedades dos produtos finais, a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM^[b] (2017) divide os materiais cerâmicos em Cerâmica Vermelha (telhas e tijolos), Cerâmica de Revestimento (pisos e porcelanatos), Cerâmica Branca (que inclui cerâmica de mesa, sanitários e isoladores elétricos), Materiais Refratários, Isolantes Térmicos, Abrasivos e Cerâmicos Avançados (materiais de implantes, sensores de umidade). O foco deste trabalho será somente sobre um dos segmentos, o de Cerâmica Branca, por ser aquele que inclui o setor de cerâmicas sanitárias.

História da Cerâmica Sanitária

A Sociedade Americana de Cerâmicos aponta que a indústria cerâmica é uma das mais antigas do mundo. De forma que, a partir do momento em que os ancestrais humanos descobriram que argila poderia ser misturada à água, modelada como desejado e então queimada tornando-se um objeto, teve-se o nascimento da indústria (*The American Ceramic Society*, 2014).

No livro *How the Toilet Changed History*, Laura Perdew (2016) faz uma cronologia dos aparelhos sanitários, com as primeiras latrinas cerâmicas datadas de 3100-2500 AEC na atual região da Escócia. Posteriormente, de 400 a 1600 EC, latrinas cerâmicas ainda são utilizadas como aparelhos sanitários e as ruas e buracos artificiais no solo como pontos de deposição de resíduos. Após 1600 EC, muitas cidades passaram a utilizar os sistemas fluviais como meio de disposição dos excrementos, mas sem o tratamento que é feito nos dias atuais.

Segundo Perdew (2016), o desenho mais moderno do aparelho sanitário surgira somente em 1592, por John Harrington, e foi melhorado em 1775 por Alexander Cummings. Porém, o aparelho sanitário moderno só passou a ser vastamente utilizado após o verão de 1858 em Londres, o qual ficou conhecido como “O Grande Fedor”, em que o mau cheiro proveniente do Rio Tâmsa, aliado ao calor e à baixa humidade, afetou negativamente a vida de todos os cidadãos. À época, o rio Tâmsa era basicamente um sistema de esgoto aberto, em que aproximadamente 3400m³ de excrementos eram jogados diariamente no rio. Após esse episódio, foram feitos investimentos para reestruturar o sistema sanitário de Londres, e com isso a adesão ao aparelho sanitário que é utilizado por boa parte da população até os dias de

hoje. Adjacente à resolução do problema do mau cheiro, ocorreu a extinção dos casos de cólera em Londres, em uma época em que não se conhecia sua causa ou remédios efetivos e 2/3 dos atingidos nunca se recuperavam da doença.

Hoje se tem conhecimento da associação entre esse tipo de doença e a insuficiência ou inexistência de saneamento. Entretanto, a invenção do aparelho sanitário só teve sua devida importância reconhecida quando milhares de leitores da *British Medical Journal* (BMJ), uma das revistas de medicina mais influentes do mundo, votaram em 2007 o saneamento moderno (vaso sanitário e água limpa) como o principal avanço médico desde 1840, em uma eleição que também trazia antibióticos e vacinas como candidatos (BMJ 2007, 334:111).

Perfil do Setor Produtivo

“O segmento de louças sanitárias integra o ramo dos produtos de minerais não metálicos da Indústria de transformação [...] que compõe o Complexo da Construção Civil” (Marsis et al., 2010, p.12).

Segundo Cabral Júnior et al. (2010) a produção brasileira teve um crescimento significativo nos anos 2000. A qual aumentou de dois milhões peças/ano em 1960, para 13,7 milhões em 1998, e para 21 milhões de peças anuais em 2008 e mostrou um crescimento de 30% nas vendas somente de 2006 a 2008 como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Estimativa da produção brasileira sanitária

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

Fonte: Cabral Júnior et al. (2010, p. 13)

Marcon (2005) afirma que o mercado interno absorve a maior parte da produção brasileira. De forma que se estimou que o mercado doméstico tivesse absorvido cerca de 19 milhões de peças, 90% do total produzido em 2003. Em outras palavras, foi o principal responsável pelo aumento, e sua sustentação, na produção brasileira nos últimos anos.

Porém, as exportações foram bastante afetadas a partir de 2007, inicialmente devido à crise imobiliária nos EUA e, em seguida, pelo impacto que a mesma causou na economia mundial, caindo de um patamar histórico de 20 para 10% da produção nacional.

Quanto às vendas, existe uma grande variação nos preços dos produtos, que irá depender da função, qualidade e sofisticação das louças. Os preços vão de R\$30,00 a R\$40,00 para cubas e lavatórios, R\$160,00 para bacias com caixa acoplada, até R\$2.000,00 para conjuntos com tecnologia e design sofisticados.

De acordo com Prado e Bressiani (2012, p. 6) o Brasil é um dos maiores produtores de louça sanitária, ao lado de China, México, Rússia, Turquia e Bulgária. A Figura 2.1 mostra a distribuição da produção de peças no mercado brasileiro.



Figura 2.1 – Distribuição de louça sanitária por tipo de produto.

Fonte: Tanno et al. (2003)

Processo de Fabricação

Cavalcante (2005, p. 8) explica que a louça sanitária esmaltada consiste no corpo cerâmico, vertido em molde de gesso ou de resina, proveniente de barbotinas defloculadas, o qual é seco, dado acabamento, aplicada camada de esmalte e finalmente sinterizado entre 1200°C a 1350°C, para que sua absorção de água seja praticamente nula e sua resistência mecânica torne-se elevada.

A empresa alvo do estudo utiliza quatro tipos de matérias primas, duas argilas, filito e granito, todas armazenadas em um galpão (ver figuras 2.2 a 2.6) denominado casa de massas, de onde são pesadas e alimentadas à mistura para criação das barbotinas.



Figura 2.2 – Pilha de filito utilizado para compor a barbotina



Figura 2.3 –Argila Padre Libério



Figura 2.4 – Argila São Simão



Figura 2.5 – Granito pré-moído



Figura 2.6 – Granito moído (abaixo 300 μ m) em bags de 1t

Segundo a ABCERAM ^[a] (2017), em todo o mundo a produção de louça sanitária segue basicamente o mesmo processo. Dessa forma, a Figura 2.7 mostra um fluxograma do roteiro genérico de fabricação criado pela ABCERAM. É importante salientar, que mesmo indústrias com alto grau de tecnologia e automação ainda envolvem métodos artesanais, principalmente na fase de acabamento.

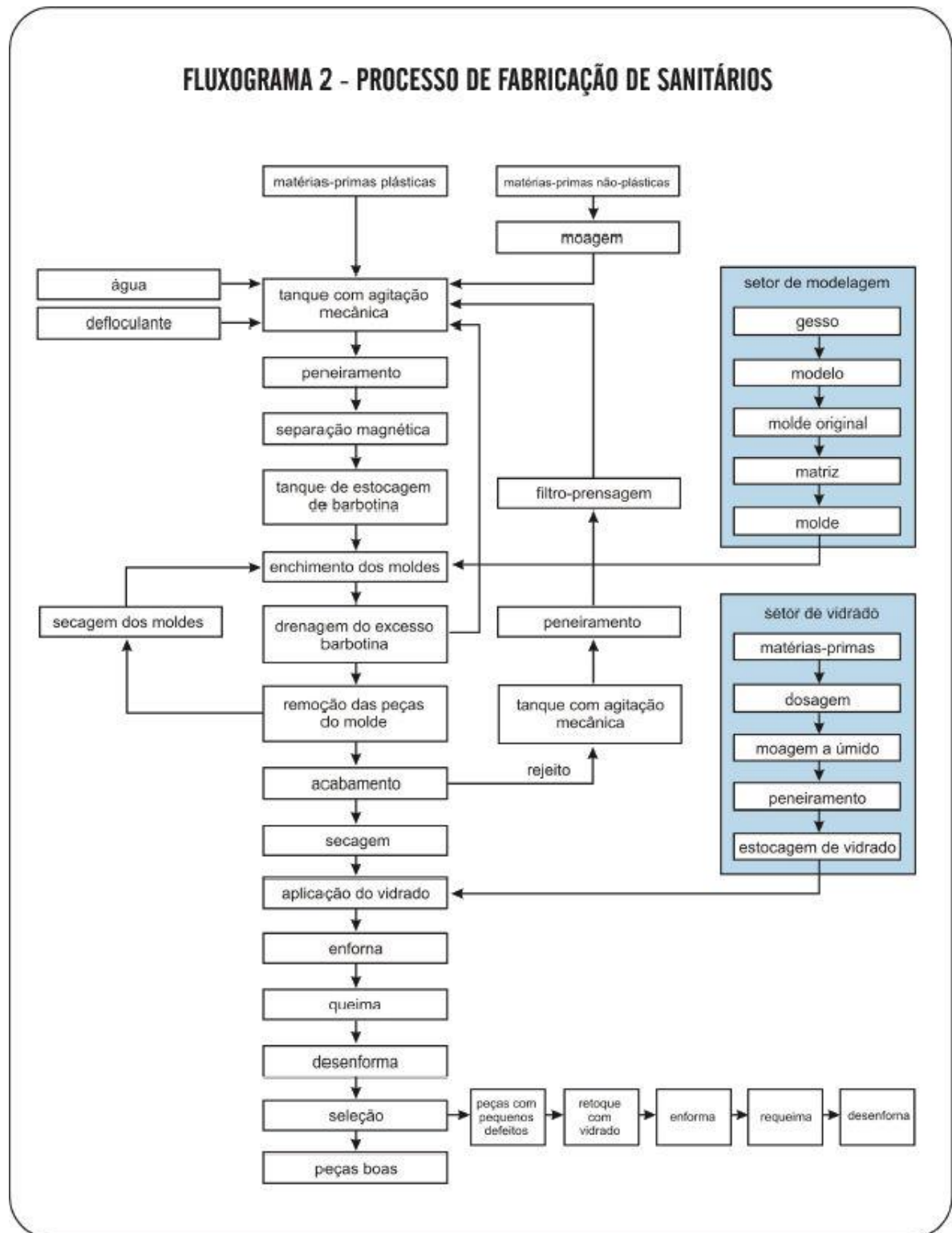


Figura 2.7 – Fluxograma do processo de fabricação de louças sanitárias.

Fonte: ABCERAM ^[a] 2017.

Preparação da Massa

A primeira etapa na fabricação de louças sanitárias é a preparação da massa, ou barbotina, esse processo é primordial, pois define características importantes, conforme Cavalcante (2005) três fatores são essenciais na produção da massa, as matérias-primas, o processamento da massa e a reologia da massa.

De acordo com Albuquerque (2009) para fabricar uma massa cerâmica é necessário utilizar matérias-primas classificadas como plásticas e não-plásticas, água e aditivos (normalmente defloculantes e, em raras ocasiões, floculantes).

Segundo Callister (2008) as matérias-primas plásticas são responsáveis pela hidroplasticidade, que é a capacidade de uma matéria em ser moldada a partir da adição de água, característica essencial à fase de conformação, em que a barbotina será moldada nas formas de gesso ou resina. Já os materiais não plásticos, também chamados de fundentes, são adicionados à massa para reduzir a retração linear, além de diminuir a temperatura de vitrificação.

Na empresa em questão as matérias primas fundentes são o filito e o granito já as plásticas são as argilas, essas matérias-primas são misturadas à água, com adição de silicato de sódio como defloculante. Esse defloculante impede que as partículas minerais se agreguem o que possibilita produzir uma massa com maior quantidade de sólidos e maior densidade, porém com uma viscosidade baixa o suficiente para ser bombeada.

O preparo da massa pela empresa é feito em etapas, a primeira delas consiste na combinação, em meio aquoso, de um dos tipos de argila e do filito em tanques misturadores (Figura 2.8). O objetivo dessa etapa inicial é criar massa base, pois a argila devido à sua alta plasticidade, se adicionada direto ao moinho, é capaz de agregar os seixos uns aos outros, e estes às paredes do moinho. Essa massa base é regularmente amostrada através de coleta realizada por técnico em recipiente de 100ml para determinação de densidade.



Figura 2.8 – Vista superior de um dos tanques misturadores

Em sequência, a massa base segue para o moinho de seixos, Figura 2.9, onde a ela são adicionados granito, filito e mais um tipo de argila. O objetivo da moagem, segundo Silva (2008), é reduzir a granulometria de partículas das matérias primas envolvidas no processo, e com isso garantir que massa cerâmica esteja homogênea e com uma distribuição granulométrica determinada. Pois, de acordo com o Almanaque Cerâmico (1998) citado por Cavalcante (2005, p.23) “o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais [...], como por exemplo: no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas propriedades finais do produto”. Ao fim da moagem a massa virgem (como é chamada a massa da saída do moinho) também é amostrada para verificar a densidade.



Figura 2.9 – À direita, conjunto de moinhos de seixo em espaço protegido e à esquerda, peneira metálica circular

Após a moagem, a barbotina segue para o peneiramento em malha de quarenta Mesh (40#), ver Figura 2.9, em que partículas acima do limite desejado são retidas na tela da peneira. Essa etapa funciona como a garantia de que a distribuição granulométrica se concentre somente na faixa de tamanho desejada (abaixo de $420\mu\text{m}$).

Posterior ao peneiramento, a massa segue para os tanques de armazenamento e acerto (Figura 2.10), que possuem agitação leve e constante para manter as partículas em suspensão. A última fase da preparação da massa consiste no acerto reológico da mesma, nesta etapa uma amostra é coletada do tanque para realização de testes laboratoriais de viscosidade. De acordo com os resultados obtidos para a barbotina, são feitas correções utilizando água ou defloculante (habitualmente silicato de sódio).



Figura 2.10 – Tanques de acerto e armazenamento da barbotina

Reologia da Barbotina

Segundo Oliveira (2000), o estudo do fluxo de fluidos viscosos resultante da aplicação de uma tensão externa é denominado reologia. Uma vez que a reologia afeta diretamente as características da barbotina e consequentemente seus custos de bombeamento, o domínio da reologia torna-se fundamental para assegurar uma homogeneização eficiente e minimizar os gastos de processo.

As medições de reologia das barbotinas são, na maioria das vezes, indiretas e possuem certo grau de complexidade, pois as barbotinas cerâmicas podem apresentar comportamentos diferentes, porém simultâneos. Um desses comportamentos, chamado pseudoplástico, o qual independe do tempo, mas depende da taxa de cisalhamento, pode ser identificado pela viscosidade aparente em viscosímetros, nos quais o aumento da tensão e/ou da taxa de cisalhamento provoca uma diminuição da viscosidade aparente da barbotina. Outro comportamento, conhecido como tixotropia, é dependente do tempo, e pode ser observado quando a suspensão torna-se mais viscosa (gelifica) pelo repouso em um processo isotérmico reversível (Rocha et al., 2008, p.333).

Conformação (ou Fundição)

Posterior à preparação da massa e verificação da reologia, a barbotina é bombeada para a estação de conformação (ou fundição como é conhecida no meio industrial), ver Figura 2.11. Segundo Silva (2008), o objetivo desta etapa é eliminar, de forma lenta e gradual, a água que foi adicionada até que a peça conformada tenha resistência mecânica suficiente para permanecer intacta durante as fases de transporte e secagem.



Figura 2.11 – Estação de conformação de caixas acopladas

O processo de fundição é feito através do preenchimento dos moldes de gesso com a barbotina, onde a mesma permanece por tempo determinado até que o gesso do molde absorva a água contida na suspensão e as partículas sólidas se moldem em sua superfície, formando o que será posteriormente a parede da peça. As peças em cerâmicas sanitárias são normalmente ocas, ou seja, o processo de fundição se dá somente até certo ponto, quando o tempo para atingir a espessura desejada das paredes é atingido, o molde é drenado para

recuperar a barbotina que ainda está líquida no interior (Guia Técnico Ambiental da Indústria Cerâmica, 2006, p.33).

Após o tempo de fundição, as peças são retiradas dos moldes, os quais posteriormente sofrem uma injeção de ar comprimido, que expelle a água de seu interior para que possa ser reutilizado. Porém, como evidenciado por Cavalcante (2005, p.17): a constante repetição do processo de absorção e eliminação da água pelo molde de gesso e a baixa dureza do mesmo, fazem com que a vida útil dos moldes seja de aproximadamente 100 fundições, o que torna necessário fabricar moldes de gesso diariamente, tarefa atribuída ao setor de modelagem da indústria.

O número de apenas 100 conformações por molde pode parecer pequeno e inviável diante dos elevados números de produção das indústrias, mas vale salientar que segundo Silva (2008), muitas composições para moldes são possíveis na indústria cerâmica, entretanto o gesso é vastamente utilizado devido ao seu baixo custo e simplicidade na fabricação de moldes. Além disso, os moldes que são substituídos geralmente são vendidos para fábricas de cimento.

Secagem

Em geral, após a etapa de conformação, as peças ainda possuem umidade elevada, e segundo a ABCERAM ^[c] (2017) a água deve ser eliminada de forma lenta e gradual para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças. Normalmente essa eliminação de água tem início em galpões equipados com exaustores e ventiladores que controlam o fluxo de ar, conforme a Figura 2.12, por aproximadamente sete dias. Na sequência, as peças seguem para estufas como a da Figura 2.13 por 24 horas para garantir que toda a umidade tenha sido eliminada.



Figura 2.12 – Galpão de secagem lenta das peças



Figura 2.13 – Estufa de secagem

Acabamento

O acabamento consiste no processo de detalhamento visual da peça, com eliminação de rebarbas através de lâminas e espongeamento como mostra a Figura 2.14. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), atualmente a grande maioria das empresas trabalha com espongeamento úmido, feito antes da secagem em estufa, o que tem reduzido substancialmente a poeira que era gerada na fase de acabamento e consequentemente, os problemas de silicose tem deixado de ser significativos no segmento.



Figura 2.14 – Processo de acabamento executado por técnico em tampa de caixa acoplada

Esmaltação

Esta é a etapa em que as peças produzidas recebem a aplicação de esmaltes cerâmicos e carimbos de marca. A aparência final do produto em questões de cor e brilho será definida pelo revestimento aplicado durante a esmaltação.

Os esmaltes normalmente são produzidos em um setor à parte da indústria, comumente chamado de casa de esmaltes, como mostra a figura 2.15. Contudo, as composições dos esmaltes variam muito de acordo com o produto em que será aplicado e também de uma empresa para a outra. Normalmente, as composições são escolhidas segundo as características desejadas para o produto final e as condições de queima.



