



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**A INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA GERAÇÃO DO
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NAS
PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA.**

MICHEL AGOSTINI

São Leopoldo, Novembro de 2014.

MICHEL AGOSTINI

**A INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA GERAÇÃO DO
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NAS
PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^ª. Dra. Feliciane de Andrade Brehm

Co-Orientador: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Siqueira Rodrigues

Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo, Novembro de 2014.

A275i

Agostini, Michel

A influência da variabilidade da geração do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades da cerâmica vermelha / Michel Agostini. -- 2014.

139 f. : il. color. ; 30cm.

Dissertação (mestre em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2014.

Orientador: Prof^ª. Dra. Feliciane de Andrade Brehm;
Coorientador: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski.

1. Engenharia civil. 2. Lodo - Estação de Tratamento - Água. 3. Cerâmica Vermelha. I. Título. II. Brehm, Feliciane de Andrade. III. Kulakowski, Marlova Piva.

CDU 624

MICHEL AGOSTINI

**A INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA GERAÇÃO DO
LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NAS
PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

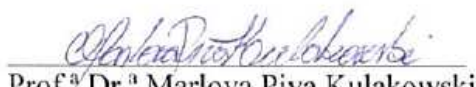
Aprovada em 27 de novembro de 2014



Prof.^a Dr.^a Feliciane Andrade Brehm
Orientadora – PPGEC/UNISINOS



Prof.^a Dr.^a Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC/UNISINOS




Prof.^a Dr.^a Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora – UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
PPGEC/UNISINOS



Prof. Dr. Marco Antônio Siqueira Rodrigues
FEEVALE

“Dedico este à minha mãe, meu pai, minha
esposa e ao meu filho.”

“Se você encontrar um caminho sem obstáculos,
ele provavelmente não leva a lugar nenhum”
(Frank A. Clark).

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família pela paciência, compreensão e peço desculpas pelos longos períodos de ausência. A minha esposa Thaisa e filho Rafael que sempre estiveram ao meu lado me dando força.

Aos meus pais Raul e Jozelita que passando por um período delicado de doença, eu pouco pude acompanhar e dar uma assistência, me fiz ausente por estar me dedicando a este trabalho. Quero que saibam que vocês são exemplos pra mim, de garra e determinação.

A minha família, amigos e colegas de trabalho eu agradeço pelas palavras de incentivo!

Agradeço muito às professoras Feliciane e Marlova por dividirem comigo todo o seu valioso conhecimento, meu muito obrigado por toda a ajuda e os puxões de orelha, levo pra vida os ensinamentos.

Aos professores do PPGEC pelos ensinamentos e em especial à coordenação do curso, professora Luciana, por toda paciência e confiança depositados em mim.

A empresa Bombas Beto por toda ajuda durante o projeto e por disponibilizarem os equipamentos para os experimentos com o lodo.

O SEMAE pela ajuda prestada durante todo o processo de coleta de lodo, um agradecimento especial à Maristela e Jamile.

Aos colegas de aula, laboratório e bolsistas, agradeço pela ajuda.

Enfim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse concluído. Agradeço por todas as palavras de incentivo!!!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA	28
1.2	OBJETIVOS	29
1.2.1	Objetivo geral.....	29
1.2.2	Objetivos específicos	29
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUA	31
2.1.1	Processo de tratamento de água.....	31
2.2	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)	37
2.2.1	Geração do LETA.....	37
2.2.2	Caracterização do LETA	38
2.3	CERÂMICA VERMELHA	50
2.3.1	Produção da Cerâmica Vermelha	51
2.3.2	Caracterizações e Propriedades da Cerâmica Vermelha.....	59
2.4	O EMPREGO DO LETA	67
2.4.1	Cerâmica vermelha com LETA.....	71
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	77
3.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	77
3.1.1	Fatores de controle.....	77
3.1.2	Variáveis de resposta.....	77
3.2	ARGILA	78
3.3	LODO DE ETA (LETA).....	79
3.3.1	Caracterização do LETA	80
3.4	PRODUÇÃO DAS CERÂMICAS.....	82
3.4.1	Preparação das argilas	83
3.4.2	Produção dos corpos de prova	84
3.4.3	Secagem.....	85
3.4.4	Sinterização	86
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS	86
3.5.1	Perda ao fogo	86
3.5.2	Difração de Raios X - DRX.	87
3.5.3	Espectrometria de Emissão Óptica em Plasma de Argônio Indutivamente Acoplado (ICP-OES).....	87
3.6	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	87
3.6.1	Retração linear.....	87
3.6.2	Resistência à flexão	87
3.6.3	Absorção de água.....	88
3.7	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.....	90
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	91
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E DOS LETAS	91
4.1.1	Limite de Plasticidade da argila.....	91
4.1.2	Teor de sólidos dos LETAS.....	91
4.1.3	Caracterização química dos LETAS por FRX.....	94
4.1.4	Caracterização mineralógica dos LETAS prensados por DRX.....	95
4.1.5	Caracterização ambiental dos LETAS prensados	97
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS	99
4.2.1	Caracterização química das cerâmicas.....	99
4.2.2	Caracterização mineralógica das cerâmicas por DRX.....	103
4.2.3	Perda ao Fogo.....	106
4.2.4	Caracterização ambiental das cerâmicas.....	107
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS CERÂMICAS.....	109
4.3.1	Retração Linear.....	109
4.3.2	Absorção de água.....	112
4.3.3	Resistência à flexão	121

5	CONCLUSÃO	128
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	ANEXO A	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de saneamento de Santos (SP) desde 2006	26
Tabela 2 – Valores de DBO e DQO	41
Tabela 3 – Características típicas de lodos com o uso de sulfato de alumínio	41
Tabela 4 – Concentração de metais em ensaios de Lixiviação	44
Tabela 5 – Concentração de metais em ensaios de solubilização	45
Tabela 6 – Quantidade de sólidos no LETA de decantadores	47
Tabela 7 – Equipamentos básicos de laboratório para simulação industrial do processo cerâmico	52
Tabela 8 – Perda ao fogo das amostras de argila	60
Tabela 9 – Principais compostos encontrados por ensaio de DRX	62
Tabela 10 – Padrão de lançamento de efluentes - limites máximos	70
Tabela 11 – Composição química do LETA de diversos estudos	72
Tabela 12 – Composição química da argila de diversos estudos	72
Tabela 13 – Composição química da cerâmica vermelha	72
Tabela 14 – Resultados de estudos de adição de LETA em Cerâmica Vermelha	73
Tabela 15 – Características e parâmetros de trabalho do filtro prensa	80
Tabela 16 – Quantidade dos corpos de prova extrudados conforme ensaio realizado	85
Tabela 17 – Resultados dos limites de plasticidade	91
Tabela 18 – Sólidos em cada amostra de LETA pré prensagem	92
Tabela 19 – Análises da água do rio nos meses correspondentes à coleta do LETA	92
Tabela 20 – Datas de limpeza do decantador e dias entre as limpezas	93
Tabela 21 – Quantidade de sulfato de alumínio utilizado na ETA 2	94
Tabela 22 – Percentual de sólidos e umidade em cada amostra de LETA prensado	94
Tabela 23 – Resultados da FRX sobre as amostras de LETA e CaO	94
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de lixiviação realizados	97
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de solubilização sobre as 3 amostras de LETA	98
Tabela 26 – Resultados de ICP-OES nos corpos de prova com e sem adição de LETA	100
Tabela 27 – Ensaio de perda ao fogo	106
Tabela 28 – Resultados dos ensaios de lixiviação sobre os corpos de prova sinterizados à 950°C	107
Tabela 29 – Resultados dos ensaios de solubilização	108
Tabela 30 – ANOVA da influência da temperatura de sinterização e da variação de percentual de STF nas 3 amostras de LETA	110
Tabela 31 – Médias do índice de absorção de água inicial	113
Tabela 32 – ANOVA dos efeitos temperatura de sinterização e percentual de sólidos voláteis sobre o AAI	114
Tabela 33 – Efeitos da temperatura e do tipo de corpo de prova sobre a resistência	121
Tabela 34 – Efeitos da quantidade de STF e da temperatura de sinterização sobre a resistência à flexão	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corpo receptor sem rejeitos da ETA – Itabirito	27
Figura 2 – Corpo receptor com rejeitos da ETA – Itabirito.....	27
Figura 3 – Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.....	32
Figura 4 – Atuação dos polímeros como auxiliares de coagulação para filtração direta	34
Figura 5 – Exemplo de processo de Floculação	36
Figura 6 – Comportamento característico da DBO_5^{20}	40
Figura 7 – Unidade de desaguamento utilizando manta.....	49
Figura 8 – Diagrama esquemático do processo de fabricação de componentes de cerâmica vermelha.....	51
Figura 9 – Diagrama de Isocompactação	54
Figura 10 – Resultados de ensaio de DRX sinterizadas a 1050°C	61
Figura 11 – Resultados de retração linear em cerâmica vermelha com adição de LETA	64
Figura 12 – Destino do LETA - EUA.....	68
Figura 13 – Destino do LETA no Reino Unido.....	69
Figura 14 – Destino do LETA na COPASA	70
Figura 15 – Blocos de argila após a extrusão	78
Figura 16 – Etapas do ensaio de limite de plasticidade.....	79
Figura 17 – LETA em tanque de decantação.....	79
Figura 18 – Organograma dos ensaios de caracterização dos LETAS.....	81
Figura 19 – Organograma das etapas de produção das cerâmicas em laboratório	82
Figura 20 – Preparação da massa com adição de LETA	84
Figura 21 – Extrusão dos corpos de prova e corpos de prova com problemas.....	85
Figura 22 – Corpos de prova dispostos dentro do forno mufla para sinterização	86
Figura 23 – Ensaio de resistência à flexão – rompimento de corpo de prova	88
Figura 24 – Ensaio de AA em andamento	89
Figura 25 – Ensaio de absorção de água – método RILEM: (a) croqui esquemático do corpo de prova em ensaio, (b) ensaio em andamento, (c) Gráfico de absorção ao longo do tempo	90
Figura 26 – Material preparado para envio ao laboratório	90
Figura 27 –Difratograma do LETA 1.....	95
Figura 28 –Difratograma do LETA 2.....	96
Figura 29 –Difratograma do LETA 3.....	96
Figura 30 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 800°C.....	102
Figura 31 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 950°C.....	103
Figura 32 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 1050°C.....	103
Figura 33 –Difratograma dos corpos de prova CPA - Referência.....	104
Figura 34 –Difratograma dos corpos de prova CPB com 5% de LETA 1.....	104
Figura 35 –Difratograma dos corpos de prova CPC com 5% de LETA 2.....	105
Figura 36 –Difratograma dos corpos de prova CPD com 5% de LETA 3.....	105
Figura 37 – Comportamento dos corpos de prova em ensaio de retração linear	109
Figura 38 – Efeito isolado dos STF dos LETAS na retração linear.....	111
Figura 39 –Influência da interação da temperatura e dos STF dos LETAS na retração linear	112
Figura 40 –Médias do índice de absorção de água (AA)X Temperatura de sinterização	112

Figura 41 – Efeito da temperatura de sinterização no AAI dos corpos de prova.....	115
Figura 42 –Efeito dos sólidos voláteis do LETA no AAI dos corpos de prova.....	115
Figura 43 – Efeito da interação da temperatura e dos sólidos voláteis do LETA sobre o AAI dos corpos de prova	116
Figura 44 – Média dos resultados de absorção de água – Método RILEM.....	117
Figura 45 – Efeito da temperatura sobre a absorção de água	118
Figura 46 – Efeito do tipo de corpo de prova na absorção de água	119
Figura 47 – Coeficiente de absorção capilar.....	119
Figura 48 - Relação entre Coeficiente de absorção inicial com coeficiente de absorção capilar.....	120
Figura 49 – Porosidade das cerâmicas: (a) Total e (b) Capilar	121
Figura 48 – Efeito da temperatura sobre a resistência dos corpos de prova.....	122
Figura 49 – Efeito isolado da composição dos corpos de prova sobre a resistência	122
Figura 50 – Efeito da interação da temperatura e da composição do corpo de prova sobre a resistência	123
Figura 51 – Efeito da quantidade de STF dos LETAS nos corpos de prova.....	125
Figura 52 – Influência da temperatura e dos STF dos LETAS na resistência à flexão.	126

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AA – Índice de Absorção de Água
AAI – Índice de Absorção de Água Inicial
APHA – American Public Health Association
CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DRX – Difração de Raios-X
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
FRX – Fluorescência de Raios-X
ICP-OES – Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma de Argônio Acoplado Indutivamente
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IP – Índice de Plasticidade
LMC – Laboratório de Materiais de Construção
LETA – Lodo da Estação de Tratamento de Água
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de Plasticidade
MF – massa final
MG – Minas Gerais
MI – Massa Inicial
MME – Ministério de Minas e Energia
MOL – Moringa Oleífera Lan
NH – Novo Hamburgo
ONU – Organização das Nações Unidas
PA – Pará
PAC – Policloreto de Alumínio
PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
RL – Retração Linear
RS – Rio Grande do Sul
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento
SP – São Paulo
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WTS –Sludge Treatment Plant Water

LISTA DE SÍMBOLOS

- b – Largura média dos corpos de prova (mm)
- d – Espessura média dos corpos de prova (mm)
- L – distância entre os apoios inferiores (mm).
- l – distância entre os apoios superiores (mm)
- P – Carga máxima aplicada
- σ – Tensão máxima de ruptura

RESUMO

AGOSTINI, M. **A influência da variabilidade da geração do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades da cerâmica vermelha.** São Leopoldo, 2014. 142. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

As estações de tratamento de água (ETA) são consideradas fontes de poluição, por gerarem resíduos sólidos como subproduto do próprio processo de tratamento. Por falta de adoção das políticas específicas de gerenciamento pelas ETAS, o lodo de estação de tratamento de água (LETA) tem sido disposto de forma ambientalmente inadequada, em cursos d'água. Uma alternativa viável seria a utilização deste LETA na fabricação de cerâmica vermelha destinada a construção civil, sendo assim, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da composição química do LETA, alterado pela qualidade da água a ser tratada, nas propriedades de cerâmica vermelha produzidas com este resíduo. Para atingir a finalidade proposta utilizaram-se 3 amostras de LETA, coletadas em Agosto de 2013, Dezembro de 2013 e Março de 2014 e uma amostra de argila, que foi amostrada em uma Olaria localizada em Porto Alegre – RS. A metodologia dividiu-se em coleta e caracterização das matérias primas, produção das 4 cerâmicas diferentes e caracterização das propriedades químicas, físicas e mecânicas das cerâmicas. O LETA foi prensado com adição de Cal para a retirada de excesso de água em um filtro prensa e caracterizado por meio dos ensaios de sólidos totais, fixos e voláteis, FRX, DRX, solubilização e lixiviação. Na argila, o LETA prensado foi empregado em adição de 5% em relação à massa total e então homogeneizado para a realização da extrusão dos corpos de prova. Os corpos de prova foram sinterizados em forno mufla nas temperaturas de 800°C, 950°C e 1050°C. As cerâmicas foram caracterizadas quanto à composição química e mineralógica, perda ao fogo e caracterização ambiental. Analisou-se a retração linear, a absorção de água e resistência à flexão dos corpos de prova. A composição química do LETA apresentou influência significativa nas propriedades estudadas das cerâmicas sinterizadas à 950°C e 1050°C, sendo que a propriedade mais afetada foi a absorção de água inicial sinterizada em 950°C, obtendo-se um acréscimo de 61% nos corpos de prova B e 12% nos corpos de prova CPD em relação as cerâmicas de referência. Na temperatura de 1050°C as cerâmicas apresentaram problema de baixa absorção de água. Nas cerâmicas sinterizadas à 800°C as propriedades físicas e mecânicas não foram alteradas significativamente pela adição de lodo, mostrando-se viável a adição de LETA na cerâmica sinterizada nesta temperatura.

Palavras-chave: Lodo de Estação de Tratamento de Água; Estação de Tratamento de Água; Cerâmica Vermelha.

ABSTRACT

AGOSTINI, M. **The influence of the variability of generation of sludge of water treatment plant in the red ceramic properties.** São Leopoldo, 2014. 142. Dissertation (Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

The water treatment plants (WTP) are considered point sources of pollution, for generating solid waste as a byproduct of the treatment process itself. For lack of adoption of specific management policies by WTP, the WTS has been disposed of improperly in environmentally watercourses. A viable alternative would be to use this WTS in the manufacture of red ceramic intended for construction, so this work aims to evaluate the influence of the chemical composition of the WTS, as amended by the water quality be treated in the properties of red pottery produced with this residue. To reach the proposed aim we used three samples of WTS, collected in August 2013, December 2013 and March 2014 and a sample of clay, which was sampled in a Pottery located in Porto Alegre - RS. The methodology divided into collecting and characterization of raw materials, production of 4 ceramics and characterization of different chemical, physical and mechanical properties of ceramics. The WTS was pressed with addition of lime for the removal of excess water and characterized by means of tests solids, fixed and volatile, XRF, XRD, solubilization and leaching. In clay, the WTS go been employed in addition of 5% relative to the total mass, and then homogenized for carrying out the extrusion of test specimens. The specimens were sintered in a muffle furnace at temperatures of 800°C, 950°C and 1050°C. The ceramics were characterized for chemical and mineralogical composition, loss on ignition and environmental characterization. We analyzed the linear shrinkage, water absorption and flexural strength of the ceramics. The chemical composition of WTS significantly affecting the properties of the ceramic sintered on 950°C and 1050°C, being the most affected absorption property was on 950°C the initial water absorption, yielding an increase of 61% in the specimens CPB and 12 % CPD in the samples in relation to the reference ceramic. On the temperature 1050°C, presented low water absorption. In the ceramics sintered at 800 ° C the physical and mechanical properties were not change significantly by the addition of sludge, being feasible the addition of WTS in this temperature.

Keywords: Sludge from Water Treatment Plant; Water Treatment Station; Red Ceramic

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento expressivo da população mundial e a crescente melhoria da qualidade de vida, a demanda por água tratada também aumenta. Segundo projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), até 2050 o haverá déficit de água em mais de 50 países. Mais de 2,8 bilhões de pessoas terão água contaminada, principalmente em países em desenvolvimento, onde cerca de 90% do esgoto é jogado nos rios. (ONU, 2014a). Não há o que discutir quanto aos benefícios da água para todos, porém, da mesma forma que qualquer indústria, o serviço de tratamento de água ou mais especificamente os processos de tratamento, geram resíduos e estes podem gerar impactos ambientais negativos.

Além do crescimento da população e da procura por qualidade de vida, a sociedade, principalmente nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, demanda uma quantidade a cada dia maior de água tratada, visto que a política de saneamento básico e inclusão social facilitam o acesso. De acordo com dados divulgados pela ONU no Brasil em 2013, houve progressos, mas o saneamento ainda é um sonho para muitos brasileiros, sendo que 52% da população ainda não possuem coleta de esgoto e somente 38% do esgoto recolhido é tratado. (ONU, 2014b).

Segundo levantamento do Instituto Trata Brasil, a universalização do saneamento básico no Brasil ainda está muito distante, mesmo quando são analisados os serviços nas cem maiores cidades do país. O governo federal pretende universalizar o saneamento básico em 20 anos (de 2014 a 2033).

No Brasil, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no ano de 2012, 93,2% da população tem acesso à água tratada. (BRASIL, 2012).

Com a finalidade de mostrar a situação do saneamento básico nas maiores cidades, mas principalmente valorizar os esforços das melhores colocadas, além de incentivar as demais a evoluir para que a população tenha melhor qualidade de vida, o Instituto Trata Brasil, divulga periodicamente um ranking anual com as cem maiores cidades do país, onde a cidade de Santos em São Paulo se destaca desde 2006 entre as cinco melhores conforme tabela 1.

Tabela 1 – Dados de saneamento de Santos (SP) desde 2006

Ano	Ano de publicação	População	Índice de atendimento total de água (%)	Índice de atendimento total de esgoto (%)	Total de Pontos	Nota (máx. 10)	Colocação no Ranking
2006	2008	418288	100	99	131	-	5°
2007	2009	418288	100	99	113	-	4°
2008	2010	417518	100	99	155	-	5°
2009	2011	417098	100	99	-	-	1°
2010	2012	419400	100	100	-	8,7	1°

Fonte: Adaptado de Instituto Trata Brasil, 2012

Segundo Souza (2009), as Estações de Tratamento de Água (ETA) possuem o objetivo de transformar uma água de manancial superficial ou subterrânea, em água potável, ou seja, enquadrá-la dentro de parâmetros de potabilidade exigidos por lei. Conforme a natureza da água a ser tratada, é necessário adotar diferentes tipos de sistemas de tratamento, com diferentes adições de produtos químicos e com isso, gera-se também diferentes tipos de resíduos os quais tem características e volume variáveis.

De uma forma geral, pode-se dizer que os lodos de estação de tratamento de água (LETA) são basicamente produtos da floculação, coagulação das partes orgânicas e inorgânicas que estão na água bruta, junto com os produtos utilizados no processo de tratamento. Segundo Richter (2001), as características do lodo variam conforme a natureza das águas brutas, dos processos unitários e dos produtos químicos utilizados para o tratamento da água.

A solução universal de destinação para o LETA ainda não é conhecida. No entanto, para possibilitar a concretização disto, a etapa chave é a caracterização, onde será possível entender quais as substâncias que compõem este LETA. Segundo Tatari (2008), o LETA contém metais pesados que quando dispostos de forma inadequada, podem gerar severos impactos de ordem ambiental e social. Por este fato, atualmente os órgãos ambientais de fiscalização requerem as empresas do setor de saneamento o gerenciamento para disposição final adequada destes lodos, gerando a corresponsabilidade e comprometimento no manejo dos recursos naturais utilizados.

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a), em seu item 3.1, os lodos de tratamento de água são classificados como resíduos sólidos, desta forma, dependendo da classificação do material, este deverá ser tratado e disposto conforme exigências legais, porém não é a realidade do Brasil. “No Brasil, os lodos de ETA são dispostos, com grande frequência, sem

nenhum tratamento em cursos de água próximos às estações de tratamento”. (TSUTIYA, 2001).

As figuras 1 e 2 mostram o manancial Carioca em Itabirito – MG, com suas características naturais e após receber os resíduos de ETA. Mudanças significativas nas características são perceptíveis.



Figura 1 – Corpo receptor sem rejeitos da ETA – Itabirito



Figura 2 – Corpo receptor com rejeitos da ETA – Itabirito

Fonte: Ribeiro (2007)

O problema da disposição inadequada do resíduo LETA tende a piorar com o crescimento da população (FERREIRA; SOBRINHO, 1997). Esta afirmação dos autores corrobora com a necessidade de ação urgente do poder público e da sociedade como um todo na busca por alternativas para este resíduo. Para que isto seja realmente entendido, é vital que tanto os órgãos públicos, as empresas privadas e a sociedade como um todo, tenham a consciência de qual o impacto ambiental que o LETA destinado da forma praticada atualmente causa.

Existem diversas alternativas para utilização ou disposição do LETA segundo Tsutiya (2001), dentre as quais, pode-se citar disposição em aterro sanitário, fabricação de cimento, cultivo de grama e fabricação de cerâmica vermelha, entre outras. Há necessidade sim de conhecer quais os impactos ambientais e em contrapartida quais os benefícios que cada utilização do LETA trará para a sociedade. Neste tópico, há o contexto de lançamentos de efluentes no rio assim como o volume do corpo receptor, pois ambos contribuem para uma sazonalidade de matéria orgânica e despejos industriais, bem como maior turbidez e conseqüentemente maior arraste de sólidos respectivamente. (CETESB, 2009), (PAVANELLI, 2001), (CORNWEL, 1987), (RICHTER, 2001).

Dentre estas alternativas, a adição em argila para a fabricação de cerâmica vermelha, vem ganhando espaço em estudos no Brasil, visto a crescente demanda de argila no país. (TATARI, 2008), (MORUZZI, 2008), (MONTEIRO et al, 2008), (MULLER, 2009), (SOUZA, 2009), (TEIXEIRA et al., 2011). Segundo relatório técnico emitido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 2009, o Brasil tem uma crescente demanda de argila. Pela produção estimada de peças cerâmicas em 2007, o consumo foi de 180 milhões de toneladas de argilas comuns, para 2030, há estimativa de um consumo de 5,2 a 8,2 bilhões de toneladas, conforme crescimento da economia brasileira. (BRASIL, 2009). Assim a cerâmica vermelha pode ser uma boa alternativa para incorporação de grande quantidade do resíduo LETA gerado no país. (NAGA; EL-MAGHRABY, 2002). Materiais cerâmicos constituídos de argila, geralmente são muito heterogêneos pois as argilas constituintes apresentam larga oscilação em suas composições, por este motivo podem admitir a presença de resíduos como o LETA. (LIEW et al., 2004). No entanto a utilização desta solução, deve ser precedida de um estudo detalhado do LETA, onde seja analisado processo de fabricação da cerâmica, a quantidade de adição possível, quais os produtos químicos utilizados no tratamento da água, as características do manancial, a variabilidade ou não de chuvas conforme a época do ano, a classificação ambiental do LETA, entre outras variáveis que podem interferir na característica do LETA e no processo de fabricação da cerâmica vermelha.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como os recursos naturais são cada dia mais escassos e de ampla necessidade, em especial ao desenvolvimento social e econômico; torna-se urgente a redução da extração de matérias primas diretamente da natureza e a melhoria do gerenciamento destes recursos assim como da disposição de resíduos.

No Brasil a maioria das empresas de saneamento utiliza processo convencional de tratamento de água. (SILVEIRA, 2012). Estes processos retiram os microrganismos, sedimentos, melhoram a cor e o gosto da água. Este processo gera o LETA, resíduo que pode ser reciclado de diversas maneiras e não deve ser descartado de qualquer forma na natureza.

A incorporação deste resíduo em cerâmica vermelha já vem sendo estudada por diversos autores, os quais a apontam como possível solução para destinação ambientalmente correta. (SANTOS, I.S.S.; 2001), (PAPPU; SAXENA; ASOLEKAR, 2007), (TATARI, 2008), (MORUZZI, 2008), (MONTEIRO et al, 2008), (MULLER, 2009), (SOUZA, 2009), (TEIXEIRA et al., 2011). No entanto, para a aceitação comercial de um novo produto, é

fundamental a realização de estudos tecnológicos, abrangendo diversas variáveis e identificando uma metodologia aplicável ao dia a dia das indústrias cerâmicas.

As características qualitativas e quantitativas do lodo de ETA podem variar de acordo com o processo de tratamento e com as condições físico climáticas locais entre outras. (TATARI, 2008). A região sul do Brasil, por exemplo, apresenta uma variabilidade climática durante o ano, com um volume de chuvas diferente conforme o mês. (BRASIL, 2014). Esta variabilidade pode impactar na composição química e na quantidade gerada do LETA.

Em vista desta problemática, o presente trabalho almejou ajudar neste processo de reciclagem de LETA pela indústria da cerâmica vermelha, verificando a influência da variabilidade do LETA na adição em cerâmica vermelha, quando este é amostrado em 3 datas distintas durante o ano.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto de três amostras diferentes de LETA nas propriedades da cerâmica vermelha, empregado em adição de 5% à massa de argila.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar e avaliar a variabilidade do LETA gerado em diferentes períodos do ano;
- Avaliar a influência das características do LETA e da sua variabilidade na produção de cerâmica vermelha;
- Avaliar a influência da interação entre a temperatura de sinterização e as características do LETA nas propriedades da cerâmica vermelha;
- Avaliar ambientalmente as cerâmicas produzidas com e sem LETA.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução e os objetivos são apresentados.

No capítulo dois, é realizada a revisão bibliográfica, contemplando o tratamento de água, LETA, cerâmica vermelha e o emprego do LETA.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental utilizando os materiais LETA e argila, para a produção de cerâmicas, caracterizando-as e realizando ensaios de verificação das propriedades físicas e mecânicas.

O quarto capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados obtidos durante o programa experimental englobando a caracterização da argila e dos LETAS, caracterização das cerâmicas e os ensaios das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova.

O quinto capítulo traz as conclusões do trabalho e as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica visa introduzir noções básicas sobre o processo de tratamento de água, a geração de lodo e o processo de fabricação de cerâmica vermelha, abordando técnicas de caracterização do lodo e de materiais cerâmicos. Estudos de reciclagem de resíduos como o LETA e utilização destes na fabricação de cerâmica vermelha já foram feitos e serão abordados durante a revisão conforme tópico proposto.

2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

2.1.1 Processo de tratamento de água

Quando se fala em água tratada, aborda-se um campo amplo do conhecimento. Enfim, para que é necessária a água tratada que não seja para o próprio consumo humano?

Ao analisar esta questão, pode-se citar um exemplo que envolve sim uma necessidade humana, porém indireta, trata-se da necessidade de abastecimento das indústrias sejam estas de qualquer tipo.

O objetivo das operações e processos de tratamento de água para abastecimento público é tornar a água adequada ao consumo humano, para que isto ocorra, é necessário que o tratamento obedeça a critérios e padrões de qualidade e higiene, garantindo assim a potabilidade da água. No entanto, a escolha do processo e grau de tratamento a serem adotados está associada principalmente ao uso final da água. Segundo Libânio, (2010) devem ser considerados os custos de implantação, manutenção e operação, manuseio e confiabilidade dos equipamentos, flexibilidade operacional, localização geográfica, assim como o tratamento e disposição final dos resíduos gerados.

Na figura 3 são apresentadas as principais tecnologias de tratamento de água com ou sem pré-tratamento.

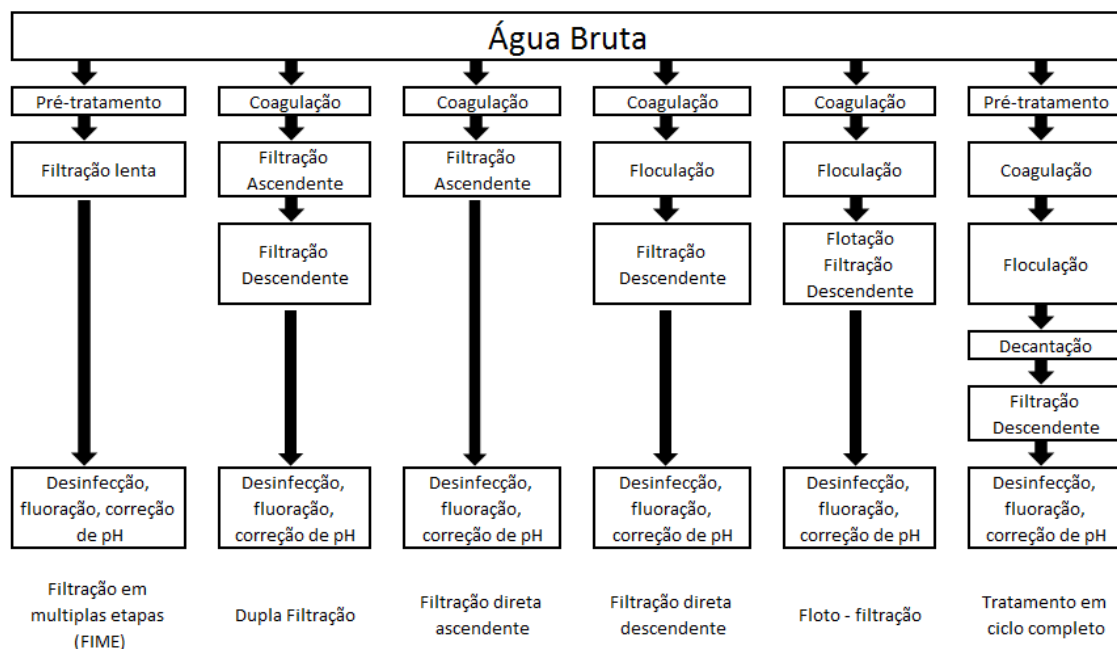


Figura 3 – Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

No Brasil, a maioria dos sistemas de abastecimento utiliza sistema convencional, também conhecido por ciclo completo (SILVEIRA, 2012).

Das tecnologias mostradas na figura 3, são discutidas algumas etapas do ciclo completo, visto que as etapas a seguir são as mesmas utilizadas na ETA geradora do LETA utilizado para este estudo.

2.1.1.1 Coagulação

A coagulação é o início do processo de tratamento de água na ETA. Tem por objetivo aglomerar as impurezas que se encontram em suspensões, em partículas maiores que possam ser removidas nas etapas de decantação ou de filtração. Nesta etapa, ocorre uma desestabilização onde, por adição de produtos químicos é neutralizado as forças de atração e repulsão das partículas.

Segundo Libânio, (2010) este processo decorreu da necessidade de melhorar o aspecto visual da água para o consumo humano e em contrapartida melhorar o avanço de doenças que utilizavam a água como veículo, mesmo que esta relação intrínseca na época, tenha se comprovado apenas aos meados do século XIX. Quanto maior concentração de partículas, maior possibilidade de presença de microrganismos patogênicos.

Coagulação corresponde à desestabilização da dispersão coloidal, devido a compressão ou redução da dupla camada elétrica. Aplica-se também este termo à desestabilização pela adição de eletrólitos hidrolisáveis, tais como o Fe_2O_3 e Al_2O_3 . (CRUZ, 2004).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a água bruta sofre coagulação com a adição de um sal de alumínio ou de ferro no mecanismo de varredura, no qual ocorre a predominante formação de metais precipitados pelo coagulante, onde há o aprisionamento das impurezas. Esse fenômeno ocorre na unidade de mistura rápida, a qual pode ser hidráulica ou mecanizada, dependendo da vazão necessária a ser tratada, da variação da qualidade da água bruta e, principalmente, das condições disponíveis para operação e manutenção.

“Em função das dosagens de coagulante e do pH do meio, as partículas coloidais são adsorvidas e as suspensas envolvidas pelo precipitado de hidróxido de alumínio ou de ferro”. (LIBÂNIO, 2010, p. 125).

Segundo Souza (2009) e Pavanelli (2001), os principais coagulantes utilizados nas ETAs no Brasil são:

- Sulfato de alumínio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
- Cloreto férrico – $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Sulfato férrico – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
- Policloreto de Alumínio - $\text{Al}_n(\text{OH})_m(\text{Cl})_{3n-m}$

Além destes coagulantes, existem também os coagulantes naturais – como a araruta, amido de mandioca, tanino e moringa oleífera.

Os coagulantes mais utilizados são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, sais que, em solução, liberam espécies químicas de alumínio ou ferro com alta densidade de cargas elétricas, de sinal contrário às manifestadas pelas partículas presentes na água bruta.

Atualmente os coagulantes de cloreto férrico e sulfato férrico tem sido utilizados ainda para tratamento de água e abastecimento da população, porém os mesmos apresentam a desvantagem de possibilitarem o acréscimo do sabor e turvação na água. Segundo relatório técnico de tratabilidade da água emitido pela SABESP (2009), estes coagulantes não são tão eficazes no tratamento da turbidez, quando comparados com o sulfato de alumínio.

Estudos com o uso de coagulantes orgânicos também vem sendo realizados. Silva et al (2012), utilizaram o coagulante Moringa Oleífera Lam (MOL), coagulante regional, para comparar o lodo frente ao uso do coagulante cloreto de polialumínio (PAC). O coagulante MOL é derivado da semente da planta Moringa Oleifera pertencente à família das Moringáceas. Segundo Obuseng, Nareetsile e Kwaambwa (2012), o coagulante MOL tem grande capacidade de absorção de metais pesados como o Mn, Pb, Zn e Cd.

Vanacor (2005), também utilizou coagulante orgânico para verificar sua eficiência e aplicabilidade em ETA de Novo Hamburgo – RS.

Di Bernardo e Dantas (2005), afirmam que ao analisar os dois tipos de lodos, com sal de alumínio e de ferro, verifica-se que ambos são muito semelhantes, apresentam coloração perto do marrom. Segundo Richter (2001), possuem difícil sedimentação ou flotação; para que isto aconteça, é necessária a adição de polímeros.

No processo de coagulação, junto com os produtos químicos utilizados, inserem-se os polímeros orgânicos sintéticos ou naturais (polieletrólitos), os quais são utilizados como auxiliares de coagulação (LIBÂNIO, 2010). Na figura 4, verifica-se a atuação dos polímeros como auxiliares de coagulação para filtração direta. Os polímeros têm a ação de ajudar na coagulação, formando uma espécie de teia para que as partículas sejam aglomeradas umas nas outras e em contato com o grão do meio filtrante.

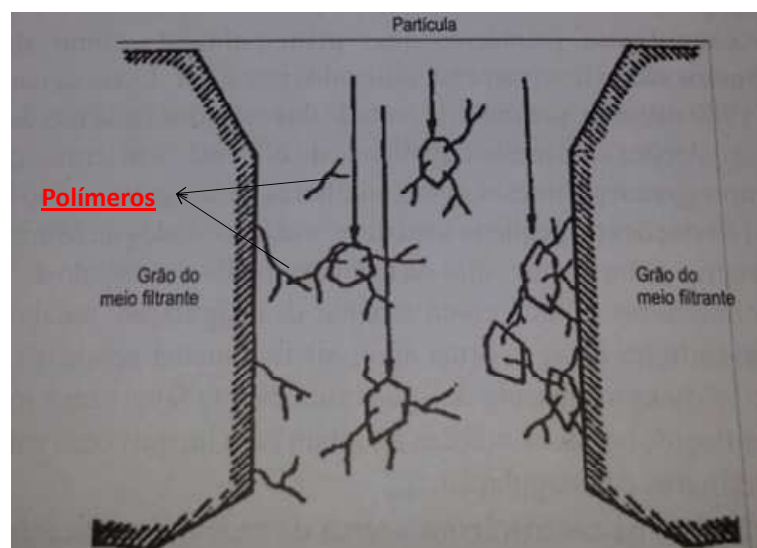


Figura 4 – Atuação dos polímeros como auxiliares de coagulação para filtração direta

Fonte: Adaptado de Libânio (2010)

Segundo Libânio (2010) embora os polímeros já fossem fabricados após a 2ª Guerra, a sua utilização foi mais comumente a partir da década de 1960 nos EUA. Os

polímeros sintéticos apresentam formulação variável conforme o fabricante e os naturais são a base de amido. Independentemente da formulação, usualmente sua utilização é inferior a 0,5 mg/L.

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), os polímeros naturais têm tido seu uso comprovado como auxiliares na floculação e/ou filtração, principalmente os amidos cationizados, com uma eficiência até 70% superior aos não cationizados.

Mais recentemente, tem sido pesquisada a aplicação de coagulantes poliméricos orgânicos e inorgânicos em substituição parcial ou total aos coagulantes inorgânicos mais comumente empregados no tratamento convencional de águas de abastecimento (DALSASSO; SENS, 2006).

Segundo Ferreira e Waelkens (2009), dentre esses coagulantes poliméricos, os coagulantes do tipo cloreto de polialumínio (PAC), são os mais comuns e de maior disponibilidade no mercado nacional. Frente a suas características físico-químicas, a sua aplicação tem possibilitado o emprego em ETA que apresente limitações operacionais em seus sistemas de pré-alcalinização. A principal razão para a maior eficiência dos polímeros é o seu peso molecular mais elevado, o que implica melhores propriedades de agregação. (TZOUPANOS; ZOUBOULIS, 2011).

Os coagulantes poliméricos a base de alumínio, são produzidos a partir da bauxita. Durante o processo de produção destes, a solução de alumínio é em parte neutralizada com uma base forte, normalmente NaOH. (AWWA, 1989).

2.1.1.2 Floculação

Uma aglomeração das partículas sem as forças de atração ou repulsão, formando flocos. Nesta etapa do processo, a aglomeração é facilitada por uma agitação suave, ajudando no contato dos flocos uns com os outros e ainda pode ter o auxílio de um produto químico floculante.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a água após ser coagulada, sofre uma agitação lenta para que os flocos alcancem o tamanho e massa suficiente para serem removidos por sedimentação nos decantadores.

A floculação ocorre sob agitação lenta, promovendo a ocorrência de choques entre as partículas formadas anteriormente, de modo a produzir outras de tamanho e densidade maiores, denominadas por flocos.

A necessidade da variação da intensidade de agitação, em função da qualidade da água bruta, indica a adoção de unidades mecanizadas, entretanto, sempre que possível deve-se empregar a floculação hidráulica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Na figura 5 é mostrado um exemplo de floculação.



Figura 5 – Exemplo de processo de Floculação

Fonte: CESAN (2013)

2.1.1.3 Decantação

Logo depois de passar pela floculação, a água vai para a decantação.

O processo de decantação é onde as partículas da água se depositam no fundo dos decantadores formando parte do LETA. Desta forma a água sem estas impurezas é recolhida da superfície.

Os flocos são separados do meio aquoso por meio de sedimentação, que consiste na ação da força gravitacional sobre estas partículas, os quais precipitam em uma unidade chamada decantador, propiciando a clarificação do meio (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Segundo Richter e Azevedo (2003), as partículas que não foram removidas pelo processo de decantação, sejam pelo tamanho pequeno ou densidade, serão removidas por filtração.

2.1.1.4 Filtração

O processo de filtração é o refino do processo de tratamento de água. Após a decantação a água segue para os filtros. Nesta etapa do processo, há o objetivo de reter pequenas partículas que estão na água; estas partículas são o restante do LETA não separado pela etapa de decantação.

Os filtros são compostos por diversas camadas e as mais comumente utilizadas são de carvão mineral e areia de diversas espessuras.

Segundo Richter e Azevedo (2003), a filtração é um processo de separação de impurezas, que faz isto por meio de fenômenos físicos e químicos e que busca retirar estas partículas, pela passagem da água por filtros porosos.

Segundo Silveira (2012), a filtração é a principal operação responsável pela produção de água de acordo com o padrão de potabilidade. Nesta etapa é realizada a remoção de partículas suspensas e coloidais e de microrganismos por processos físicos, químicos e biológicos. São utilizados nos filtros, areia, antracito, seixo entre outros.

Conforme Richter e Azevedo (2003), é o processo final de remoção de impurezas numa ETA.

2.1.1.5 Desinfecção

A etapa final do tratamento por ciclo completo é a desinfecção, processo que usa um agente químico como, por exemplo, o cloro, ou um físico, como a radiação UV, a fim de inativar os microrganismos patogênicos presentes na água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Após a desinfecção, na eta em estudo, é adicionado cal para o acerto de pH e flúor. Com isso a água está pronta para ser enviada à cidade.

2.2 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

2.2.1 Geração do LETA

O LETA é o conjunto das substâncias que foram retiradas da água durante o seu processo de tratamento. Em uma ETA de ciclo completo os resíduos são basicamente provenientes da limpeza ou descarga de decantadores e da lavagem dos filtros. (SILVEIRA, 2012). Cada linha geradora de resíduos, tanto decantadores como os filtros, apresentam características diferenciadas, quanto à vazão e composição de sólidos. (SABOGAL-PAZ; DI BERNARDO, 2005). Em termos volumétricos a maior quantidade de lodo é proveniente da lavagem dos filtros, no entanto em termos mássicos, a maior quantidade produzida é gerada nos decantadores, por ser a sedimentação o primeiro processo físico de separação sólido-líquido. (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A geração do lodo é um ponto a ser verificado com muita atenção no momento de instalação de um processo e na melhoria deste, caso o tratamento de água já exista. Uma boa

eficácia no processo, uma água de qualidade e pouca geração de lodo, que por consequência, causará menor impacto ambiental negativo, são requisitos importantes na implantação ou manutenção de uma ETA.

2.2.2 Caracterização do LETA

A composição do LETA dependem basicamente do manancial que será utilizado para captação da água, bem como dos produtos químicos utilizados para o tratamento, porém, ao detalhar o processo de tratamento da água pode-se expandir este conceito.

Alguns pontos são cruciais para que o tratamento tenha uma boa eficácia e gere uma água de qualidade e acima de tudo, produza a menor quantidade de LETA possível, que por consequência, causará um menor impacto ambiental negativo.

Dentre estes pontos pode-se destacar:

1 - Características da água bruta

A qualidade da água bruta influencia fortemente o processo de tratamento da água; não somente pelas mudanças químicas, as quais irão ocorrer conforme os produtos químicos utilizados, mas por outros fatores correlacionados a ela como quantidade de sólidos e turbidez. (RICHTER, 2001). Se a água for retirada do corpo hídrico em uma época de seca, o rio estará com um nível de água mais baixo e com uma água menos turva. Também há outros pontos a serem considerados como a possibilidade de assoreamentos do leito do rio e existência de despejos provenientes de efluentes industriais antes do ponto de captação.

A erosão das margens dos rios em estações chuvosas, que é intensificada pelo mau uso do solo aumenta a turbidez das águas exigindo alterações nas dosagens de coagulantes nas estações de tratamento de água. (CETESB, 2009), (RICHTER, 2001).

As características qualitativas e quantitativas do LETA podem variar de acordo com as condições físico-químicas do ambiente aquático e as condições físico-climáticas locais, as quais impactam no corpo d'água. (TATARI,2008).

Segundo CONAMA 357 (CONAMA, 2005), a classe dos corpos hídricos de água doce, são definidas e determinadas conforme tratamento necessário.

- Classe Especial: destinadas ao abastecimento humano após desinfecção;
- Classe 1: destinadas ao abastecimento humano após tratamento simplificado;
- Classe 2: destinadas ao abastecimento humano após o tratamento convencional;

- Classe 3: destinada ao abastecimento humano após tratamento convencional ou avançado.

- Classe 4: destinada à navegação e harmonia paisagística.

2 - Tecnologia de tratamento

Outro ponto impactado pelo tipo de água é a escolha do tratamento de água, ou do tipo de ETA a ser instalada para que se tenha uma boa eficácia no tratamento de água. Um exemplo disso é o processo de floto-filtração.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005, p. 36), “A floto-filtração é usada no tratamento de águas que possuem elevada concentração de algas ou cor verdadeira relativamente alta”.

3 - Características da coagulação

A etapa de coagulação pode ter muita influência na formação do LETA. Para entender esta influência, é necessário conhecer um pouco mais sobre Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A DBO de uma água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Normalmente a DBO é considerada a quantidade de oxigênio em um período a uma temperatura. O que é utilizado normalmente, é um período de 5 dias à uma temperatura de 20°C referenciado como DBO_5^{20} . (CETESB, 2013).

A total oxidação da matéria orgânica praticamente é observada em um período de 20 dias, ainda assim, um período muito demorado, desta forma, utiliza-se os valores de DBO em 5 dias, pois este valor representa uma parte significativa, em torno de 70% da DBO total. O período de 5 dias também foi escolhido para minimizar a interferência que ocorre na oxidação da amônia, a que ocorre após a partir do dia 8. (CETESB, 2013).

O comportamento da DBO_5^{20} é demonstrado na figura 6.

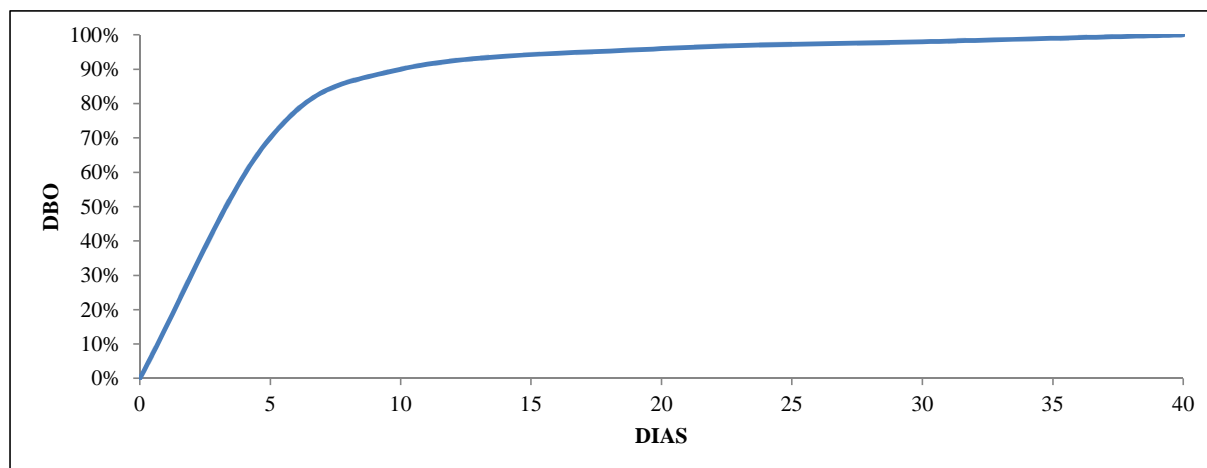


Figura 6 – Comportamento característico da DBO₅²⁰

Fonte: CETESB (2013)

A análise de DQO pode ser explicada pela quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico, como por exemplo o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$). Esta análise é muito utilizada em conjunto com a DBO, para observar a biodegradabilidade da amostra de despejos. Como o poder de oxidação do agente químico normalmente é maior que o resultante da ação de microrganismos, os resultados da DQO de uma amostra são superiores aos de DBO na grande maioria dos casos. (CETESB, 2013).

A adição de matéria orgânica nos cursos d'água consome oxigênio destes através da oxidação química e principalmente da bioquímica, isto acontece devido à respiração dos microrganismos, estes purificam a água da matéria orgânica contida no corpo d'água. Assim, pode-se dizer que a poluição orgânica ou quantidade orgânica de um curso d'água, pode ser avaliada conforme a quantidade de oxigênio necessário para oxidá-la.

Segundo Kim et al (2000), a demanda de oxigênio é um parâmetro importante que possibilita avaliação da concentração de contaminantes orgânicos em cursos d'água, quanto mais degradação orgânica, mais oxigênio requerido.

Ao analisar a DBO e DQO, para lodos de ETA que utilizam o coagulante sulfato de alumínio, Vanacor (2005) verificou que os valores são muito mais baixos do que os apresentados com a utilização do coagulante veta organic a base de tanino. É possível verificar na tabela 2, as amostras A e B dos valores reportados por Vanacor (2005) e Pereira (2011), onde é notável a diferença dos valores de DBO e DQO quando se compara um tipo de coagulante orgânico com um inorgânico.

Tabela 2 – Valores de DBO e DQO

Autor	Ano	Coagulante	Amostras	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
Vanacor	2005	Veta organic	A	910,2	12.971,4
			B	2.204,7	21.200,0
Pereira	2011	Sulfato de Alumínio	A	68,6	320,3
			B	61,3	278,0

Fonte: Elaborado pelo autor

O coagulante orgânico a base de tanino utilizado por Vanacor (2005) contribui para valores altos de DBO e DQO, o que não acontece com o coagulante químico utilizado por Pereira (2011).

Segundo Richter (2001), o lodo proveniente do uso de sulfato de alumínio apresenta uma pequena proporção de biodegradabilidade. Isto se pode verificar nos resultados das duas amostras de Pereira (2011), onde a relação de DQO/DBO é muito menor, quando comparados com os resultados obtidos por Vanacor (2005).

Considerando que a água bruta da ETA-NH, não apresenta características que justifiquem grande elevação no teor de matéria orgânica, conclui-se que o Veta Organic aumenta a carga orgânica do efluente no tratamento de água. (VANACOR, 2005).

Esta afirmação de Vanacor (2005) confirma o conceito de que a demanda de oxigênio é relacionada com a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação da matéria orgânica, visto que os valores encontrados são mais elevados do que os normalmente encontrados em LETA, onde o coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio.

A tabela 3 apresenta as características genéricas do LETA quando se utiliza sulfato de alumínio para o tratamento da água.

Tabela 3 – Características típicas de lodos com o uso de sulfato de alumínio

Sólidos totais (%)	Inorgânicos (%)	Matéria Orgânica (%)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
0,1 – 4	35 – 70	15 – 25	30 – 300	30 - 5000

Fonte: Adaptado de Richter, 2001.

Será verificado em processamento cerâmico, que a sinterização é a etapa do processo de fabricação da cerâmica que atua na transformação das partículas, transformando a argila em cerâmica. Nesta etapa do processo, quanto maior a quantidade de matéria orgânica na argila maior poderá ser a geração de poros e trincas na cerâmica, ou seja, uma característica não desejada no produto final.

4 – Destino final do LETA

Hoje há diversas alternativas em estudo para utilização do LETA. A secagem para a futura utilização ou para a disposição final é uma alternativa. (TSUTIYA, 2001). Para tal processo há algumas características que podem ser interessantes dentro da proposta deste trabalho.

- Desidratação em lagoas – Processo lento de desidratação feito em lagoas artificiais ou naturais. (TSUTIYA, 2001)

- Leito de secagem – utilizado normalmente em estações de tratamento de esgoto ou estações de tratamento de indústrias. (TSUTIYA, 2001), (FERRANTI et al., 2005).

- Desidratação mecânica – desidratação feita com o auxílio de equipamentos. (TSUTIYA, 2001), (RICHTER, 2001), (TATARI, 2008).

As tecnologias atualmente disponíveis para secagem utilizam os seguintes princípios:

A - Separação por sedimentação em campo de força gravitacional, normalmente centrípeta.

B - Filtração dos sólidos, os quais são retidos num meio ou superfície filtrante. Será utilizada esta técnica no trabalho, a qual será melhor abordada na metodologia.

Partindo para a destinação final do LETA, o que mais acontece hoje no Brasil é a disposição diretamente no próprio corpo hídrico, destino este que não atende os requisitos da legislação brasileira CONAMA 430 (CONAMA, 2011). Estudos existem diversos, há a possibilidade de dispor em aterro sanitário, fabricação de cimento, cultivo de grama, compostagem, plantação de cítricos e fabricação de tijolos. (TSUTIYA, 2001).

Porém, um ponto importante a ser devidamente verificado antes de qualquer destinação, é a toxidade do LETA gerado. Esta característica pode ter influência na saúde das pessoas envolvidas.

2.2.2.1 Caracterização mineralógica do LETA.

As características mineralógicas dos LETAS onde a água foi tratada com o coagulante sulfato de alumínio, apresentam semelhanças nos compostos identificados por ensaios de DRX.

Dentre estes compostos, os principais são o Quartzo (SiO_2), Hematita (Fe_2O_3) e a Alumina (Al_2O_3). (PORTELLA et al., 2003), (KINIZIEVIC, et al., 2013), (TATARI, 2008). Também são encontrados argilominerais do grupo das Caolinitas (SANTOS et al., 2001).

2.2.2.2 Classificação ambiental do LETA

O potencial tóxico do LETA pode ser proveniente de algum componente específico ou de uma série de componentes em conjunto, ou ainda da interação de um componente do lodo com um produto químico utilizado para o tratamento do lodo.

Alguns metais presentes no LETA, possuem ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, na disposição final e até mesmo na reciclagem destes resíduos. (CORDEIRO, 1993), (PORTELLA et al, 2003). Dentre estes cita-se principalmente cobre (Cu), zinco (Zn), níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), manganês (Mn) e, em especial, alumínio (Al).

Os ensaios utilizados para realizar a classificação ambiental dos LETAS são a lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004b) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c).

Segundo Pereira (2011), os resíduos de ETA, comumente, não têm características inflamáveis, corrosivas, reativas e tóxicas. Tendem a ser classificados como “Classe IIA – Não inertes”, tendo em vista as altas concentrações de metais, como o alumínio, que está presente nos coagulantes normalmente utilizados no tratamento de água, o qual ultrapassa os limites estabelecidos no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a), nos ensaios de solubilização conforme NBR 10006 (ABNT, 2004c).

Com base nos conceitos de lixiviação e solubilização, assim como na classificação de resíduos sólidos, segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), as tabelas 4 e 5 demonstram alguns dados que comprovam a afirmação de Pereira (2011).

Na tabela 4 são demonstrados alguns ensaios de lixiviação de diversos LETAS, confrontando com o anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004a), a qual indica os valores máximos no extrato lixiviado.

Tabela 4 – Concentração de metais em ensaios de Lixiviação

PARÂMETRO (mg/L)	PEREIRA (2008)	SANTOS et al (2001)	SILVA et al (2012)	SILVA et al (2012)	Limite NBR 10004: 2004 anexo F
Al	-	-	15	0,3	SL
Ag	-	ND	0,03	0,011	5
As	-	ND	0,5	0,7	1
Ba	<0,05	0,3	11,6	11,4	70
Cd	<0,01	ND	0,016	0,008	0,5
Cr ³⁺	<0,02	0,04	0,028	0,029	5
Cu	<0,01	-	-	-	SL
Hg	-	ND	ND	0,004	0,1
Ni	0,025	-	-	-	SL
Pb	<0,05	ND	0,094	0,029	1
Se	-	ND	0,7	0,25	1
Zn	3,66	-	-	-	SL
Coagulante utilizado	Cloreto Férrico	-	Cloreto de Polialumínio	Moringa Oleifera Lam	

*(- - não analisado); (ND - Não determinado); (SL – Sem limite estabelecido pela norma)

Fonte: Elaborado pelo autor

Alguns aspectos são importantes na classificação do resíduo. Nestes ensaios realizados, embora sejam LETAS diferentes, com coagulantes diversos, todos os resultados ficam abaixo do limite estabelecido pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), desta forma o resíduo é classificado como “Classe II – Não perigoso”.

Segundo Silva et al (2012), apesar do Al não ter um parâmetro estabelecido em norma para esta análise, o tipo de coagulante utilizado é muito importante, já que com o uso de PAC (cloreto de polialumínio) as concentrações de Al são muito superiores quando comparadas às amostras de LETA com o uso do coagulante orgânico Moringa Oleifera Lam. Lembra-se que o coagulante MOL, não tem alumínio em sua composição e os resultados de Al demonstrados na tabela 4 são provenientes da água captada para efetivação do tratamento.

Ao comparar o uso do PAC com o sulfato de alumínio, observa-se que a geração de LETA com o uso de PAC apresenta semelhança com os valores do LETA utilizando sulfato de alumínio, dessa forma, é possível afirmar que ambos os coagulantes apresentam comportamento semelhante com respeito à produção de LETA. (FERREIRA; WAELKENS, 2009).

Na tabela 5 são demonstradas algumas concentrações de metais solubilizados em diversos LETA pelos mesmos autores, confrontando com a NBR 10004 (ABNT, 2004a) anexo G, a qual indica os valores máximos para o extrato solubilizado.

Tabela 5 – Concentração de metais em ensaios de solubilização

PARÂMETRO (mg/L)	PEREIRA (2008)	SANTOS et al (2001)	SILVA et al (2012)	SILVA et al (2012)	Limite NBR 10004: 2004 anexo G
Al	<0,05	0,34	0,39	0,25	0,2
As	-	ND	0,96	1	0,01
B	<0,05	0,33	5	9,6	0,7
Cd	<0,01	ND	0,002	0,002	0,005
Cr	0,13	0,16	0,026	0,029	0,05
Cu	1,31	0,02	0,024	0,036	2
Fe	15,3	2,56	1,32	4,1	0,3
Mn	0,32	1	9,73	27,25	0,1
Pb	<0,05	ND	0,006	0,01	0,01
Se	-	ND	0,44	0,44	0,01
Zn	-	0,02	0,29	1,5	5
Coagulante utilizado	Cloreto Férrico	-	Cloreto de Polialumínio	Moringa Oleifera Lam	-

*(- - não analisado); (ND - Não determinado)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os ensaios de solubilização assim como os ensaios de lixiviação também sofrem impacto dos coagulantes utilizados no tratamento de água. Segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a) a classificação de todos os tipos de LETA demonstrados na tabela 5 são “Classe II A – não inertes”.

No ensaio realizado por Pereira (2008), o limite de ferro (Fe) fica muito superior a qualquer outro autor, pela utilização do cloreto férrico para o tratamento da água.

A mesma particularidade percebe-se nas análises do trabalho de Silva et al (2012) onde a alta incidência de manganês (Mn) tem grande relevância, quando é utilizado o coagulante Moringa Oleifera Lan (MOL).

Outros resultados obtidos na remoção de prata e manganês referem à mesma propriedade, em que a semente de moringa oleifera é particularmente eficaz em águas que apresentam alto teor destes metais (MENDES; COELHO, 2007).

O resultado da análise de Mn também é alto quando utilizado o coagulante PAC, e segundo Silva et al (2012), o lodo pode possuir alta concentração de metais pesados, estes possivelmente são oriundos da água bruta utilizada no tratamento, assim como os resultados de Boro (B).

Destaca-se que o LETA de todos os estudos referidos na tabela 5, estão acima dos limites estabelecido na CONAMA 430 (CONAMA, 2011) e devem ter uma destinação adequada ao invés de serem lançados diretamente nos corpos hídricos conforme ocorre na

grande maioria das ETAs no Brasil. (TSUTIYA, 2001). A resolução CONAMA 430 (CONAMA, 2011), determina que toda e qualquer emissão de efluente, de qualquer fonte poluidora somente poderá ser lançado nos corpos receptores se passarem por um tratamento adequado e obedecerem a padrões e exigências contidas na resolução ou em outras normas aplicáveis.

2.2.2.3 Quantidade de sólidos no LETA

A quantidade de sólidos no LETA é uma das características mais importantes quando a destinação deste é a aplicação em cerâmica vermelha. Isto é de fácil compreensão, visto que o teor de sólidos é a fração do LETA utilizável no processo.

Segundo APHA (2008), temos os seguintes conceitos:

- Sólidos totais: é o termo aplicado ao resíduo do material que resta depois da evaporação e sua secagem num forno a uma temperatura definida. Sólidos totais incluem os sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais.