Figura 2.15 – Casa de esmaltes (detalhe de produção de esmalte à direita)

De acordo com Eppler (2002), para evitar que apareçam defeitos no esmalte, é necessário escolher com cuidado os óxidos que o compõe, pois cada um deles tem uma limitação como é mostrado no Quadro 2.1. O cuidado é para que o esmalte apresente uma temperatura de selagem (vitrificação após queima) alta, já que sua fusão libera grande quantidade de gases. Esses por sua vez devem ser eliminados, pois uma vez que o esmalte se encontre selado, a saída dos gases pode gerar bolhas não desejadas na superfície da peça.

Quadro 2.1 – Óxidos utilizados nos esmaltes e suas limitações

Óxido	Limitação
Sílica (SiO_2)	Baixa taxa de fusão
Zircônia (ZrO_2)	Baixa solubilidade
Óxido de Boro (B_2O_3)	Aparecimento de bolhas
Óxido de Zinco (ZnO_2)	Sensibilidade dos pigmentos cerâmicos
Alcalino-Terrosos (CaO , SrO)	Somente para esmaltes queimados a mais de 1093°C
Álcalis (Na_2O , K_2O , Li_2O)	Limites de expansão térmica

Fonte: Adaptado do texto de Eppler (2012, p.14)

O processo de esmaltação se dá em cabines, conforme mostrado na Figura 2.16, onde depois de feito o acerto do esmalte, o mesmo segue por bombeamento até as pistolas de esmaltação, as quais funcionam à base de ar comprimido. O processo de esmaltação pode ser feito por operador ou ser automatizado, como é o caso do carrossel mostrado na Figura 2.17.



Figura 2.16 – Processo de esmaltação executado por operador



Figura 2.17 - Processo de esmaltação automatizado em carrossel

Queima ou Cozimento

Posteriormente à secagem e à esmaltação, as peças seguem para a etapa de queima. No decorrer dessa, mudanças físico-químicas ocorrem tanto na massa quanto no esmalte.

Durante esta etapa, a densidade é aumentada, com a consequente diminuição da porosidade e a resistência mecânica melhora. [...] Quando materiais à base de argila são aquecidos a temperaturas elevadas, ocorrem reações, uma delas é a vitrificação, ou seja, a formação gradual de um vidro líquido que flui para dentro e preenche parte do volume dos poros, SILVA (2008, p. 36).

A partir dos anos 90 progressos consideráveis foram feitos nas tecnologias de queima. Um dos principais avanços foi a utilização da informática no controle da temperatura de fornos, a qual aperfeiçoou as curvas de queima. Além disso, novos materiais para revestimento e tijolos refratários mais leves foram introduzidos. Consequentemente, a qualidade das peças aumentou consideravelmente enquanto a energia gasta diminuiu drasticamente (Cino e Brötz, 1996).

A empresa atualmente opera com uma curva de queima no intervalo de 450 a 1250° C em fornos contínuos (de túnel) e fornos intermitentes, mostrados nas Figuras 2.18 e 2.19, ambos com tempo de queima em torno de 12 horas. Segundo Cino e Brötz (1996), os fornos contínuos possuem um consumo específico de até 1000 Kcal/Kg de peça, enquanto nos intermitentes esse consumo pode superar 2000 Kcal/Kg de peça.



Figura 2.18 – Peças em forno contínuo (entrada do forno à esquerda e saída do forno à direita)



Figura 2.19 - Forno intermitente (antes da queima à esquerda e após a queima à direita)

As operações de carregamento e descarregamento em ambos os fornos são feitas manualmente por operadores em regime de turno, mas esse processo é realizado de maneira mais fácil e ágil nos fornos contínuos.

Classificação

Após a queima as peças são analisadas por sistemas automatizados quanto às suas dimensões, e posteriormente por técnicos que realizam o controle de qualidade através da codificação das peças. De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (2006, p. 41), essa classificação deve levar em conta os seguintes aspectos: “regularidade dimensional, aspecto superficial e características mecânicas e químicas, análise dos aspectos superficiais e das características mecânicas, tais como cor, trinca e empeno”.

Após passar pelo setor de classificação mostrado na Figura 2.20 os produtos menores são embalados em caixa de papelão, enquanto os maiores recebem algumas proteções em regiões de contato. Posteriormente, com o auxílio de empilhadeiras os produtos são dispostos em pallets de madeira e armazenados para comercialização.



Figura 2.20 – Setor de classificação de peças

Geração de Efluente Líquido

No processo de fabricação de louças sanitárias são gerados três tipos de resíduos: gesso, cacos e efluente líquido (lodo mineral).

A grande maioria do descarte de gesso é consumida por empresas do ramo cimenteiro, a quantidade do resíduo de gesso gira em torno de 50 a 80 kg por tonelada de peça produzida, essa massa é derivada do descarte dos moldes à medida que os mesmos perdem sua capacidade de absorção da água da barbotina.

Já os cacos, provenientes de perdas após o processo de queima, são rejeitos inertes que normalmente são destinados a aterros dentro da própria área da empresa. O volume desse rejeito pode variar de 6% a 20% dependendo do nível de controle de qualidade da empresa (COELHO, 2009).

O efluente líquido é originado principalmente na limpeza dos moldes e das cabines de esmaltação. A composição desse resíduo é muito similar às matérias-primas, porém com adição de elementos pesados como zinco, chumbo, cádmio, cromo, cobre, níquel e cobalto oriundos de esmaltes e corantes (SILVA, 2008).

Segundo as informações da empresa, são gerados cerca de 5.000 L diários de efluente líquido, com um total de resíduo sólido da ordem de 350t por ano. Além disso, o efluente líquido é proveniente de três setores: conformação, esmaltação e em pequena parte pela modelagem. Porém, não é feito nenhum tipo de reutilização da massa sólida (resíduo) proveniente desse efluente, o mesmo é destinado a uma lagoa artificial para decantação, em que o objetivo é somente a reutilização da água. Entretanto, o volume de resíduo sólido na

lagoa aumenta a cada dia, e ao chegar ao ponto de saturação da lagoa, esse resíduo é transferido para aterros sanitários, o que gera despesas para a empresa.

Impacto Ambiental

O art. 1^a da Resolução 01/1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), afirma que:

Considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota (flora e fauna); as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986, Art. 1.).

De acordo com Pereira (2004) mesmo que exista algum tipo de tratamento, a grande maioria dos resíduos cerâmicos é disposta em aterros sanitários e industriais, o que requer grandes áreas para instalação.

Conforme Medeiros (2012), as áreas utilizadas como aterros, sejam dentro da planta da empresa ou fora dela, ainda que protegidas, acabam congregando um passivo ambiental expressivo, já que, depois de terminados os aterros, existem muitas restrições quanto aos usos que podem ser dados à área.

Segundo Medeiros (2012), os sólidos, provenientes desse efluente líquido, podem ser considerados inertes, se feito tratamento prévio adequado do mesmo. Apesar disso, para reutilização deste efluente, o mesmo deve apresentar características físicas e químicas adequadas, para não ocorrer interferências no processo cerâmico.

Estudos de Reutilização

Existem diversos estudos que buscam reciclar os rejeitos produzidos pelas indústrias de cerâmicas. Porém, a maioria destes trabalhos trata principalmente de cacos, que são os resíduos sólidos provenientes de peças queimadas que não atingiram as especificações necessárias.

Todavia, alguns estudos buscaram reciclar o efluente líquido dentro da própria indústria ou em outras indústrias relacionadas, como cerâmicas de revestimento e cerâmicas vermelhas. Entre esses trabalhos destacam-se, em ordem cronológica, os estudos de: Zanette (2004), Cavalcante (2005), Silva (2008), Albuquerque (2009) e Almeida et al. (2016).

No primeiro deles, Zanette (2004) buscou avaliar a tratabilidade de efluentes gerados por uma indústria de cerâmica sanitária para possibilitar seu reuso. O método aplicado incluiu testes de clarificação com auxílio de coagulantes (policloreto e sulfato de alumínio) e

floculante catiônico. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento é tecnicamente viável. Porém, mesmo após ser tratado, o efluente não deveria ser reutilizado na esmaltação, pois a presença de diferentes elementos químicos metálicos no resíduo poderia intervir na coloração desejada para o esmalte após a queima. Logo, foi sugerido realizar estudos para reutilizar o efluente na preparação da massa da própria indústria ou para outros segmentos da indústria cerâmica.

Dessa forma, Cavalcante (2005) realizou testes de avaliação do potencial de produção de barbotinas para uso em revestimentos cerâmicos, utilizando resíduos da indústria de louça sanitária na composição. A metodologia consistiu na fabricação de quatro composições diferentes de barbotina utilizando resíduos diferentes do processo em cada. Os resultados mostraram que as quatro formulações possuem potencial para serem aplicadas com essa finalidade, sem apresentar problemas quanto à coloração ou resistência. Além do mais, com a diminuição dos custos em matérias-primas para as empresas de revestimento cerâmico, conclui-se que elas podem ser uma fonte de absorção para os resíduos da indústria de cerâmica sanitária.

Já Albuquerque (2009) analisou o potencial de reaproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louças sanitárias dentro do próprio setor, comparando a massa cerâmica criada com o resíduo à massa padrão utilizada na empresa. O desenvolvimento da pesquisa consistiu em analisar os resíduos gerados e confeccionar corpos de prova com cada um deles, com e sem um aditivo mineral denominado ADCER, para analisar propriedades mecânicas como: retração, absorção de água e perda ao fogo. Os resultados obtidos possuem limitação, já que não foram realizados testes de resistência mecânica, mas demonstraram que existe um alto potencial para aplicação dos resíduos na confecção de massas principalmente para aqueles com o aditivo industrial.

No mais recente dos trabalhos citados, Almeida et al. (2016) buscaram caracterizar o efluente líquido produzido na instalação, avaliar a taxa de produção diária do mesmo e utilizá-lo na composição de barbotina. Os testes realizados com a mistura compreenderam difração de raios-X, granulometria, permeabilidade, resistência à flexão, espessura de parede formada, e deformação pirolástica. Uma vez feita a análise dos resultados, concluiu-se que a reincorporação de parte da produção diária do efluente era viável na composição da massa. Contudo, os valores de deformação pirolástica foram considerados altos, com isso foi sugerida a separação de efluentes oriundos do processo de esmaltação dos efluentes derivados da massa cerâmica.

METODOLOGIA

Materiais e Equipamentos

Na realização deste trabalho, as matérias primas utilizadas, incluindo o defloculante e as amostras de resíduo, foram obtidas na empresa de indústria de cerâmicas sanitárias da cidade de Araxá-MG e estes materiais estão identificados no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Lista das materiais utilizados na confecção das barbotinas

Matéria prima	Descrição
Argila São Simão	Argila Plástica
Argila Padre Libério	Argila pseudoplástica
Filito Bambuí	Fundente
Granito São Joaquim	Fundente
Resíduo Mineral	Resíduo proveniente da lagoa de decantação
Silicato de sódio	Defloculante

Os equipamentos utilizados foram:

- Turbidímetro portátil;
- Phmetro portátil;
- Moldes de gesso;
- Viscosímetro rotativo analógico Brookfield, acoplado com *spindle* nº 2;
- Balança de precisão $\pm 0,01\text{g}$;
- Fornos de queima da indústria;
- Balões volumétricos de 100 ml;
- Peneiras da série Tyler de 40# e 325#;
- Lâminas metálicas;
- Paquímetro digital;
- Moinho de bolas de 70rpm, com parede e corpos moedores de cerâmica;
- Baldes plásticos;
- Chapa térmica elétrica;
- Formas metálicas para estufa;
- Dessecador;
- Béqueres de 1L;

- Segmentos de tubos em PVC de 70 mm de diâmetro;

Todos os equipamentos utilizados foram fornecidos pela empresa de cerâmicas sanitárias ou pelos laboratórios do CEFET-MG.

Caracterização do Resíduo Sólido

O resíduo sólido, originário da lagoa de decantação da empresa e utilizado nesse trabalho, foi caracterizado por Resende (2015) como passível de ser utilizado como aditivo mineral, devido à sua composição e granulometria bastante reduzida. Além disso, o resíduo foi testado como material pozolânico para substituições de 35% em cimento Portland. Porém, os resultados apresentados para o cimento foram considerados insatisfatórios, o que impossibilitou, dentro das condições do estudo, a utilização do resíduo para esse fim.

Granulometria

A curva da distribuição granulométrica pode ser vista na figura 2.21 e conforme Resende (2015, p. 48): “o resíduo tem uma granulometria bem ajustada, possuindo uma variação no tamanho das partículas, principalmente, entre 0,70 e 70,00 μm , com uma distribuição bem uniforme dessas partículas”.

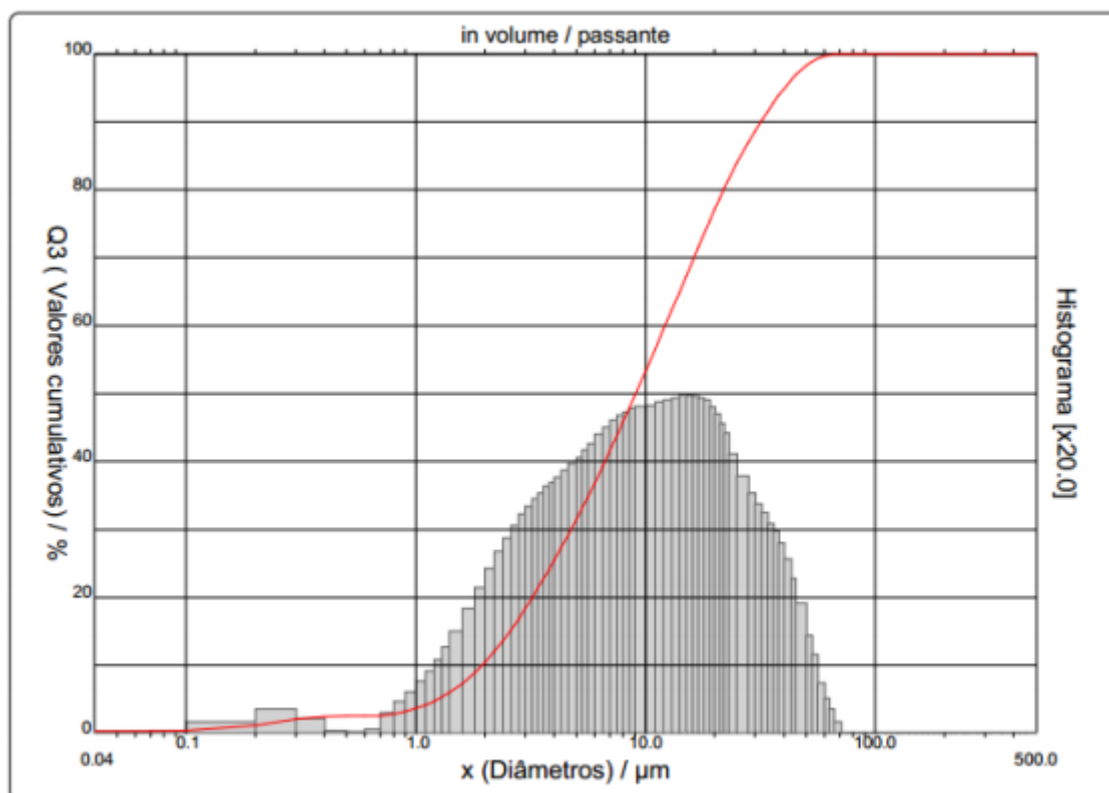


Figura 2.21 - Curva da distribuição granulométrica do resíduo.

Fonte: Resende (2015, p. 49).

Composição Química e Mineralógica

Segundo Resende (2015) através de fluorescência de raios-X determinou-se que os principais compostos químicos encontrados na amostra são óxidos, sendo os principais de: silício, alumínio e cálcio, como podem ser visto na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Composição química da amostra de resíduo e seus percentuais.

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

Fonte: Resende (2015, p. 49).

Além disso, foi evidenciado na espectrometria por difração de raios-X da figura 2.22 a existência de picos de minerais de quartzo e concluiu-se que o resíduo apresenta padrão de difração típico de materiais cristalinos. Ainda, a sílica presente na amostra provavelmente é sílica cristalina, o que indica que o material apresentará baixa reatividade (RESENDE, 2015, p. 50).

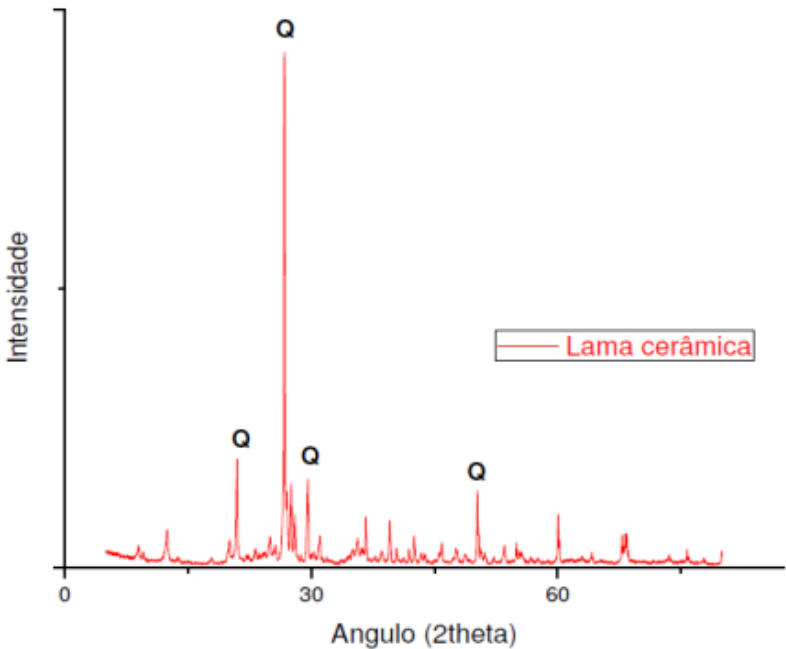


Figura 2.22 - Espectro de difratometria de raios-X da amostra.

Fonte: Resende (2015, p. 50).

Morfologia e densidade

A partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar que o resíduo “possui grãos de tamanhos heterogêneos com ângulos retos e arestas vivas”. Além de partículas mais claras em tom cinza, que podem ser vistas na figura 2.23, a partir das quais se deduziu que “tendo em vista que a imagem foi realizada com detectores de elétrons retroespalhados, pode-se afirmar que estas partículas possuem massa específica superior ao restante da amostra” (RESENDE, 2015, p. 51).

Além disso, a densidade do resíduo foi determinada como $2,63\text{g/cm}^3$ através de picnometria por Resende (2015).