- Sólidos suspensos totais: a porção de sólidos totais retido por um filtro

- Sólidos dissolvidos totais: a porção que passa através do filtro.

- Sólidos fixos: é o termo aplicado ao resíduo total, suspensos ou dissolvidos depois de aquecer até a secagem, durante um tempo especificado a uma temperatura especificada.

- Sólido volátil: é o termo aplicado à perda de material pelo aquecimento até a secagem do material.

Embora as determinações de sólidos fixos e voláteis sejam utilizadas como parâmetros de matéria inorgânica e orgânica, não distinguem precisamente isto. A perda de ignição não está limitada à quantidade de matéria orgânica; incluem-se as perdas devido à decomposição ou volatilização de alguns sais minerais (APHA, 2008).

A quantidade de sólidos voláteis no LETA poderá impactar negativamente na utilização destes na fabricação de cerâmica vermelha. (MORUZZI, 2008). A etapa de sinterização da cerâmica vermelha, onde acontecerá a volatilização destes sólidos, poderá ocasionar problemas como o excesso de poros, o que contribuirá para a geração de trincas na cerâmica, tornando-a menos resistente. (VITORINO; MONTEIRO; VIEIRA, 2009).

Na tabela 6 foram relacionados alguns autores que avaliaram os teores de sólidos dos LETAS estudados obtendo-se a quantidade de sólidos presentes em correlação com o tipo de coagulante e o tipo de LETA amostrado.

Segundo Vanacor (2005), os tipos de LETA amostrados podem ser líquidos ou fluídos com baixo percentual de sólidos, também podem ser pastosos que são mais consistentes e são retirados no fim da limpeza dos decantadores.

Tabela 6 – Quantidade de sólidos no LETA de decantadores

Autor	Ano	Coagulante	Tipo de LETA	Metodologia de ensaio	Sólidos totais (mg/L)	Sólidos Voláteis (% de ST)
Richter	2001	Sulfato de Alumínio	-	ND	1000 a 40.000	20 – 35
Vanacor	2005	Veta organic	Líquido	SMEWW 2540	30448	38
Vanacor	2005	Veta organic	Pastoso	SMEWW 2540	72781	53
Muller	2009	Cloreto de Polialumínio	Líquido	ND	3424	ND
Souza	2009	Sulfato de Alumínio	Líquido	Gravimétrico	5279	27
Oliveira	2010	Sulfato de Alumínio	Pastoso	SMEWW 2540	8381	40
Marques et al	2011	Sulfato de Alumínio	Líquido	Gravimétrico	9,65	12

* ND – não disponível

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se verificar na tabela 6 que a faixa de valores de sólidos totais descrita é muito ampla e depende dos diversos fatores correlacionados.

Segundo Richter (2001), a quantidade de sólidos voláteis varia de 20 a 35 % dos sólidos totais.

Segundo Vanacor (2005), os valores de sólidos encontrados por ele, foram afetados pela utilização de um coagulante de base orgânica, o que contribuiu para o aumento de número de sólidos voláteis, comprovando a forte interferência do tipo de coagulante utilizado no número de sólidos.

A concentração de sólidos no lodo decantado aumenta com o tempo de retenção. Tanques de decantação horizontal de limpeza manual, podem ter o lodo acumulado entre 2 a 3 meses. Nestes casos, a concentração de sólidos é geralmente alta, enquanto que, a unidade de remoção contínua apresenta menores concentrações, aproximando-se das águas de lavagem de filtros. (RICHTER, 2001).

Além do tempo de retenção a quantidade de sólido é altamente influenciada pela qualidade da água que está sendo retirada do corpo hídrico e esta por consequência é afetada pelas características do meio ambiente. Um exemplo no qual há diferenças na água é a condição climática, onde em épocas de chuva intensa a água é mais turva, com maior

quantidade de sólidos, que em consequência no fim do tratamento, resultará em uma quantidade maior de LETA gerado. (PAVANELLI, 2001), (CORNWEL, 1987), (RICHTER, 2001).

A tabela 6, demonstra que os autores Marques et al (2011), obtiveram valores de sólidos muito abaixo da média dos outros autores. Tal fato pode ser explicado pela metodologia de coleta do LETA utilizada no estudo, onde Marques et al (2011) retirou o LETA da canalização de envio para o rio, local onde o lodo, já estava diluído pela água utilizada na limpeza do decantador, diferentemente dos outros autores, os quais recolheram as amostras de lodo líquido e pastoso diretamente dos decantadores.

Oliveira (2010) também analisou a quantidade de sólidos e da mesma forma que Vanacor (2005), encontrou um número maior de sólidos ao analisar o LETA pastoso do que o LETA líquido analisado por Souza (2009) utilizando o mesmo coagulante. Desta forma percebe-se que a faixa citada por Richter (2001), pode ser considerada como referência para tratamento de água com sulfato de alumínio.

Para garantir uma boa desidratação do LETA, segundo Tatari (2008), existem diversos equipamentos atualmente disponíveis no mercado brasileiro, citam-se em ordem crescente de custo, e que atendem a exigências de uma torta com 15 a 35% de sólidos, os seguintes:

- Prensa desaguadora;
- Centrífuga;
- Filtro prensa;
- Filtro rotativo a vácuo;

Segundo Richter (2001), o filtro prensa é utilizado para desidratação de lodo que apresenta partículas finas e possibilita a obtenção de uma torta de 40 a 50% de sólidos em lodos de cal, com uma taxa de captura de até 98%. Este processo possui limitações de aplicação de cal ou cinza.

Segundo Demattos et al (2001), a adição sulfato de alumínio para o tratamento de água, reage com a alcalinidade natural da água ou com a alcalinidade adicionada, neste caso o cal conforme a Equação 1:



Equação 1

Segundo Pieper (2008), a aplicação de cal resumidamente é feita para que haja a formação de CaSO_4 e $\text{Al}(\text{OH})_3$. O primeiro pouco solúvel e o segundo insolúvel em água ajudam na secagem do LETA quando este é prensado no filtro prensa. Desta forma a separação da água dos sólidos, torna-se mais fácil, visto que com a adição de Cal, há uma formação de uma pré-camada deste na trama dos filtros e a pressão de trabalho do equipamento realiza o restante da retirada da água, passando o LETA pelo filtro, onde os sólidos ficam retidos junto ao Cal da pré-camada.

Para realizar a retirada da água além da utilização de maquinários há possibilidade também de realizar por meio de filtração conforme exemplo realizado por Muller (2009), onde é retirada a água por meio de uma manta geotêxtil e segundo o autor depois de 23 dias com o uso da unidade de desaguamento, é possível a retirada da água semelhante ao uso da prensa. A figura 7 mostra uma das unidades de desaguamento implantadas por Muller, (2009).



Figura 7 – Unidade de desaguamento utilizando manta

Fonte: Muller (2009)

Contudo, Muller (2009) não comenta as condições de pressão, tempo de prensagem e outras características quando sugere uma comparação com o desaguamento mecanizado e ainda ao realizar a moldagem da mistura de 80% de argila e 20 % de LETA, cita que não foi possível a extrusão devido à alta umidade da argila.

No processo de fabricação de tijolos foi necessária a interrupção da adição de água na homogeneização da massa cerâmica, mas ainda assim a massa apresentou umidade acima do desejado. (MULLER, 2009). Esta umidade pode ter ocorrido pela água intersticial

presente no LETA e a qual não seria retirada sem o uso de força mecânica ou de um produto específico para ajudar nesta etapa.

Segundo Oliveira (2010), a água intersticial está adsorvida nos interstícios dos flocos, sendo que uma parte dela está presa no interior do floco. Pode ser liberada se a estrutura do floco for destruída, sendo removida por força mecânica ou pelo uso do floculante.

2.3 CERÂMICA VERMELHA

A cerâmica vermelha abrange a atividade de produção de produtos, como: tijolos, blocos, telhas, lajotas, entre outros, que podem ser obtidos a partir da moldagem, secagem e queima da argila. Segundo Kazmierczak (2010) as cerâmicas são obtidas de uma base de argila, que sofre uma secagem lenta para a retirada de água e após é sinterizada a temperaturas elevadas. Normalmente provenientes de argilas sedimentares com alto teor de ferro.

A matéria prima normalmente provém de argilas sedimentares, possuindo alto teor de ferro, o que confere as cerâmicas a cor avermelhada. As argilas são compostas ainda por argilominerais, como a caulinita, a illita e as montmorilonitas, e outros minerais. (KAZMIERCZAK, 2010).

Segundo Tatari (2008), os materiais cerâmicos podem ser divididos em dois grupos: as cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas. Normalmente, as cerâmicas tradicionais são obtidas a partir de três componentes básicos: argila, sílica, e feldspato. Os tijolos e telhas utilizados na indústria de construção, e a porcelana elétrica usada na indústria elétrica, são exemplos de cerâmicas tradicionais.

Por outro lado, as cerâmicas técnicas, ou avançadas, são fabricadas habitualmente a partir de compostos puros ou quase puros, tais como óxidos de alumínio (Al_2O_3), o carbeto de silício (SiC) e o nitreto de silício (Si_3N_4).

A argila é composta principalmente por silicato hidratado de alumínio, quando são excessivamente plásticas, ou ricas em alumina e devem ser equilibradas com substâncias desengordurantes como quartzo, feldspato e caulim. E ao contrário, ou seja, ricas em sílica, podem ser equilibradas com outras argilas mais plásticas. (SANTOS; SILVA, 1995).

A sílica em pequenas quantidades diminui a cor avermelhada e a retração, facilitando a moldagem. (SANTOS; SILVA, 1995). Os feldspatos normalmente são misturados com a argila e quando aquecidos a temperaturas elevadas, sofrem fusão, ligando o material. (BARBA et al. 2002).

Desta forma, além de um entendimento melhor do processo de adição de LETA como componente para a fabricação de cerâmica vermelha, é importante entender mais sobre o processo de fabricação da cerâmica e as variações contidas neste processo. Variações estas que podem sofrer interferência desde fatores ligados à qualidade requerida no produto final, até ao tipo de processo que a empresa utiliza, manual ou mecanizado.

2.3.1 Produção da Cerâmica Vermelha

A fabricação das peças cerâmicas apresenta diferenças desde a extração da argila, onde conforme afirma Bastos (2003), algumas empresas trabalham com matérias-primas mais agregadas, que necessitam ser moídas antes de sua utilização. O nível de mecanização, e a preparação da massa podem melhorar a qualidade e diminuir as perdas.

A seguir, na figura 8 é apresentado um diagrama do processo de produção da cerâmica vermelha.

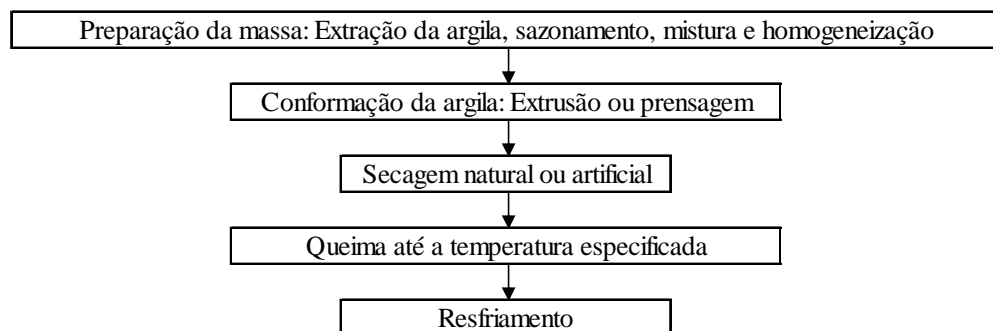


Figura 8 – Diagrama esquemático do processo de fabricação de componentes de cerâmica vermelha

Fonte: Kazmierczak (2010)

Inicialmente o processo de fabricação de materiais cerâmicos é voltado para a extração das matérias-primas nas suas jazidas, que em grande maioria atualmente, é onde as empresas cerâmicas estão situadas. Para preparação das matérias-primas de cada material cerâmicos fabricado, o conhecimento do processamento específico e do comportamento frente as mudanças do processo são de vital importância, com isso o estudo das características da argila a fim de obter um melhor desempenho na confecção da mistura cerâmica é essencial. (MULLER, 2009).

A adequação da massa para o processo de fabricação é realizada na etapa inicial de preparação da massa, onde o sazonalamento, a mistura e a homogeneização procuram adequar a argila ao processo de extrusão. O processo de sazonalamento é a exposição da argila

às intempéries, degradando os torrões e contribuindo para a reatividade. A mistura de duas argilas é realizada com o intuito de corrigir deficiências da argila. (KAZMIERCZAK, 2010).

O tamanho de partículas e a distribuição destas junto às outras características como a forma e estado de agregação, tem diretamente forte influência nas propriedades do produto final. Uma moagem executada por mais tempo, gera um número maior de partículas finas possibilitando um empacotamento de grãos maior, o que resulta em uma menor porosidade. Entretanto, se o processamento for muito demorado, as partículas ficarão com tamanho muito reduzido, isto aumentará o número de contatos superficiais, que contribuirão para o processo de coalescência em fase líquida, durante a vitrificação. Assim, quanto menor for o tamanho do grão, melhor será o empacotamento, conseqüentemente proporcionarão uma menor porosidade, menor retração linear e uma maior resistência. (BARBA et al. 2002).

2.3.1.1 Conformação e fabricação.

Após uma mistura adequada com uma umidade correta é realizado a conformação. Na conformação, deve-se tomar cuidado com a entrada de ar na massa, este se não for retirado, poderá resultar em trincas ou fendilhamentos que surgirão na etapa de sinterização, onde o ar aquecido se expandirá. (PETRUCCI, 2007).

A compactação e moldagem das matérias primas podem ser desenvolvidas de diversas maneiras. A necessidade de matérias primas varia de acordo com o requisito que o produto final requer. A adição de partículas e ingredientes à mistura não seguem uma regra, podem ser homogeneizados úmidos ou secos por exemplo; esta definição, depende do objetivo a que se prestará o material cerâmico.

Em cada etapa da fabricação cerâmica há processos específicos e equipamentos básicos para cada produto; alguns destes são necessários para uma simulação em laboratório do processo de fabricação da cerâmica vermelha; estes estão descritos junto com parâmetros importantes para a operação na tabela 7.

Tabela 7 – Equipamentos básicos de laboratório para simulação industrial do processo cerâmico

Produto	Estágio da produção	Equipamento básico	Principais parâmetros de controle	Propriedades a serem medidas
	Preparação da massa	Laminador, moinho de martelo	Quantidade de água, peneiramento, mistura de trabalho	Distribuição de tamanho de partículas e trabalhabilidade
Tijolos e Telhas	Conformação	Extrusora	Taxa de extrusão, taxa de compressão	Plasticidade
	Secagem	Secador	Temperatura e umidade relativa	Contração na secagem, sensibilidade na secagem, resistência a flexão

Sinterização	Forno com Gradiente de Temperatura	Ciclo, tempo, temperatura e posição no forno	Contração de queima, absorção de água, densidade relativa e resistência à flexão.
--------------	------------------------------------	--	---

Fonte: Adaptado de Dondi, (2006)

2.3.1.2 Moldagem

Moldagem é a operação que formata a cerâmica conforme desejado. Entre os tipos de moldagem, se destaca três:

- a) Com pasta fluida (com 30 a 50% de umidade);

Este processo de moldagem é utilizado onde a argila aderida em moldes se retrai no momento em que seca, descolando do molde. São muito utilizados na confecção de porcelanas e louças sanitárias.

- b) A seco ou semi-seco (com 4 a 8% de umidade);

O objetivo deste processo é a obtenção de materiais com alta resistência mecânica e baixa contração linear, no entanto este não propicia elevada produtividade, o que é necessário para a fabricação de blocos ou tijolos. O controle de granulometria é importante para que na prensagem haja um bom contato entre as partículas. As pressões de trabalho elevadas, na ordem de 5 a 70 kgf/cm², ajudam que o material cerâmico à verde fique o mais compacto possível. É utilizado este processo para fabricação de azulejos, pisos e refratários. (TATARI, 2008).

A prensagem a seco comprime o pó cerâmico dentro de uma cavidade, ocorrendo inicialmente a redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e da reordenação dos grânulos. Em seguida, ocorre a redução do volume e tamanho dos espaços intergranulares por deformação plástica associada com o esmagamento de alguns grânulos ociosos. Finalmente, a diminuição de volume e de tamanho pelo deslizamento e reordenação das partículas, buscando um empacotamento mais denso. (CUSTÓDIO et al, 2012).

Segundo Amorós (2001), para elevadas pressões de compactação e umidade, a água pode vir a saturar os poros existentes na peça, o que impedirá a sua posterior compactação, ou seja, a água em demasia impede uma boa compactação ou extrusão. O mesmo fato acontece com a extrusão que será utilizada neste trabalho, a umidade em excesso não propicia uma extrusão adequada. Um exemplo de relação de compactação com umidade e a pressão de compactação pelo processo de prensagem é apresentada na figura 9. O diagrama

de isocompactação mostra que para a obtenção de uma mesma densidade a seco, podem-se ter diferentes relações entre umidade e pressão de compactação. (CUSTÓDIO et al, 2012).

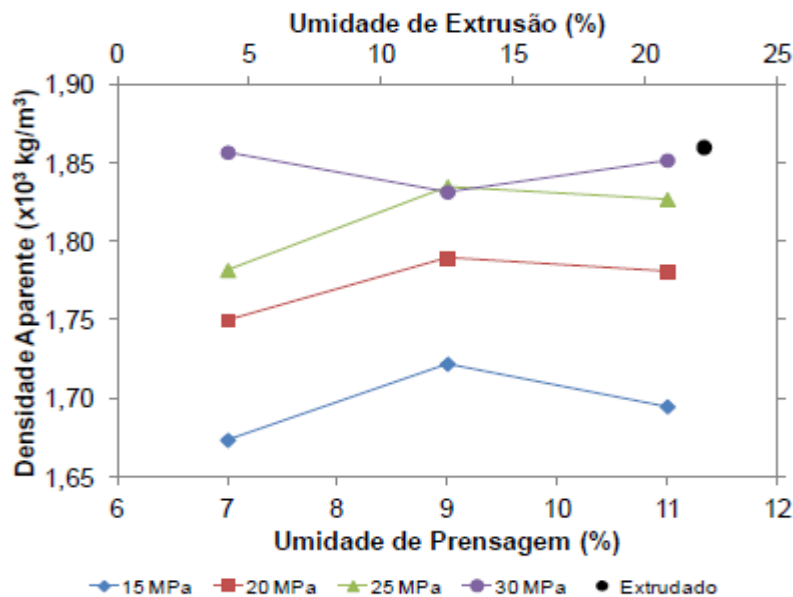


Figura 9 – Diagrama de Isocompactação

Fonte: Custódio et al. (2012)

c) Com pasta plástica consistente, Extrusão (com 20 a 35% de umidade);

O método de extrusão consiste em passar a massa por pressão, por um local apropriado. Esta característica é muito importante, pois facilita a homogeneização e retirada de ar da massa. O método também propicia elevada produtividade em produtos de seção transversal constante como os tijolos. (TATARI, 2008).

Segundo Wieck e Duailibi (2013), extrusão é um processo de conformação plástica, limitado à fabricação de objetos com seção constante. É muito utilizado na indústria cerâmica vermelha e os principais fatores que afetam o rendimento do processo e a qualidade dos produtos finais são:

- Composição e a preparação das massas cerâmicas;
- Plasticidade das massas;
- Moldes de extrusão (boquilhas); e
- Tipo de extrusora e a qualidade do vácuo.

Salienta ainda Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003), é necessário que as argilas possuam elevada plasticidade para uma melhora do produto final extrudado. Deve-se

trabalhar próximo ao limite de liquidez máximo da massa, facilitando o deslizamento das partículas sobre as paredes do equipamento de extrusão.

Na determinação do índice de plasticidade (IP) são utilizadas as normas técnicas da NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984b), determinando-se previamente os limites de Atterberg de acordo com a equação 2:

$$IP = LL - LP \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade

LL = Limite de liquidez

LP = Limite de Plasticidade

A plasticidade da argila é a propriedade considerada como a capacidade desta deformar-se, sob a ação de uma força externa, mantendo a deformação após a remoção da força aplicada. A plasticidade é afetada pelo teor de água adicionado, o qual tem um limite para cada argila, que é definido como “Limite de Liquidez”. (WIECK; DUAILIBI, 2013).

Conforme Wieck e Duailibi (2013), a plasticidade será conseguida logo após o ponto de máxima coesão com um pequeno acréscimo de água, que fará efeito lubrificante possibilitando a conformação da peça. A quantidade de água a ser adicionada depende da argila, tipo de peça e equipamento utilizado.

Além da plasticidade, é importante também entender como a coesão (força de união) entre as partículas se comporta na fabricação de cerâmica vermelha pelo processo de extrusão. Um bom exemplo é o caso da argila desagregada, sem nenhum percentual de umidade, a qual seria impossível conformar, isto porque é necessário um meio para unir as partículas, que no caso das argilas é a água. Inicialmente a água adicionada envolve cada partícula de argila, ficando a ela ligada intimamente e após, com mais adição de água, ocorre a ligação das partículas. (WIECK; DUAILIBI, 2013).

Para argilas com tamanhos de partículas grandes ou com deficiência na moagem, é necessária uma determinada superfície de recobrimento de água. Ao diminuir o tamanho das partículas, ou seja, para uma argila mais fina, é necessária uma quantidade maior de água para a máxima coesão, já que haverá um aumento da superfície específica. (WIECK; DUAILIBI, 2013).

Santos et al. (2012), ao analisar as zonas de extrusão utilizando como critério o índice de plasticidade na região de Marabá (PA) verificou que para uma extrusão ótima a argila deve apresentar Índice de Plasticidade entre 15 e 25% enquanto o Limite de Plasticidade fica entre 18 e 25%. Isto é uma variável na qual vários aspectos podem incorrer em alterações, dentre o principal ser a variabilidade e heterogeneidade das argilas. (KAZMIERCZAK, 2010). A água adicionada na argila para que a extrusão seja feita de uma maneira adequada, não ultrapassando o limite de plasticidade e obtendo-se uma boa coesão, é impactada pelo percentual de umidade presente na argila. Segundo Wieck e Duailibi (2013), o percentual de umidade das argilas vermelhas fica geralmente em torno de 16% a 20%. No entanto, estes valores variam conforme as características das argilas. (KAZMIERCZAK, 2010).

Segundo Clara et al. (2004) o valor de Limite de Plasticidade pode ser afetado pela dimensão das partículas sólidas, composição mineralógica, forma das partículas, área superficial, teor de água, temperatura da água, agregação das partículas, atração molecular, presença de outros materiais, origem da argila e tratamentos prévios.

Outro aspecto muito importante neste processo de fabricação é a retirada de ar na extrusão da argila. Antes de cortar a massa no comprimento desejado, como o processo incorpora muito ar, para que não ocorra fendilhamento ou até a desagregação da peça na etapa de sinterização, acopla-se uma câmara de vácuo na extrusora. Esta câmara de vácuo fará a retirada desse ar, aumentando o contato das partículas, diminuindo a porosidade e o risco de fissuras ou rachaduras que ocorrem nas fases posteriores do processo. (VELASCO et al., 2014). Esse processo é usual para fabricação de tijolos. (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2003).

A fabricação de cerâmica vermelha também pode sofrer variações conforme as estações do ano, condições climáticas podem influenciar as fases do processo, onde por exemplo a secagem pode ser afetada diretamente pela umidade do ar, condição climática comum no inverno do sul do Brasil. Contudo, hoje há tecnologia utilizada na indústria da cerâmica para que esta e outras interferências sejam eliminadas ou minimizadas, assim, estes impactos podem variar de acordo com o nível tecnológico da indústria cerâmica.

2.3.1.3 Tratamentos térmicos

As temperaturas e o tempo de exposição dos tratamentos térmicos alteram as propriedades dos materiais na fabricação dos produtos cerâmicos, promovendo a

movimentação das moléculas. Estas mudanças são parte importante na fabricação das cerâmicas, pois diminuem a porosidade, a absorção de água e aumentam a resistência entre outras propriedades.

- Secagem:

Esta é a etapa em que a perda de umidade para o ambiente deve ser realizada de forma lenta. Nesta etapa as partículas de argila são envolvidas e separadas por uma fina camada de água. (WIECK; DUAILIBI, 2013).

As características da etapa de secagem são vitais para uma boa sinterização da cerâmica vermelha. Segundo Kazmierczak (2010), as argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha contem alta umidade entre 20 e 30%. Esta umidade deve ser retirada lentamente para impedir que apareçam deformações ou fissuras durante o processo de sinterização.

Segundo Callister (2012), a etapa de secagem é a etapa principal do processo, pois a perda de umidade para o ambiente não pode ser tão rápida a ponto de danificar o produto com trincas e empenamentos, decorrentes da variação de volume. A água retida dos poros não causa deformação, porém, cede lugar às bolhas de ar que podem interferir nas propriedades de resistência mecânica e porosidade. (SMITH, 1998).

A secagem pode ser realizada de forma natural ou forçada. Assim, em uma olaria, segundo Tatari (2008), um tijolo pode levar de 3 a 6 semanas para secar naturalmente. Em uma secagem forçada, este tempo pode ser diminuído, desde que o processo seja bem conduzido, evitando deformação e trincas.

Segundo Callister (2012), se a taxa de evaporação for maior que a taxa de difusão, a superfície irá secar mais rapidamente do que no interior, isto possivelmente irá gerar defeitos no material, logo, deve-se diminuir a taxa de evaporação para que ocorra a difusão da água. A taxa de evaporação da água pode ser controlada pela temperatura, umidade e pela taxa de escoamento do ar.

Em estudo experimental Bersch (2011), simulando um processo natural de secagem, utilizou um pano úmido para colocar sobre os corpos de prova nas primeiras 24h

após a extrusão, evitando a evaporação acelerada dos corpos de prova com umidade relativa do ar de 70% em uma sala climatizada.

No processo de secagem, o ar desempenha papel essencial como veículo de transporte de calor. A transmissão do calor é feita por convecção do ar quente para a cerâmica e por condução da superfície para o interior. (CALLISTER, 2012).

- Sinterização:

A sinterização de materiais cerâmicos é um tratamento térmico que consiste em um aquecimento inicial, seguido de um tempo de permanência a máxima temperatura e finalmente um resfriamento, o qual pode ser lento ou rápido. (BÓ et al., 2012). Durante a etapa de queima ou sinterização, ocorrem as transformações irreversíveis na cerâmica. Segundo Kazmierczak (2010), até 150°C ocorre a evaporação da água livre. Desta temperatura até 600°C, ocorre a perda da água absorvida e a partir daí acontecem as transformações químicas.

A etapa de sinterização tem por finalidade a aglomeração de partículas, melhorando a resistência mecânica. Esta etapa também impacta em diversas propriedades como a redução de porosidade e de absorção de água assim como a redução da área superficial. (TATARI, 2008).

Segundo Kazmierczak (2010), velocidade do aumento de temperatura, temperatura máxima, tempo de manutenção da máxima temperatura e velocidade do resfriamento são determinantes para as propriedades que a cerâmica irá obter após a sinterização. A saída gradual da água deve ser um parâmetro para a especificação da velocidade de acréscimo de temperatura. Na fabricação dos blocos e tijolos de cerâmica vermelha a temperatura máxima atingida fica na ordem de 800°C a 1100°C. Em outros componentes pode-se superar os 1200°C. A taxa de aquecimento utilizada usualmente para ensaios de blocos cerâmicos é de 2,5°C/min. (KAZMIERCZAK, 2010).

Segundo afirmam Pinheiro e Holanda (2010), as temperaturas também tem grande impacto na qualidade da cerâmica, o intervalo entre 900°C e 1000°C é onde acontece uma transformação cristalina na cerâmica vermelha.

O grau de vitrificação da cerâmica vermelha depende da temperatura e do tempo de sinterização, depende também especialmente da composição mineralógica da argila que a

amostra foi fabricada. Na sinterização ocorre a formação da fase líquida, influenciando na coalescência entre as partículas dos argilominerais, preenchendo parte do volume dos poros. (BARBA et al., 2002).

Além disso, a fase fundida da cerâmica escoar ao redor das partículas que não se fundiram no meio e preenchem os poros. Nesse processo, a coalescência das partículas influencia na redução de volume da cerâmica e com o resfriamento, a fase fundida forma uma matriz vítrea que resulta em um corpo mais denso e muito mais resistente (CALLISTER, 2012).

Nesta etapa, deve-se atentar aos malefícios que a cal poderá inserir na cerâmica. Os carbonatos expostos a temperaturas acima de 800°C são dissociados e liberam CO₂. No entanto, os respectivos óxidos permanecem no interior dos corpos de prova e podem reagir com outras substâncias presentes. Um exemplo prático desta reação é a liberação do CO₂ conforme reação química descrita na equação 3:



As partículas minerais portadoras de carbonato de cálcio do calcário, durante a queima dos corpos-de-prova, são decompostas em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂). As moléculas de CaO ficam espalhadas no interior da peça cerâmica, no entanto o CO₂ é liberado para a atmosfera quando atravessa o corpo cerâmico. A ocorrência da liberação de CO₂ pode provocar defeitos na peça. (OLIVEIRA et al., 2011).

Estes defeitos além de problemas estéticos também podem gerar problemas estruturais nas peças cerâmicas. A cerâmica é um material cuja resistência depende da natureza dos defeitos superficiais e volumétricos de cada parte. Uma fratura começa em geral de pequenas falhas, que são descontinuidades na microestrutura e que, por simplicidade, podem ser consideradas como pequenas, no entanto após uma aplicação de carga tornam-se maiores ou até mesmo críticas. (DEFEZ et al., 2013).

2.3.2 Caracterizações e Propriedades da Cerâmica Vermelha

Para simular a fabricação de cerâmica vermelha e conseguir extrair diversos dados para estudo, são realizados em laboratório alguns ensaios que ajudam entender o comportamento da cerâmica como perda ao fogo, difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), retração linear, absorção de água e resistência à flexão.

a) Perda ao Fogo:

O ensaio de perda ao fogo fornece informações importantes sobre a quantidade de água de constituição e/ou matéria orgânica existente na massa cerâmica. De acordo com Souza (1975), perde-se a água de hidroxilas dos argilominerais e também de hidróxidos como o $\text{Al}(\text{OH})_3$ e o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ assim como sulfetos, sulfatos e carbonatos quando presentes.

Consiste em determinar a perda de massa dos corpos de prova durante a sinterização em forno. A temperatura pode variar conforme o tipo de material a ser estudado.

Para o cálculo deste ensaio deve ser utilizada uma equação simples que nos remete o percentual de matéria que foi exaurida no ensaio. Segue exemplo na equação 4:

$$PF = ((MI - MF) / MI) * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

MI = massa inicial (antes da sinterização)

MF = massa final (depois da sinterização).

O percentual de perda ao fogo é alterado pela quantidade de substâncias voláteis que a massa de argila contém. A quantidade de constituintes voláteis na cerâmica é influenciada por diversos parâmetros, principalmente o tipo de argila e alguma adição com mais teor orgânico.

Conforme Moruzzi (2008), a perda de massa ao fogo aumentou com a adição de LETA na massa cerâmica de 4,5% para 7,8%, para as concentrações de 0% e 30% de LETA respectivamente. Houve uma diminuição na qualidade da mistura com o incremento do LETA.

A quantidade de substâncias voláteis normalmente é maior no LETA do que na argila, portanto para este tipo de situação, quanto maior a adição de LETA, estima-se que maior será a perda ao fogo da cerâmica.

A tabela 8 demonstra a perda ao fogo encontrada por Santis et al. (2013), analisando 5 tipos diferentes de argilas. A perda ao fogo das amostras variou de 4,64%, para a amostra de Leme, a 10,96%, para a amostra de Ubarana. Segundo Santis et al. (2013), a perda ao fogo dá-se principalmente pela umidade das massas além da perda de hidroxilas dos hidróxidos, como $\text{Al}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Tabela 8 – Perda ao fogo das amostras de argila

Amostra	Perda ao fogo (%)
---------	-------------------

Itu	7,68
Leme	4,64
Porto Ferreira	5,42
Tambaú	6,04
Ubarana	10,96

Fonte: Santis et al. (2013)

b) Caracterização mineralógica:

A técnica de difração de raios X tem sido amplamente utilizada para a determinação de fases cristalinas em materiais cerâmicos assim como em argila. Entre as técnicas de caracterização de materiais, a técnica de DRX é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes. Isto é possível porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. (ALBERS et al., 2002).

A cerâmica vermelha apresenta importantes transformações durante o processo de sinterização e estas transformações tendem a influenciar diversas propriedades do material, como as propriedades mecânicas por exemplo. A adição de qualquer material também pode alterar a cristalinidade. (KIZINIEVIC et al., 2013).

A figura 10 apresenta os difratogramas da adição de 5% e 40% de LETA em cerâmica vermelha pesquisada por Kizinievic et al. (2013), onde se percebe um maior amorfismo na amostra b com 40% de LETA, pois a linha de base sobe.

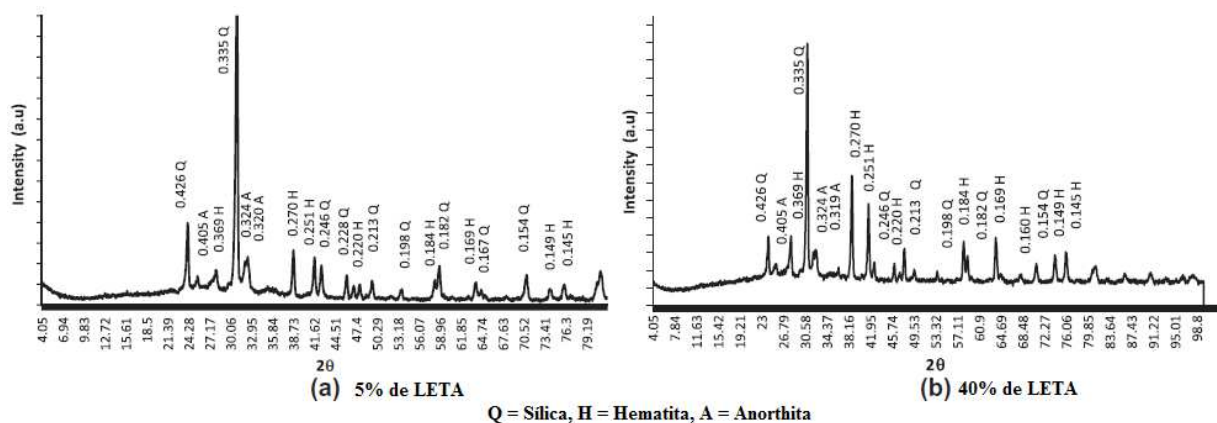


Figura 10 – Resultados de ensaio de DRX sinterizadas a 1050°C

Fonte: Kizinievic et al. (2013)

Entre as vantagens da técnica de DRX para a caracterização de fases, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de

materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases. (ALBERS et al., 2002).

A tabela 9 mostra alguns resultados obtidos por autores que analisaram argila e cerâmica.

Tabela 9 – Principais compostos encontrados por ensaio de DRX.

Material analisado	Composição	Temperatura de sinterização	Autor	Principais compostos.
Argila	NA	NA	(ANDRÉS et al, 2009)	Sílica, Ilita e Caulinita
Argila	NA	NA	(CLARA et al., 2004)	Sílica, Ilita e Caulinita
Argila	NA	NA	(ALBERS et al., 2002)	Sílica, Ilita e Caulinita
Argila	NA	NA	(MULLER, 2009)	Sílica, Caulinita e Muscovita
Argila	NA	NA	(VILLAREJO et al., 2012)	Sílica, Caulinita, calcita, Ilita e Hematita
Argila	NA	NA	(KIZINIEVIC et al., 2013)	Sílica, Ilita e Calcita
Argila	NA	NA	(VIEIRA; PINHEIRO, 2011)	Sílica, Mica e Caulinita
Argila	NA	NA	(TATARI, 2008)	Sílica, Caulinita e Hematita
Argila	NA	NA	(TALINI, 2009)	Sílica, Ilita e Magnetita
Argila	NA	NA	(MONTEIRO et al., 2008)	Sílica, Caulinita e Gibsita
Cerâmica	50% LETA, 15% Vidro, 15% Sais e 20% Argila	1000°C	(TALINI, 2009)	Hematita, Magnetita e Alumina
Cerâmica	95% Argila, 5% LETA	1050°C	(KIZINIEVIC et al., 2013)	Sílica, Hematita e Anortita
Cerâmica	60% Argila, 40% LETA	1050°C	(KIZINIEVIC et al., 2013)	Sílica, Hematita e Anortita
Cerâmica	100% Argila	1020°C - 1030°C	(ANDRÉS et al, 2009)	Sílica, Mulita, Hematita
Cerâmica	100% Argila	1050°C	(PINHEIRO; HOLANDA, 2010)	Sílica, Mulita e Hematita
Cerâmica	100% Argila	950°C	(PINHEIRO; HOLANDA, 2010)	Sílica, Ilita, Mulita e Hematita
Cerâmica	100% Argila	850°C	(PINHEIRO; HOLANDA, 2010)	Sílica, Ilita e Hematita

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que as argilas são diferentes conforme região ou localidade. No entanto, percebe-se que os compostos Sílica, Ilita e Caulinita aparecem na grande maioria dos ensaios. Quando verifica-se a composição mineralógica das cerâmicas, a composição e temperatura de sinterização resultam em diferenças nos componentes cristalinos. Embora

existam estas diferenças, os componentes Sílica e Hematita aparecem em quase todos os ensaios.

c) Retração linear:

A retração linear é umas das características importantes também a serem verificadas após a extrusão e após a sinterização do corpo de prova. Na figura 11 são apresentados os resultados de retração linear obtidos no estudo de Kizinievic et al (2013), onde utiliza LETA adicionado à cerâmica vermelha e verifica a retração dos corpos de prova antes e após a secagem e após a sinterização em duas temperaturas.

Fica evidente que a maior retração linear aconteceu após a sinterização a uma temperatura de 1050°C, visto que esta é a maior temperatura de sinterização. Pode-se verificar uma tendência de comportamento crescente nas 3 medições, à medida que é adicionado LETA. A temperatura tem fator determinante na retração, no entanto o teor de água inicial também tem impacto significativo.

Percebe-se que neste caso a perda de água também aumenta conforme é realizada a adição de LETA, variando de 42 à 52%, ou seja em determinados momentos é responsável por mais de 50% da retração da cerâmica e o restante da retração é devido as perdas de matéria orgânica bem como pela coalescência da massa (BARBA et al. 2002).

A retração gerada pelo acréscimo de matéria orgânica é mínima, comparada com a retração influenciada pelo aumento de temperatura. Verifica-se que neste caso a retração pelo acréscimo de matéria orgânica com a adição de LETA influencia um aumento máximo de 13% quando compara-se a cerâmica referência frente à cerâmica com 40% de adição de LETA. Em contrapartida a sinterização é responsável por até 58% de retração quando na cerâmica referência.

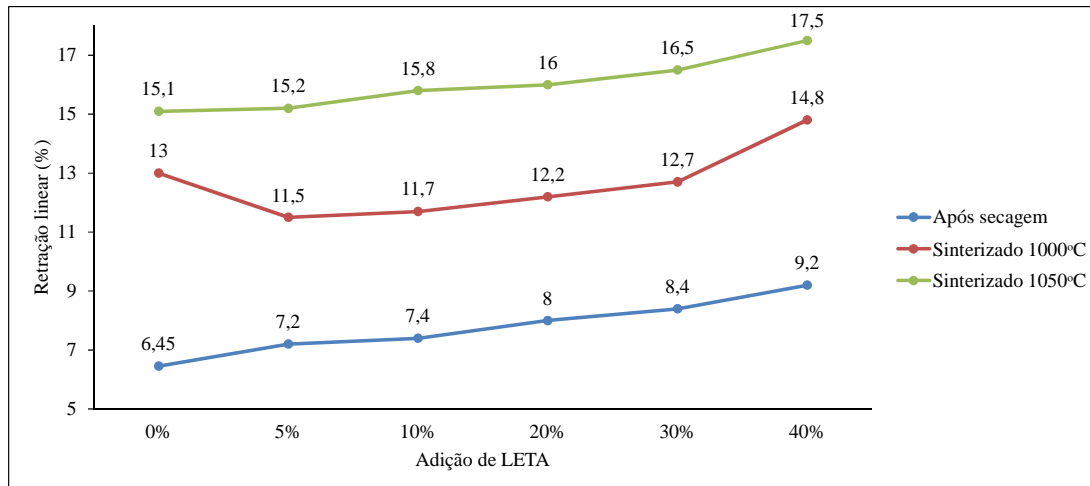


Figura 11 – Resultados de retração linear em cerâmica vermelha com adição de LETA

Fonte: Kizinievic et al. (2013)

A retração linear é calculada pela equação 5:

$$RL (\%) = ((L_i - L_f) / L_i) * 100$$

Equação 5

Onde:

RL – Retração Linear

L_i – Medida inicial (antes da secagem)

L_f – Medida final (após a sinterização)

d) Absorção de água:

Os ensaios de absorção de água têm como objetivo determinar a quantidade de água que o material ou amostra irá absorver em determinado tempo. Segundo Contreras et al. (2014), a absorção de água em especial está relacionada com a porosidade dos corpos de prova, quanto maior a porosidade, maior será a capacidade de absorção de água.

Dentre estes ensaios, segundo a NBR 15270-3 (ABNT, 2005c), o ensaio de índice de absorção de água (AA) é obrigatório para comprovar a conformidade dos blocos de cerâmica vermelha. Este ensaio deve ser executado conforme anexo B da mesma NBR 15270-3 (ABNT, 2005c) e o resultado de absorção para blocos cerâmicos deve ser de no mínimo 8% e no máximo 22%.

O índice de absorção de água inicial (AAI) não é um ensaio obrigatório para avaliação da conformidade, no entanto, indica um parâmetro importante e vital para o uso dos blocos de cerâmica vermelha. Segundo a NBR 15270-3 (ABNT, 2005c), caso o AAI seja

maior do que $(30\text{g}/193,55\text{cm}^2)/\text{min}$, os blocos cerâmicos deverão ser umedecidos antes do assentamento. Segundo Carasek (2007), a cerâmica deve ser molhada ou estar úmida o suficiente para que ocorra a penetração dos cristais da argamassa no bloco no momento do assentamento.

Outro ensaio que pode ser utilizado para se verificar a absorção de água é uma adaptação do ensaio descrito na recomendação técnica RILEM TC 116-PCD: 1999. O ensaio utilizado para verificar a absorção de água em concreto, possibilita verificar a absorção de água em função do tempo.

Os mecanismos que regem o transporte de umidade em uma parede podem aparecer em duas fases, vapor e líquida. Durante a fase de vapor, o transporte da umidade é condicionado pelo processo de difusão e convecção, já na fase líquida a umidade é captada pela capilaridade. A água do solo por exemplo, migra através dos poros, podendo causar a degradação dos revestimentos, os quais não cumprem a impermeabilização, proteção e acabamento que lhe são exigidas. (SILVA, 2012). Desta forma destaca-se fortemente a importância da capilaridade, resultante da fabricação da cerâmica vermelha. A capilaridade da cerâmica vermelha deve ser rigorosamente controlada a fim de otimizar desempenho mecânico e prevenir ocorrências de fissuras ou problemas de qualidade como o aparecimento de sais. (ANAND; VASUDEVAN; RAMAMURTHY, 2003),

Porém um fato importante é relatado por Kazmierczak (1989), onde cita que a umidade relativa do componente afeta na força de ascensão capilar, uma vez que após saturação dos poros, a força capilar deixa de existir. Em blocos não saturados pela absorção de água, o efeito da capilaridade aumenta à medida que a largura do poro diminui, mas a quantidade de água succionada por capilaridade diminui.

Este relato foi confirmado por Bersch (2011) onde em seu trabalho cita que o maior diâmetro de poro com uma menor quantidade de poros que é característico das menores temperaturas de sinterização, o que acabou facilitando a entrada, a circulação e a cristalização dos sais no interior do material, resultando em diminuição do coeficiente de absorção capilar ao longo dos ensaios. Com o passar do tempo os materiais porosos, favorecem a entrada e permanência de água e sais na rede de poros. Os sais então muitas vezes se acumulam nas alvenarias durante os anos, auxiliando na deterioração da construção. (GONÇALVES, 2007), (ANGELI et al., 2010).

Outro aspecto relevante na absorção de água é a composição da cerâmica. Na tabela 14 são apresentados diversos dados de trabalhos onde foram executados ensaios de absorção de água em cerâmicas referência e cerâmicas com adição de LETA. Outro componente que pode interferir na cerâmica é o carbonato de cálcio. A utilização deste (conforme temperatura de sinterização), pode propiciar uma peça mais porosa e com acesso facilitado à água, podendo causar curvaturas ou tortuosidades na peça, devido a absorção de água. É necessário que as peças queimadas apresentem elevada cristalinidade e baixo amorfismo para que as adições de carbonato de cálcio não causem dano ao produto. (MENEZES et al., 2006).

e) Resistência à flexão:

No ensaio de tensão de ruptura à flexão, para corpos de prova, o material de seção transversal retangular é colocado sobre dois suportes e sofre uma deformação que é aplicada no centro do corpo de prova. Conforme Santos (1989), a tensão de ruptura à flexão recomendada para blocos é de 5,5 MPa.

O ensaio para verificar a resistência mecânica dos blocos cerâmicos é realizado conforme norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005a).

Para cálculo da tensão máxima à ruptura, será utilizado a equação 6:

$$\sigma = 1,5 * ((P * (L - l)) / (b * d^2))$$

Equação 6

Onde:

σ = Tensão máxima de ruptura

P = Carga máxima aplicada

b = Largura média dos corpos de prova (mm)

d = Espessura média dos corpos de prova (mm)

l = distância entre os apoios superiores (mm)

L = distância entre os apoios inferiores (mm).

O ensaio de resistência foi utilizado por Kizinievic et al (2013), Zamora et al (2008), Monteiro et al (2008), Muller (2009) e Dias et al. (2008) conforme demonstrado na tabela 14 em estudos onde adicionaram LETA em cerâmica vermelha.

Os valores mínimos requeridos pela norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) para blocos de vedação com furos na vertical é de 3 MPa e com furos na horizontal é de 1,5 MPa.

Para blocos estruturais, a resistência característica à compressão deve ser considerada à partir de 3,0 MPa, referida à área bruta.

2.4 O EMPREGO DO LETA

Com o objetivo de melhorar o cenário de disposição inadequada dos resíduos gerados, um setor que apresenta potencial para contribuir na solução de problemas ambientais originários nos mais diversos processos industriais é o da cerâmica vermelha. Conforme Moraes et al., (2010), o setor de cerâmica atualmente é responsável por uma parcela significativa de impactos ambientais, como forma de minimizar tais impactos tem se possibilidade de incorporar resíduos nos produtos do setor. Trabalhos reportados na literatura têm mostrado que é possível a reciclagem de resíduos industriais inseridos nas massas cerâmicas para a fabricação de produtos para a construção civil. O LETA é um destes resíduos.

- Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, micro esferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de baterias e areia de fundição (TALLINI, 2009).

- Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETAII) do município de Rio Claro - SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha (MORUZZI, 2008)

- Fabricação de novos materiais cerâmicos a partir de barro e argila vermelha derivados da indústria do alumínio. (VILLAREJO et al, 2012).

A reciclagem do LETA também pode ser realizada incorporando-o na matriz cerâmica. Com esta adição, as propriedades da cerâmica são alteradas principalmente pela adição de matéria orgânica e estas alterações, exigem diversos ensaios, como resistência à flexão, retração e absorção de água, comprovando que a cerâmica ainda está dentro das normas ou mais do que isso, apresenta qualidade igual, melhor ou que a interferência do resíduo não seja perceptível. Para que isto seja possível, a cor, retração linear, resistência à flexão, absorção de água e porosidade, devem viabilizar a utilização do LETA na matriz cerâmica.

Quanto à adição de LETA em cerâmica vermelha, pode-se dizer que o assunto vem sendo estudado com um foco voltado principalmente para percentual de adição e temperatura de sinterização. O processo ainda não é implantado em diversas localidades, pois a matéria prima constituinte principal, a argila, ainda é abundante e a previsão do LETA ou

outro tratamento de retirada do excesso de água, deve acontecer já na ETA geradora do resíduo, esta complexidade logística além do fator econômico pode comprometer os resultados desejados. (TSUTIYA, 2001).

Embora a viabilidade desta aplicação tenha sido comprovada por diversos autores como Tatari (2008), Muller (2009), Kizinievic et al.(2013), entre outros, as variáveis climáticas ainda não foram amplamente abordadas, representando uma lacuna de conhecimento sobre as interferências que a pluviometria pode ter na água e esta por consequência no LETA. Segundo Tatari (2008), as variações físicas climáticas no manancial, afetam diretamente o processo de geração de LETA.

Quanto ao uso do LETA fora do Brasil, este tem diversos destinos, os quais são diferentes quando se comparam com os destinos de utilização do LETA no Brasil. Segundo Cornwell et al (2000) o uso do LETA nos Estados Unidos tem sua maior aplicação no solo como plantação de grama, conforme figura 12.

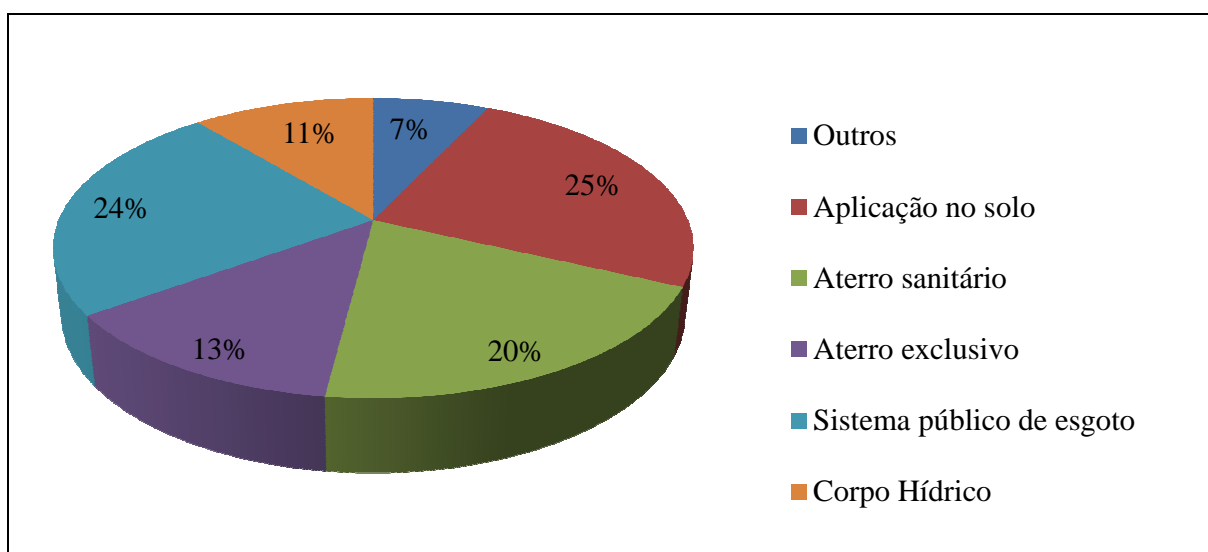


Figura 12 – Destino do LETA - EUA

Fonte: Cornwell et al. (2000)

Alguns dos benefícios associados com a adição de resíduos de coagulante no solo incluem: melhoria na estruturação do solo, ajuste de pH, adição de minerais, aumento da capacidade de retenção de umidade e aeração do solo. Também há estudos sobre os malefícios, e as investigações têm demonstrado que alguns componentes do resíduo têm uma tendência para se ligar ao fósforo disponível e a fito toxicidade de alumínio também pode ser um problema se o pH do solo não for mantido acima de 6,5. (CORNWELL et al. 2000). Segundo Dayton e Basta (2011), mesmo que o LETA melhore a retenção de água no solo,

pode causar problemas de retenção de fósforo, o que pode ser prejudicial para algumas aplicações.

Em segundo lugar aparece o tratamento em estações de esgoto nos Estados Unidos, é quando o LETA é o enviado para o sistema público de esgoto, seguido pela disposição em aterros sanitários com 20% do LETA, onde o resíduo é então tratado ou disposto corretamente.

O Reino Unido, de forma distinta aos processos utilizados nos Estados Unidos, destina o LETA em mais de 50% para os aterros sanitários, seguido por envio ao sistema público de tratamento de esgoto conforme estudo realizado por Simpson, Burgess e Coleman (2002), apresentado na figura 13. Em segundo lugar dentre as tecnologias empregadas, aparece o tratamento por meio do sistema público de esgoto.

Fazendo uma rápida análise dos dois países, verifica-se que ambos utilizam aterro sanitário e o sistema público de esgoto como destino do resíduo, o que indica uma tratativa mais adequada ao resíduo e uma preocupação com o destino dado ao LETA.

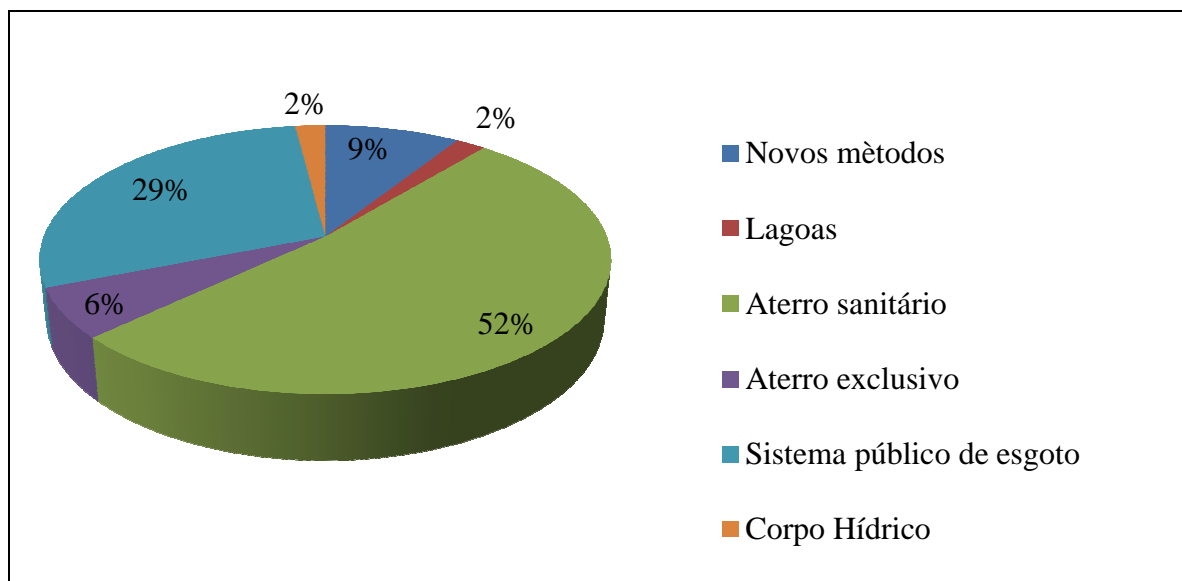


Figura 13 – Destino do LETA no Reino Unido

Fonte: Simpson, Burgess e Coleman (2002)

Ao se realizar uma comparação com o que acontece no Brasil, verifica-se que há muitas possibilidades ainda a serem trabalhadas. O LETA no Brasil segundo Tsutiya (2001) é enviado em sua grande maioria de volta para o corpo hídrico, o que se pode comprovar na figura 13, nos dados da Companhia de Saneamento de Minas Gerais. O percentual LETA

enviado novamente para o corpo hídrico é de 87% em Minas Gerais. Na cidade de São Leopoldo – RS, o percentual chega a 100% do LETA.

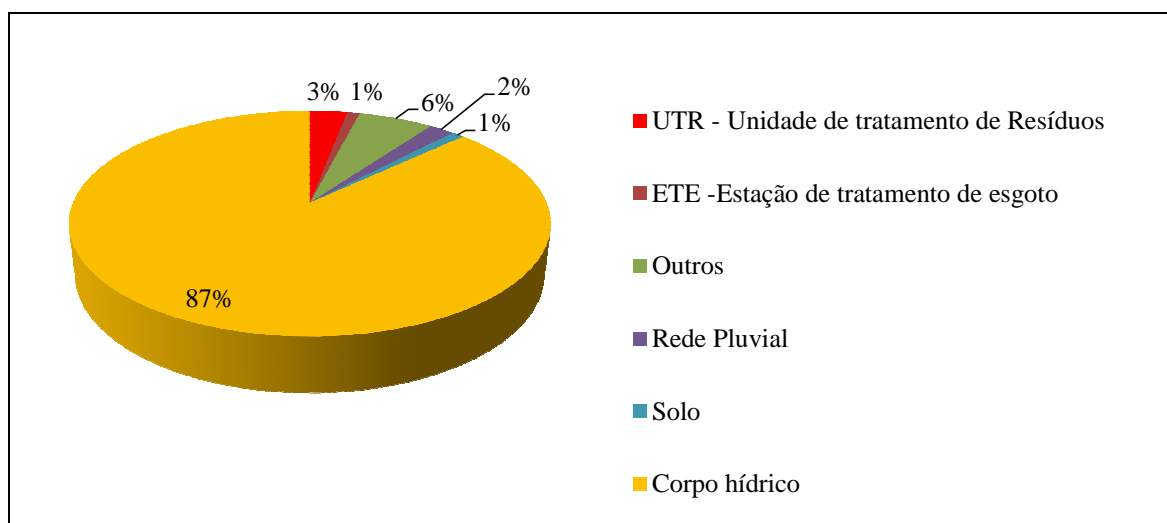


Figura 14 – Destino do LETA na COPASA

Fonte: Alexandra et al. (2009)

No Brasil inteiro, 70% das mais de 7500 ETAs lançam diretamente nos corpos hídricos os resíduos do processo de tratamento de água. (SABESP, 2013). No entanto, há também exemplos positivos, onde o tratamento adequado ao LETA já vem sendo realizado. Na ETA Cafezal na cidade de Londrina no Paraná, o LETA está sendo tratado na ETE Sul da mesma cidade. (LONDRINA, 2008).

Independentemente do destino que for mais adequado, seja simplesmente enviar para um aterro sanitário como ocorre com grande frequência no Reino Unido ou a própria aplicação no solo comumente utilizada nos Estados Unidos, ambos os destinos do LETA, são ambientalmente mais corretos que a destinação no corpo hídrico, que ainda acontece no Brasil com grande frequência.

Para que a disposição do LETA em corpo hídrico seja adequada conforme legislação CONAMA 430 (CONAMA, 2011), o resíduo deveria passar por um tratamento onde o resultado ou saída, resultasse nos parâmetros aceitos perante a legislação brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a). Este tratamento poderia ser feito inclusive nas estações de tratamento de efluentes, da mesma forma que é feito nos Estados Unidos e no Reino Unido. Na tabela 10 são apresentados os padrões de lançamento de efluentes conforme CONAMA 430 (CONAMA, 2011), com os valores máximos permitidos no Brasil.

Tabela 10 – Padrão de lançamento de efluentes - limites máximos

Produto químico	As	Ba	B	Cd	Pb	CN	Cu	Cr ⁶⁺	Cr ³⁺	Sn	Fe	Mn	Hg	Ni	Ag	Se	S	Zn
Valores máximos (mg / L)	0,5	5	5	0,2	0,5	1	1	0,1	1	4	15	1	0,01	2	0,1	0,3	1	5

Fonte: Adaptado de CONAMA 430 (CONAMA, 2011).

Além do lançamento de produtos químicos inadequadamente no corpo hídrico a destinação do LETA sem o devido tratamento também influencia negativamente de outras formas, alterando o habitat e o equilíbrio natural do meio.

Segundo SABESP (2013), a disposição inadequada do LETA no corpo hídrico:

- Aumenta a quantidade de sólidos nos corpos d'água;
- Pode causar ou aumentar o assoreamento;
- Aumenta a cor, turbidez e concentração de alumínio na água;
- Altera o pH (normalmente diminui);
- Causa liberação de odores;
- Reduz a quantidade de oxigênio dissolvido no corpo d'água;
- Pode causar toxicidade crônica aos organismos aquáticos;

Dos autores citados, tanto Simpson, Burgess e Coleman (2002), assim como, Cornwell et al. (2000), não foi possível conhecer as características químicas dos LETAs e desta forma realizar uma comparação com as características dos LETAS encontrados no Brasil. Sabe-se também que esta comparação não é simples, visto inúmeras variáveis constantes no processo de tratamento de água, que engloba desde as características da água que será tratada, o tipo de ETA que fará o tratamento e o tipo de produto químico utilizado neste processo. Assim, cada LETA deve ser analisado e caracterizado para que possa ser realizada uma comparação com os estudos já executados até hoje.

2.4.1 Cerâmica vermelha com LETA

a) Caracterização dos LETAS, Argilas e Cerâmicas

Para analisar a adição de LETA na cerâmica vermelha é importante identificar os produtos químicos que constituem as amostras tanto de argila, quanto LETA e as futuras alterações após a sinterização. As tabelas 11 e 12 demonstram os componentes químicos conforme o autor do LETA e da argila respectivamente.