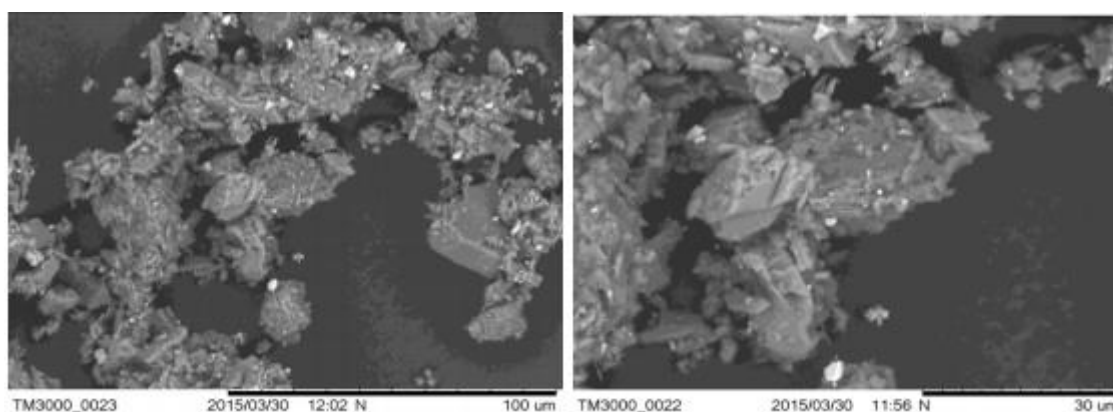


Figura 2.23 - Fotomicrografias da amostra.

Perda ao fogo

A perda ao fogo obtida por Resende (2015) mostrou um resultado de 9,5% que é muito elevado em relação aos parâmetros da NBR 12653 (2014), a qual define que para ser considerado como material pozolânico classe E, a perda ao fogo deve ser no máximo de 6,0%.

Desenvolvimento

Nas condições atuais, os efluentes líquidos gerados nos processos de conformação, esmaltação e uma pequena parte pela modelagem se juntam através de canaletas espalhadas pela fábrica e escoam para uma manilha que desagua o efluente na lagoa artificial de decantação conforme as figuras 3.1 e 3.2, nessa última é possível observar a praia formada pelo resíduo sólido decantado.



Figura 3.1 – Saída do efluente líquido para a lagoa de decantação



Figura 3.2 – Lagoa artificial de decantação

Turbidez e pH

Em conversas com os representantes da empresa ficou evidente que não se tinha uma ideia clara da quantidade de particulados carregados pela água para os efluentes. Dessa forma, foram feitas análises de turbidez do efluente para realizar uma avaliação, ainda que grosseira, de qual das fontes do efluente apresentava maior número de particulados. Portanto, o efluente líquido foi amostrado em béqueres com capacidade de 1L para caracterizá-lo quanto à turbidez (quantidade de sólidos suspensos).

Os testes foram feitos no local da lagoa e em três estâncias: no momento de saída de efluente proveniente do setor de conformação, na saída de efluente oriundo da esmaltação, e na área de recuperação de água da lagoa, em que parte do sólido já teria sido decantada. Todas essas amostras foram comparadas à água utilizada no laboratório.

Essa análise de turbidez envolveu colocar uma amostra do efluente líquido dentro do recipiente que acompanha o turbidímetro, em sequência posicionar o recipiente cheio no aparelho, como mostra a figura 3.3, travá-lo propriamente, apertar o botão “Read” e esperar pelo resultado mostrado pelo aparelho. Para diminuir a chance de erro, o teste de turbidez foi realizado em duplicata para cada estância de coleta, e a cada ponto diferente o recipiente era lavado inicialmente com água e depois com o efluente líquido que seria analisado, de forma que as paredes do recipiente só estivessem sujas com o próprio efluente.



Figura 3.3 – Teste de turbidez

Outro fator até então desconhecido era o pH desse efluente e da água da lagoa após decantação. Os locais e método de coleta do efluente para essa análise foram os mesmos do teste de turbidez, mas dessa vez os resultados foram obtidos por um phmetro portátil. Assim, o eletrodo do phmetro foi baixado até entrar em contato com o efluente coletado no béquer, como mostrado na figura 3.4 e observou-se a medida indicada no aparelho até que essa se tornasse estável. Esse teste também foi realizado em duplicata para cada ponto de coleta, bem como feita a devida limpeza dos béqueres e do eletrodo entre cada medida.



Figura 3.4 – Medição de pH

Cone de queima

Segundo informações fornecidas pelo diretor de produção, do ponto de vista econômico, o reaproveitamento do resíduo dentro da própria empresa só seria viável se o mesmo fosse aplicado substituindo total ou parcialmente uma das matérias primas. Como Resende (2015) concluiu que o resíduo possuía potencial para ser utilizado como aditivo mineral, foram realizadas análises para determinar sobre qual das matérias-primas o resíduo apresentaria melhor substituição.

O primeiro teste em laboratório consistiu na análise do cone de queima, para verificar a estrutura e brilho do material após ser queimado. Para realizar esse teste, parte do resíduo foi coletada, misturada a uma cola orgânica, passada em peneira de 40# e disposta em moldes cerâmicos em forma de cone, como mostra a Figura 3.5-A. Em seguida, esses moldes foram girados sobre uma região com cola de uma placa de cerâmica crua, para que o resíduo deixasse o molde e se posicionasse sobre a placa, ver Figura 3.5-B. O objetivo da cola (a qual se desfaz durante a queima) é tentar manter a geometria do cone intacta para que não ocorra deslizamento do material antes que a queima aconteça. Depois de formados os cones, a placa foi levada ao forno da empresa para queima por aproximadamente doze horas.



Figura 3.5 – Elaboração dos cones de queima
(Em A – Disposição do resíduo no molde, e em B – colocação do cone sobre placa cerâmica).

Após a saída do forno, a placa foi levada ao laboratório e os cones do resíduo foram comparados aos cones das matérias-primas utilizadas em relação à estrutura, cor e brilho.

Preparação das Massas

Uma vez determinada a matéria prima que seria substituída pelo resíduo nos testes, foram elaboradas duas formulações de barbotina, com suas diferenças evidenciadas na tabela 3.1 e denominadas formulações A e N, e atribuídas os códigos AF e NF respectivamente. Ambas foram propostas pelo diretor de produção da empresa e utilizadas na confecção de iguais quantidades de corpos de prova, os quais foram comparados à massa padrão, de código *Standard* ou STD, para determinar o grau de aplicabilidade.

Para cada uma das formulações foram feitos seis graus de substituição, sendo estes de 100%, 75%, 50%, 25%, 10% e 5%, os quais indicam qual fração de matéria-prima foi substituída por resíduo em cada teste. Conforme a Tabela 3.1, as massas foram feitas em diversas cargas individuais compostas por 4 kg de material sólido e 1,1 L de água, essa mistura resultava em aproximadamente 3L de barbotina para cada carga.

Tabela 3.1 – Formulações propostas

A.F (100, 75, 50, 25, 10 e 5%)		N. F (100, 75, 50, 25, 10 e 5%)	
Fração	Material	Fração	Material
340g	Argila São Simão	340g	Argila São Simão
200g	Argila Padre Libério	320g	Argila Padre Libério
2560g	Filito Bambuí	2560g	Filito Bambuí
900g	Granito (e/ou Resíduo)	780g	Granito (e/ou Resíduo)
1100mL	Água	1100mL	Água
10mL	Silicato de sódio	10mL	Silicato de sódio

As matérias primas foram coletadas no galpão da empresa, e então dispostas dentro de um moinho de cerâmica de escala laboratorial, como mostra a figura 3.6 em que a forma metálica da parte esquerda inferior da figura possui filito e a forma superior contém as demais matérias primas (argilas, granito e/ou resíduo), juntamente com água e silicato de sódio. O volume de silicato adicionado foi proporcional ao que é utilizado na casa de massas da empresa. É importante ressaltar que normalmente é adicionado mais silicato de sódio à barbotina na fase de acerto reológico da massa.



Figura 3.6 – Material utilizado e moinho laboratorial de cerâmica
(Em A – Filito, em B – Argilas e em C – Granito e ou resíduo).

O moinho de bolas com o material sólido, água, silicato de sódio e corpos moedores de cerâmica foi então fechado e disposto sobre os rolos do equipamento de moagem, ver figura

3.7, o qual após ser ligado, fazia o moinho girar a 70 rpm, promovendo a moagem do material durante uma hora.



Figura 3.7 – Moinho sobre roletes

Depois de decorrido o tempo de moagem, o moinho foi retirado do equipamento, aberto e a massa cerâmica, agora homogênea, despejada em balde plástico. Essa massa então, ao modelo do processo industrial, foi passada em peneira de 40# como mostra a figura 3.8. A massa retida nessa peneira foi armazenada separadamente, mesmo sem ter qualquer outro uso nesse trabalho.



Figura 3.8 – Barbotina sendo passada em peneira de 40#

Massa específica aparente

Após o peneiramento, foi feito o teste em duplicata de massa específica aparente para a barbotina passante. Nesse teste um balão volumétrico de 100ml (ou 100 cm³) foi pesado na balança, ver figura 3.9-A, retornou-se a leitura da mesma para a tara (valor zero), e o balão volumétrico foi retirado, dessa forma a balança mostrava o peso do balão volumétrico em valor negativo. A massa cerâmica passante na peneira de 40# era então alimentada no balão e o mesmo era pesado novamente, como mostra a figura 3.9-B. Assim, o valor indicado na balança era somente a massa do material cerâmico.

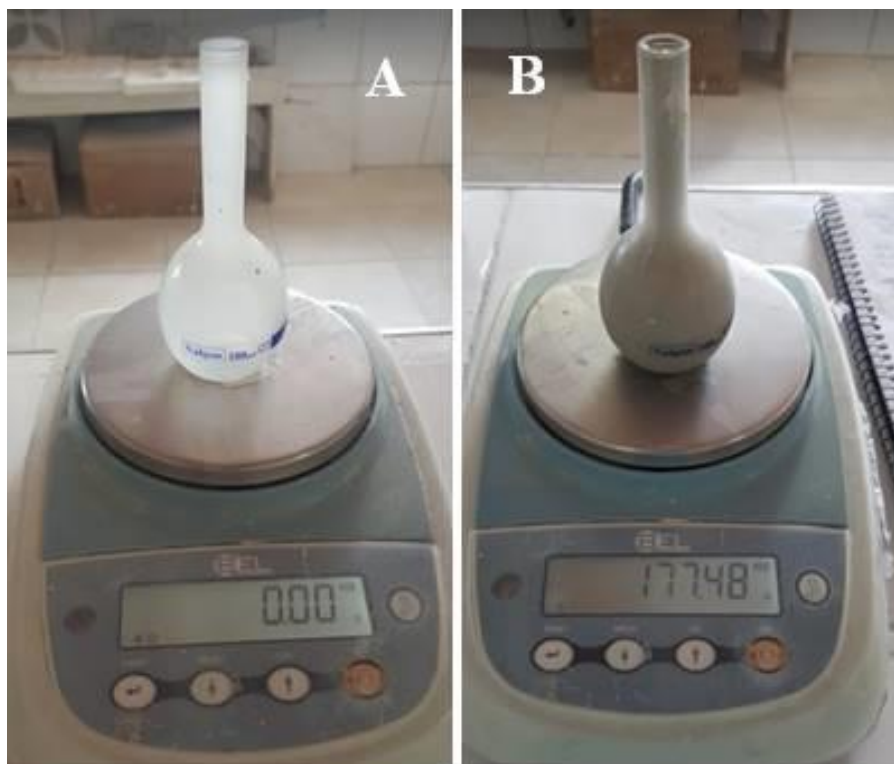


Figura 3.9 – Determinação da massa específica

(Em A – pesagem do balão volumétrico vazio e balança tarada, em B – pesagem do balão cheio com barbotina).

Com esse valor de massa e o volume do balão, a densidade das barbotinas foi calculada através da equação (1).

$$\text{Massa Específica} = \frac{\text{Massa (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

Reologia das Massas

A barbotina passante na peneira foi submetida aos testes para acerto reológico. O primeiro desses testes foi o de viscosidade em viscosímetro rotativo e analógico Brookfield. Nesse teste, um litro de barbotina foi colocado em um béquer, agitou-se por um minuto e então foi feita a medida no viscosímetro, como mostra a figura 3.10.



Figura 3.10 – Medição de viscosidade

Para analisar os dois comportamentos reológicos da barbotina, explicados na seção 2.4.2, a medição no viscosímetro foi realizada em dois instantes.

No primeiro instante, o viscosímetro foi ajustado para 50 rpm. Essa rotação promove uma força de cisalhamento constante, o que faz com que o viscosímetro indique um valor estável após cerca de quinze segundos. O equipamento foi então desligado e a indicação do viscosímetro anotado. Após essa medição aguardava-se cinco minutos para a leitura em segundo instante, a qual era feita em menor rotação (2,5 rpm) buscando avaliar o efeito da tixotropia da massa, a qual corresponde à diferença entre as viscosidades em cada instante.

Para calcular a viscosidade em cada instante, foram utilizados os fatores de conversão localizados na lateral do equipamento, e transferidos para a tabela 3.2

Tabela 3.2 – Fatores de conversão do viscosímetro analógico Brookfield

Velocidade (rpm)	Nº Spindle						
	01	02	03	04	05	06	07
0,5	200	800	2K	4K	8K	20K	80K
1	100	400	1K	2K	4K	10K	40K
2	50	200	500	1K	2K	5K	20K
2,5	40	160	400	800	1,6K	4K	16K
4	25	100	250	500	1K	2,5	10K
5	20	80	200	400	800	2K	8K
10	10	40	100	200	400	1K	4K
20	5	20	50	100	200	500	2K
50	2	8	20	40	80	200	800
100	1	4	10	20	40	100	400

O *spindle* utilizado foi o nº2, pois segundo o fabricante do equipamento é o indicado para massas cerâmicas. Com esse dado e as rotações do equipamento, foi possível determinar os fatores de conversão para cada caso e assim calcular a viscosidade através das equações (2) e o fator de tixotropia pela equação (3)

$$\text{Viscosidade (cP)} = \text{Leitura do viscosímetro} \times \text{Fator de conversão} \quad (2)$$

$$\text{Fator} = \frac{B_{2,5} \times 160}{B_{50} \times 8} \quad (3)$$

Tempo de Secagem (TS) e Velocidade de Deposição (VD)

O teste seguinte, de tempo de secagem, tinha por objetivo analisar o tempo que a barbotina levava pra secar superficialmente após a conformação e qual a massa depositada em dois minutos de conformação. Nesse teste a barbotina era alimentada em um molde de gesso circular, ver figura 3.11-A, depois de cheio o molde, a massa era deixada em repouso por dois minutos. Decorrido o tempo, o molde era girado para drenar a massa que ainda estava líquida, conforme a figura 3.11-B. Após esse giro, acionava-se o cronômetro que só era parado quando a massa que ainda se encontrava no molde ficasse visualmente seca na superfície (este é um conceito que pode depender do técnico que faz o teste, mas a secagem da massa é

facilmente percebida com o passar do tempo). Posterior à determinação do tempo de secagem, retirou-se a massa do molde e a mesma foi pesada para determinar VD.



Figura 3.11 – Teste de tempo de secagem

(Em A – enchimento do molde semicircular com barbotina, em B – drenagem do molde).

Também foi feita uma análise de destacamento e plasticidade da massa, no entanto esses testes demonstram apenas valor qualitativo. Para o destacamento foi avaliada a facilidade da massa em ser retirada do molde, se acontece alguma quebra ou se sai por inteira. Além disso, após a pesagem da massa retirada do molde, a mesma foi conformada em um esferoide como o da figura 3.12, para analisar sua plasticidade e resistência inicial. Esse teste, no dia-a-dia da indústria, ajuda a prever se determinada massa cerâmica apresentará resistência suficiente para ser transportada após sair dos moldes de gesso.



Figura 3.12 – Análise de plasticidade da massa

Conformação dos Corpos de Prova

A massa cerâmica acertada foi utilizada para confeccionar corpos de prova de retração, deformação e ruptura por flexão.

Os moldes de gesso foram devidamente limpos e, com o auxílio de um pincel, foi passado talco na superfície dos moldes que fica em contato com os corpos de provas, para que os mesmos pudessem ser destacados com facilidade.

Nessa etapa não basta apenas completar o volume do molde de gesso. Pois, ao secar, o corpo de prova retrai. Logo, para que o mesmo ficasse maciço e do tamanho adequado foi necessária que ocorresse alimentação constante da massa. Para isso, segmentos de tubos em PVC tiveram uma de suas extremidades molhada na massa, e posteriormente foram colocados no topo dos moldes, como mostra a figura 3.13, com exceção do molde de retração que utilizou um funil. A massa na parede do tubo escorre e seca no molde, isso permite encher o molde com a barbotina e ainda alimentar um excesso de massa no tubo, que escorrerá para dentro do molde no caso de qualquer retração, garantindo um corpo de prova maciço.



Figura 3.13 – Moldes de gesso com tubos em PVC para auxiliar a conformação de corpos de prova

Os corpos de prova de retração e ruptura ficam nos moldes por duas horas após o enchimento, já os de deformação levam seis horas nos moldes para serem conformados devido à sua maior espessura em uma das extremidades, como pode ser visto na figura 3.14.



Figura 3.14 – Corpos de prova fundidos

(De cima para baixo: três barras para teste de ruptura, uma de retração e uma de deformação)

Após a conformação, os corpos de prova foram deixados para secar naturalmente, até que ficassem brancos como na figura 3.15, e então foram colocados na estufa a 110°C por 24 horas.



Figura 3.15 – Corpos de prova secos

Ensaio Mecânicos

Os corpos de prova foram submetidos à metodologia de ensaios mecânicos observada no Quadro 3.1, tanto para as formulações propostas quanto para a massa padrão. Pelo quadro é possível observar que para cada formulação foram feitos 16 corpos de prova. O número total

de formulações feitas foi treze, sendo uma delas a massa padrão e foram aplicados seis níveis de substituição para cada formulação (AF e NF), totalizando 208 corpos de prova.

Quadro 3.1 – Tipos de Ensaios Mecânicos

Tipo de Ensaio (Corpo de prova)	Parâmetros Avaliados	Temperatura ¹	Nº de amostras
Retração Linear	Retração de secagem	110° C	5
	Cor de secagem		
	Retração de queima	1250° C	
	Cor de Queima		
	Retração total		
	Perda ao fogo		
Módulo de ruptura à Flexão	Resistência crua	110° C	3
	Resistência queimada	1250° C	3
Deformação	Deformação pirolástica	1250° C	5
	Absorção de água		

Retração Linear

O corpo de prova de retração visto na figura 3.14 possui duas marcações referenciais em cada extremidade. A distância entre esses pontos foi medida em três instantes diferentes: depois da conformação, após a secagem em estufa e posterior à sinterização no forno de produção. Com isso foram determinados três valores de retração: retração linear de secagem, de queima e total.