Para determinação quantitativa destes componentes químicos os autores utilizaram a técnica de espectrometria de FRX.

Tabela 11 – Composição química do LETA de diversos estudos

Autor	Ano	% óxidos dos elementos químicos (LETA)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂	Perdas
Dias et al	2008	27,8	26,4	13,5	0,05	0,23	0,13	0,27	-	-	0,95	-	30,67
Kizinievic et al	2013	10,90	1,34	68,65	8,23	0,61	-	-	9,39	0,88	-	-	-
Monteiro et al	2008	24,68	30,39	11,59	0,16	0,17	-	0,35	-	-	0,9	-	31,76
Tatari	2008	24,1	31,6	18,6	-	-	-	0,3	-	2,8	2,2	-	20,4
Vitorino, Monteiro e Vieira	2009	41,12	38,31	16,34	0,25	-	-	0,89	0,64	-	1,16	0,28	1,01
Zamora et al	2008	33,23	31,98	4,94	0,64	0,63	0,41	0,43	0,4	-	0,48	0,32	26,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Composição química da argila de diversos estudos

Autor	Ano	% dos componentes químicos (ARGILA)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂	Perdas
Kizinievic et al	2013	67,52	17,09	6,56	2,14	1,88	-	4,23	-	0,58	-	-	-
Monteiro et al	2008	48,84	25,94	9,14	0,3	0,83	0,46	1,9	-	-	1,3	-	12,06
Tatari	2008	40,2	26,5	9,3	0,5	-	-	-	-	2,3	8,4	-	12,8
Zamora et al	2008	58,26	19,43	5,76	2,47	1,23	1,74	0,94	0,08	-	0,88	0,09	9,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição química de cada uma das matérias primas da cerâmica vermelha tem grande influência no processo. Para realizar uma comparação das modificações ocorridas após a sinterização, pode-se consultar a tabela 13, onde são apresentados os percentuais dos componentes da cerâmica vermelha do estudo de Kizinievic et al (2013). Nota-se que os percentuais dos componentes Si, Al, Fe e Ca principalmente, sofrem alteração conforme a adição de LETA. Esta alteração tem impacto direto nas propriedades de resistência da cerâmica conforme abordado na tabela 14.

Tabela 13 – Composição química da cerâmica vermelha

Autor	Ano	% dos componentes químicos (CERÂMICA VERMELHA)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂	Perdas
Kizinievic et al *	2013	65,13	12,99	10,26	3,37	1,67	1,33	3,92	1,14	0,2	-	-	-
Kizinievic et al **	2013	43,17	8,17	35,25	5,29	1,23	1,00	2,35	3,55	-	-	-	-

* Cerâmica 5 % de LETA; ** Cerâmica 40 % de LETA; ambas sinterizadas à 1050 °C.

Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Propriedades das Cerâmicas com adição de LETA

A utilização de LETA em cerâmica vermelha tem sido abordada por diversos autores e dentre estas abordagens observadas, a tabela 14 apresenta alguns estudos, os quais servirão de base comparativa junto com outras literaturas para os resultados deste trabalho.

Tabela 14 – Resultados de estudos de adição de LETA em Cerâmica Vermelha

Autor	Ano	Formato do corpo de prova	Resfriamento após sinterização	Tempo de duração da Sinterização	% de adição de LETA	Temperaturas máximas de Sinterização (°C)	Absorção de água (%)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Diametral (MPa)	Retração Linear (%)	% de Carga orgânica da cerâmica vermelha
Kizinievic et al.	2013	70 x 70 x 70 mm	ND	34 horas com 4 horas na temperatura máxima	0	1000	14,2	24,6	-	13,0	-
						1050	11,6	39,4	-	15,1	
					5	1000	11,0	48,5	-	11,5	1,1
						1050	4,6	53,8	-	15,2	
					10	1000	12,8	35,6	-	11,7	2,3
						1050	6,5	52,5	-	15,8	
					20	1000	18,0	19,7	-	12,2	4,5
						1050	11,7	40,9	-	16,0	
					30	1000	24,7	16,1	-	12,7	6,8
						1050	16,2	32,0	-	16,5	
					40	1000	28,8	14,0	-	14,8	9,0
						1050	19,8	25,9	-	17,5	
Vitorino, Monteiro e Vieira	2009	Cilindrico - Diâmetro 20,1 mm	Desligando-se o forno	Tx de aquecimento de 2°C / min	0	700	15,7	-	2,8	0,8	Em torno de 9% em peso
					3	700	15,2 - 15,7	-	2,7	0,8	
					5	700	14,5 - 16,5	-	2,6	0,6 - 0,7	
					7	700	14,7 - 16,7	-	2,4 - 2,6	0,5 - 0,7	
					10	700	14,4 - 17,5	-	2,2 - 2,4	0,5 - 0,8	
					0	1040 - 1200	12 - 15	24,5	-	7 - 10	
Zamora et al.	2008	Compressão: 20 x 6 x 4,5 cm Restante dos testes: 15 x 3 x 1 cm	ND	1 hora	17,2	1040	26,1	21,0	-	8,5	12,2
					20	880	26,2	15,4	-	10,3	12,6
					20	1200	22,5	-	-	16,5	
					30	835	35,4	7,8	-	5,0	
					30	1040	24,9	-	-	12,5	14,3
					30	1244	4,6	-	-	18,5	
Monteiro et al.	2008	11,5 x 2,5 x 1 cm	Natural	Tx de aquecimento de 3°C / min + 1 hora na temperatura máxima.	0	700	23,0	6,0	-	1,5	12,1
						900	23,0	9,5	-	3,0	
					3	1100	11,0	24,0	-	9,5	12,6
						700	23,0	5,0	-	1,5	
					3	900	24,0	7,5	-	3,0	13,0
						1100	12,0	19,5	-	9,5	
					5	700	25,0	4,5	-	1,5	13,9
						900	24,0	7,5	-	3,0	
					5	1100	12,0	18,0	-	9,5	13,9
						700	27,0	4,5	-	1,5	
					10	900	27,0	6,0	-	3,5	13,9
						1100	14,0	16,5	-	8,5	
Muller	2009	Bloco cerâmico de 6 furos (não determina dimensões reais)	Desligando-se o forno (24 horas dentro do forno)	ND	0	500	12,3	3,2	-	-	ND
					10	500	15,9	2,1	-	-	
					12	500	15,4	2,1	-	-	
					20	500	Não foi possível a moldagem dos blocos cerâmicos				
Dias	2008	Bloco cerâmico de 6 furos na horizontal. (não informa dimensões reais)	ND	Em torno de 3 dias com aumento gradual da temperatura	0	900	17,0 - 21,9	2,1	-	-	24,5
					10	900	-	1,7	-	-	24,9
					20	900	17,7 - 23,3	1,3	-	-	20,6
					30	900	-	1,0	-	-	24,9
					40	900	-	0,9	-	-	26,3
					50	900	-	0,6	-	-	25,0

ND – Não Disponível

Kizinievic et al. (2013), utilizam corpo de prova em forma de cubo e duas temperaturas de sinterização 1000°C e 1050°C. Neste estudo, conforme demonstrado na tabela 14, uma adição de 5% melhora os resultados de resistência, a retração linear mantém-se na mesma faixa observada no corpo de prova referência, porém a absorção de água na sinterização de 1050°C fica abaixo do especificado na norma NBR 15270-2 (ABNT, 2005b). Nos resultados de adição de 10% de LETA, em comparação com os 5% de adição, a resistência cai bruscamente, porém ainda apresenta melhora em relação ao corpo de prova referência e continua com a absorção de água à 1050°C abaixo do requerido em norma.

Segundo Kizinievic et al. (2013), com a adição de 5% de LETA, a cerâmica aumenta a densidade de 5% a 14%, melhora a resistência de 36 a 50% e diminui a absorção de água de 33 a 60%. Estes resultados de resistência são viáveis pela grande presença de (Fe_2O_3) no LETA, conforme tabela 11.

Para realizar uma comparação mais eficiente entre os autores decidiu-se verificar qual a carga orgânica que cada um dos estudos obteve, visto que este dado será essencial para os ensaios de absorção de água, resistência à flexão e retração linear, que são apresentados na tabela 14.

Os resultados altos de resistência de Kizinievic et al. (2013) podem sim ter influência do (Fe_2O_3), porém não é a única resposta para isso. O percentual de matéria orgânica da cerâmica vermelha utilizada neste estudo é inferior a qualquer outro demonstrado na mesma tabela, o que contribui para uma resistência superior quando se compara com os outros estudos. Além disto, pode-se relacionar como outro fator preponderante para o resultado de resistência, o tempo de sinterização, onde o corpo de prova fica trinta e quatro horas dentro do forno, sendo que deste tempo, quatro horas na temperatura máxima, acima do intervalo de transformação cristalina conforme Pinheiro e Holanda (2010).

No estudo realizado por Vitorino, Monteiro e Vieira (2009), foi concluído que os resíduos do decantador e do filtro não alteraram a plasticidade e trabalhabilidade da argila, já após a sinterização, estas adições aumentaram a absorção de água em até 11% e reduziram a resistência mecânica de 4% até 22%. O estudo foi feito com adições de LETA de 3%, 5%, 7% e 10%, onde conforme conclusão, a maior restrição do uso do LETA está relacionada à redução da resistência mecânica da cerâmica.

Vitorino, Monteiro e Vieira (2009), utilizaram um corpo de prova cilíndrico de diâmetro 20,1mm para ensaio de resistência, onde realizaram o ensaio de resistência

diametral. Este ensaio de resistência não é utilizado para cerâmica vermelha e sim para concreto, o que inviabiliza a comparação deste parâmetro com qualquer outro autor citado na mesma tabela.

A retração linear pequena do estudo de Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) pode ser explicada pela baixa temperatura de sinterização. Nesta faixa de temperatura normalmente não ocorre o preenchimento dos poros abertos pela evaporação de matéria orgânica e água. Acontece o começo da cristalização da matéria, onde há a aproximação das partículas maiores, sem ocorrer fusão e o preenchimento dos vazios. (BLOOT, 2010). A temperatura é determinante na retração e resistência, as quais na cerâmica vermelha, atingem valores máximos a partir dos 900°C, onde as reações de vitrificação acontecem, ou seja, o estado de fusão da massa, contribuindo para valores mínimos de porosidade. O início da vitrificação apenas acontece a 700°C quando há grande quantidade de minerais como o K₂O que funde a 695°C. A parte fundida da massa incorpora as partículas sólidas, forçando a sinterização. (CALLISTER, 2012).

Os autores Zamora et al. (2008), atribuíram a adição de lodo como um componente de cerâmica vermelha uma excelente saída para a destinação final do material. A adição de LETA com grãos maiores do que a argila, parece limitar a extensão da reação química envolvida e fornece uma estrutura sólida que melhora a forma dos tijolos. A baixa densidade dos corpos de prova com LETA produzidos, em média 1,22g/cm³, pode ser atribuída principalmente à absorção do H₂O pela reação de formação da Caulinita. Os autores utilizaram percentuais de adição de lodo de 17,2%, 20% 30% e 40%.

No estudo de Zamora et al (2008), verifica-se que os níveis de adição de LETA são muito elevados chegando a 40%, assim como os utilizados por Kizinievic et al. (2013). Porém, diferentemente de Kizinievic et al. (2013), Zamora et al (2008) utilizam uma mistura (Argila + LETA) com percentual alto de carga orgânica, variando de 9,3% à 16%, ou seja, com mais elementos voláteis. Este fator pode ter contribuído para os resultados de resistência 5,2 MPa à 24,5 MPa, menores que os encontrados por Kizinievic et al. (2013) de 14 MPa à 53 MPa.

A conclusão do estudo de Zamora et al. (2008), foi que a otimização do processo de produção da cerâmica vermelha com a utilização do LETA somente será possível com a investigação sobre a natureza das reações que ocorrem durante o processo de fusão dos materiais.

Segundo Monteiro et al (2008), uma incorporação de 10% do LETA em relação à massa de argila, causa um aumento de 3 a 4% na absorção de água e diminui em torno de 30% a resistência mecânica, no entanto, a sua incorporação deve ser feita em baixa porcentagem, para evitar danos na qualidade do produto final.

Ao realizar uma comparação entre o estudo de Muller (2009) e o estudo realizado por Dias et al. (2008), verifica-se que os resultados de resistência encontrados por Muller (2009), 2,1 a 3,2 MPa, são melhores do que os resultados de Dias et al. (2008), 0,6 a 2,1 MPa. Estes resultados podem ter diversas causas, mesmo Muller (2009), mesmo tendo uma temperatura de sinterização de 500°C, menor do que a utilizada por Dias et al. (2008) de 900°C, o percentual de carga orgânica, tempo de sinterização assim como a composição química do LETA e da argila podem influenciar os resultados.

Assim, se verifica que qualquer comparação entre os estudos relacionados na tabela 14 não pode ser direta, tão pouco existe uma relação linear pois há diversas propriedades que afetam o resultado final, principalmente pelos diversos tipos de dimensões e formas das cerâmicas. Além deste, outros aspectos também dificultam uma relação apropriada, visto que tempo, velocidade e temperatura de sinterização, são as mais diversas, assim como os tipos de argila são heterogêneos.

Ressalta-se que não há uma metodologia de análise consolidada para este tipo de estudo, há necessidade de padronização dos métodos para que seja possível a comparação entre os resultados.

Para que seja possível a incorporação de LETA na cerâmica vermelha, o primeiro passo é estabelecer critérios, nos quais o teor de adição, temperatura, tempo de sinterização, tempo de secagem e outras características do processo, deverão ser adequadas visando atender ao requisito pré-estabelecido. Os blocos de cerâmica vermelha aplicados em vedação devem atender minimamente os itens da norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) e quando aplicados em alvenaria estrutural, devem atender a norma NBR 15270-2 (ABNT, 2005b), conforme a aplicação requerida.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as origens dos materiais, metodologias de coleta, preparação dos corpos de prova e caracterizações tanto das matérias primas, bem como dos corpos de prova, que foram utilizadas para a realização do trabalho.

3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Neste item são apresentados os fatores de controle e as variáveis de resposta do programa experimental.

3.1.1 Fatores de controle

a) Fatores de controle com nível variável

O **Lodo de Estação de Tratamento (LETA)** foi coletado em três períodos distintos, a fim de verificar-se a variabilidade das suas características e o efeito desta nas propriedades ao empregá-lo na produção de cerâmicas vermelhas. Os níveis de estudo foram definidos como coleta ou LETA 1, 2 e 3. Em algumas ocasiões, para fins de análise, o LETA foi identificado pelo seu teor de sólidos fixos e voláteis.

A influência da **temperatura de queima**, ou de sinterização, foi estudada neste trabalho em três níveis, sendo eles 800°C, 950°C e 1050°C. Estas temperaturas foram escolhidas para possibilitar a análise dos impactos da transformação cristalina da cerâmica que ocorre entre os 900°C e 1000°C, conforme afirmação de Pinheiro e Holanda (2010). A temperatura de 800°C também foi escolhida para contemplar a faixa de temperaturas usuais de sinterização de cerâmicas vermelhas que é de 800°C à 1100°C. (KAZMIERCZAK, 2010).

b) Fatores de controle com nível fixo

A **Argila** empregada no trabalho foi coletada em um único lote, caracterizando um fator de controle de nível fixo;

O **Teor de LETA** foi fixado em um único nível de estudo (5% de adição), a fim de facilitar a compreensão do efeito da sazonalidade (período de coleta) do LETA nas propriedades do material cerâmico.

3.1.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta são as propriedades estudadas com o propósito de verificar a influência da variabilidade do LETA, obtido em diferentes períodos, no comportamento do material cerâmico, sendo elas:

- Absorção inicial – método NBR – AAI ($\text{g}/193,55 \text{ cm}^2/\text{min}$);
- Absorção de água – método NBR – AA (g);
- Coeficiente de absorção de água – método RILEM – S ($\text{mm}/\text{h}^{1/2}$);
- Retração linear (%);
- Resistência à flexão (MPa).

3.2 ARGILA

A argila utilizada para o trabalho foi obtida na região da grande Porto Alegre – RS. A mesma é utilizada para a fabricação de blocos cerâmicos.

Foram coletados 120 kg de argila, após a sua passagem pela máquina extrusora, pois neste momento a argila se encontra homogeneizada e com o teor de umidade próximo daquele necessário para a extrusão em equipamento de laboratório. A figura 15 apresenta o material coletado ao ser extrudado.



Figura 15 – Blocos de argila após a extrusão

Para a caracterização da argila, foi utilizado o limite de plasticidade. Os ensaios de limite de plasticidade foram executados com as 4 amostras de argila (REF, argila + LETA1, argila + LETA2, argila + LETA3), para se proceder ao ajuste de teor de umidade em função do equipamento e das adições de LETA, garantindo uma extrusão adequada.

O ensaio foi realizado conforme norma NBR 7180 (ABNT, 1984b). O LETA adicionado no ensaio foi seco em estufa a 60°C , a fim de evitar a evaporação de sólidos voláteis. A figura 16 mostra as imagens do ensaio de limite de plasticidade sendo realizado.



Figura 16 – Etapas do ensaio de limite de plasticidade

3.3 LODO DE ETA (LETA)

O lodo de ETA foi gerado em uma estação de tratamento de água do Vale dos Sinos/RS. Nesta ETA, é realizado o tratamento da água e geração do LETA pelas etapas de coagulação, com o uso de sulfato de alumínio, floculação, sem a adição de nenhum floculante, filtração e por fim desinfecção e ajuste de pH com cloro e cal respectivamente.

Coletou-se 1000 litros de lodo e as amostragens ocorreram em 07/08/2013, em 01/12/2013 e em 09/03/2014. Na figura 17 é possível observar o LETA em um dos tanques de decantação, na data da primeira amostragem.



Figura 17 – LETA em tanque de decantação

O emprego de LETA foi realizado em um teor de 5% em adição à massa de argila.

Para viabilização do emprego de LETA como adição à massa de argila é necessário extrair o excesso de água que o compõe, pois o alto teor de água da fase líquida, confere ao lodo uma fluidez que inviabiliza a aplicação direta.

O LETA em estudo foi compactado em um filtro prensa, cedido por empresa de bombas da região, situada na cidade de Portão – RS. Segundo dados do fabricante, as concentrações de sólidos podem chegar a mais de 80% em função da mistura com 99,8% de captura. Para auxiliar a extração de água do LETA na prensagem foi adicionado cal para que o pH do LETA chegasse ao requerido como parâmetro pelo fabricante, realizando a reação química da equação 1 (DEMATTOS et al.,2001). Os parâmetros de prensagem do equipamento utilizado são apresentados na tabela 15, conforme especificação do fabricante.

Tabela 15 – Características e parâmetros de trabalho do filtro prensa

Características de trabalho	Valor
Pressão de trabalho:	150 bar
Pressão da bomba:	7,5 bar
Tempo de prensagem	45 min
Tempo de passagem de ar:	10 min
pH do LETA	11,5 – 12
Quantidade de placas:	6 placas

A adição de cal tornou-se necessária devido ao uso do equipamento para a secagem do LETA. Sabe-se que com isso ocorreu uma mudança nas propriedades do LETA, as quais serão observadas nos ensaios de caracterização tanto do LETA como da cerâmica vermelha.

3.3.1 Caracterização do LETA

Para a caracterização do LETA, foram utilizados os ensaios de sólidos totais e voláteis, caracterização química por Fluorescência de Raios X (FRX); caracterização mineralógica por Difração de Raios X (DRX); lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004b) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c). A Figura 18 apresenta o organograma dos ensaios executados.

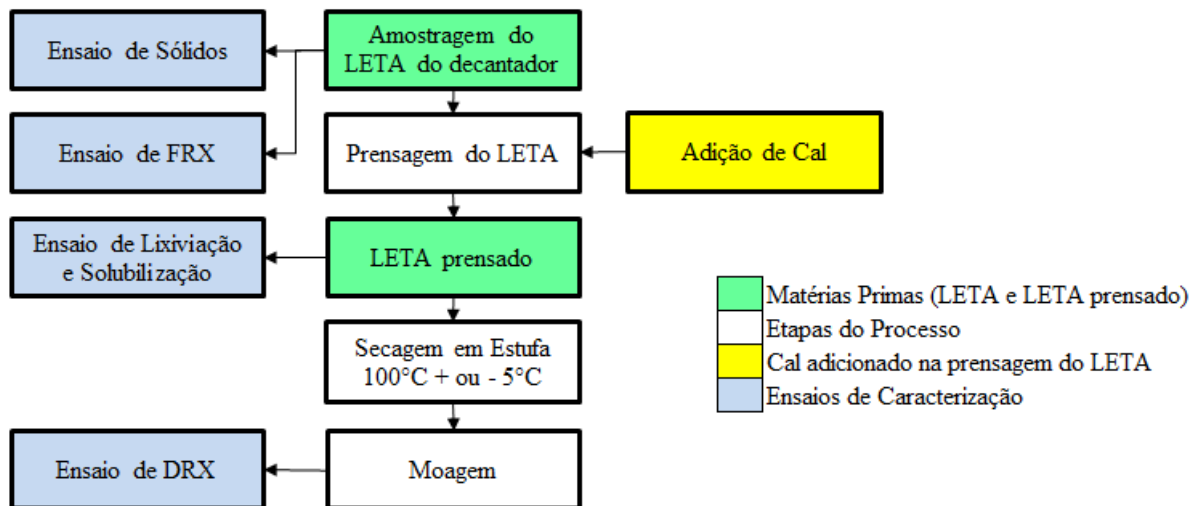


Figura 18 – Organograma dos ensaios de caracterização dos LETAS

Fonte: Elaborado pelo autor

a) Teor de Sólidos

Os ensaios para quantificação de sólidos foram executados para possibilitar a relação das propriedades cerâmicas com a quantidade de sólidos voláteis, fixos e totais apresentados no LETA. Os ensaios foram realizados com o LETA retirado do decantador conforme norma SMEWW 2540 (APHA, 2008).

Estes ensaios também foram utilizados por Richter (2001), Vanacor (2005), Muller (2009), Souza (2009), Oliveira (2010) e Marques et al. (2011) para a quantificação dos sólidos contidos no LETA conforme tabela 6.

b) Caracterização química por Fluorescência de Raios X - FRX

O ensaio de FRX foi realizado com a amostra de LETA retirada diretamente do decantador e assim como a argila, foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da UNISINOS, em espectrômetro de fluorescência de raios-x por Energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu do Brasil Comércio Ltda.

c) Difração de Raios X - DRX

Para se verificar as diferenças cristalinas das 3 amostras de LETA, foram realizados ensaios de difratometria de raios X (DRX). O LETA prensado, seco e após um processo de moagem em grau de ágata, para se atingir uma granulometria requerida pelo

equipamento, abaixo de 44 μm , foi submetido ao ensaio. Esta técnica também foi utilizada pelos autores da Muller (2009) e (Kizinievic et al., 2013), para a caracterização dos LETAS.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Física da UFRGS, no difratômetro marca Siemens D5000. Os difratogramas foram obtidos utilizando uma fonte de $\text{CuK}\alpha$ e as medições foram de 2 a 140°, passo de 0,05/s. Os resultados foram analisados pelo software X'Pert High Score e sua respectiva base de dados.

d) Caracterização ambiental

A caracterização ambiental dos LETAS prensados, foram realizadas empregando-se os ensaios de lixiviação e solubilização, executados conforme NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c) em laboratório contratado.

3.4 PRODUÇÃO DAS CERÂMICAS

A figura 19 apresenta etapas de produção das cerâmicas em laboratório.

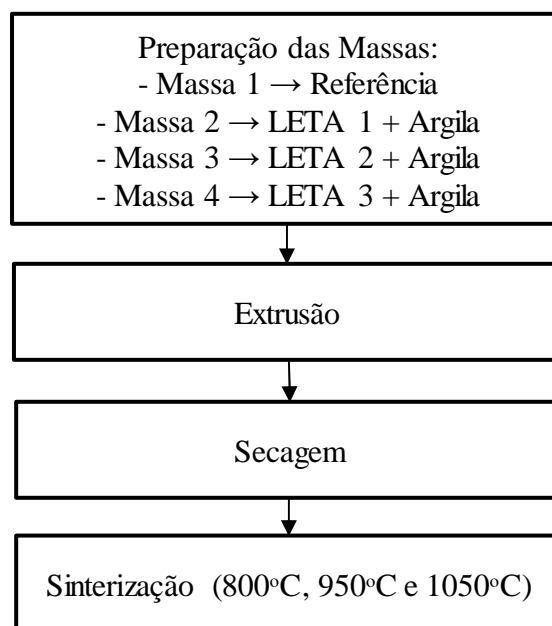


Figura 19 – Organograma das etapas de produção das cerâmicas em laboratório

Fonte: Elaborado pelo autor

As características específicas do processo produtivo cerâmico como propriedades da extrusão e variações que isto pode gerar no processo produtivo não serão alvo da proposta do estudo experimental, visto que estas e outras características podem influenciar direta ou indiretamente as propriedades dos corpos de prova.

3.4.1 Preparação das argilas

Nesta etapa foi onde foram realizadas as preparações das argilas de referência e com adição de LETA para a sinterização dos corpos de prova.

A Massa 1, composta somente por argila, é o material de referência. Após a coleta diretamente da saída da extrusora de blocos na olaria, o material amostrado foi colocado em sacos plásticos, que foram acondicionados em sala com temperatura e umidade controlada ($20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade aproximadamente 70%), evitando a alteração de propriedades, em especial a plasticidade em função da perda de umidade. A preparação para conformar os corpos de prova na extrusora do laboratório, o material coletado foi simplesmente fracionado de forma a possibilitar o abastecimento da máquina.

Para as misturas com LETA, primeiramente foi realizado um estudo piloto, empregando-se 10% de LETA 1, obtido na primeira amostragem. No entanto, observou-se que, mesmo após a homogeneização completa este percentual de adição se mostrou inadequado para a conformação de corpos de prova. Assim, testou-se novamente a mistura de argila com teor de 5% de LETA 1, e o resultado obtido confirmou as informações levantadas na revisão bibliográfica como sendo 5% o teor viável para uso em material cerâmico. O procedimento de mistura foi realizado com as amostras de argila, na forma de blocos de 6 furos, que foram fragmentados manualmente em pequenos pedaços, até um montante de 30kg. Esta quantidade foi dividida em 2 partes iguais de 15 kg. Sobre uma bancada devidamente preparada para que não ocorresse contaminação, distribuiu-se uma camada de 15 kg de argila, sobre a qual distribuiu-se uniformemente uma camada de 1,5 kg de LETA (5% do peso da argila), cobrindo-a com uma segunda camada de 15 kg de argila, formando uma espécie de “sanduíche” A figura 20 apresenta a introdução do LETA, na forma de camadas, na amostra de argila.

Para a homogeneização completa, o material foi misturado passando-o 2 vezes pela extrusora. O primeiro abastecimento da extrusora foi realizado sempre em frações de mesmas dimensões do material composto pelas 3 camadas. Depois de todo material passar pela extrusora a primeira vez é que se completou a homogeneização, passando o material uma segunda vez pela extrusora.



Figura 20 – Preparação da massa com adição de LETA

A massa 3, composta por argila e LETA 2, oriundo da segunda amostragem, e a massa 4, composta por argila e LETA 3, obtido na terceira amostragem, também empregaram o teor de 5% de adição em relação à massa total de argila, realizando-se a mistura e homogeneização conforme já descrito.

3.4.2 Produção dos corpos de prova

Para a produção dos corpos de prova, empregou-se a extrusora Modelo 051, da marca Verdés, do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS. Após a dupla homogeneização da mistura, procedeu-se à extrusão para obtenção dos corpos de prova, com dimensões de 86mm de comprimento, 27mm de largura e 18mm de espessura (altura), sendo este o tamanho padrão do equipamento.

A figura 21(a) mostra a extrusão dos corpos de prova com 5% de adição de LETA. As figuras 21 (b) e (c) exemplificam dois corpos de prova com rebarbas laterais e desprendimento de pedaços no momento do corte, um indicativo de que a umidade estava no limiar para a extrusão.

Salienta-se que no equipamento utilizado não é possível ajuste de variáveis como velocidade e pressão na extrusão e a única variável é a composição da argila.

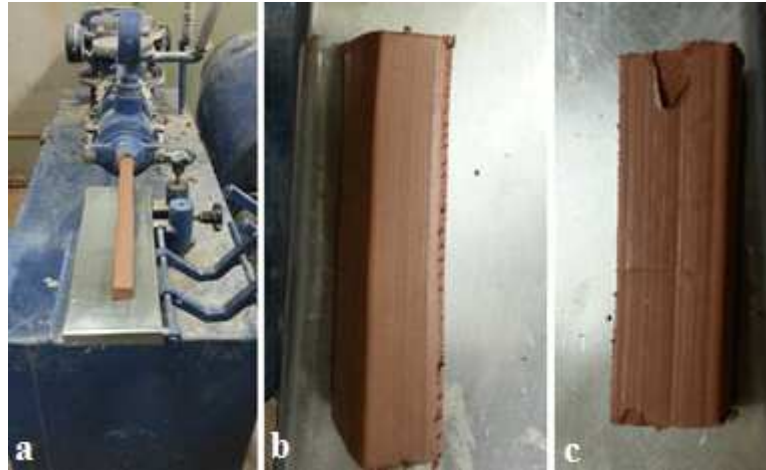


Figura 21 – Extrusão dos corpos de prova e corpos de prova com problemas

O equipamento empregado teve um rendimento aproximado de 50% em relação ao consumo de material, pois na extrusão de cada uma das 4 misturas cerca de 15 kg de amostra ficam retidos na maromba.

Ao todo, foram extrudados 114 corpos de prova para cada uma das misturas, totalizando 456 corpos de prova. A tabela 16 demonstra a quantidade de corpos de prova separados para cada ensaio que foi realizado.

Tabela 16 – Quantidade dos corpos de prova extrudados conforme ensaio realizado

Descrição	Temperatura	Quantidade de corpos de prova (Unidades)		
		Resistência à flexão + Lixiviação e Solubilização	ICP-OES + DRX + Perda ao fogo	Absorção de água
Referência – CPA	800°C	20	8	10
	950°C	20	8	10
	1050°C	20	8	10
Adição do Leta 1 – CPB	800°C	20	8	10
	950°C	20	8	10
	1050°C	20	8	10
Adição do Leta 2 – CPC	800°C	20	8	10
	950°C	20	8	10
	1050°C	20	8	10
Adição do Leta 3 – CPD	800°C	20	8	10
	950°C	20	8	10
	1050°C	20	8	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Secagem

Antes de realizar a sinterização, na sequência da conformação, os corpos de prova foram colocados em sala climatizada com temperatura de $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de

aproximadamente 70%, sobre um pano úmido, por 24h. (BERSCH, 2011). O objetivo desta etapa é garantir uma perda lenta do excesso de água, procurando-se evitar trincas e deformações. Nas 24h posteriores, os corpos de prova permaneceram sem o pano, sob secagem ao ar para completar a redução do teor de água livre. A última etapa da secagem foi realizada em estufa na temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por mais 24 horas.

3.4.4 Sinterização

Com os corpos de prova secos, foi executada a sinterização em forno tipo mufla. A taxa de aquecimento utilizada foi de $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e patamar de 12 h de queima. Para a fabricação de blocos cerâmicos esta é uma configuração tx de aquecimento usual. (KAZMIERCZAK, 2010). Os corpos de prova foram dispostos deitados, apoiados na lateral de menor dimensão, obtendo uma economia de espaço, boa circulação de ar entre eles e apenas duas sinterizações por temperatura. A figura 22 mostra os corpos de prova colocados para sinterização dentro do forno mufla.



Figura 22 – Corpos de prova dispostos dentro do forno mufla para sinterização

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS

Para realizar a caracterização dos corpos de prova cerâmicos, foram realizados os ensaios de perda ao fogo, DRX, ICP-OES, lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004b) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c).

3.5.1 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a norma CEMP número 120, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da UNISINOS. Para cada tipo de cerâmica, se empregou um corpo de prova.

3.5.2 Difração de Raios X - DRX.

Os ensaios de DRX foram executados para caracterizar mineralogicamente a cerâmica, assim como para verificar os impactos da transformação cristalina que ocorre a partir de 900°C na cerâmica (PINHEIRO; HOLANDA, 2010). Foram realizados no Laboratório de Física da UFRGS, no difratômetro marca Siemens D5000 e os difratogramas foram obtidos utilizando uma fonte de $\text{CuK}\alpha$ e as medições foram de 2 a 140°, passo de 0,05/s. Os resultados foram analisados pelo software X'Pert High Score e sua respectiva base de dados.

3.5.3 Espectrometria de Emissão Óptica em Plasma de Argônio Indutivamente Acoplado (ICP-OES)

A amostra para a análise química por ICP-OES foi obtida após a cominuição de corpos de prova, com o auxílio de um martelo de borracha e enviada para o laboratório externo.

3.6 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Para verificar as propriedades físicas e mecânicas, foram executados os ensaios de retração linear, resistência à flexão e absorção de água.

3.6.1 Retração linear

Entre os ensaios de caracterização das propriedades da cerâmica vermelha, a retração linear foi o primeiro ensaio a ser executado após a sinterização dos corpos de prova. Este é um ensaio empregado no estudo de cerâmicas vermelhas e os resultados podem indicar a influência da adição do LETA no comportamento da cerâmica vermelha, bem como o efeito das 3 temperaturas de sinterização estudadas e a interação entre emprego de lodo e temperatura de queima.

A retração linear foi calculada conforme equação 5, marcando com auxílio de um paquímetro, o corpo de prova em uma medida de 6 cm, logo após a extrusão. Após realizar o processo de sinterização e resfriamento dos mesmos, foram medidas as peças no local demarcado, repetidamente 3 vezes, com isso realizou-se a média aritmética das medidas, obtendo-se o resultado.

3.6.2 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão é um ensaio para verificar esta propriedade mecânica da cerâmica e foi realizado conforme norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005c), no equipamento universal de ensaio EMIC, modelo DS 2000, pertencente ao Laboratório de

Materiais de Construção da UNISINOS. A figura 23 apresenta o ensaio em andamento, onde um corpo de prova aparece rompido.



Figura 23 – Ensaio de resistência à flexão – rompimento de corpo de prova

3.6.3 Absorção de água

A absorção de água dos foi caracterizada pelos ensaios de índice de absorção inicial (AAI) e índice de absorção de água (AA) conforme norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005c). Ainda foram conduzidos ensaios de absorção de água ao longo do tempo, conforme método adaptado da recomendação técnica RILEM TC 116-PCD: 1999.

O índice de absorção de água inicial (AAI) foi calculado de acordo com a equação 7 definida na norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005c).

$$AAI = 193,55 * (\Delta p / \text{Área})$$

Equação 7

Onde:

- AAI é o índice de absorção d'água inicial (sucção) da face ensaiada dos blocos, expresso em (g/193,55cm²) /min;
- Δp é a variação de massa obtida no ensaio, em gramas;
- Área é a área bruta dos blocos ensaiados, em centímetros quadrados.
- O índice de absorção de água AA foi calculado de acordo com a norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005c), expresso pela equação 8.

$$AA(\%) = ((\mu - ms) / ms) * 100$$

Equação 8

Onde:

- AA é o índice de absorção d'água;
- μ representa a massa úmida;
- ms representa a massa seca.

A figura 24 mostra o ensaio de AA em andamento.

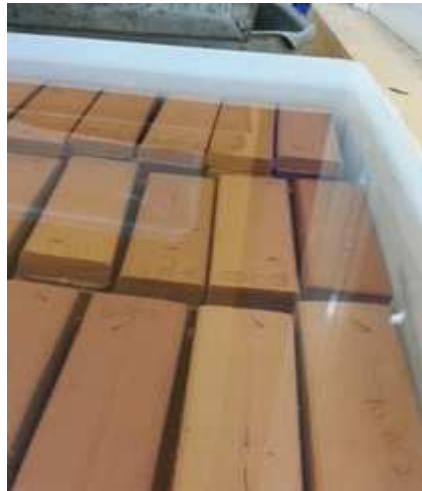


Figura 24 – Ensaio de AA em andamento

O ensaio da recomendação técnica RILEM TC 116-PCD: 1999 foi realizado com pesagens sucessivas nos tempos 0 min, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h, e 72h. Com este ensaio é possível traçar um perfil de absorção, calcular a taxa ou coeficiente de absorção capilar e ainda a porosidade capilar e total.

Foram utilizados 3 corpos de prova para cada temperatura e adição de LETA, os quais foram embalados deixando apenas a parte inferior descoberta e em contato com a água, utilizou-se fita tape nas faces laterais e na face superior, cobriu-se com um plástico. A figura 25(a) mostra o esquema de ensaio de absorção do método adaptado de RILEM TC 116-PCD: 1999, a Figura 25 (b) mostra o ensaio em cerâmicas em andamento, e a figura 25 (c) mostra um exemplo de gráfico com absorção de água ao longo do tempo.

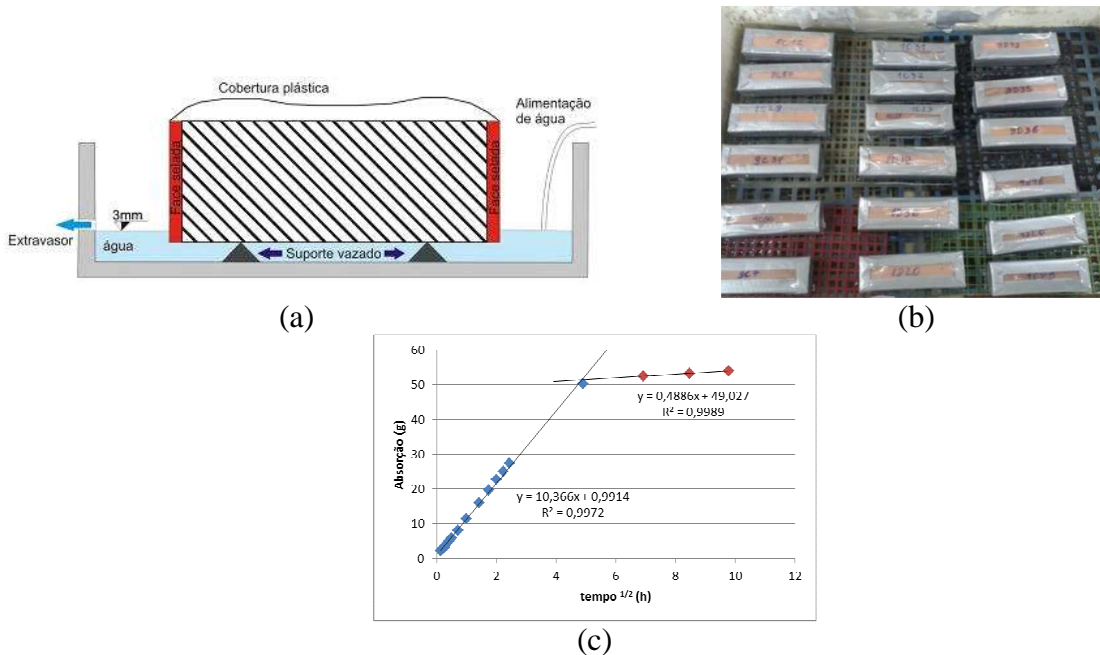


Figura 25 – Ensaio de absorção de água – método RILEM: (a) croqui esquemático do corpo de prova em ensaio, (b) ensaio em andamento, (c) Gráfico de absorção ao longo do tempo

Fonte: (a) Werle (2010)

3.7 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A caracterização ambiental das cerâmicas foi realizada pelos ensaios de lixiviação e solubilização, respectivamente pelos métodos NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e NBR 10.006 (ABNT, 2004c), executados com o intuito de caracterizar e classificar ambientalmente a cerâmica com e sem adição de LETA, pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Para este ensaio, foram empregados os corpos de prova sinterizados à 950°C submetidos ao ensaio de resistência à flexão. Esta temperatura foi utilizada pois se enquadra no intervalo de transformação cristalina das cerâmicas. (PINHEIRO; HOLANDA, 2010). Para adequar a amostra aos ensaios, os corpos de prova foram também moídos até obterem-se tamanhos de grãos menor que 9,5 mm, com o auxílio de um martelo de borracha. A figura 26 mostra o material preparado para o ensaio de lixiviação e solubilização.



Figura 26 – Material preparado para envio ao laboratório

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E DOS LETAS

4.1.1 Limite de Plasticidade da argila

A tabela 17 apresenta os resultados dos limites de plasticidade da argila referência e das argilas com adição de 5% de LETA.

Os limites de plasticidade resultaram em valores muito próximos entre as amostras. Este fato deve-se provavelmente a baixa adição de LETA na argila e aos demais fatores contribuintes e que influenciam a plasticidade. Dentre estes fatores pode-se citar a mineralogia, a granulometria, a carga elétrica dos cristais e a natureza dos cátions de troca. (OLIVEIRA; MACHADO; HOLANDA, 2004).

Tabela 17 – Resultados dos limites de plasticidade

Amostra	Adição	Limite de Plasticidade
Argila – referência	0%	25,00%
Argila com amostra de LETA 1	5%	24,80%
Argila com amostra de LETA 2	5%	24,90%
Argila com amostra de LETA 3	5%	24,50%

Os valores de limite de plasticidade ficam dentro da faixa estabelecida por Santos et al. (2012), muito próximos do limite superior, onde as argilas têm de 18% a 25% de limite de plasticidade. Embora a adição de LETA tenha alterado o limite de plasticidade no estudo de Oliveira, Machado e Holanda (2004), resultados semelhantes entre as adições, também foram encontrados por estes, onde com 5 e 10% de adição de LETA obtiveram o mesmo resultado de limite de plasticidade. Verifica-se que há diversos fatores que influenciam na variabilidade dos limites de plasticidade, inclusive a umidade, a qual tem variabilidade em função das características da argila conforme Kazmierczak (2010).

4.1.2 Teor de sólidos dos LETAS

a) LETA coletado do decantador

Os valores dos ensaios de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV), nas 3 amostras de LETA são apresentadas na tabela 18.

Tabela 18 – Sólidos em cada amostra de LETA pré prensagem

Amostra	ST (%)	STF (%)	STV (%)	% (STV / ST)	Data da amostragem
LETA 1	5,8	3,4	2,4	42	07/08/2013
LETA 2	8,5	6,5	2,0	23	01/12/2013
LETA 3	7,5	6,0	1,5	20	09/03/2014

Percebe-se uma diferença quanto ao percentual de sólidos. O LETA 1 apresenta o menor percentual de sólidos totais (5,8%), porém o maior percentual de sólidos voláteis (2,4%), isto implica em um grande percentual (42%) de sólidos totais voláteis sobre sólidos totais (STV/ST), acima dos outros dois LETAS. O LETA 2 apresenta o maior número de sólidos totais (8,5%) e o LETA 3 apresenta o menor percentual de sólidos voláteis (1,5%), diferenças que praticamente se anulam quando se verifica o percentual de STV/ST, onde o LETA 2 e LETA 3 apresentam valores muito semelhantes, 23% e 20%.

Estas mudanças nos percentuais podem ser explicadas em parte pela análise da água nas datas das coletas e em parte, pelo tempo de limpeza dos decantadores onde os lodos foram coletados.

A tabela 19 apresenta os valores de análise da água, fornecidos pela ETA, nos 3 meses em que foram amostrados os LETAS.

Tabela 19 – Análises da água do rio nos meses correspondentes à coleta do LETA

Dados	1º coleta	2º coleta	3º coleta
Data amostragens	07/08/2013	01/12/2013	09/03/2014
Mês	Ago	Dez	Mar
Temperatura (°C)	14,6	24,8	23,3
Turbidez (uT)	56,0	80,5	47,1
Cor (uC)	317,5	310,1	119,7
Dureza (mg/L CaCO ₃)	24,8	29,5	25,5
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	24,6	28,2	29,0
CO ₂ Livre (mg/L CO ₂)	8,6	12,2	13,8
O ₂ Dissolvido (mg/l O ₂)	6,3	3,3	3,1
Matéria Orgânica (mg/L O ₂ consumido)	9,1	5,9	5,8
Condutibilidade Elétrica (µS/cm)	73,5	99,9	99,0

A tabela 20 apresenta as datas de limpezas dos decantadores da ETA, onde foram coletadas as 3 amostras de LETA.

Tabela 20 – Datas de limpeza do decantador e dias entre as limpezas

Datas de limpeza do decantador	Quantidade de dias entre as limpezas
02/07/2013	-
07/08/2013 *	36
18/09/2013	42
01/12/2013 **	74
09/03/2014 ***	98

* 1º amostra de LETA; ** 2º amostra de LETA; ***3º amostra de LETA.

Realizando uma análise sobre os valores percentuais dos sólidos, percebe-se que o LETA 1, tem mais sólidos voláteis do que os outros dois LETAS. Conforme tabela 19, a água nesta data de coleta, apresentava 9,1 mg/L de oxigênio consumido, indicando uma maior quantidade de matéria orgânica na própria água que foi tratada pela ETA. Quanto mais degradação orgânica, mais oxigênio requerido. (KIM et al., 2000).

A pequena quantidade de sólidos totais do LETA 1, pode ser explicada pelo pequeno tempo de limpeza do decantador entre a primeira amostra de LETA e a anterior a esta. Como se pode verificar na tabela 20, este tempo é de 36 dias, muito inferior aos 98 dias entre a segunda e terceira amostragem. Desta forma, acredita-se que o número de 7,5% de sólidos totais presentes na amostra do LETA 3 é o efeito do longo tempo (98 dias) entre as limpezas do decantador. A concentração de sólidos no lodo decantado aumenta com o tempo de retenção no decantador. (RICHTER, 2001).

Segundo informações de operação da ETA, a limpeza dos decantadores é preferencialmente feita todos os meses, no entanto a demanda de água tratada, escala de operadores e condições climáticas influenciam esta frequência.

Conforme tabela 18, a amostra de LETA 2 apresenta valores de sólidos totais mais elevados do que o LETA 3, esta diferença pode ser explicada pela alta turbidez da água conforme se verifica na tabela 19. Turbidez pode ser definida como o grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma quantidade de água, devido às partículas presentes. (PAVANELLI, 2001). Além da turbidez, verifica-se que a diferença da água nestas datas é de 80,5 uT para o LETA 2, enquanto a água que gerou o LETA 3 apresenta valor de 47,1 uT, diferença que pode ser verificada também pela alta do consumo de coagulante sulfato de alumínio, expressos na tabela 21, onde a data de coleta do LETA 2 apresenta o maior consumo de coagulante.

Tabela 21 – Quantidade de sulfato de alumínio utilizado na ETA 2

Mês	Sulfato de Al (kg)
ago/13	75.940
dez/13	83.160
mar/14	79.880

O aumento da turbidez da água exige alteração na dosagem de coagulantes nas estações de tratamento de água e gera maior quantidade de sólidos no decantador. (CETESB, 2009), (PAVANELLI, 2001), (CORNWEL, 1987), (RICHTER, 2001).

b) LETA prensado

A caracterização do LETA prensado é apresentada na tabela 22. Nota-se uma diferença de 19% entre os STF dos LETAS 1 e 2 comparados com o LETA 3. Esta variabilidade ocorre em função do teor de sólidos e da quantidade de cal adicionada para a prensagem do LETA, visto que os parâmetros iniciais de prensagem exigem uma faixa de pH entre 11,5 à 12,0 sendo corrigido com a adição de CaO.

Tabela 22 – Percentual de sólidos e umidade em cada amostra de LETA prensado

Amostra	ST (%)	STF (%)	STV (%)	% (STV / ST)	Umidade (%)
LETA 1	58,8	37,7	21,1	35,9	41,2
LETA 2	49,3	37	12,3	25,0	50,7
LETA 3	56,8	46	10,8	19,0	43,2

4.1.3 Caracterização química dos LETAS por FRX.

Na tabela 23 são apresentados os resultados da análise química qualitativa obtidos através da técnica de FRX para as 3 amostras de LETA. Também foi realizada a análise do CaO adicionado para a realização da prensagem do LETA, a fim de identificar os possíveis contaminantes do mesmo.

Tabela 23 – Resultados da FRX sobre as amostras de LETA e CaO

Descrição da amostra	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos Traços (< 5%)
LETA - Amostra 1	Fe	Si, S, Al	Ca, K, Mn
LETA - Amostra 2	Fe	Al	Ti, Si, K, Mn, Ca, V
LETA - Amostra 3	Fe	Al	Ti, Si, K, Mn, Ca, Zn, V
CaO	Ca	Fe, Si	Mg, Al, K, Ti, Mn, Sr, Rb

Em uma análise comparativa entre as 3 amostras de LETA, percebe-se mudanças entre as amostragens. Verifica-se que a primeira amostra de LETA contém S na composição química, como elemento de menor quantidade, já as outras duas amostras, contém o elemento Ti, como elemento traço, o qual não aparece como composição do LETA 1. Verifica-se também que a quantidade de Si é maior na primeira amostra do que na segunda e terceira.

Percebe também que a CaO apresenta elementos de menor quantidade Fe e Si, assim como o Mg, elemento traço que chama a atenção como um componente que não aparece nas amostras de LETA. Desta forma, os elementos Fe e Si no LETA prensado, apareceram com uma maior quantidade, devido à adição de CaO.

Por fim, os ensaios corroboram os resultados da bibliografia, onde a maior quantidade de material é composta pelos componentes Fe e Al. (KIZINIEVIC et al., 2013), (MONTEIRO et al., 2008), (TATARI, 2008) e (ZAMORA et 2008).

4.1.4 Caracterização mineralógica dos LETAS prensados por DRX.

Os difratogramas obtidos das amostras de LETA 1,2 e 3 são apresentados neste item nas figuras 27, 28 e 29.

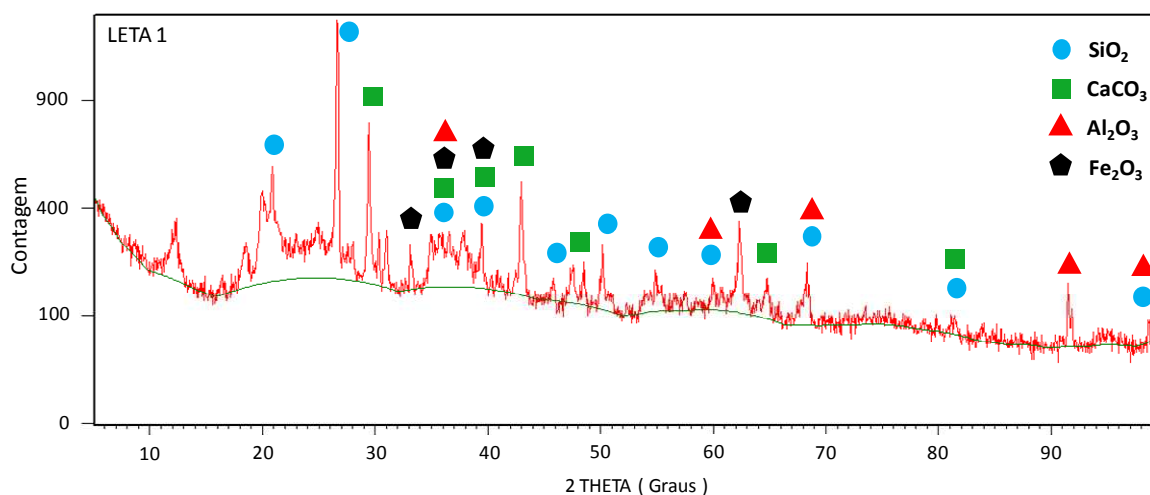


Figura 27 –Difratograma do LETA 1

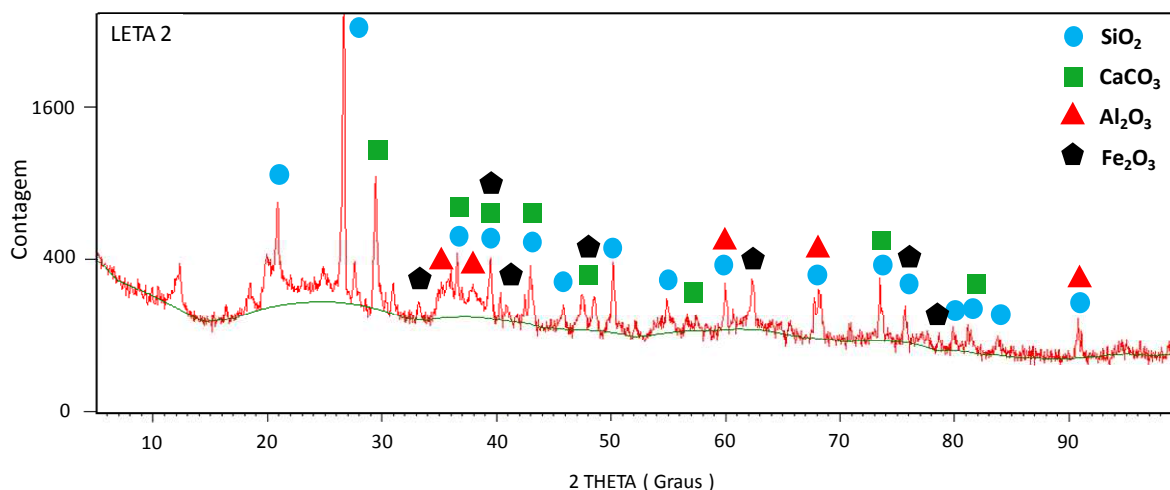


Figura 28 –Difratograma do LETA 2

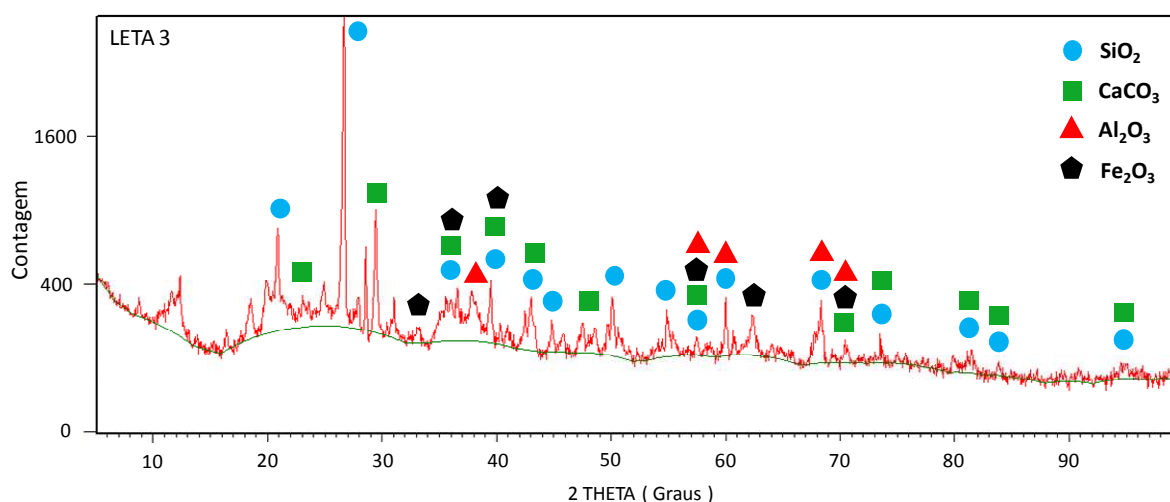


Figura 29 –Difratograma do LETA 3

Percebe-se que a o LETA 1 apresenta uma escala de contagem inferior ao LETA 2 e 3, ou seja, apresenta picos típicos cristalinos, mas com menor intensidade. Esta menor intensidade do LETA 1, indica menor número de elétrons contidos em uma unidade de volume por unidade de tempo. (SOARES, 2011).

Na análise de componentes cristalinos, as 3 amostras de LETA apresentam semelhanças entre si. Todas as amostras de LETA contêm Quartzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3), Hematita (Fe_2O_3) e Alumina (Al_2O_3).

Os difratogramas de LETA na bibliografia o caracterizam como um material amorfo, com alguns poucos picos cristalinos. Conforme Portella et al. (2003), o difratograma da amostra de LETA seco, não apresentou picos característicos de fase cristalina, mostrando

ser um material amorfo. No entanto, ao sinterizar o LETA em 700°C, Portella et al. (2003) encontra SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ como elementos predominantes nos difratogramas. Kinizievic (2013), analisou apenas o LETA sinterizado à 1000°C, no qual encontrou os compostos SiO₂ e Fe₂O₃, mesmo resultado que Tatari (2008), este porém ao analisar LETA apenas seco, sem ser sinterizado. Em tempo, ressalta-se que Portella et al.(2003), Kinizievic (2013) e Tatari (2008), utilizaram em seus estudos, LETAS que utilizavam sulfato de alumínio como coagulante, o mesmo utilizado na ETA geradora do lodo deste trabalho. Desta forma verifica-se que SiO₂ e Fe₂O₃ aparecem com frequência em LETAS pela composição dos minerais e detritos da água, assim como podem também ter origem na adição da CaO ao LETA no momento da prensagem, conforme composição verificada no ensaio de FRX ilustrado na tabela 23.

O composto de Al₂O₃ pode ser proveniente dos sólidos dissolvidos na água do rio, ou ser oriundo do coagulante sulfato de alumínio, utilizado para o tratamento da água. (TATARI, 2008), (QUESADA et al., 2011).

A constante presença do CaCO₃, nos difratogramas, pode ser proveniente da adição de CaO no LETA. O CaO tende a absorver instantaneamente o CO₂ presente no ar formando o CaCO₃. (KALINKIN et al.,2005).

4.1.5 Caracterização ambiental dos LETAS prensados

Com o intuito de analisar a viabilidade do uso do LETA em adição na cerâmica vermelha, realizou-se os ensaios de lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004b) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c) nas 3 amostras de LETA.

A tabela 24 apresenta os resultados de lixiviação NBR 10005 (ABNT, 2004b), das 3 amostras de LETA comparadas com o limite estabelecido no anexo F da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de lixiviação realizados

Parâmetros Extrato Lixiviado	Und	Limite de Quantificação	Limite NBR 10004: 2004 Anexo F	LETA 1	LETA 2	LETA 3
Teor de Bário	mg/l	0,006	70	<0,006	<0,006	<0,006
Fluoreto	mg/l	0,05	150	0,217	0,194	0,544
Teor de Arsênio	mg/l	0,0015	1	<0,0015	<0,0015	<0,0015
Teor de Cádmi	mg/l	0,002	0,5	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Chumbo	mg/l	0,08	1,0	<0,08	<0,08	<0,08
Teor de Cromo	mg/l	0,015	5,0	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Mercúrio	mg/l	0,0001	0,1	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Teor de Prata	mg/l	0,015	5,0	<0,015	<0,015	<0,015

Teor de Selênio mg/l 0,002 1 <0,002 <0,002 <0,002

Os resultados dos ensaios de lixiviação comprovam que as 3 amostras de LETA não ultrapassam os valores limites da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), desta forma, após este ensaio, o resíduo é classificado como “Resíduo Classe II – Não perigoso”. A mesma classificação foi encontrada pelos autores da bibliografia.

A tabela 25 apresenta os resultados de solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c), dos ensaios realizados sobre as 3 amostras de LETA.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de solubilização sobre as 3 amostras de LETA

Parâmetros Extrato Solubilizado	Und	Limite de Quantificação	Limite NBR 10004: 2004 Anexo G	LETA 1	LETA 2	LETA 3
Cianetos	mg/L	0,025	0,07	<0,025	<0,025	<0,025
Cloretos	mg/L	1,5	250	6,51	<1,5	2,21
Fenol	mg/L	0,003	0,01	<0,003	<0,003	<0,003
Fluoreto	mg/L	0,05	1,5	0,36	0,52	0,62
Nitratos	mg/L	0,2	10	1,97	0,75	0,75
Sulfatos	mg/L	2,0	250	123,21	50,74	25,88
Surfactantes	mg/L	0,06	0,5	0,47	0,45	0,34
Teor de Alumínio	mg/L	0,2	0,2	0,62	2,52	7,55
Teor de Arsênio	mg/L	0,0015	0,01	<0,0015	<0,0015	<0,0015
Teor de Bário	mg/L	0,006	0,7	<0,006	<0,006	<0,006
Teor de Cádmi	mg/L	0,002	0,005	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Chumbo	mg/L	0,008	0,01	<0,008	<0,008	<0,008
Teor de Cobre	mg/L	0,005	2,0	0,13	<0,005	0,11
Teor de Cromo	mg/L	0,015	0,05	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Ferro	mg/L	0,105	0,3	<0,105	0,41	0,38
Teor de Manganês	mg/L	0,0006	0,1	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Teor de Mercúrio	mg/L	0,0001	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Teor de Prata	mg/L	0,015	0,05	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Selênio	mg/L	0,002	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Sódio	mg/L	1,0	200	3,66	<1,0	1,41
Teor de Zinco	mg/L	0,1	5	<0,1	<0,1	<0,1

Nos ensaios de solubilização dos LETAS, os resultados foram fortemente impactados pelo tipo de coagulante utilizado no tratamento de água e consequentemente formação do LETA. Pode-se verificar que os teores de alumínio estão acima do estabelecido pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004a).