Para determinar cada uma dessas retrações foram utilizadas as equações de (4) a (6) em que:

- CI = Comprimento inicial
- CS = Comprimento seco
- CQ = Comprimento queimado
- RS = Retração de secagem
- RQ = Retração de queima
- RT = Retração total

¹ Temperatura máxima a que foi submetido o corpo de prova anteriormente aos testes.

$$RS = \frac{CI-CS}{CI} \times 100 \quad (4)$$

$$RQ = \frac{CS-CQ}{CS} \times 100 \quad (5)$$

$$RT = \frac{CI-CQ}{CI} \times 100 \quad (6)$$

Perda ao Fogo

Após a queima, o produto cerâmico perde parte de sua massa inicial. Essa diferença nas massas inicial e final é chamada de perda ao fogo e segundo Cavalcante (2005, p.42): “consiste em avaliar o percentual de material (água e matéria orgânica) que foi perdido da amostra durante a etapa de queima”.

O corpo de prova utilizado para o teste de retração linear também foi empregado na avaliação da umidade e da perda ao fogo. Dessa forma, o mesmo foi pesado em dois instantes: posterior à secagem em estufa e após a queima.

Para calcular a perda ao fogo, os resultados foram lançados na equação (7), em que:

- PF = Perda ao fogo
- MS = Massa seca
- MQ = Massa queimada

$$PF = \frac{MS-MQ}{MS} \times 100 \quad (7)$$

Cor de Secagem e Queima

Consistiu em avaliar a tonalidade dos corpos de prova feitos com as formulações propostas, após a secagem em estufa e após a queima, e compará-los à tonalidade daqueles confeccionados com a massa padrão.

Módulo de Ruptura à Flexão (M.R.F.)

Os corpos de prova de ruptura crus e queimados (exemplos na figura 3.16) foram submetidos a um equipamento analisador de resistência, com três pontos de apoio. Esse equipamento atua com um incremento de força de 50N/s e uma distância de 10 cm entre os pontos de apoio, registrando a força necessária para ruptura.

O diâmetro dos corpos de prova foi medido com paquímetro digital, conforme mostrado na figura 3.17.



Figura 3.16 – Corpos de prova para determinação de MRF
(à esquerda os queimados e à direita os crus, notar a diferença de tamanho).

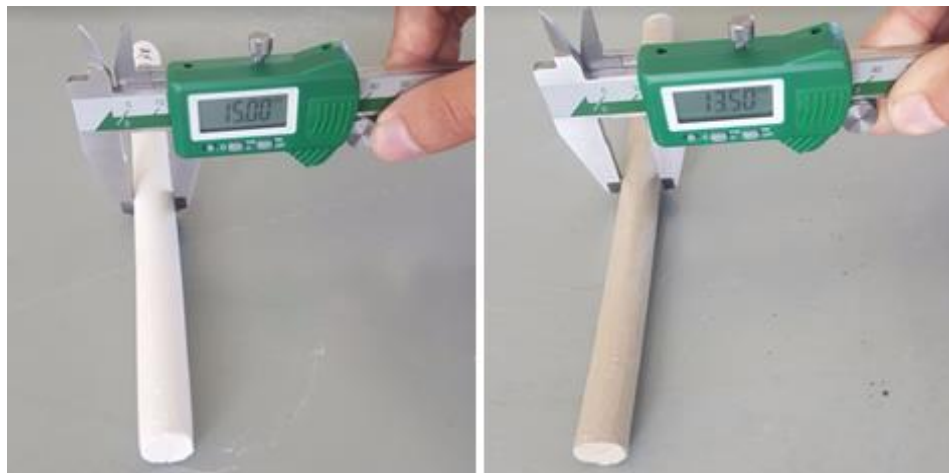


Figura 3.17 – Medição do diâmetro dos corpos de prova de MRF
(à esquerda corpo de prova cru e à direita queimado).

Os valores encontrados foram aplicados na equação (8) para corpos de prova cilíndricos e assim calculados os valores de MRF em Kgf/cm^2 , pois essa unidade facilita o entendimento por parte dos operadores e técnicos da empresa.

$$MRF = \frac{F \times L}{\pi \times R^3} \quad (8)$$

Onde:

F = Carga necessária para ruptura (Kgf)

L = Distância entre os pontos de suporte (cm)

R = Raio do corpo de prova na seção de ruptura (cm)

Deformação pirolástica

Segundo Almeida et al. (2016) a deformação pirolástica consiste na deformação do objeto durante o processo de queima. Essa deformação ocorre devido à formação de fase líquida durante a queima e a menor viscosidade adquirida por essa fase em relação ao corpo sólido. Estes parâmetros são dependentes da composição da massa, especialmente quando a quantidade de elementos fundentes aumenta, e consequentemente defeitos podem acontecer no produto final.

Para avaliar esta deformação, o corpo de prova seco foi colocado no forno de produção segundo a representação da figura 3.18. Essa disposição permite que parte do corpo de prova fique suspensa, o que faz com que ao atingir a formação de fase líquida, parte do material escoe pela ação da gravidade, consequentemente deformando o corpo como exemplificado na figura 3.19. Essa deformação foi então medida a partir do extremo da barra em relação a horizontal, como exemplificado na figura 3.20.



Figura 3.18 – Disposição dos corpos de prova de deformação no forno



Figura 3.19 – Exemplo de deformação sofrida pelo corpo de prova



Figura 3.20 – Medição da deformação sofrida pelo corpo de prova

Absorção de água

De acordo com Silva (2008) este ensaio avalia a qualidade da sinterização da peça cerâmica através da determinação da quantidade de água absorvida pela mesma após ser queimada. Uma vez que durante a sinterização os poros são preenchidos pela fase líquida formada, a absorção de água deve ser baixa, a menos que exista algum problema na queima.

Os corpos de provas utilizados aqui são provenientes daqueles usados no ensaio de deformação. Nestes foram feitas marcações a 8 cm da extremidade, ver figura 3.21, para indicar a região de quebra (figura 3.22) e então, utilizá-los para o teste de absorção.



Figura 3.21 – Corpos de prova de deformação marcados para quebra



Figura 3.22 – Corpos de prova de absorção de água

A realização deste ensaio seguiu as orientações da Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) n°. 15097:2011 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Dessa forma, os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa por 24 horas para eliminar qualquer umidade superficial, e ao retirá-los, os mesmos foram colocados em um dessecador (com sílica-gel) para resfriar e evitar contato com umidade.

Em seguida os corpos de prova foram pesados para determinar sua massa seca, e então submersos na água, a qual foi aquecida por uma chapa elétrica vista na figura 3.23.



Figura 3.23 – Testes submersos em água aquecida por chapa elétrica

Após atingir o ponto de ebulição da água, os testes ficaram em cozimento por duas horas e posteriormente foram deixados em repouso, submersos na água, por 24 horas. Decorrido esse tempo, os corpos de prova foram retirados da água, um pano levemente umedecido foi passado na superfície dos mesmos para retirar o excesso de água e estes foram pesados novamente para determinar a absorção. Os valores encontrados foram atribuídos às respectivas variáveis da equação (9), e assim foi calculada a absorção.

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (9)$$

Em que:

- MU = Massa úmida
- MS = Massa Seca

Produção de Elementos Vazados

Para testar se as massas propostas poderiam ser utilizadas com o esmalte que já é empregado pela empresa, foram confeccionados tijolos vazados, comumente chamados de cobogó, para os níveis de substituição propostos em AF e NF. A opção pelos tijolos se residiu na necessidade de uma peça relativamente grande para avaliar a alteração de cor do esmalte e

a presença de furos de ar indesejados, que podem ser provocados por escape de gases no processo de queima. Porém os moldes utilizados para as peças grandes produzidas na empresa, por seu tamanho, não eram práticos para testes em laboratório. Assim, foram utilizados os moldes dos tijolos vazados, um produto que a empresa espera produzir no futuro.

A colagem dessas peças foi um pouco mais complexa do que os corpos de prova, já que os tijolos não são maciços e sim ocos, bem como os vasos sanitários produzidos. Porém é importante lembrar que o processo de conformação de vasos sanitários é basicamente automatizado, com enchimento e drenagem automáticos, facilitando a fundição, além de injeção de ar comprimido que aumenta a coesão das paredes durante a secagem.

Já para os tijolos essas etapas foram feitas manualmente, com exceção do ar comprimido que não pôde ser utilizado. Logo, para garantir a estabilidade das paredes formadas, foi necessário utilizar uma prática bastante comum do setor de fundição que consiste em utilizar uma diluição de barbotina em água para aplicar nos moldes de gesso da figura 3.24. Essa diluição por sua vez, foi feita com 50mL da barbotina, que seria alimentada no molde, misturada a 500mL de água.

O processo iniciou-se com espongeamento da barbotina diluída sobre a superfície interna do molde (figura 3.24) onde as paredes da peça são formadas, evitando que essas paredes formadas caiam para dentro da própria peça como mostrado na figura 3.25. Já no centro do molde foi passado talco com auxílio de um pincel para facilitar o destacamento da peça.



Figura 3.24 – Moldes de gesso e processo de espongeamento de barbotina diluída



Figura 3.25 – Detalhe de falha na fundição do cobogó
(A parede do tijolo se soltou do molde e caiu para dentro da própria estrutura)

O molde do tijolo possui dois orifícios (um no topo e outra na base) utilizados para enchimento (topo) e drenagem (base). Após o fechamento do molde, um dos furos foi fechado por um tampão, enquanto ao redor do outro foi colocado um segmento de tubo PVC como no processo descrito na seção 3.2.8, e então a barbotina foi alimentada ao molde até que o mesmo fosse cheio (incluindo tubo PVC), ver figuras 3.26.

O tempo para formação das paredes foi estipulado em 15min, e uma vez decorrido o prazo o tampão na parte inferior era retirado, o que promovia a drenagem da massa ainda líquida no interior do molde como mostrado na figura 3.26.



Figura 3.26 – Enchimento, drenagem e detalhe da drenagem na fundição dos cobogós

Finalizada a drenagem da massa o elemento vazado continuava dentro do molde por mais duas horas, quando então era destacado (figura 3.27) e deixado para secar naturalmente.



Figura 3.27 – Cobogó destacado da forma após o tempo de fundição

Após a secagem da peça, foi verificada a cor de secagem, uma das peças de cada teste foi cortada, como exemplificado na figura 3.28, para verificar espessura com paquímetro, à

outra foi dado acabamento e então essa foi colocada na estufa por 24h. Após esse período, esperou-se a peça esfriar e a mesma esmaltada por um técnico da empresa (figura 3.29), de onde seguiu para o forno de produção para queima nas mesmas condições das peças já produzidas pela empresa.



Figura 3.28 – Cobogó cortado para medição de espessura das paredes



Figura 3.29 – Cobogós esmaltados

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Turbidez e pH

Os resultados encontrados para os testes de turbidez e pH são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de pH e turbidez encontrados para a lagoa de decantação

Amostra	pH	Turbidez (FTU) ²
Efluente da fundição	9,25 ± 0,04	456 ± 51
Efluente da Esmaltação	11,20 ± 0,07	18,86 ± 0,72
Água clarificada	8,37 ± 0,03	214,5 ± 2,1
Água laboratório	6,96 ± 0,01	0,615 ± 0,021

Através dos resultados foi possível observar que apesar da aparência opaca do efluente proveniente da esmaltação como visto na figura 4.1, o mesmo mostrou quantidade pequena de particulados. Dessa forma, pode-se concluir que o volume de sólidos provenientes do setor de esmaltação é muito inferior àquele produzido pelo setor de fundição.



Figura 4.1 – Medição de pH do efluente da esmaltação

² FTU – Unidades de Turbidez Formazina, medida do espalhamento de um feixe de luz ao atravessar a amostra.

Atualmente somente a água clarificada (pH ~8,4) é reutilizada no processo. Logo a importância de conhecer o valor de pH reside no fato de que segundo Medeiros (2012) para reutilização do efluente, o mesmo deve apresentar pH adequado (não superior a 10) para não interferir no processo cerâmico e para ser descartado em fontes fluviais o pH deve estar entre 6 e 9.

Dos efluentes apresentados somente o da esmaltação ultrapassou o limite de 10 para o pH, porém como o volume do mesmo é muito inferior ao efluente da fundição, os resultados indicaram potencial para ser aplicado às massas cerâmicas. Também foi possível observar que ambos os efluentes possuem caráter básico, porém o efluente proveniente do setor de esmaltação apresenta uma basicidade mais elevada que aquele derivado do setor de fundição. Também foi possível observar que o pH provavelmente é função dos sólidos em suspensão, uma vez que após a decantação de parte dos sólidos a água apresentou, além de menor turbidez, menor valor de pH.

Cone de Queima

Pelos cones de queima do resíduo e das matérias primas mostrados nas figuras 4.2 a 4.4, foi possível observar que, apesar da diferença de cor, a estrutura e o brilho dos cones feitos com o resíduo foram muito semelhantes àqueles feitos com o granito. Segundo Cavalcante (2005) esse tipo de queima, apresentando estrutura compacta e brilho perolado indica materiais fundentes. Como o comportamento dos dois foi muito semelhante, foi definido que o resíduo teria seu comportamento avaliado na massa substituindo o granito, já que as demais matérias-primas apresentaram cones arenosos ou se desmancharam durante a queima.

Acredita-se que a cor de queima do resíduo seja produto da mistura de diferentes cores dos esmaltes aplicados nas cabines e escoados para a lagoa após a limpeza.



Figura 4.2 – Cones de queima do resíduo da lagoa (à esquerda) e do granito (à direita)



Figura 4.3 – Cones de queima das argilas São Simão (à esquerda inferior) e Padre Libério (à direita)



Figura 4.4 – Cones de queima do Filito

Massa específica aparente

Os resultados conseguidos através da equação (1) são mostrados nas tabelas 4.2 e 4.3 para avaliação.

Tabela 4.2 – Valores de massa específica das formulações AF e STD em duplicata

Formulação		AF 100	AF 75	AF 50	AF 25	AF 10	AF 5	STD
Massa Específica (g/cm ³)	Teste 1	1,779	1,793	1,810	1,802	1,811	1,820	1,815
	Teste 2	1,782	1,794	1,804	1,806	1,814	1,819	1,818

Tabela 4.3 – Valores de massa específica das massas NF e STD em duplicata

Formulação		NF 100	NF 75	NF 50	NF 25	NF 10	NF 5	STD
Massa	Teste 1	1,814	1,805	1,822	1,803	1,819	1,816	1,815
Específica	Teste 2	1,816	1,801	1,815	1,799	1,814	1,821	1,818
(g/cm³)								

Todos os resultados de densidade apresentaram-se dentro do intervalo trabalhado pela empresa, de 1,75 a 1,85g/cm³. Dessa forma, pode-se afirmar que a substituição do granito pelo resíduo não altera significativamente a densidade.

Este resultado vai de acordo com o esperado, pois a caracterização feita por Resende (2015) determinou a densidade do resíduo como 2,63g/cm³, valor muito próximo à densidade média de 2,65g/cm³ do granito utilizado como matéria prima para confecção de barbotinas, logo a substituição do granito pelo resíduo na composição da massa cerâmica não deveria ocasionar grandes alterações na massa específica da barbotina.

Reologia

Antes de se proceder as mensurações de viscosidade utilizando o viscosímetro Brookfield adicionou-se mais silicato às massas elaboradas. O volume adicionado para que as massas apresentassem uma viscosidade visual e texturalmente semelhante à massa padrão variou entre as formulações e foi proporcional ao grau de substituição do resíduo, como pode ser visto nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Volume de silicato de sódio adicionado às massas do grupo AF em relação à STD

Formulações	AF 100	AF 75	AF 50	AF 25	AF 10	AF 5	STD
Volume de Silicato adicionado (mL)	4,0	4,0	3,5	3,0	2,0	2,0	1,0
Volume total de silicato na massa (mL)	14,0	14,0	13,5	12,5	12,0	11,5	11,0

Tabela 4.5 – Volume de silicato de sódio adicionado às massas do grupo NF em relação à STD

Formulações	NF 100	NF 75	NF 50	NF 25	NF 10	NF 5	STD
Volume de Silicato adicionado (mL)	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
Volume total de silicato na massa (mL)	13,0	12,5	12	11,5	11,0	11,0	11,0

Já as leituras feitas a 50rpm e a 2,5 rpm foram chamadas respectivamente de B₅₀ e B_{2,5}, devido ao nome Brookfield, e os valores de viscosidade encontrados através da equação (2) foram dispostos nas tabelas 4.6 e 4.7 como viscosidade 1 e 2 respectivamente, junto ao valor encontrado para o fator de tixotropia pela equação (3).

Tabela 4.6 – Viscosidade e tixotropia para as massas AF e STD

Formulação	AF 100	AF 75	AF 50	AF 25	AF 10	AF 5	STD
B 50	73,5	65,4	60,3	58,1	50,6	52,6	51,5
B 2,5	28,0	25,4	18,4	18,2	15,4	14,5	16,2
Viscosidade 1 (cP)	588,0	523,2	482,4	464,8	404,8	420,8	412,0
Viscosidade 2 (cP)	4480,0	4064,0	2944,0	2912,0	2464,0	2320,0	2592,0
Fator (V2/V1)	7,6	7,8	6,1	6,3	6,1	5,5	6,3

Tabela 4.7 – Viscosidade e tixotropia para as massas NF e STD

Formulação	NF 100	NF 75	NF 50	NF 25	NF 10	NF 5	STD
B 50	65,2	65,4	59,1	52,7	53,3	55,2	51,5
B 2,5	20,1	25,4	20,3	16,9	16,0	15,6	16,2
Viscosidade 1 (cP)	521,6	523,2	472,8	421,6	426,4	441,6	412,0
Viscosidade 2 (cP)	3216,0	4064,0	3248,0	2704,0	2560,0	2496,0	2592,0
Fator (V2/V1)	6,2	7,8	6,9	6,4	6,0	5,7	6,3

A partir desses dados foi possível observar que existe uma relação entre o aumento do grau de substituição do granito por resíduo e os maiores valores de viscosidades. Acredita-se que essa relação seja baseada no recebimento de efluente contendo gesso proveniente do setor de modelagem pela lagoa de decantação. Ainda que em pequena quantidade, o gesso é responsável por absorver água da massa fazendo com que a mesma fique sólida, é esperado que o mesmo fosse responsável por aumentar a tixotropia, a qual é o processo de gelificação da massa por repouso, e consequentemente também fazer com que fosse gasto mais silicato de sódio para desflocular as massas com maior quantidade de resíduo da lagoa.