A alteração da quantidade de Al presente no LETA é verificada, possivelmente pela diferença entre os intervalos de limpeza dos decantadores. Na coleta 1 com um intervalo de 36 dias, o LETA 1 apresenta 0,62 mg/L de Al solubilizado, enquanto que nas outras duas

coletas, os resultados foram 2,52 mg/L e 7,55 mg/L de Al solubilizado, para 74 e 98 dias de intervalo de limpeza respectivamente. A turvação na água decantada, aumenta com o passar do tempo. (OLIVEIRA et al. 2007). Por consequência, o aumento da turbidez da água, exige alteração na dosagem de coagulantes, neste caso o sulfato de alumínio. (CETESB, 2009), (PAVANELLI, 2001), (CORNWEL, 1987), (RICHTER, 2001).

As alterações de Fe nos LETA 2 e 3, deve-se provavelmente às alterações na água do rio referente a estas duas coletas, onde o Fe apresentou maiores níveis já na água captada para o tratamento de água. Desta forma as classificações ambientais das 3 amostras de LETA são “Resíduo Classe IIA – Não inerte”. Os mesmos resultados foram encontrados por autores da bibliografia, onde o componente Al também ficou fora de especificação conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS

4.2.1 Caracterização química das cerâmicas

Para realizar a caracterização química dos corpos de prova cerâmicos, foram realizados ensaios de ICP-OES.

Na tabela 26, são apresentados os resultados da análise de ICP-OES sobre os corpos de prova com e sem adição de LETA, após a sinterização nas temperaturas de 800°C, 950°C e 1050°C.

Tabela 26 – Resultados de ICP-OES nos corpos de prova com e sem adição de LETA

Componente	Unidade	Limite de quantificação	Temperatura de sinterização	CPA - REF	CPB – 5% LETA 1	CPC – 5% LETA 2	CPD – 5% LETA 3
Fósforo total	mg/Kg	0,10	800°C	102,33	151,32	162,49	136,33
			950°C	112,94	86,13	100,53	77,71
			1050°C	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Teor de Alumínio	mg/Kg	0,10	800°C	18186,70	24636,60	21306,20	24116,74
			950°C	386,48	608,46	677,79	623,56
			1050°C	205,16	1830,90	379,20	282,81
Teor de Bário	mg/Kg	0,006	800°C	128,37	165,67	150,94	148,81
			950°C	28,52	53,14	37,44	27,21
			1050°C	21,66	23,84	< 0,006	< 0,006
Teor de Cálcio	mg/Kg	0,03	800°C	2217,24	3073,05	2849,50	2860,98
			950°C	830,40	1525,88	1947,90	1626,72
			1050°C	875,99	1748,80	1671,89	1282,60
Teor de Estrôncio	mg/Kg	0,103	800°C	< 0,103	< 0,103	< 0,103	< 0,103
			950°C	< 0,103	< 0,103	< 0,103	< 0,103
			1050°C	< 0,103	< 0,103	< 0,103	< 0,103
Teor de Ferro	mg/Kg	0,120	800°C	3026,09	3710,00	3189,96	3498,46
			950°C	214,2	379,70	479,29	329,67
			1050°C	193,4	405,45	169,86	124,51
Teor de Magnésio	mg/Kg	1,054	800°C	2201,08	3710,04	3036,64	3252,69
			950°C	194,87	473,55	534,40	669,03
			1050°C	174,44	603,17	395,61	413,44
Teor de Manganês	mg/Kg	0,01	800°C	237,34	290,72	262,45	256,53
			950°C	100,11	207,03	194,22	97,65
			1050°C	38,49	84,53	50,90	60,08
Teor de Potássio	mg/Kg	0,20	800°C	3818,67	5083,86	4374,75	4773,43
			950°C	709,43	613,99	666,10	532,34
			1050°C	218,05	444,90	156,58	128,30
Teor de Silício	mg/Kg	1,08	800°C	< 1,08	< 1,08	< 1,08	< 1,08
			950°C	< 1,08	< 1,08	< 1,08	< 1,08
			1050°C	< 1,08	< 1,08	< 1,08	< 1,08
Teor de Sódio	mg/Kg	0,502	800°C	468,76	536,09	549,98	498,08
			950°C	232,58	198,34	236,22	215,06
			1050°C	161,16	228,57	179,27	149,41
Teor de Titânio	mg/Kg	0,007	800°C	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007
			950°C	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007
			1050°C	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007
Teor de Zinco	mg/Kg	0,116	800°C	35,37	38,02	54,76	38,59
			950°C	< 0,116	< 0,116	< 0,116	9,69
			1050°C	< 0,116	< 0,116	< 0,116	< 0,116
Enxofre	mg/dm ³	0,01	800°C	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
			950°C	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
			1050°C	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

É evidente o impacto nos corpos de prova produzidos com a adição de LETA. Independentemente da temperatura de sinterização analisada, os componentes químicos Ca e Al apresentam maior percentual nos corpos de prova com a adição de LETA. Um ponto a ser

destacado é o malefício provocado pelo CaO nas peças cerâmicas, segundo Soares (2008), a granulometria grosseira e a decomposição do CaO durante a queima, provocam defeitos nas cerâmicas como: menor empacotamento, aumento de poros, fissuras e trincas. Este em maior número nestes corpos de prova é proveniente da adição do CaO para auxílio na prensagem do LETA e o Al, é proveniente do coagulante utilizado no tratamento de água, o sulfato de alumínio. (TATARI, 2008), (PEREIRA, 2008).

Percebe-se que os componentes P, Ba, Na e Mg não haviam sido identificados nos ensaios de FRX, técnica esta que foi feita qualitativamente para caracterizar os LETAS, diferente da técnica de ICP-OES, muito mais sensível, além de quantitativa. No entanto, todos são comumente achados em argila. Quanto maior a quantidade de argila presente no solo, mais facilmente o P é adsorvido. (MACHADO et al., 2011) e (VALLADARES; PEREIRA; ANJOS, 2003). O Ba, apresenta uma concentração média nos solos do mundo de 362 à 580 mg/kg, podendo chegar a uma concentração de 1500 mg/kg. (PENDIAS, 2011). O mesmo acontece com o Na, Mg e Zn, mas o Zn em especial, pode ter sua origem tanto da argila com uma média de 80 à 120 mg/kg, como do calcário com média de 10 à 25 mg/kg. (PENDIAS, 2011).

O Na é particularmente maléfico para fabricação de tijolos, segundo Dias e Blanco (2010), a característica principal deste efeito é a expansão ou retração, de acordo com a umidade presente. Assim, se houver uma alta expansão por exemplo, ocorrerá a fragmentação, causando a dispersão ou desagregação. Verifica-se que mesmo com a adição de LETA os resultados de Na não foram alterados significativamente devido às adições.

Evidenciando a análise de FRX sobre o Cal adicionado nos LETAS, o Mg aparece com valores maiores nos corpos de prova com adição de LETA, quando comparados aos valores dos corpos de prova referência. Esta diferença se deve provavelmente à adição de Cal na prensagem do LETA.

O Mn também é um componente químico que apresenta valores diferentes, quando se compara corpos de prova referência com corpos de prova com adição de LETA. No entanto, especialmente quando se realiza comparação dos corpos de prova contendo adição do LETA 1, com os corpos de prova com a adição dos outros dois LETAS. Os corpos de prova CPB, apresentam valores de Mn em média 28% superiores aos outros. Esta mudança na quantidade de Mn é possivelmente proveniente da água captada para o tratamento, visto que o processo de tratamento de água é o mesmo nas 3 amostras de LETA, e processo de fabricação da Cal também não difere.

Ao se analisar a tabela 26, verifica-se que o Si em todas as amostras não atinge o mínimo de quantificação para ser encontrado no ensaio de ICP-OES. Este resultado não condiz com a literatura, desta forma acredita-se que houve um erro analítico na realização do ensaio.

O componente químico Fe, encontrado com valores superiores nos corpos de prova com adição de LETA, pode ser a causa da adição de cor aos corpos de prova. Esta quantidade Fe conforme tabela 26, provém da adição do LETA. As figuras 30, 31 e 32 demonstram a cor mais escura nestes corpos de prova, acentuando ainda mais, com o aumento da temperatura. (VIEIRA; SOARES; MONTEIRO, 2004), (KAZMIERCZAK, 2010). Desta forma, a cor apresenta uma tonalidade mais escura nos corpos de prova sinterizados à 1050°C devido a oxidação do Fe^{2+} pela atmosfera da mufla, gerando o Fe^{3+} . (ROVERI; ZANARDO; MORENO, 2007).



Figura 30 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 800°C



Figura 31 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 950°C**Figura 32 – Cores dos corpos de prova sinterizados a 1050°C**

Ao verificar o efeito da temperatura nos corpos de prova, verifica-se um decréscimo no peso dos corpos de prova, a medida em que a temperatura é elevada, um comportamento característico da cerâmica, visto que com o aumento da temperatura, acontecem reações químicas como desidratação química, decomposição de matéria orgânica, oxidação e vitrificação. (KAZMIERCZAK, 2010). Embora este comportamento seja esperado, nos resultados da tabela 26, percebe-se que há inconsistências nas quantidades dos elementos Al, Ca, Fe e Mg dos corpos de prova CPB, quando sinterizados à 1050°C. Ao comparar estes resultados com os dos corpos de prova sinterizados à 950°C, verifica-se que os primeiros apresentam maior quantidade de material, mesmo tendo uma temperatura de sinterização mais elevada. Esta inconsistência deve-se provavelmente a alguma falha de homogeneização do LETA prensado com LETA, CaO e Argila na fração de cerâmica analisada, visto que para este ensaio, foram necessários apenas 50 g de cerâmica.

4.2.2 Caracterização mineralógica das cerâmicas por DRX.

As figuras 33, 34, 35 e 36 ilustram os difratogramas dos corpos de prova com e sem adição de LETA, sinterizados nas temperaturas de 800°C, 950°C e 1050°C.

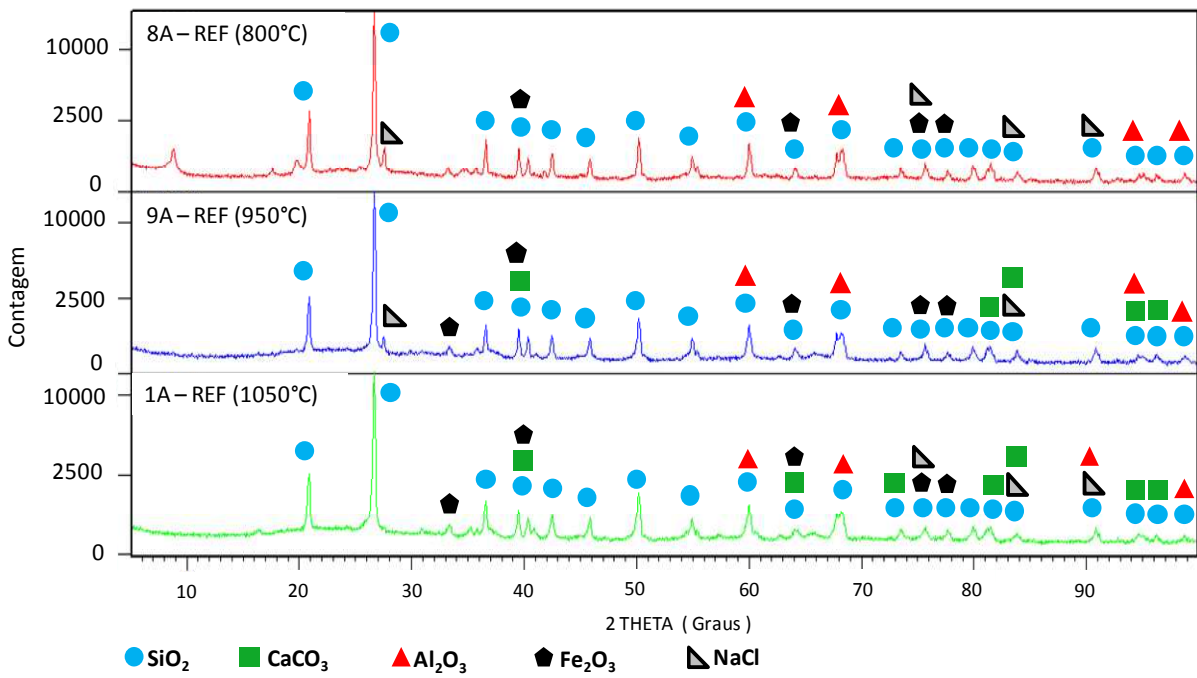


Figura 33 –Difratograma dos corpos de prova CPA - Referência

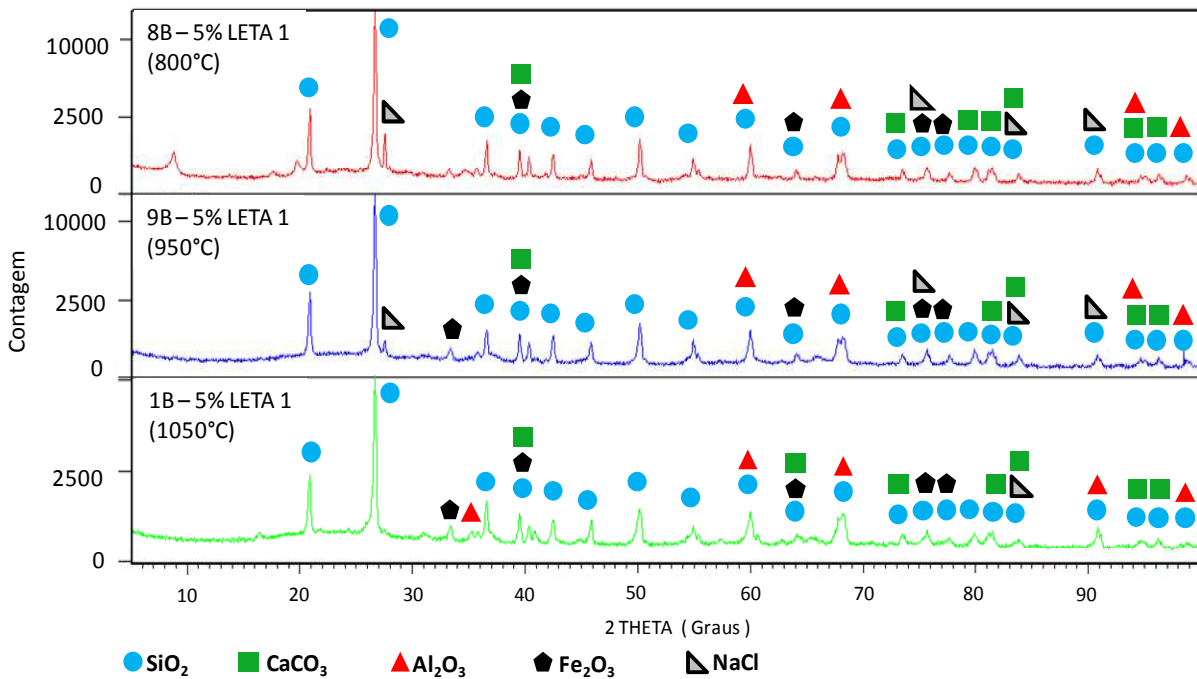


Figura 34 –Difratograma dos corpos de prova CPB com 5% de LETA 1

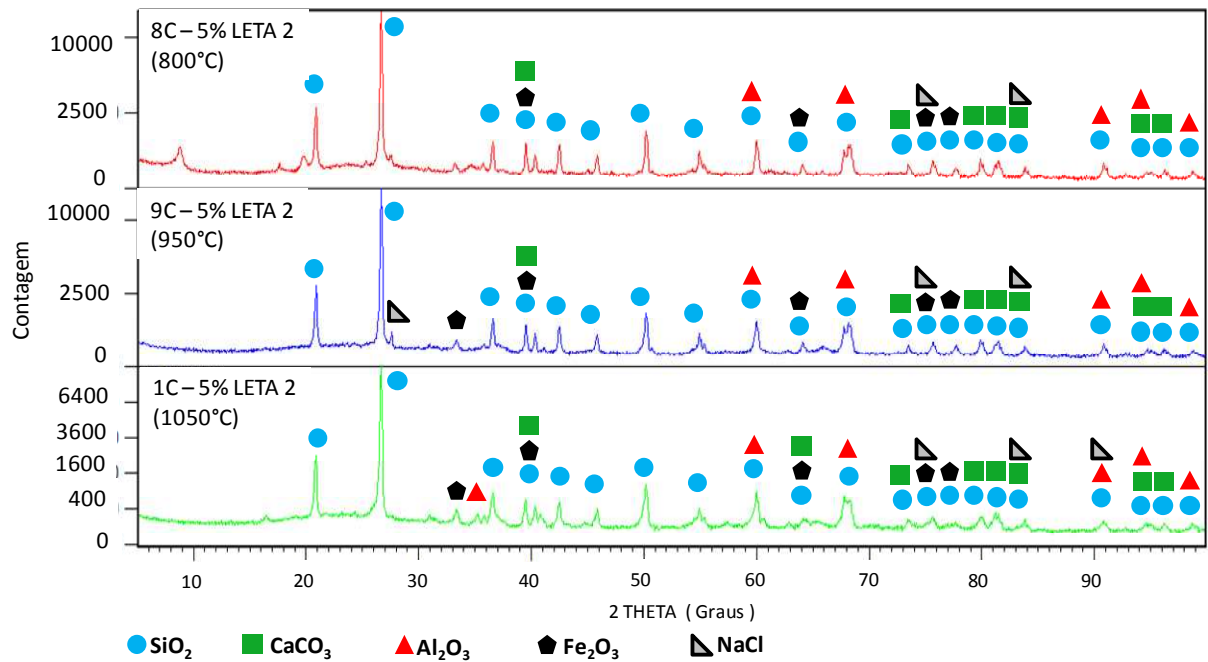


Figura 35 –Difratograma dos corpos de prova CPC com 5% de LETA 2

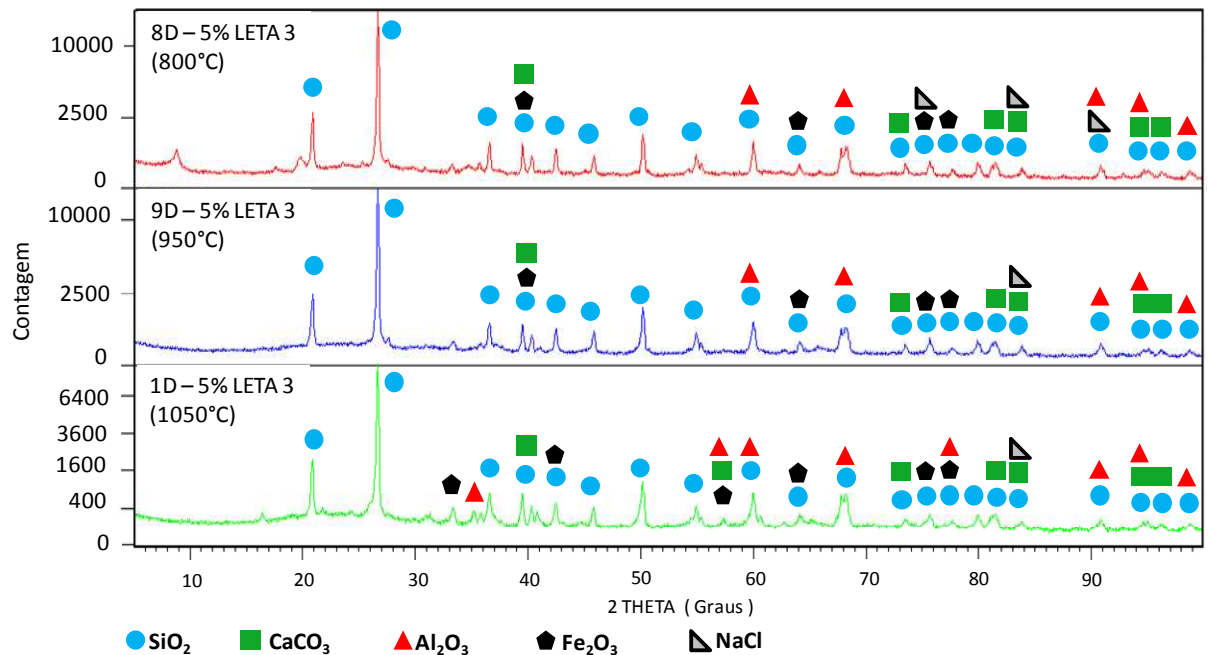


Figura 36 –Difratograma dos corpos de prova CPD com 5% de LETA 3

Com o aumento da temperatura de sinterização os difratogramas dos corpos de prova que contêm LETA apresentam decréscimo na contagem, em especial no difratograma dos corpos de prova CPB, com a adição de 5% de LETA1. A diminuição da contagem é atribuída às reações químicas como desidratação química e vitrificação dos corpos de prova que ocorrem a partir de 600°C e 800°C respectivamente. (KAZMIERCZAK, 2010). Os

LETAS adicionados, mesmo passando por sinterização são materiais mais amorfos que a argila, contribuindo para esta diferença da contagem nos difratogramas. (MULLER, 2009).

Nas figuras 33, 34, 35 e 36 percebe-se sobreposição de picos e coexistência de fases, ou seja, temos todas as fases ou simplesmente alguma, desta forma, coloca-se em dúvida a existência de algumas fases. (BREHM, 2004). Os componentes encontrados e os respectivos códigos de referência são Al_2O_3 (00-010-0173), SiO_2 (00-033-1161), Fe_2O_3 (00-024-0072), CaCO_3 (00-005-0586) e NaCl (00-005-0628).

Verifica-se também que a transformação e aparecimento do composto CaCO_3 , nos corpos de prova referência da figura 33, acontece apenas nas amostras sinterizadas à 950°C e 1050°C , o que não acontece nos corpos de prova com adição de LETA, onde há adição de Cal. A diferença deve-se provavelmente ao contato do CaO com a umidade da argila. Em virtude da temperatura de decomposição do CaCO_3 ser 825°C , nos corpos de prova referência sinterizados em 800°C , o CaO forma o CaCO_3 em contato com CO_2 e umidade da argila e não é decomposto pela sinterização. No entanto, nos corpos de prova com sinterização de 950°C e 1050°C o CaO , forma o CaCO_3 apenas em contato com o CO_2 na maior parte de sua estrutura. O CaCO_3 foi decomposto pela sinterização e no resfriamento reagiu novamente com o CO_2 do ambiente formando o CaCO_3 . (SOARES, 2008). Na temperatura ambiente, onde é feita a mistura das argilas e extrusão, há adsorção de umidade e CO_2 pelo CaO , que reage formando CaCO_3 amorfo na superfície das partículas. (KALINKIN et al.,2005).

4.2.3 Perda ao Fogo

A tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de perda ao fogo.

Tabela 27 – Ensaio de perda ao fogo

Amostra	Adição de LETA	Perda ao fogo
Referência	0%	4,18%
Cerâmica com amostra de LETA 1	5%	4,73%
Cerâmica com amostra de LETA 2	5%	4,84%
Cerâmica com amostra de LETA 3	5%	4,85%

Com a análise dos dados da Tabela 27, é possível verificar que os corpos de prova com adição de LETA apresentam valores de perda ao fogo semelhantes, com diferença de 0,12% entre o menor e o maior valor. No entanto, a perda ao fogo dos corpos de prova com adição de LETA, apresentam valores acima da referência. Este resultado já era esperado, pois há uma piora na qualidade da mistura da argila, devido à adição de matéria orgânica

introduzida pela adição de LETA. (CHIOU et al., 2006). Pode-se inferir que a alteração dos valores de perda ao fogo foram consequência desta adição, o LETA comparado à argila é um material que piora o empacotamento das partículas, aumentando assim a porosidade. (MORUZZI, 2008).

4.2.4 Caracterização ambiental das cerâmicas

Para caracterizar ambientalmente as cerâmicas realizou-se os ensaios de lixiviação e solubilização nas 4 amostras sinterizadas a uma temperatura de 950°C. A tabela 28 apresenta os resultados de lixiviação.

Tabela 28 – Resultados dos ensaios de lixiviação sobre os corpos de prova sinterizados à 950°C

Parâmetros Extrato Lixiviado	Und	Limite de Quantificação	Limite NBR 10004: 2004 Anexo F	CPA – REF	CPB - 5% LETA 1	CPC - 5% LETA 2	CPD - 5% LETA 3
Teor de Bário	mg/l	0,006	70	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Fluoreto	mg/l	0,05	150	0,623	0,352	0,429	0,673
Teor de Arsênio	mg/l	0,0015	1	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015
Teor de Cádmi	mg/l	0,002	0,5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Chumbo	mg/l	0,08	1,0	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Teor de Cromo	mg/l	0,015	5,0	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Mercúrio	mg/l	0,0001	0,1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Teor de Prata	mg/l	0,015	5,0	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Selênio	mg/l	0,002	1	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002

Os resultados dos ensaios de lixiviação comprovam que o uso do LETA em corpos de prova cerâmicos sinterizados na temperatura de 950°C, não ultrapassam os valores limites da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), desta forma foram classificados como “Resíduo Classe II – Não perigoso”.

A tabela 29 apresenta os resultados de solubilização dos ensaios realizados sobre os 4 corpos de prova sinterizados à 950°C.

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de solubilização

Parâmetros Extrato Solubilizado	Und	Limite de Quantificação	Limite NBR 10004: 2004 Anexo G	CPA – REF	CPB - 5% LETA 1	CPC - 5% LETA 2	CPD - 5% LETA 3
Cianetos	mg/L	0,025	0,07	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Cloretos	mg/L	1,5	250	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
Fenol	mg/L	0,003	0,01	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Fluoreto	mg/L	0,05	1,5	0,34	0,53	0,33	0,39
Nitratos	mg/L	0,2	10	0,27	0,25	0,24	0,24
Sulfatos	mg/L	2,0	250	<2,0	<2,0	2,09	<2,0
Surfactantes	mg/L	0,06	0,5	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Teor de Alumínio	mg/L	0,2	0,2	0,29	0,23	0,24	0,31
Teor de Arsênio	mg/L	0,0015	0,01	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015
Teor de Bário	mg/L	0,006	0,7	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Teor de Cádmi	mg/L	0,002	0,005	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Chumbo	mg/L	0,008	0,01	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008
Teor de Cobre	mg/L	0,005	2,0	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Teor de Cromo	mg/L	0,015	0,05	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Ferro	mg/L	0,105	0,3	0,37	0,37	0,35	0,38
Teor de Manganês	mg/L	0,0006	0,1	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Teor de Mercúrio	mg/L	0,0001	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Teor de Prata	mg/L	0,015	0,05	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Teor de Selênio	mg/L	0,002	0,01	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Teor de Sódio	mg/L	1,0	200	<1,0	<1,0	1,098	<1,0
Teor de Zinco	mg/L	0,1	5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Os resultados de solubilização nos corpos de prova não sofrem impacto relevante quando há adição de LETA, pois os corpos de prova referência, já apresentam valores superiores aos permitidos pelo anexo G da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a). Verifica-se isto nos resultados dos componentes Al e Fe. Nos corpos de prova CPC, os sulfatos ficam acima do mínimo de quantificação, no entanto muito próximo a este, não caracterizando um comportamento diferente do restante dos corpos de prova. Desta forma, a classificação ambiental dos 4 corpos de prova sinterizados à 950°C foi “Resíduo Classe IIA – Não inerte”, concordando com os resultados de Brehm et al. (2013), que utilizou a mesma argila.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DAS CERÂMICAS

4.3.1 Retração Linear

Na figura 37 são apresentados os resultados da retração linear conforme temperatura de sinterização e amostragens de LETA nos corpos de prova.

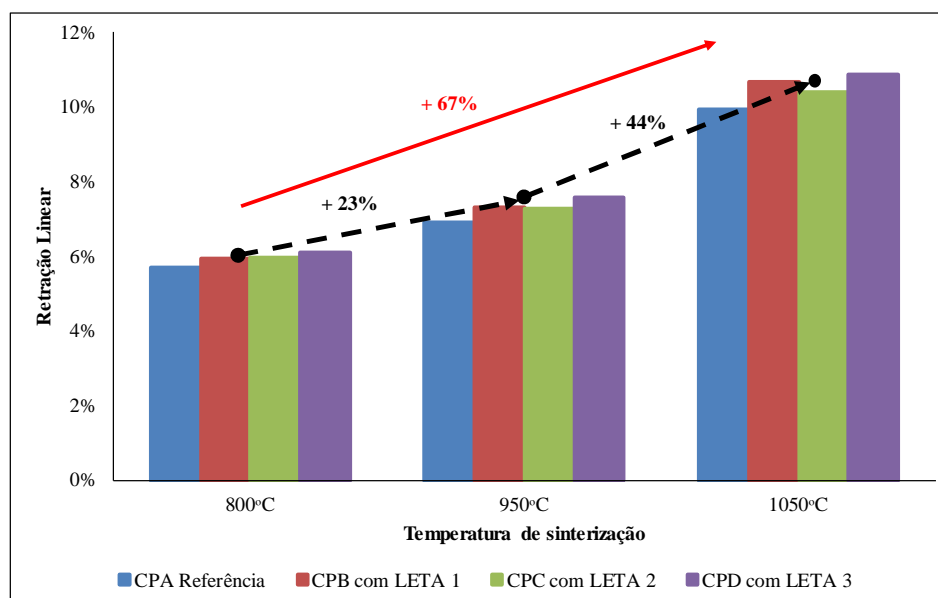


Figura 37 – Comportamento dos corpos de prova em ensaio de retração linear

Pode-se perceber, pela análise dos dados da Figura 37, que a retração aumenta conforme o aumento da temperatura de queima. A retração média das cerâmicas na temperatura de 800°C foi de 6% enquanto que para a temperatura de 1050°C esta média sobe para 10%. Comparando-se a retração média das cerâmicas com LETA com a cerâmica de referência, é possível observar uma mesma tendência de comportamento em todas as temperaturas de ensaio. A adição de LETA aumenta a retração dos corpos de prova, corroborando com os resultados de perda ao fogo expostos na tabela 27, no entanto, aparentemente é minimizada pela adição de um baixo teor (5%). A retração das cerâmicas de referência, adotando-se todas as temperaturas, é 5,8% menor que as cerâmicas com LETA 1 e 4,7% e 8,2% menores que as cerâmicas com LETA 2 e 3, respectivamente.

De forma quantitativa, os lodos podem ser classificados pelo seu teor de sólidos totais fixos (STF). Na tabela 22 os resultados das 3 amostras de LETA ajudam a explicar os comportamentos de retração linear dos corpos de prova com adição de LETA. Ao relacionar-se a quantidade de sólidos totais fixos presentes nos LETAS após a sinterização, com a retração dos corpos de prova, verifica-se que a quantidade de STF no LETA 1 e no LETA 2

apresentam pouca diferença, o que se reflete na retração dos corpos de prova com adição destes LETAS. O LETA 3 apresenta maior percentual de STF, o que contribui para uma retração maior do que os outros dois LETAS.