Tempo de secagem (TS) e Velocidade de deposição (VD)

Os dados obtidos para o tempo de secagem e velocidade de deposição foram dispostos nas tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 – Valores de TS e VD para as formulações AF

	AF 100	AF 75	AF 50	AF 25	AF 10	AF 5	STD
TS (min:seg)	1:43	1:40	1:38	1:40	1:37	1:41	1:38
VD (g/min)	180,12	175,43	170,14	166,33	152,78	147,22	145,15

Tabela 4.9 – Valores de TS e VD para as formulações NF

	NF 100	NF 75	NF 50	NF 25	NF 10	NF 5	STD
TS (min:seg)	1:39	1:40	1:38	1:40	1:37	1:41	1:38
VD (g/min)	163,81	158,14	153,66	150,01	148,30	146,43	145,15

Foi possível analisar que o aumento do grau de substituição também elevou o valor de VD. Tal comportamento era esperado, pois como discutido na seção anterior, a presença de gesso, responsável por absorver água da massa pode fazer com que uma massa maior (quando comparado à massa padrão) se deposite sobre o molde em um mesmo intervalo de tempo.

Esperava-se que esse comportamento também se refletisse sobre o tempo de secagem, porém não foi o que aconteceu. Os valores variaram independentemente do nível de substituição de resíduo aplicado à massa. Contudo, esse teste analisa somente a secagem superficial da massa e esse parâmetro é essencialmente visual, o que depende da observação e julgamento do operador.

Retração Linear

Segundo Melchiades et al. (2001) a retração linear de secagem é dependente do método de conformação utilizado, da granulometria do material e do volume de água adicionado. Uma vez que o método de conformação e o volume de água utilizado foram os mesmos para todos os testes realizados, tem-se que a diferença nos valores de Retração Linear de Secagem (RLS) provavelmente se deve à granulometria, a qual difere pelos efeitos da moagem. Ou seja, apesar de ter sido feita com o mesmo tempo para todos os testes, a moagem pode gerar pequenas variações nos tamanhos devido ao movimento dos corpos moedores e das partículas no interior do moinho, o que é refletido nos resultados de RLS.

Os resultados médios obtidos para os ensaios de RLS foram dispostos em forma de gráfico nas figuras 4.5 e 4.6. Já os valores individuais obtidos, podem ser vistos no Apêndice-A ao final do trabalho. De acordo com Cavalcante (2005) valores de RLS de até 5% são satisfatórios para o setor de louças sanitárias. Dessa forma, tem-se que todas as formulações propostas se apresentaram dentro de um limite aceitável.

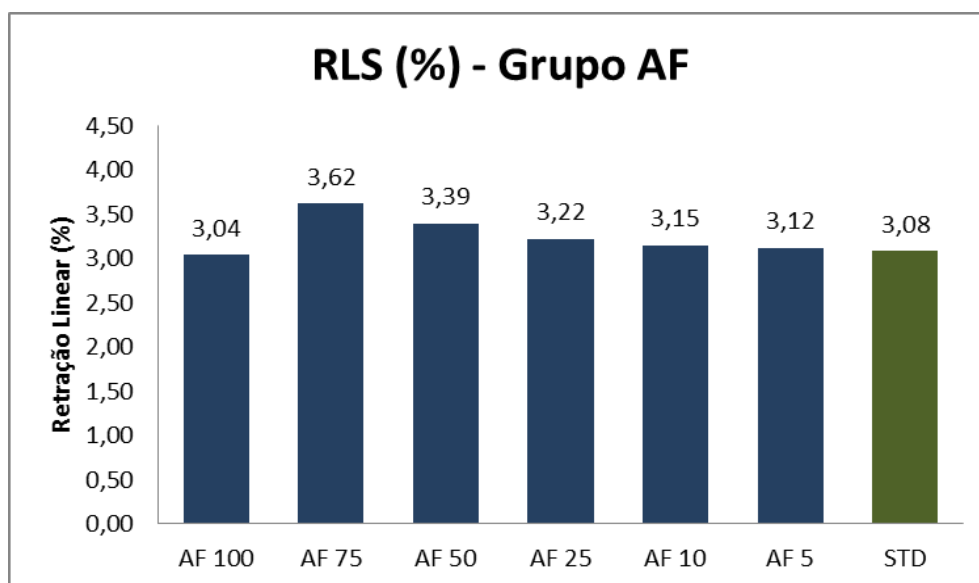


Figura 4.5 – Gráfico dos valores de RLS do grupo AF comparados à STD

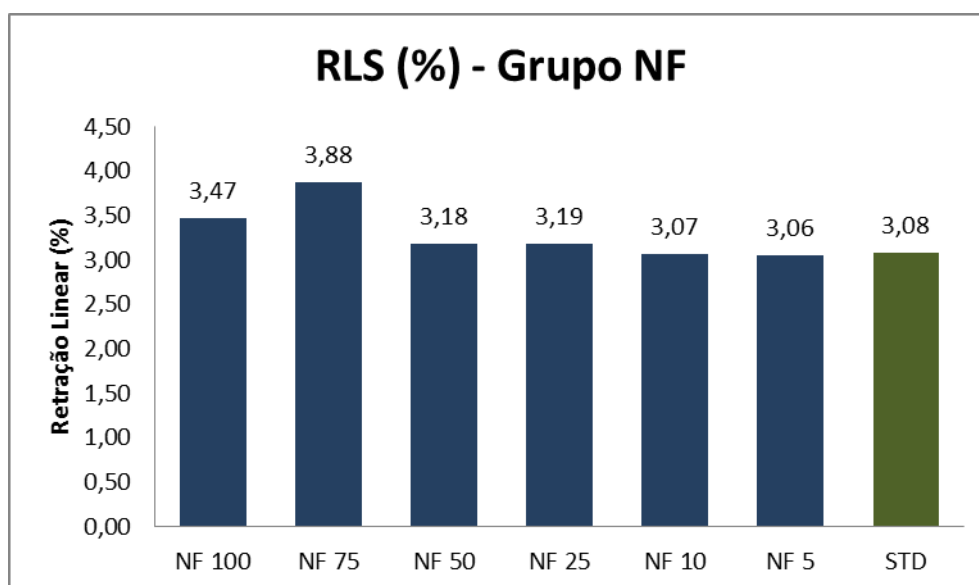


Figura 4.6 – Gráfico dos valores de RLS do grupo NF comparados à STD

Já quanto à retração linear de queima (RLQ), Melchiades et al. (2001) afirmam que seu valor depende essencialmente da composição da massa, ou seja, variações na composição provocam diferentes retrações de queima. Tal fato pode ser observado nas figuras 4.7 e 4.8, em que todas as composições propostas apresentaram valor de retração de queima maior que

o padrão, pois as mesmas possuem, em maior ou menor grau, resíduo da lagoa de decantação na composição, o qual, por ainda não possuir tratamento e estar em contato direto com o ambiente, tem maior quantidade de matéria orgânica e elementos voláteis que o granito.

Segundo a ABCERAM ^[b] (2017), o valor desejado pela indústria será sempre o menor e mais constante possível, porém o intervalo aceitável dependerá da variação permitida para o produto final, de forma que mesmo valores maiores como 12% podem ser considerados trabalháveis, desde que sejam pouco variáveis e apresentem um produto final dentro dos padrões exigidos.

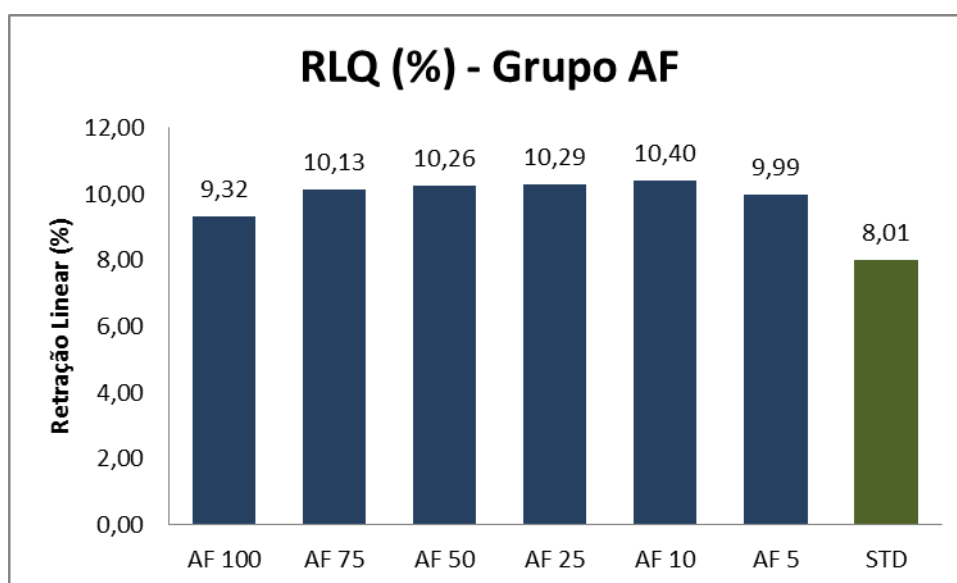


Figura 4.7 – Gráfico dos valores de RLQ do grupo AF comparados à STD

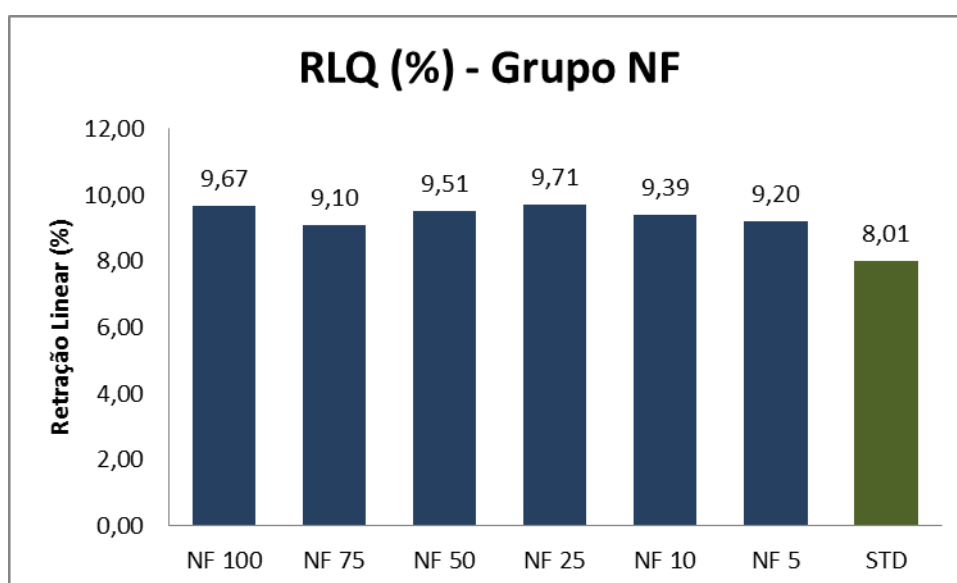


Figura 4.8 – Gráfico dos valores RLQ do grupo NF comparados à STD

O resultado esperado consistia em observar a diminuição do valor de RLQ à medida que o grau de substituição diminuísse, porém não foi o ocorrido. Como RLQ depende essencialmente do processo de queima, pequenas alterações nesse, como mudanças na curva de queima, tempo dentro do forno influenciam seu valor final, bem como as interações atômicas que não podem ser descritas sem análise estrutural por microscopia.

Perda ao fogo (PF)

Os resultados médios de perda ao fogo podem ser observados nos gráficos das figuras 4.9 e 4.10. Enquanto os individuais são apresentados no Apêndice-A. Observou-se que em ambos os grupos de massa (AF e NF) existe relação direta entre o aumento do grau de substituição do granito pelo resíduo e uma maior perda ao fogo.

De acordo com Zaccarona et al. (2014) a perda ao fogo provê dados relativos à quantidade de matéria orgânica e substâncias voláteis na peça. Além disso, durante a queima ocorre uma série de transformações físico-químicas nos argilominerais. A principal delas é que para estes minerais ocorre a expulsão da água ligada estruturalmente sob a forma de grupos OH^- entre 400 °C e 900 °C.

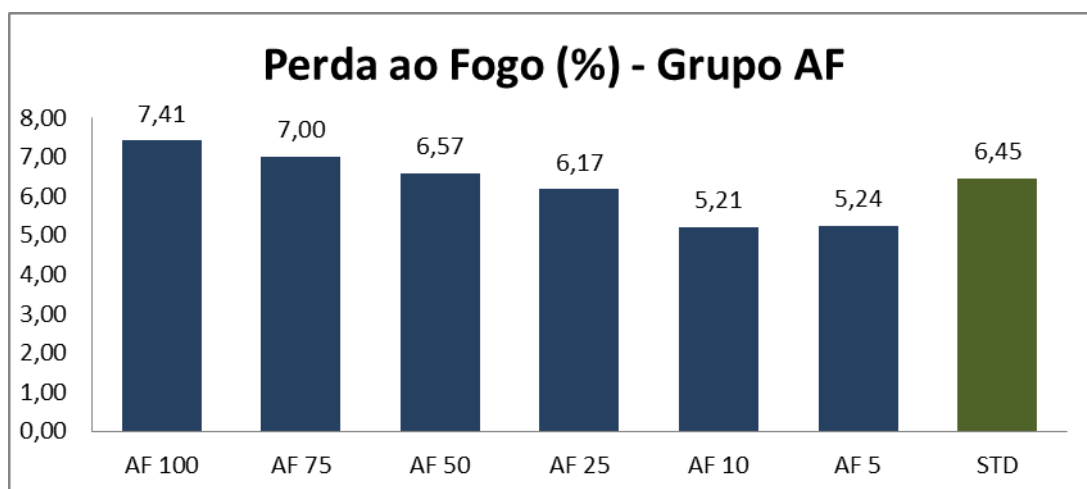


Figura 4.9 – Resultados de Perda ao Fogo do grupo AF em comparação à STD

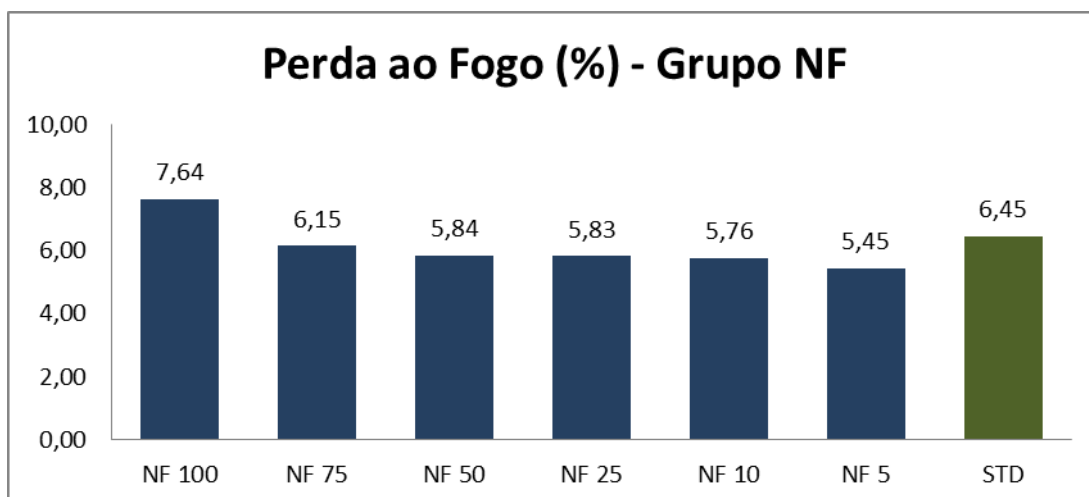


Figura 4.10 – Resultados de Perda ao Fogo do grupo NF em comparação à STD

Na literatura não é definido um valor limite para a perda ao fogo, porém do ponto de vista prático, qualquer indústria irá preferir os menores valores possíveis de perda ao fogo, pois isso significa menor quantidade de energia gasta para queimar somente matéria-prima, o que torna o consumo de gás natural, ou outra fonte de aquecimento, mais eficiente.

Acredita-se que os resultados obtidos nessa seção se baseiem no mesmo princípio dos resultados de RLQ, em que durante a queima o resíduo perde mais massa que o granito da composição padrão por possuir maior quantidade de matéria orgânica e elementos voláteis, pois o primeiro tem contato direto com o solo, águas pluviais, folhas e galhos provenientes de árvores ao redor da lagoa, enquanto o segundo é armazenado em galpão.

Cor de secagem e cor de queima

A cor de secagem dos corpos de prova é importante, pois o grupo a que as louças sanitárias pertencem é chamado de Cerâmica Branca e segundo a ABCERAM ^[b] (2017) “são materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea”.

Todos os corpos de prova apresentaram a mesma tonalidade de branco, idêntica à massa padrão, e independente de grupo ou grau de substituição utilizado, como pode ser visto na figura 4.11, o que indica que o resíduo não altera a cor de secagem.



Figura 4.11 – Corpos de prova secos

A cor de queima dos corpos de prova elaborados também foi semelhante à massa padrão, como visto na figura 4.12. Este resultado mostra boa aplicabilidade das massas elaboradas quanto a esse requisito. Porém, vale lembrar que todos os produtos produzidos atualmente pela empresa recebem aplicação de uma camada vítrea e opaca de esmalte branco ou colorido, portanto esse requisito não é um limitador, desde que a massa não tenha problemas com o acordo massa-esmalte.

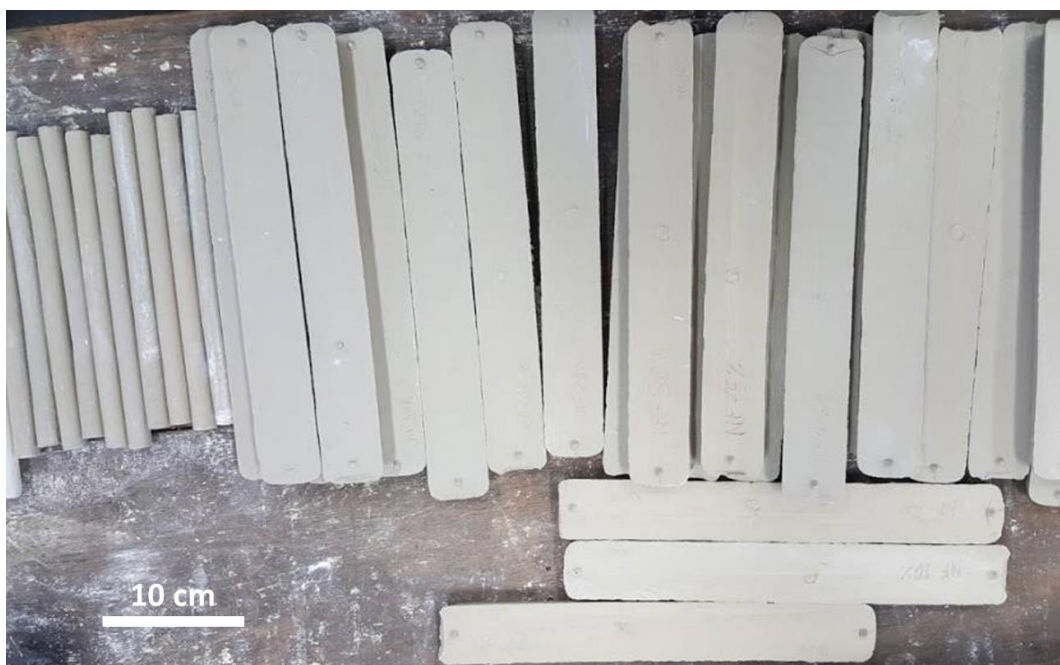


Figura 4.12 – Cor de queima dos corpos de prova
(Formulações Elaboradas na vertical e padrão na horizontal)

Módulo de Ruptura à flexão (MRF)

Os resultados individuais dos corpos de prova submetidos ao ensaio de MRF podem ser vistos no Apêndice-B ao final do trabalho. Com esses valores foi determinada a carga média suportada por cada formulação e calculado os valores de MRF vistos nas figuras 4.13 a 4.16.

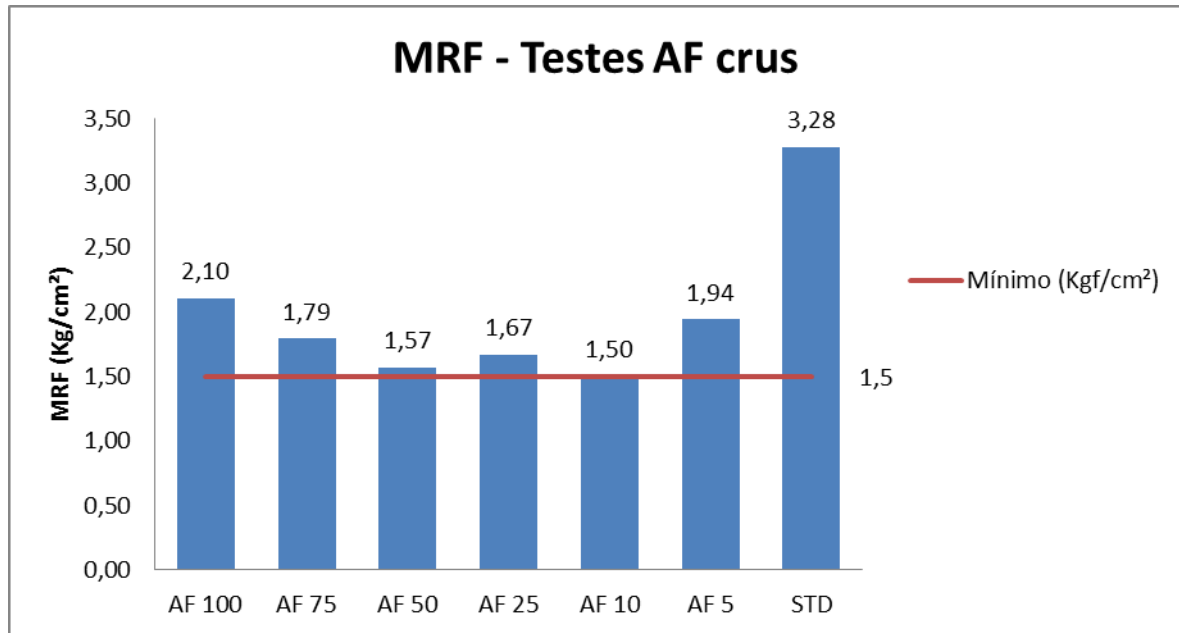


Figura 4.13 – Gráfico de MRF dos corpos de prova crus do grupo AF

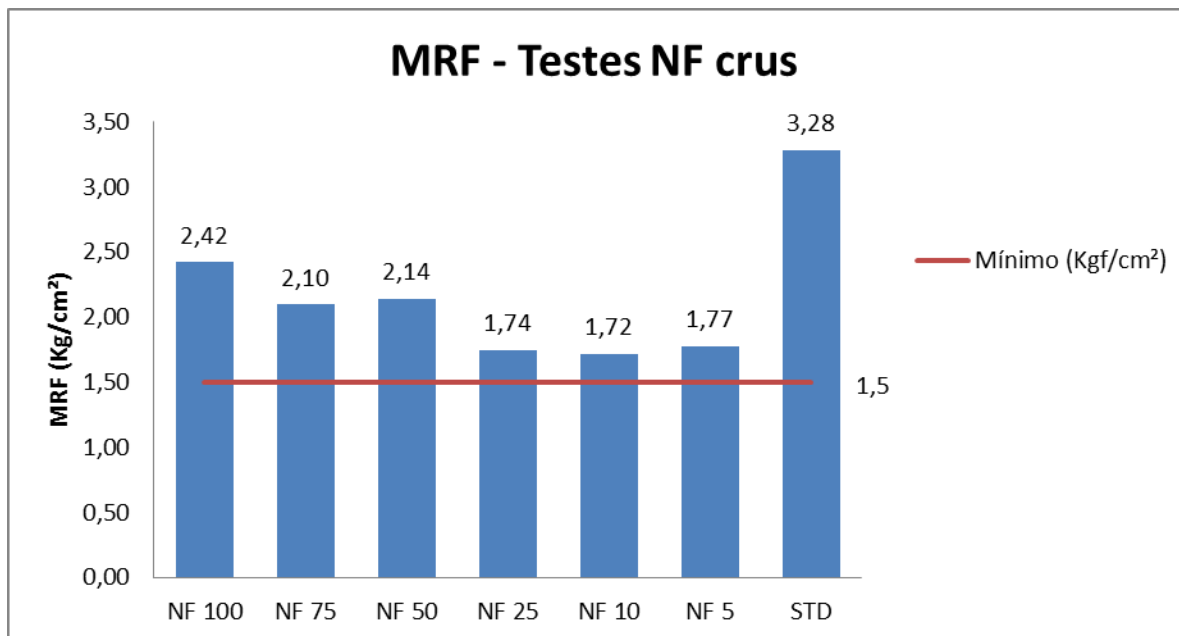


Figura 4.14 – Gráfico de MRF dos corpos de prova crus do grupo NF

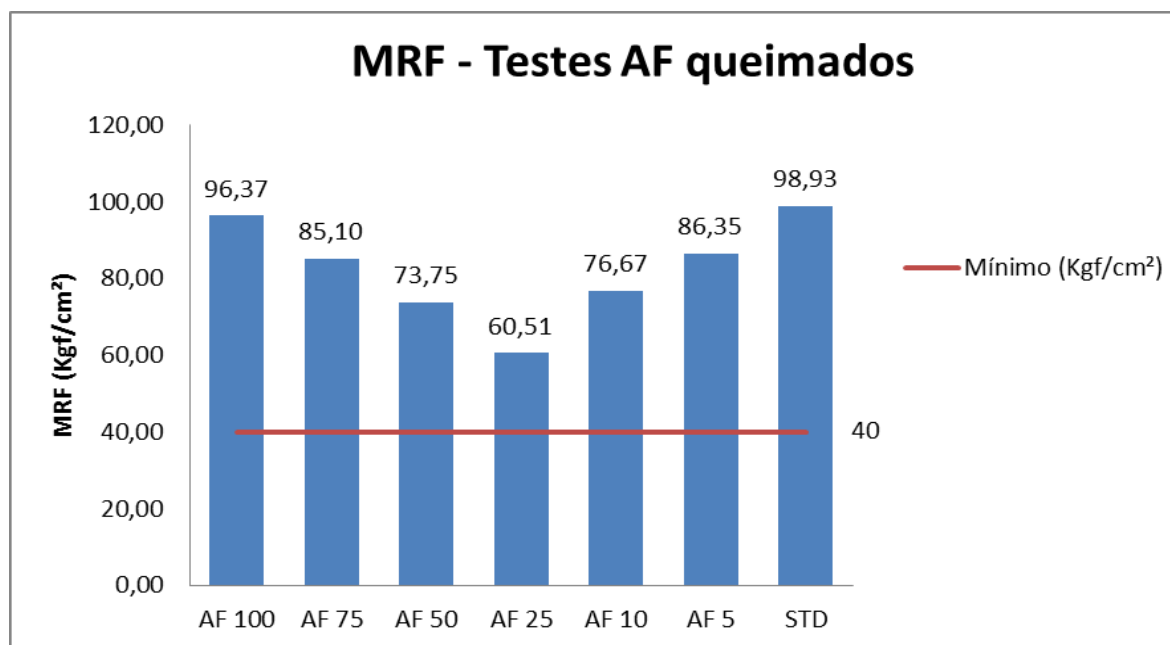


Figura 4.15 – Gráfico de MRF dos corpos de prova queimados do grupo AF

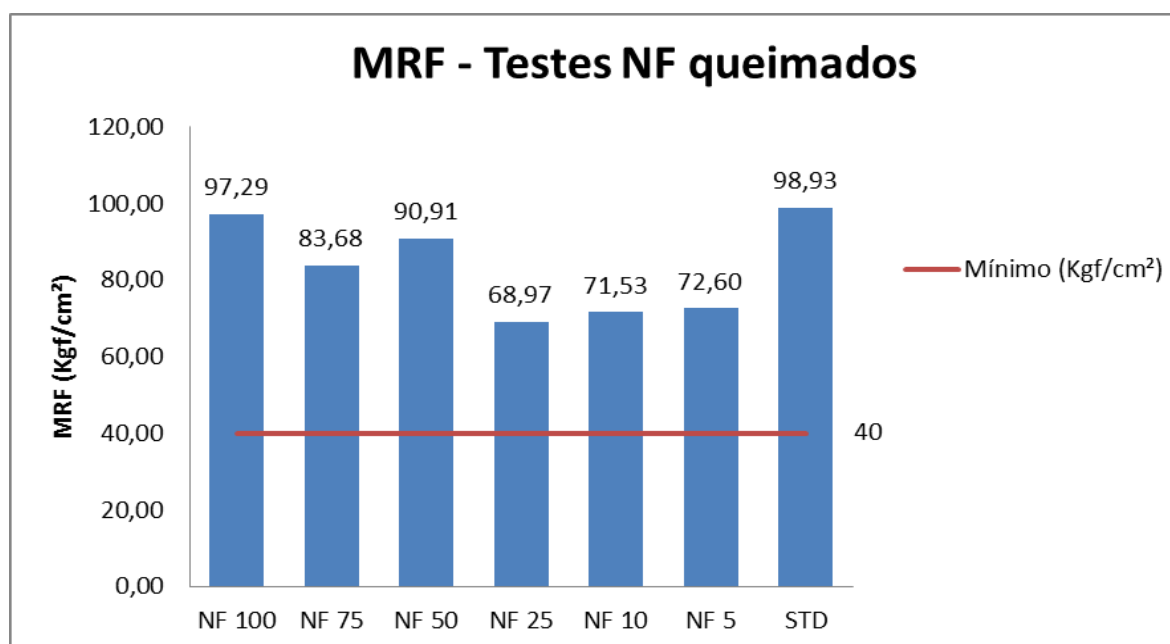


Figura 4.16 - Gráfico de MRF dos corpos de prova queimados do grupo AF

Foi possível observar que todas as formulações apresentaram MRF cru abaixo do padrão utilizado, com alguns desses valores, como AF-10% e AF-50%, muito próximos ao limite mínimo adotado pela empresa. Porém, ao analisar os testes com os corpos de prova queimados, notou-se que todas as formulações foram muito superiores ao mínimo adotado, com AF-100 e NF-100 muito próximas do MRF padrão.

Também foi possível observar que o valor de MRF queimado para a formulação AF-25% foi bem menor que os demais do grupo AF, essa diminuição na média foi causada por

um valor isolado que apresentou MRF muito abaixo dos demais (Ver Apêndice B – seção MRF queimados – teste AF-25%). Essa situação foi causada por um defeito interno do corpo de prova, visto na figura 4.17, que foi gerado durante a retirada do corpo de prova após a conformação, e o defeito só foi observado na estrutura mesmo após a queima.

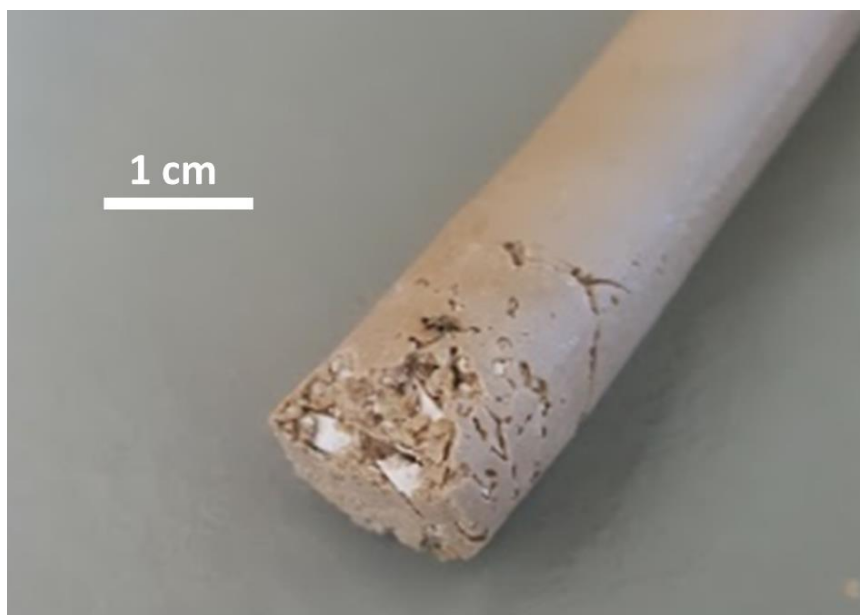


Figura 4.17 – Defeito na estrutura do corpo de prova de MRF

Deste modo, em caso de reutilização do resíduo as formulações AF-10% e AF-50% não seriam indicadas, pois seus valores médios para MRF-cru são muito próximos ao mínimo, podendo existir valores acima e, no pior caso, abaixo do limite. Por outro lado, as formulações recomendadas segundo o critério de MRF seriam AF-100, NF-100, NF-75 e NF-50, que apresentaram MRF queimado muito superior ao limite e mais próximos do padrão. Porém, um cuidado maior provavelmente seria exigido no transporte das peças secas, para evitar quebras devido à menor resistência.

Deformação pirolástica

Os resultados individuais de deformação podem ser vistos no Apêndice C, já as médias dos resultados obtidos foram utilizadas na confecção de gráficos para comparação.

Segundo Mesquita (2016) a deformação pirolástica consiste na deformação sofrida pelo corpo de prova ao ser submetido à sinterização. Além disso, esse parâmetro serve também como medidor de quão fundente é o material.

De acordo com Prado et al. (2008) a deformação pirolástica está diretamente ligada à estabilidade estrutural da peça, ou seja, uma deformação menor significa menor chance de defeitos na peça.

Ao analisar as figuras 4.18 e 4.19, notou-se que os valores obtidos para a deformação pirolástica se mostraram proporcionais ao grau de substituição utilizado, de forma que quanto maior este, maior também foi a deformação sofrida pelos corpos de prova. Esse resultado reforça a afirmação feita após os testes dos cones de queima, de que o resíduo da lagoa possui caráter fundente, e esse aparenta ser maior que o granito, pois resultou em valores de deformação maiores que os da massa padrão.

Ainda que não exista um limite estabelecido por normas, o Manual de Práticas Cerâmicas utilizado pela empresa recomenda valores abaixo de 70mm para a deformação. Consequentemente, no grupo AF somente a substituição de 5% (AF5) poderia ser aplicada, já no grupo NF todos os níveis de substituição encontram-se dentro do limite estabelecido.

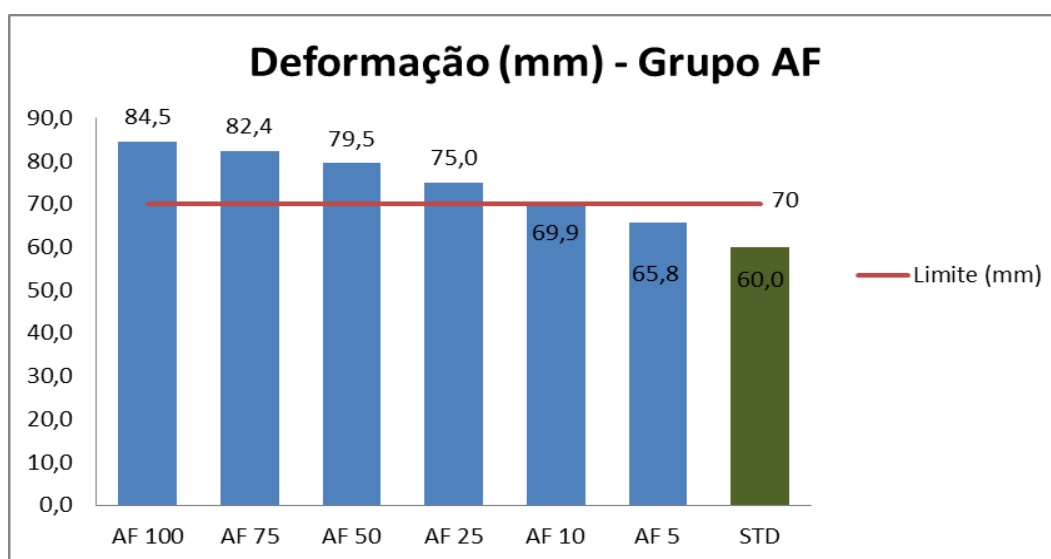


Figura 4.18 – Deformação Pirolástica do grupo AF comparados à STD

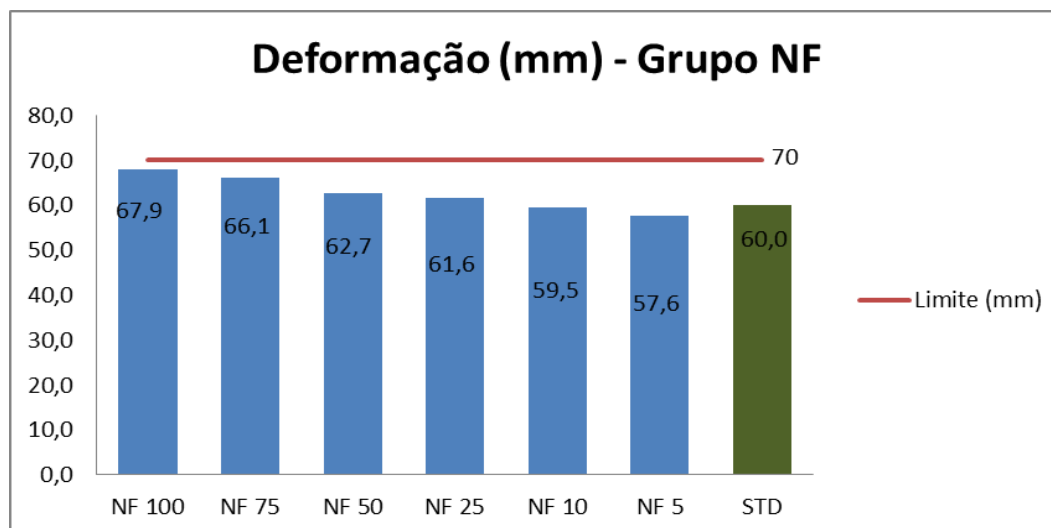


Figura 4.19 – Deformação Piroplástica do grupo NF comparados à STD

Absorção de água

O parâmetro de absorção de água (AA) é um dos mais importantes quando se trata de cerâmicas sanitárias, com direito à sua própria seção na NBR 15097:2001, a qual estipula que o valor máximo para AA é de 0,75%. Valores tão baixos como esse só são possíveis graças a queima, pois como apontado por Silva (2008) durante a queima ocorre a formação de fase líquida, a qual (por capilaridade) preenche os poros entre as partículas promovendo o adensamento do corpo cerâmico e a eliminação de poros. Porém esse processo não é perfeito e o teste de absorção de água pode mostrar a existência de poros na peça.

Os resultados obtidos foram dispostos nas tabelas do Apêndice D e a partir de suas médias foram construídos os gráficos das figuras 4.20 e 4.21, através destes pode-se observar que tanto a massa padrão quanto as propostas estão muito abaixo do valor máximo estabelecido para AA em louças sanitárias. Além disso, também foi possível notar a correlação entre o grau de substituição e AA, uma vez que quanto maior a porcentagem de substituição feita, menor foi o valor apresentado para AA, o que indica que o resíduo da lagoa de decantação por ser mais fundente que o granito, como foi observado na seção 4.10, também é mais eficiente em formar fase líquida e preencher os poros do corpo cerâmico, o que diminui a absorção de água.

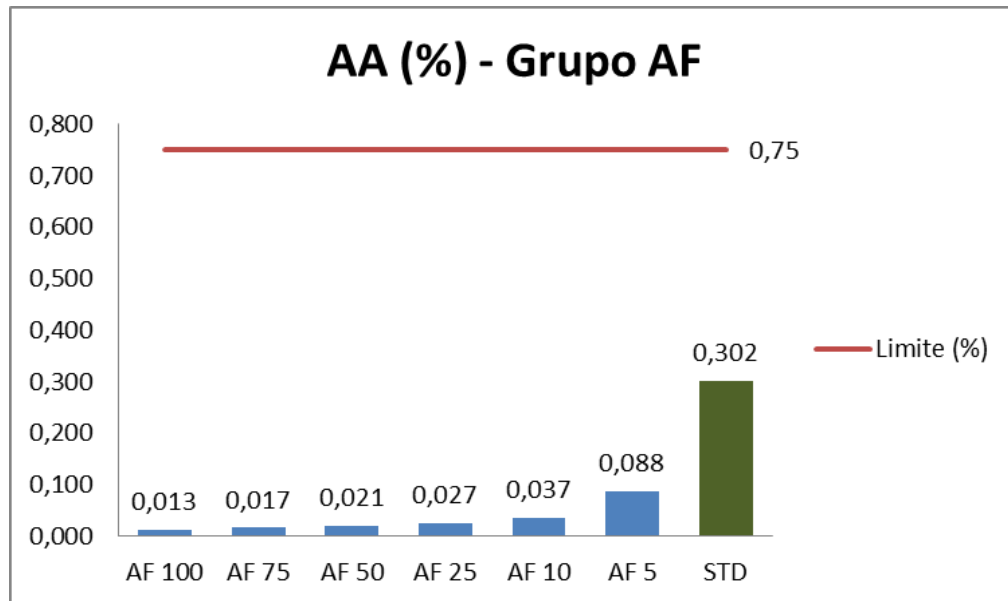


Figura 4.20 – Resultados de absorção de água do grupo AF comparados à STD

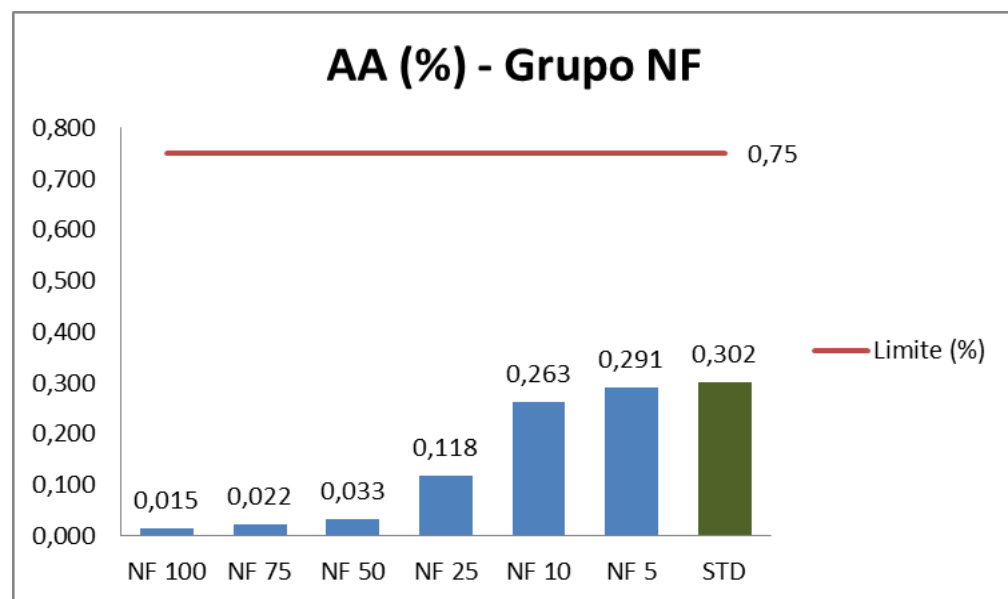


Figura 4.21 – Resultados de absorção de água do grupo NF comparados à STD

Produção de elementos vazados

Os resultados obtidos para espessura dos cobogós foram dispostos nas tabelas 4.7e 4.8.

Tabela 4.7 – Espessura da parede dos cobogós do grupo AF e STD

Teste	AF 100	AF 50	AF 25	AF 10	AF 5	STD
Espessura (mm)	11,2	11,0	10,5	10,1	10,0	10,0

Tabela 4.8 – Espessura da parede dos cobogós do grupo NF e STD

Teste	NF 100	NF 50	NF 25	NF 10	NF 5	STD
Espessura (mm)	10,5	10,2	10,1	10,0	10,0	10,0

Foi possível observar que graus de substituições maiores, para ambos os grupos de formulações, acarretaram uma formação de parede mais espessa. Se comparados aos resultados de VD na seção 4.5, será notada a relação entre a velocidade de deposição e a formação de parede.

Nenhum dos testes apresentou furos de ar, desacordo visível com esmalte ou diferença de coloração. Isso indica que em caso de reutilização não seria necessária a reformulação do esmalte para a massa contendo resíduo da lagoa.

Alguns dos cobogós produzidos podem ser vistos na figura 4.22, estes são pertencentes ao grupo NF, os quais possuem menores valores de deformação pirop lástica. Já quanto aos do grupo AF, em sua maioria com exceção do teste AF5, apresentaram algum defeito estrutural, com pequenos ‘amassados’ nas paredes, vistos em detalhe na figura 4.23.



Figura 4.22 – Elementos vazados esmaltados



Figura 4.23 – Detalhe nos defeitos estruturais encontrados nos cobogós do grupo AF

A justificativa para aparecimento de tais defeitos somente em um dos grupos se reside tanto na fundição quanto na queima. Quanto à queima a maior deformação piropoplástica apresentada pelos testes do grupo AF pode ser responsável pelo aparecimento de tais “amassados” na estrutura. Contudo, tais defeitos também podem ser produto de uma má fundição. Uma vez que os tijolos do grupo NF foram feitos após os do grupo AF, a diferença na experiência do operador no processo de fundição também pode ter contribuído para que os do grupo AF, feitos primeiro, apresentassem defeitos após a queima. Esse último, caso seja a fonte dos defeitos, pode ser removido através da automatização do processo, como é feito atualmente pela empresa para as peças maiores de louça sanitária.

Porém, se a razão para os defeitos for de fato a maior deformação piropoplástica das massas do grupo AF (das seis elaboradas, somente AF-5% apresentou deformação piropoplástica menor que o limite adotado pela empresa) então as demais formulações propostas para o grupo AF não podem ser aplicadas.

CONCLUSÕES

❖ As massas propostas para o grupo NF possuem maior potencial para serem aplicadas como via de reutilização do resíduo, pois todas apresentaram valores dentro dos limites aceitáveis.

❖ As massas do grupo AF apresentaram altos valores de deformação e baixos valores para MRF cru, o que impossibilita que sejam utilizadas, com exceção da formulação AF-5%;

❖ De todas as formulações propostas, a NF-100% apresentou o melhor conjunto de parâmetros, com os mais altos MRF cru e queimado, a menor absorção de água e retração linear admissível. Além de deformação e massa específica dentro dos intervalos definidos pela empresa;

❖ Os valores mais elevados de retração e perda ao fogo de ambos os grupos em relação à massa padrão, principalmente nos níveis de substituição maiores, são devidos ao contato que o resíduo da lagoa tem com fontes externas de material orgânico, como folhas e raízes de árvores, chuva e insetos;

❖ Se decidido que o resíduo será reutilizado, os valores para parâmetros de retração e perda ao fogo serão reduzidos. Pois, como a vazão de efluente para a lagoa não é constante e depende da atividade e da hora do dia, seria necessário criar um sistema de armazenamento, para realimentação do resíduo o que isolaria o mesmo do contato com as fontes externas de material orgânico.

❖ A aplicação de um sistema de armazenamento para o resíduo deve ser feita após a recuperação de água, que como citado na seção 2.5 é o principal objetivo da lagoa. Dessa forma, será necessário instalar um processo ou equipamento que promova a separação das partículas sólidas da água, direcionando os sólidos para armazenamento e a água para recirculação.

❖ A reutilização do resíduo demandará custos iniciais, porém pode evitar que a empresa tenha gastos futuros com transporte e disposição do mesmo em aterros sanitários. Além disso, a reutilização do resíduo para fabricação de elementos vazados pode promover a geração de receita extra e redução do impacto ambiental.

SUGESTÕES

- ❖ Analisar a resistência dos elementos vazados produzidos por cada formulação segundo a NBR 15812:2010;
- ❖ Aplicar processo de otimização através da análise estatística de misturas sobre os resultados apresentados;
- ❖ Estudar novas composições da massa, principalmente caso alguma das matérias-primas seja substituída por outra semelhante;
- ❖ Utilizar formulações com nível de substituição mais alto (100, 75 e 50%) como linha separada de produção, enquanto níveis de substituição menores poderiam ser aplicados à massa já utilizada na produção;
- ❖ Avaliar a eficiência de processos e/ou equipamentos que promovam a separação sólido-líquido para o efluente, e assim definir qual têm a aplicação mais viável para o resíduo;
- ❖ Examinar a viabilidade econômica da implantação do processo de reutilização, considerando os custos, o preço de venda dos elementos vazados e seu volume de produção;
- ❖ Considerar o redirecionamento do efluente oriundo da modelagem, pois ficou claro que o mesmo é responsável por aumentar a viscosidade da massa e consequentemente seu VD, o que pode interferir no processo produtivo das cerâmicas, em que é necessária uma estabilidade nos valores de espessura das paredes para que não haja variação entre as peças.

REFERÊNCIAS

- [a] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Fluxograma 2 – Processo de Fabricação de Sanitários**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/fluxograma/>>. Acesso em 14/04/2017.
- [b] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações Técnicas – Definição e Classificação**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em 10/04/2017.
- [c] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Processo de Fabricação**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em 16/04/2017.
- ALBUQUERQUE, L. M. C. **Reciclagem e estudo de reaproveitamento de resíduos cerâmicos de indústria de louça sanitária**. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- ALMEIDA, B. A.; ALMEIDA, M.; MARTINS, S.; MAÇARICO, V. A.; FONSECA, A. T. **Recycling liquid effluents in a ceramic industry**. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Volume 55, p. 95-104. 2016.
- BRESSIANI, J. C., BUSTAMANTE, G. **A indústria cerâmica brasileira**. Revista Cerâmica Industrial, Volume 5 – Número 3. Maio/Junho, 2000.
- BRITISH MEDICAL JOURNAL – BMJ. **BMJ readers choose the “sanitary revolution” as greatest medical advance since 1840**. BMJ 2007; 334:11. Disponível em: <<https://doi.org/10.1136/bmj.39097.611806.DB>>. Acesso em 22/03/2017.
- CABRAL JÚNIOR, M.; TANNO, L. C.; MOTTA, J. F. M.; RUIZ, M. S.; COELHO, J. M. **Panorama da Indústria Cerâmica de Sanitários no Brasil**. Revista Cerâmica Industrial. Volume 15 – Número 6, Setembro/Dezembro, 2010.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução SOARES, S. M. S. – Rio de Janeiro : LTC, 2008.
- CAVALCANTE, W. F. V., **Aproveitamento de Resíduos Cerâmicos da Indústria de Louça Sanitária para Produção de Massas para Revestimento Cerâmico**. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, p.8.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento - Série P+L**. Secretaria do Meio Ambiente – Governo do Estado de São Paulo, 2006.
- CINO, F.; BRÖTZ, F. J. **Tecnologias Modernas para a Produção de Louça Sanitária**. Revista Cerâmica Industrial. Volume 1 – Número 3, Julho/Agosto, 1996.
- COELHO, J.M. **Perfil de Louças Sanitárias e de Mesa**. In: **Projeto de assistência técnica ao setor de energia**. Ministério de Minas e Energia, 2009.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986.** Publicação - Diário Oficial da União - 17/02/1986. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8902>>. Acesso em 03/04/2017.

EPPLER, R. A. **Selecionando Matérias-Primas para Esmaltes.** Revista Cerâmica Industrial, Volume 7 – Número 6. Novembro/Dezembro, 2002.

FONSECA, M. G.; DE PAULA, G. R.; TEIXEIRA, R. A.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. **O estudo de matérias primas fundentes.** Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, SC, 1999.

MARCON, J. C. **A indústria de louça sanitária no Brasil: situação atual e perspectivas.** In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2005, Salvador. Associação Brasileira de Cerâmica. Palestra apresentada.

MEDEIROS, M. J. **Avaliação dos Aspectos e Impactos Ambientais do Setor Cerâmico na Bacia do Rio Itaqui – Município de Campo Largo, e Propostas de Controle Ambiental:** Estudo de Caso. 2012, 145f. Tese (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/502/1/CT_PPGCTA_M_Medeiros%2C%20Mirela%20Jacomasso_2012.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2017.

MELCHIADES, F. G.; DEL ROVERI C.; SOTÉRIO, J.; SILVA L. L.; BOSCHI A. O. **Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões.** Revista Cerâmica Industrial. Volume 6 – Número 5, Setembro/Outubro, 2001.

MESQUITA, A. C.; **Avaliação da Reutilização do Resíduo de Louça Sanitária em Compósitos Cerâmicos.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, 2015. Disponível em: <http://www.engminas.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Ana_Clara_Mesquita.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Produto 48 – Cadeia de Louças.** Setembro 2009. 53p.

OLIVEIRA, A. P. N. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos.** Revista Cerâmica Industrial Vol. 5 – Número 6. Setembro/Dezembro, 2000.

OLIVEIRA, M. C.; MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas brancas e de revestimento.** São Paulo: CETESB, 2006.

PADILHA, A. F., **Materiais e Engenharia – Microestrutura e Propriedades,** São Paulo: Hemus, 1997, p. 16-18.

PERDEW, L. **How the Toilet Changed History.** Essential Library of Inventions. 2016. 112p.

PEREIRA, S. W. **Análise Ambiental do Processo Produtivo de Pisos Cerâmicos. Aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida.** UFSC, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87886/220876.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

PRADO, A. C. A.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T.; MENEGAZZO, A. P. M. **Redução da susceptibilidade à deformação pirolástica das argilas do Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes através da adição de matérias-primas**. 2008. Revista Cerâmica Industrial. Volume 7 – Número 20. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v54n329/a0354329.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2017.

PRADO, U. S.; BRESSIANI, J. C. **Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década**. 2012. Anais do 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2012/eventos/cbc/18423.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

RAMOS, F. M. S. **Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil para produção de bloco cerâmico de vedação**. Scielo, Volume 55 Número 336, 2009. Páginas 408-414.

RESENDE, M. C. **Caracterização do Resíduo Sólido da Lagoa de Rejeito de uma Indústria de Cerâmicas e Aplicação como Pozolana**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, 2015. Disponível em: <http://www.engminas.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/TCC_-_Melissa_Cunha_de_Resende.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2016.

ROCHA, R. R.; ZANARDO, A.; MORENO M. M. T. **Estudo do comportamento reológico de barbotinas preparadas com argilas da Formação Corumbataí utilizadas no pólo cerâmico de Santa Gertrudes (SP)**. Revista Cerâmica, Número 54, 2008, p. 332-337.

SILVA, J. C. **Aproveitamento do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de Indústria Cerâmica na Composição de Massa Cerâmica para Produção de Louças Sanitárias**, UFPE, 2008, p.12. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA JUNIOR, J. E. S.; SILVA G. H.; PASSOS, R. A.; BENINI, V. A. V.; BALDO, J. B.; MARTINS, C. A. **Argamassas Obtidas a Partir da Reciclagem de Louça Sanitária**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – Natal, RN 2002. Disponível em: < https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc107-009.pdf>. Acesso em: 12 Jan. 2017.

TANNO, L.C., CUCHIERATO, G., MOTTA, J.F.M., CABRAL JR, M., SINTONI, A., MACHADO, S., YOKOTA, R. **Perspectivas para a Indústria Cerâmica**. Revista Cerâmica Industrial, Volume 8 – Número 4. Julho/Agosto, 2003.

THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY, **History of Ceramics**. 2014. Disponível em: < <http://ceramics.org/learn-about-ceramics/history-of-ceramics>>. Acesso em 11 abr. 2017.

ZACCARONA, A.; GALATTO, S. L.; NANDI, V. S.; FERNANDES, P. **Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo**. Revista Cerâmica Industrial. Volume 19 – Número 3, Maio/Junho, 2014.

ZANETTE, T. M. Estudo de Tratabilidade do Efluente Líquido da Indústria Cerâmica Para Fins de Reuso. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma – SC, 2004. Disponível em: <<http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/baixararquivo.jsp?id=488&NomeArquivo=Estudo%20de%20tratabilidade%20do%20efluente%20l%C3%ADquido%20da%20ind%C3%ADustria%20cer%C3%A2mica%20para%20fins%20de%20reuso.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

APÊNDICE A – TABELAS DE RETRAÇÃO LINEAR E PERDA AO FOGO

Formulação	Teste	CI (cm)	CS (cm)	CQ (cm)	RT (%)	RS (%)	RQ (%)	MI (g)	MS (g)	MQ (g)	PF (%)
AF 100%	T1	28,91	27,92	25,45	11,97	3,42	8,85	335,67	260,72	241,72	7,29
	T2	28,92	28,11	25,50	11,83	2,80	9,28	335,47	268,89	249,33	7,27
	T3	28,91	28,12	25,45	11,97	2,73	9,50	335,29	268,90	249,46	7,23
	T4	28,90	28,01	25,35	12,28	3,08	9,50	334,18	264,07	243,79	7,68
	T5	28,91	28,00	25,35	12,31	3,15	9,46	336,36	264,55	244,50	7,58
	MÉDIA	28,91	28,03	25,42	12,07	3,04	9,32	335,39	265,43	245,76	7,41
Desvio Padrão		0,01	0,08	0,07	0,22	0,28	0,28	0,79	3,49	3,47	0,20
AF 75%	T1	28,92	27,85	25,10	13,21	3,70	9,87	300,55	238,04	221,11	7,11
	T2	28,98	27,85	25,05	13,56	3,90	10,05	306,33	238,38	221,68	7,01
	T3	28,98	27,92	25,02	13,66	3,66	10,39	302,50	236,16	219,65	6,99
	T4	28,97	27,97	25,18	13,08	3,45	9,97	304,14	241,96	225,15	6,95
	T5	28,96	27,98	25,08	13,40	3,38	10,36	302,95	236,23	219,87	6,93
	MÉDIA	28,96	27,91	25,09	13,38	3,62	10,13	303,29	238,15	221,49	7,00
Desvio Padrão		0,02	0,06	0,06	0,24	0,21	0,23	2,13	2,36	2,21	0,07
AF 50%	T1	28,91	27,92	25,07	13,28	3,42	10,21	304,63	239,13	223,45	6,56
	T2	28,91	27,89	25,01	13,49	3,53	10,33	303,76	239,03	223,36	6,56
	T3	28,93	27,90	25,09	13,27	3,56	10,07	306,17	241,59	225,70	6,58
	T4	28,93	27,98	25,11	13,20	3,28	10,26	307,29	242,21	226,29	6,57
	T5	28,92	28,01	25,09	13,24	3,15	10,42	305,65	240,82	224,94	6,59
	MÉDIA	28,92	27,94	25,07	13,30	3,39	10,26	305,50	240,56	224,75	6,57
Desvio Padrão		0,01	0,05	0,04	0,11	0,17	0,13	1,37	1,43	1,32	0,02
AF 25%	T1	28,93	28,01	25,12	13,17	3,18	10,32	306,36	241,84	227,02	6,13
	T2	28,93	28,10	25,13	13,14	2,87	10,57	308,71	242,98	228,07	6,14
	T3	28,92	27,93	25,09	13,24	3,42	10,17	308,84	243,01	228,08	6,14
	T4	28,92	27,91	25,10	13,21	3,49	10,07	307,02	241,31	226,52	6,13
	T5	28,93	28,02	25,12	13,17	3,15	10,35	308,41	243,62	228,21	6,33
	MÉDIA	28,93	27,99	25,11	13,19	3,22	10,29	307,87	242,55	227,58	6,17
Desvio Padrão		0,01	0,08	0,02	0,04	0,25	0,19	1,11	0,95	0,76	0,09
AF 10%	T1	28,92	27,92	25,08	13,28	3,46	10,17	307,50	242,73	230,13	5,19
	T2	28,93	28,03	25,11	13,20	3,11	10,42	308,81	243,90	231,27	5,18
	T3	28,93	28,01	25,09	13,27	3,18	10,42	307,45	242,69	230,07	5,20
	T4	28,92	28,00	25,11	13,17	3,18	10,32	307,80	243,32	230,54	5,25
	T5	28,92	28,11	25,11	13,17	2,80	10,67	308,96	244,46	231,66	5,24
	MÉDIA	28,92	28,01	25,10	13,22	3,15	10,40	308,10	243,42	230,73	5,21
Desvio Padrão		0,01	0,07	0,01	0,05	0,23	0,18	0,73	0,76	0,71	0,03
AF 5%	T1	28,95	27,93	25,21	12,92	3,52	9,74	316,23	251,89	238,74	5,22
	T2	28,93	28,01	25,21	12,86	3,18	10,00	317,26	253,02	239,75	5,24
	T3	28,93	28,18	25,23	12,79	2,59	10,47	318,24	253,34	240,15	5,21
	T4	28,94	28,09	25,31	12,54	2,94	9,90	320,22	256,17	242,72	5,25
	T5	28,93	27,96	25,21	12,86	3,35	9,84	319,14	254,48	241,10	5,26

	MÉDIA	28,94	28,03	25,23	12,79	3,12	9,99	318,22	253,78	240,49	5,24
	Desvio Padrão	0,01	0,10	0,04	0,15	0,36	0,28	1,56	1,62	1,51	0,02
NF 100%	T1	28,89	27,90	25,02	13,40	3,43	10,32	306,69	240,98	222,87	7,52
	T2	28,88	27,92	25,31	12,36	3,32	9,35	312,15	245,49	226,26	7,83
	T3	28,89	27,90	25,25	12,60	3,43	9,50	314,33	246,05	228,54	7,12
	T4	28,90	27,90	25,27	12,56	3,46	9,43	314,31	245,29	226,75	7,56
	T5	28,91	27,83	25,12	13,11	3,74	9,74	328,45	258,57	237,47	8,16
	MÉDIA	28,89	27,89	25,19	12,81	3,47	9,67	315,19	247,28	228,38	7,64
	Desvio Padrão	0,01	0,03	0,12	0,43	0,15	0,39	8,04	6,63	5,48	0,39
NF 75%	T1	28,93	27,71	25,21	12,86	4,22	9,02	312,48	245,81	230,22	6,34
	T2	28,92	27,81	25,26	12,66	3,84	9,17	314,01	246,21	230,56	6,36
	T3	28,95	27,79	25,31	12,57	4,01	8,92	311,25	244,99	229,98	6,13
	T4	28,93	27,82	25,28	12,62	3,84	9,13	308,99	244,02	230,01	5,74
	T5	28,94	27,93	25,34	12,44	3,49	9,27	310,68	245,30	230,11	6,19
	MÉDIA	28,93	27,81	25,28	12,63	3,88	9,10	311,48	245,27	230,18	6,15
	Desvio Padrão	0,01	0,08	0,05	0,15	0,27	0,13	1,89	0,84	0,23	0,25
NF 50%	T1	28,92	28,02	25,38	12,24	3,11	9,42	320,42	254,33	238,83	6,09
	T2	28,92	27,99	25,29	12,55	3,22	9,65	318,11	252,65	237,02	6,19
	T3	28,93	28,01	25,31	12,51	3,18	9,64	315,66	250,16	236,11	5,62
	T4	28,91	28,00	25,35	12,31	3,15	9,46	304,79	243,44	229,88	5,57
	T5	28,92	27,98	25,35	12,34	3,25	9,40	309,52	244,66	230,69	5,71
	MÉDIA	28,92	28,00	25,34	12,39	3,18	9,51	313,70	249,05	234,51	5,84
	Desvio Padrão	0,01	0,02	0,04	0,13	0,05	0,12	6,43	4,82	3,99	0,28
NF 25%	T1	28,92	27,93	25,21	12,83	3,42	9,74	312,98	247,13	232,76	5,81
	T2	28,93	28,01	25,29	12,58	3,18	9,71	313,55	247,96	233,89	5,67
	T3	28,93	28,03	25,28	12,62	3,11	9,81	314,64	248,65	233,95	5,91
	T4	28,91	27,99	25,30	12,49	3,18	9,61	314,99	248,84	234,09	5,93
	T5	28,92	28,04	25,32	12,45	3,04	9,70	315,11	249,53	235,02	5,81
	MÉDIA	28,92	28,00	25,28	12,59	3,19	9,71	314,25	248,42	233,94	5,83
	Desvio Padrão	0,01	0,04	0,04	0,15	0,14	0,07	0,94	0,91	0,80	0,10
NF 10%	T1	28,95	28,05	25,42	12,19	3,11	9,38	320,13	255,34	240,89	5,66
	T2	28,94	28,04	25,40	12,23	3,11	9,42	318,77	253,88	239,04	5,85
	T3	28,93	28,01	25,38	12,27	3,18	9,39	319,46	254,67	239,88	5,81
	T4	28,93	28,07	25,43	12,10	2,97	9,41	320,58	255,49	240,73	5,78
	T5	28,91	28,05	25,42	12,07	2,97	9,38	321,19	256,01	241,34	5,73
	MÉDIA	28,93	28,04	25,41	12,17	3,07	9,39	320,03	255,08	240,38	5,76
	Desvio Padrão	0,01	0,02	0,02	0,09	0,09	0,02	0,94	0,82	0,92	0,07
NF 5%	T1	28,93	28,01	25,42	12,13	3,18	9,25	320,75	254,62	240,46	5,56
	T2	28,92	28,06	25,44	12,03	2,97	9,34	321,22	255,02	241,65	5,24
	T3	28,92	28,03	25,47	11,93	3,08	9,13	320,49	254,33	240,28	5,52
	T4	28,93	28,03	25,47	11,96	3,11	9,13	321,17	255,16	241,44	5,38
	T5	28,91	28,06	25,49	11,83	2,94	9,16	321,66	255,28	241,09	5,56
	MÉDIA	28,92	28,04	25,46	11,98	3,06	9,20	321,06	254,88	240,98	5,45
	Desvio Padrão	0,01	0,02	0,03	0,11	0,10	0,09	0,45	0,40	0,60	0,14

PADRÃO (STD)	T1	28,93	28,02	25,72	11,10	3,15	8,21	321,26	256,01	240,12	6,21
	T2	28,94	28,04	25,79	10,88	3,11	8,02	323,12	257,99	241,36	6,45
	T3	28,93	28,03	25,80	10,82	3,11	7,96	322,31	256,86	239,75	6,66
	T4	28,92	28,04	25,83	10,68	3,04	7,88	322,64	257,13	240,68	6,40
	T5	28,92	28,05	25,81	10,75	3,01	7,99	323,40	258,04	241,22	6,52
	MÉDIA	28,93	28,04	25,79	10,85	3,08	8,01	322,55	257,21	240,63	6,45
Desvio Padrão		0,01	0,01	0,04	0,16	0,06	0,12	0,83	0,85	0,69	0,17

APÊNDICE B – TABELAS DE MRF

MRF (Cru)						
Formulação	Substituição	Força Máxima (N)	Média (N)	Força Máxima (Kgf)	Média (Kgf)	MRF (Kgf/cm²)
AF	100%	20,68	20,630	2,109	2,104	1,984
		21,3		2,172		
		19,91		2,030		
	75%	16,534	17,600	1,686	1,795	1,693
		18,644		1,901		
		17,623		1,797		
	50%	15,037	15,400	1,533	1,570	1,481
		14,765		1,506		
		16,398		1,672		
	25%	16,126	16,376	1,644	1,670	1,575
		15,514		1,582		
		17,487		1,783		
	10%	14,765	14,720	1,506	1,501	1,416
		13,881		1,415		
		15,514		1,582		
	5%	19,868	19,051	2,026	1,943	1,832
		17,28		1,762		
		20,005		2,040		
STD	Padrão	33,749	32,184	3,441	3,282	3,095
		30,891		3,150		
		31,912		3,254		
NF	100%	23,355	23,718	2,382	2,419	2,281
		22,42		2,286		
		25,38		2,588		
	75%	21,433	20,549	2,186	2,095	1,976
		18,372		1,873		
		21,842		2,227		
	50%	20,753	21,003	2,116	2,142	2,020
		20,413		2,082		
		21,842		2,227		
	25%	18,099	17,101	1,846	1,744	1,645
		14,289		1,457		
		18,916		1,929		
	10%	12,588	16,852	1,284	1,718	1,621
		19,46		1,984		
		18,508		1,887		
	5%	17,675	17,391	1,802	1,773	1,673
		16,262		1,658		
		18,235		1,859		
STD	Padrão	33,749	32,184	3,441	3,282	3,095
		30,891		3,150		
		31,912		3,254		

MRF (Queimado)						
Formulação	Substituição	Força Máxima (N)	Média (N)	Força Máxima (Kgf)	Média (Kgf)	MRF (Kgf/cm²)
AF	100%	741,321	730,473	75,594	74,488	96,368
		680,652		69,408		
		769,446		78,462		
	75%	671,921	645,089	68,517	65,781	85,104
		666,885		68,004		
		596,461		60,822		
	50%	461,941	559,037	47,105	57,006	73,752
		624,832		63,716		
		590,338		60,198		
	25%	550,465	458,652	56,132	46,770	60,508
		554,955		56,590		
		270,537		27,587		
	10%	665,525	581,129	67,865	59,259	76,666
		518,280		52,850		
		559,582		57,062		
	5%	686,822	654,524	70,037	66,743	86,349
		621,025		63,327		
		655,726		66,866		
NF	100%	732,215	737,486	74,665	75,203	97,293
		718,630		73,280		
		761,614		77,663		
	75%	669,539	634,316	68,274	64,682	83,683
		563,325		57,443		
		670,083		68,330		
	50%	742,413	689,090	75,705	70,268	90,909
		734,180		74,866		
		590,678		60,233		
	25%	550,465	522,771	56,132	53,308	68,967
		421,252		42,956		
		596,597		60,836		
	10%	531,140	542,234	54,161	55,293	71,534
		473,985		48,333		
		621,577		63,384		
	5%	539,646	550,312	55,029	56,116	72,600
		538,577		54,918		
		572,714		58,401		
STD	Zero (Padrão)	702,063	749,920	71,591	76,471	98,934
		770,378		78,557		
		777,319		79,265		

APÊNDICE C – Tabelas de Deformação Piroplástica

Formulação	Teste	Deformação (mm)
AF 100%	T1	81,9
	T2	79,0
	T3	87,2
	T4	85,1
	T5	89,1
	Média	84,5
	Desvio	4,06

AF 75%	Padrão	
	T1	83,4
	T2	85,1
	T3	83,2
	T4	81,4
	T5	78,9
	Média	82,4
AF 50%	Desvio	
	Padrão	2,35
	T1	80,2
	T2	78,5
	T3	80,1
	T4	78,9
	T5	79,6
	Média	79,5
AF 25%	Desvio	
	Padrão	0,74
	T1	76,1
	T2	74,5
	T3	75,2
	T4	74,1
	T5	75,3
	Média	75,0
AF 10%	Desvio	
	Padrão	0,77
	T1	72,5
	T2	69,5
	T3	69,8
	T4	69,3
	T5	68,6
	Média	69,9
AF 5%	Desvio	
	Padrão	1,50
	T1	68,1
	T2	66,2
	T3	63,8
	T4	66,1
	T5	64,7
	Média	65,8
NF 100%	Desvio	
	Padrão	1,64
	T1	71,1
	T2	69,2
	T3	68,0
	T4	66,2
	T5	65,1

	Média	67,9
	Desvio Padrão	2,38
NF 75%	T1	65,2
	T2	67,1
	T3	65,8
	T4	66,6
	T5	65,9
	Média	66,1
	Desvio Padrão	0,75
NF 50%	T1	62,0
	T2	61,5
	T3	64,1
	T4	62,3
	T5	63,4
	Média	62,7
	Desvio Padrão	1,06
NF 25%	T1	62,3
	T2	64,5
	T3	59,8
	T4	60,1
	T5	61,1
	Média	61,6
	Desvio Padrão	1,91
NF 10%	T1	59,7
	T2	60,0
	T3	58,9
	T4	59,3
	T5	59,8
	Média	59,5
	Desvio Padrão	0,44
NF 5%	T1	59,1
	T2	56,9
	T3	57,5
	T4	57,1
	T5	57,2
	Média	57,6
	Desvio Padrão	0,89
PADRÃO (STD)	T1	64,3
	T2	65,1
	T3	63,9

	T4	63,8
	T5	64,2
	Média	64,26

NF 100%	T1	71,1
	T2	69,2
	T3	68,0
	T4	66,2
	T5	65,1
	Média	67,9

Desvio Padrão 2,38

NF 75%	T1	65,2
	T2	67,1
	T3	65,8
	T4	66,6
	T5	65,9
	Média	66,1

Desvio Padrão 0,75

NF 50%	T1	62,0
	T2	61,5
	T3	64,1
	T4	62,3
	T5	63,4
	Média	62,7

Desvio Padrão 1,06

NF 25%	T1	62,3
	T2	64,5
	T3	59,8
	T4	60,1
	T5	61,1
	Média	61,6

Desvio Padrão 1,91

NF 10%	T1	59,7
	T2	60,0
	T3	58,9
	T4	59,3
	T5	59,8
	Média	59,5

Desvio Padrão 0,44

NF 5%	T1	59,1
	T2	56,9
	T3	57,5
	T4	57,1
	T5	57,2
	Média	57,6

Desvio Padrão 0,89

PADRÃO (STD)	T1	64,3
	T2	65,1
	T3	63,9
	T4	63,8
	T5	64,2
	Média	64,26

APÊNDICE D – TABELAS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