A tabela 30 apresenta a análise de variância para testar estas diferenças, analisando o efeito significativo da temperatura e do percentual de STF na retração das cerâmicas. Observa-se, que para um nível de confiança de 95%, tanto a temperatura quanto a coleta de lodo, representada pelo STF, assim como a interação entre estes dois fatores apresentam efeito significativo sobre a retração linear, visto que a hipótese nula é descartada, uma vez que o valor de p é inferior a 5%. Também se verifica que os valores de F calculados são maiores do que os valores de F crítico, validando a análise de que, tanto a temperatura como o percentual de STF no LETA, isoladamente ou em conjunto, influenciam na retração linear dos corpos de prova.

Tabela 30 – ANOVA da influência da temperatura de sinterização e da variação de percentual de STF nas 3 amostras de LETA

Efeitos	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p	Fcrítico	Efeito Significativo
STF	2,57	1,00	2,57	34,61	0,00000	3,93	Sim
Temperatura	423,43	2,00	211,71	2851,00	0,00000	3,08	Sim
STF x Temperatura	0,53	2,00	0,27	3,59	0,03105	3,08	Sim
Erro	8,02	108,00	0,07				

Onde: GDL = Graus de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

A figura 38 apresenta o gráfico de médias de retração linear das cerâmicas com LETA para o efeito isolado do percentual médio de STF dos três LETAS. Percebe-se que a influencia tecnicamente ao inverso da estatística é quase nula.

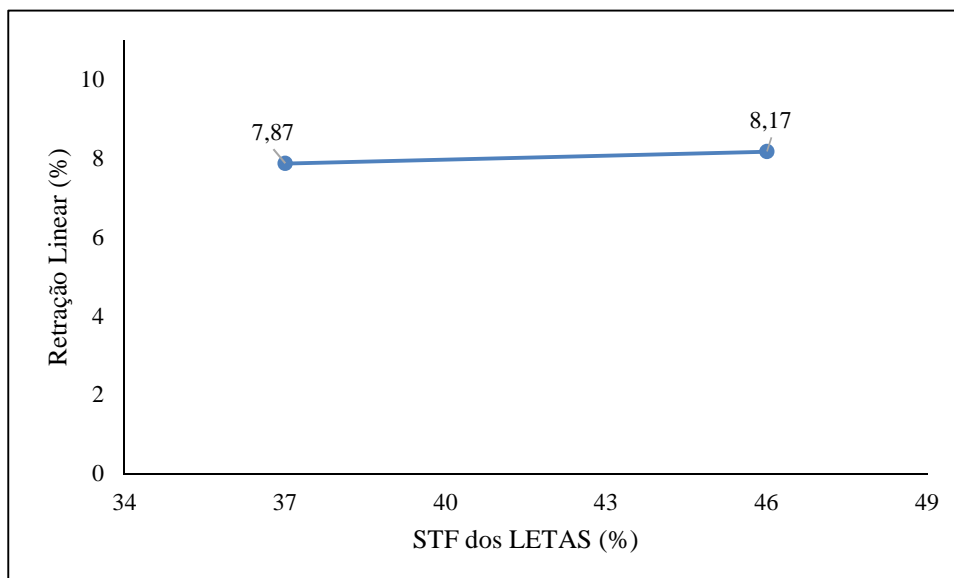


Figura 38 – Efeito isolado dos STF dos LETAS na retração linear

As cerâmicas com LETA 3 aparecem com um percentual médio de retração de 8,17%, cerca de 4% acima da retração média apresentada pelas cerâmicas com LETA 1 e 2 e a ANOVA indicou que estas diferenças são significativas sob o ponto de vista estatístico. No entanto, sob o ponto de vista técnico esta diferença relativa entre as retrações das cerâmicas pode ser considerada não significativa. A figura 39 indica que esta tendência de comportamento é a mesma para cada uma das cerâmicas queimadas a diferentes temperaturas, com um ligeiro aumento nas diferenças a medida que se aumenta a temperatura de queima.

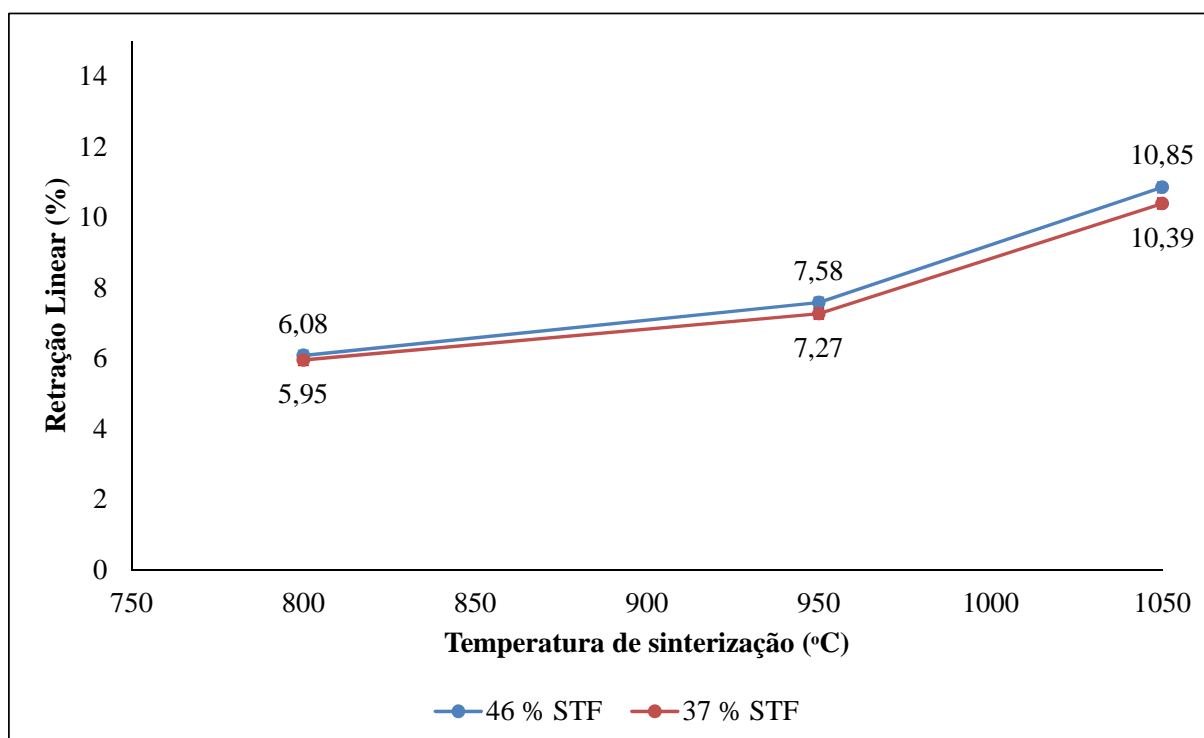


Figura 39 –Influência da interação da temperatura e dos STF dos LETAS na retração linear

A figura 39 mostra que as médias de retração dos corpos de prova que contém LETA com 37% de STF (LETA 1 e 2), são em média 4% menores quando comparadas às retrações dos corpos de prova com 46% de STF no LETA 3. Esta diferença tecnicamente indica que o resultado não é significativo.

4.3.2 Absorção de água

Neste tópico serão apresentados os resultados do índice de absorção de água, índice de absorção de água inicial e os resultados de absorção de água conforme tempo de absorção sobre os corpos de prova com e sem adição de LETA.

A figura 40 apresenta gráfico de médias do índice de absorção de água (AA).

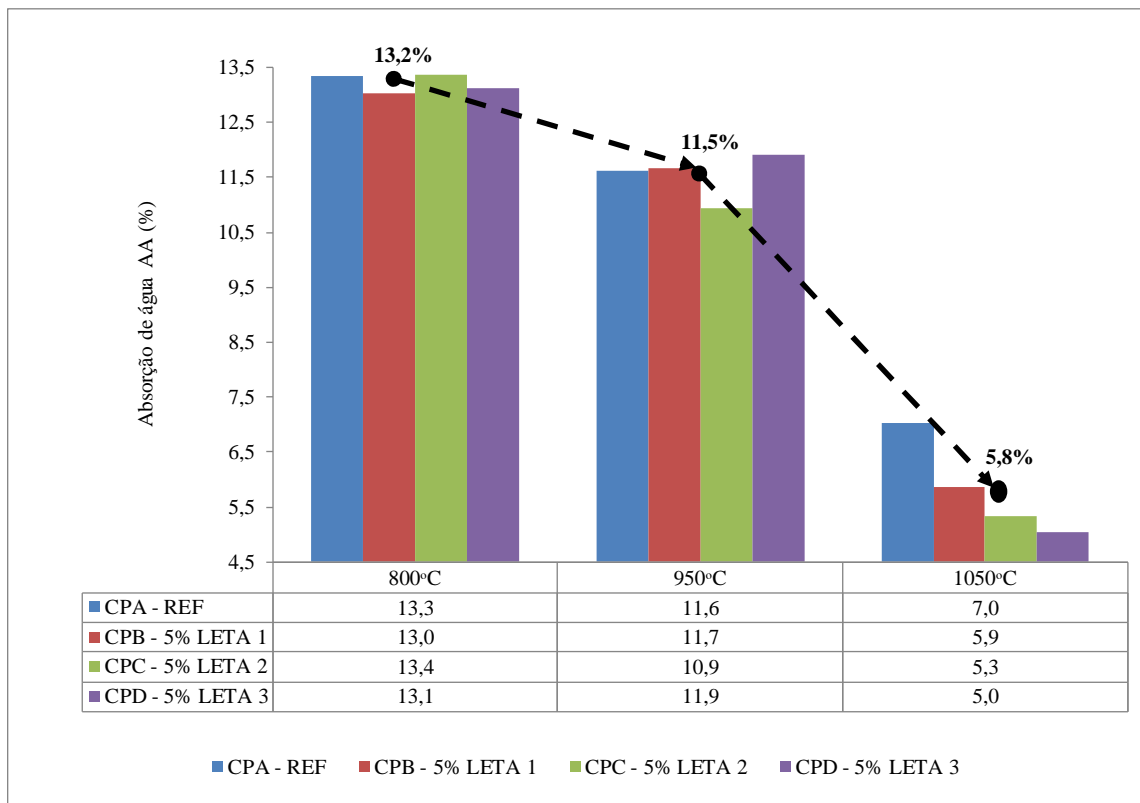


Figura 40 –Médias do índice de absorção de água (AA)X Temperatura de sinterização

A análise dos dados indica uma variação muito baixa no índice de absorção de água entre as cerâmicas com e sem LETA queimadas a 800°C e a 950°C, com desvio padrão de 0,2 e 0,4, respectivamente, acarretando em um baixo coeficiente de variação, 1,2% e 3,6% respectivamente. Para estas temperaturas os índices AA ficaram dentro do estabelecido pela

NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) (na faixa entre 8% e 22%). No entanto para temperatura de 1050°C os índices ficaram abaixo do requerido de 8%, conforme mesma norma, nesta temperatura a AA observada entre as cerâmicas variou notadamente, com coeficiente de variação de 15,1%.

O comportamento de absorção de água inferior ao requerido por norma, submete a uma baixa porosidade do corpo de prova, corroborando também com este efeito a elevada retração verificada na figura 37. Este tipo de comportamento indica que o uso da cerâmica para a fabricação de tijolos não é recomendado, pois poderia causar descolamentos da argamassa e rachaduras na construção. (KAZMIERCZAK, 2010).

Em contrapartida, o ensaio para verificar o índice de absorção de água inicial (AAI), apresentou resultados satisfatórios ao se analisar o umedecimento dos blocos antes do assentamento, indicando que os corpos de prova não necessitam deste processo. NBR 15270-3 (ABNT, 2005c).

A tabela 31 apresenta as médias de índice de absorção de água inicial conforme temperatura de sinterização dos corpos de prova.

Tabela 31 – Médias do índice de absorção de água inicial

TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO	CPA REF	CPB 5%LETA 1	CPC 5%LETA 2	CPD 5%LETA 3
800°C	12,95	10,99	8,55	9,94
950°C	15,06	24,31	15,29	16,96
1050°C	9,13	14,47	7,61	8,02

* Resultados em: (g/193,55 cm²)/min

O índice de absorção de água inicial das cerâmicas obtidas em 800°C apresentam uma absorção menor que os obtidos na temperatura de 950°C. Um dos prováveis motivos é que a temperatura de 950°C pode decompor muitas substâncias voláteis sem, no entanto, conseguir sinterizar a argila a ponto de reduzir a porosidade deixada por tais substâncias. Outra explicação pode ser o aumento do tamanho dos poros e a diminuição da quantidade destes, com a interrupção da ligação entre eles com o aumento da temperatura. (KAZMIERCZAK, 1989). No entanto, em 1050°C ambos os aspectos podem ter ocorrido, o que torna a cerâmica mais densa, ou seja os poros diminuíram ou foram eliminados pela coalescência da massa (BARBA et al. 2002).

O AAI na temperatura de 950°C chega aos valores mais altos, especialmente nos corpos de prova com adição de LETA, conforme tabela 31. Estes valores mais altos podem

ser também causados pela decomposição do CaCO_3 e liberação de CO_2 , que ocorre a partir de 825°C . Quando o CO_2 sai do corpo de prova, há criação de poros, que junto com os deixados pela evaporação da água, facilitam uma maior absorção de água inicial na temperatura de sinterização de 950°C . (OLIVEIRA et al, 2011).

Quando se compara a AAI dos corpos de prova CPB, CPC e CPD, todos com adição de 5% de LETA, se verifica que os corpos de prova CPB, tem um AAI muito superior aos outros dois corpos de prova, tal diferença pode ser explicada pela quantidade de sólidos voláteis em cada LETA apresentada na tabela 22. Esta quantidade de sólidos voláteis no momento em que a peça cerâmica é sinterizada, deixam poros, alterando a qualidade do produto final e facilitando a absorção de água. (MORUZZI, 2008)

A tabela 32 apresenta os resultados da ANOVA realizada para verificar se os efeitos da temperatura e do percentual de sólidos voláteis são significativos sobre a AAI, bem como a sua interação.

Tabela 32 – ANOVA dos efeitos temperatura de sinterização e percentual de sólidos voláteis sobre o AAI

Efeitos	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância p	Fcrítico	Efeito Significativo
Temperatura	955,9	2,0	477,9	114,2	0,000000	3,2	Sim
Sólidos Voláteis	379,1	2,0	189,6	45,3	0,000000	3,2	Sim
Sólidos Voláteis x Temperatura	93,1	4,0	23,3	5,6	0,001007	2,6	Sim
Erro	188,4	45,0	4,2				

Onde: GDL = Graus de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

Na tabela 32 é possível verificar que tanto o efeito isolado dos fatores analisados, como a interação entre eles, apresenta efeito significativo sobre a AAI das cerâmicas. O efeito isolado dos fatores, bem como da interação sobre a AAI são apresentados ainda nas figuras 41, 42 e 43, sob a forma de gráficos de médias.

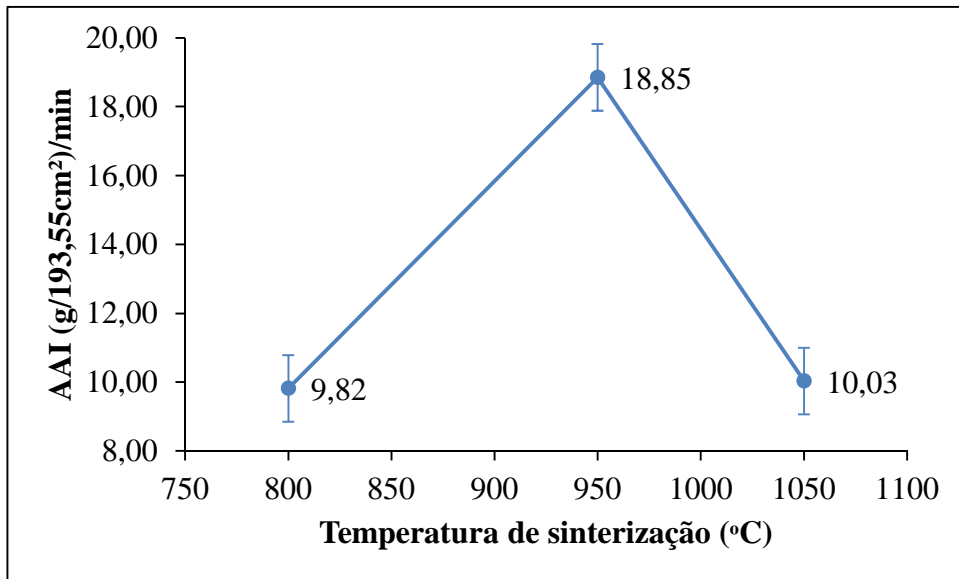


Figura 41 – Efeito da temperatura de sinterização no AAI dos corpos de prova

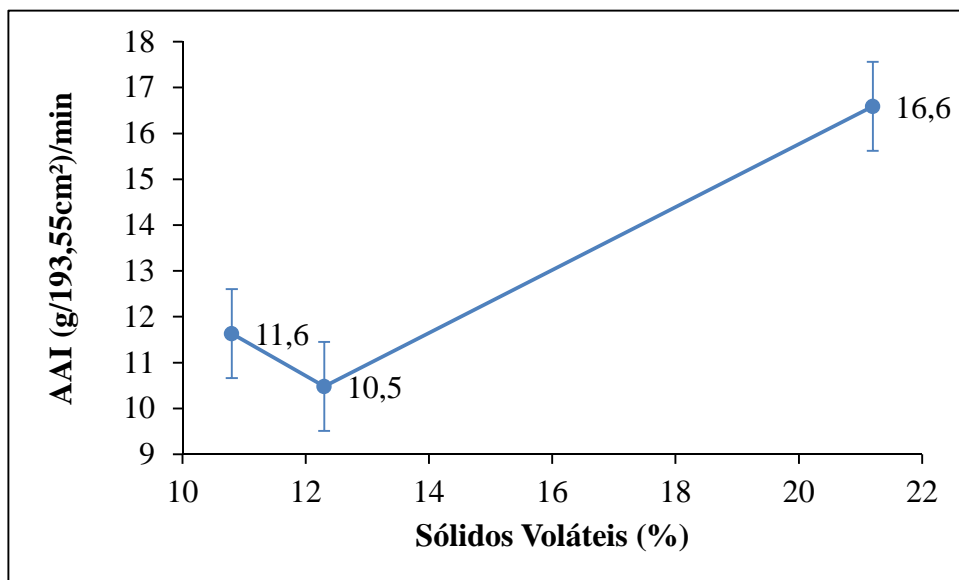


Figura 42 – Efeito dos sólidos voláteis do LETA no AAI dos corpos de prova

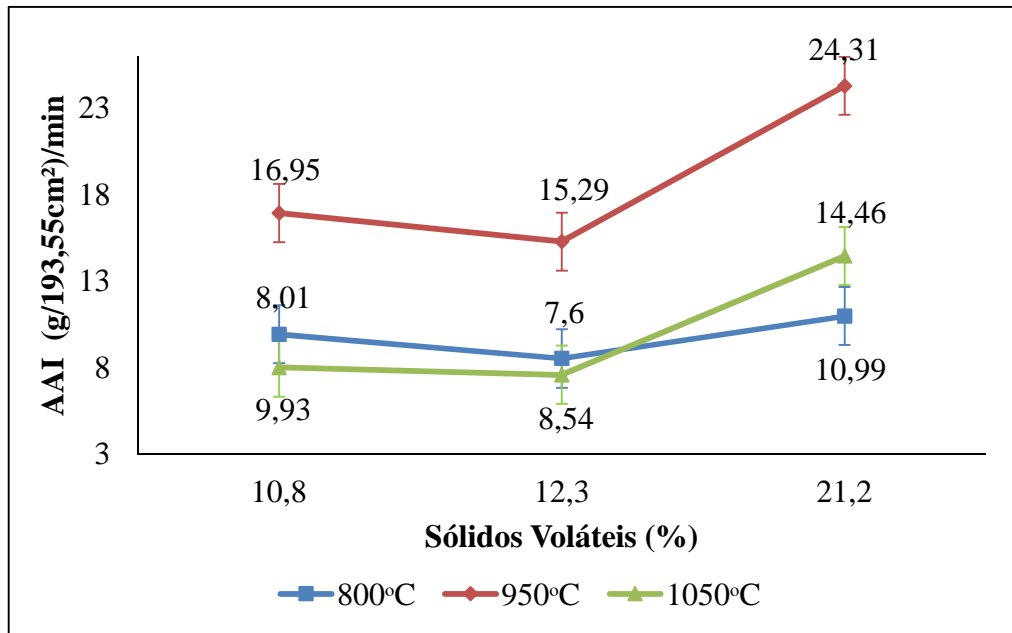


Figura 43 – Efeito da interação da temperatura e dos sólidos voláteis do LETA sobre o AAI dos corpos de prova

Na figura 43 se percebe que ambos fatores analisados têm influência sobre o AAI, que pode ser visualizado pelo fato das linhas não serem paralelas entre si. No entanto, o comportamento das cerâmicas com adição de LETA 1 (21,2% de sólidos voláteis), apresentam os maiores valores no AAI, em média 66% superiores. Assim, em conjunto com a adição da cal, a absorção de água é facilitada devido a decomposição CaCO_3 e consequente formação de poros pela liberação do CO_2 . (MENEZES et al., 2006). (SOARES, 2008)

Desta forma verifica-se que os dados obtidos nos ensaios de AAI indicam que as cerâmicas sinterizadas na temperatura de 950°C, terão alta absorção capilar, conseqüentemente quando expostas à chuva, poderão apresentar problemas estruturais na construção ou até uma degradação acelerada.

Também foram realizados ensaios de absorção de água conforme método RILEM TC 116-PCD: 1999, onde as curvas obtidas nos ensaios são apresentadas no anexo A. A Figura 44 apresenta as médias dos resultados obtidos para absorção de água pelo método RILEM.

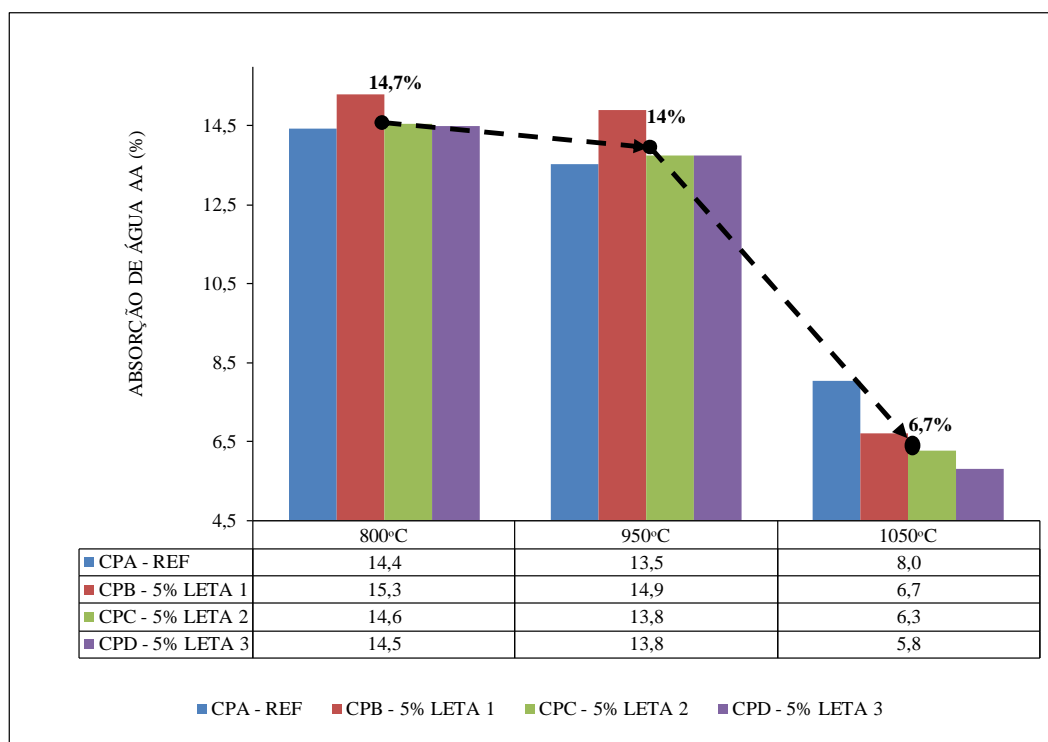


Figura 44 – Média dos resultados de absorção de água – Método RILEM

Na Figura 44 é possível observar comportamentos distintos acerca da influência do LETA na absorção de água-RILEM, quando são analisadas as temperaturas de sinterização. Para as temperaturas de 800 e 950°C observa-se para as cerâmicas com e sem LETA uma diferença média de absorção na ordem de 2,5 e 4,6%, respectivamente. Tecnicamente, estas diferenças não podem ser consideradas significativas e, nestas temperaturas, a presença ou não de LETA leva as cerâmicas a se comportarem de forma semelhante. No entanto, a análise das diferenças das cerâmicas com e sem LETA na temperatura de 1050°C obteve-se diferenças médias entre as quatro cerâmicas na ordem de 22%, o que, sob o ponto de vista técnico, indica diferença significativa nas absorções das argamassas sem e com os diferentes lotes de LETA.

A [Figura 45](#) apresenta o gráfico das médias de absorção de água das cerâmicas quando tomam-se isoladamente as diferentes temperaturas de produção das cerâmicas, onde é possível observar a influência da temperatura na absorção de água das cerâmicas. Comparando-se as cerâmicas de 800 e 950°C, percebe-se uma diferença de 11%. No entanto, a comparação com 1050°C, indica um comportamento de menor absorção, na ordem de 50%.

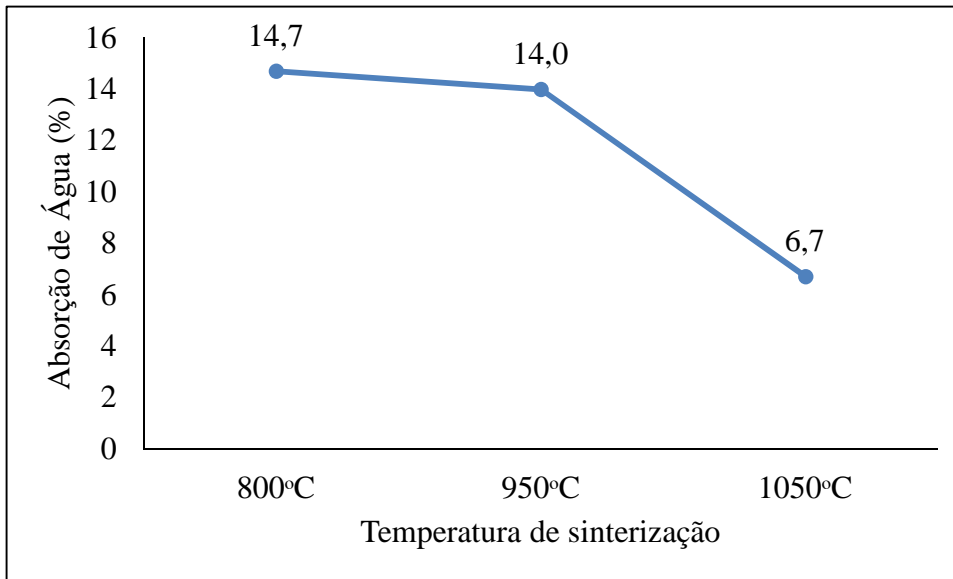


Figura 45 – Efeito da temperatura sobre a absorção de água

A tendência de comportamento observada dos resultados de absorção de água da RILEM é a mesma que a dos dados obtidos nos outros métodos de absorção. O efeito isolado da temperatura indica que a 800°C acontece a maior absorção de água e a 1050°C a menor, correspondendo a apenas 45% da maior absorção. A temperatura de 1050°C leva a uma estrutura de poros mais refinada com consequente diminuição da quantidade de poros, com menos interligações entre eles, mas no entanto com uma maior dimensão, causando assim uma diminuição da absorção de água. (KAZMIERCZAK, 1989).

As médias dos resultados quando toma-se todos os valores obtidos para cada uma das cerâmicas é apresentada no gráfico da [Figura 46](#)~~Figura-46~~. O efeito isolado do tipo de cerâmica não pode ser considerado tecnicamente significativo, pois a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de absorção é de apenas 5,3%. Este parece ser um bom indicativo, pois não havendo diferenças significativas quanto a presença ou não de LETA ou quanto ao tipo de LETA, a princípio, indica uma viabilidade do LETA, o que concorda com os resultados de perda ao fogo da tabela 27.

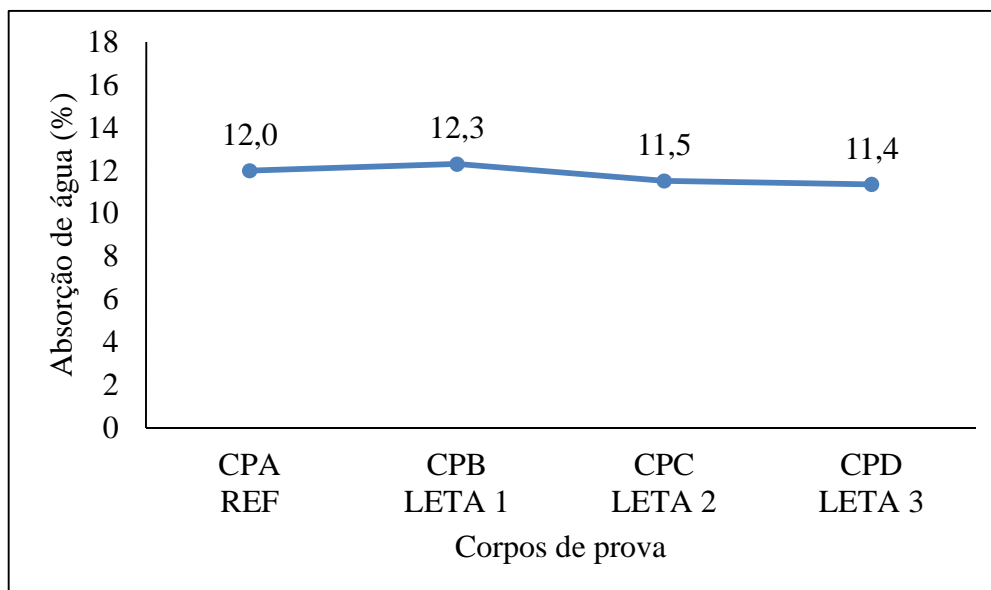


Figura 46 – Efeito do tipo de corpo de prova na absorção de água

A partir dos resultados de absorção de água obtidos pelo Método RILEM, é possível obter, tomando-se as características geométricas dos corpos de prova, outras propriedades com Coeficiente de Absorção Capilar ou Coeficiente de sucção capilar (S), em milímetros por raiz quadrada do tempo em horas. Os dados desta propriedade são apresentados na [Figura 47](#).

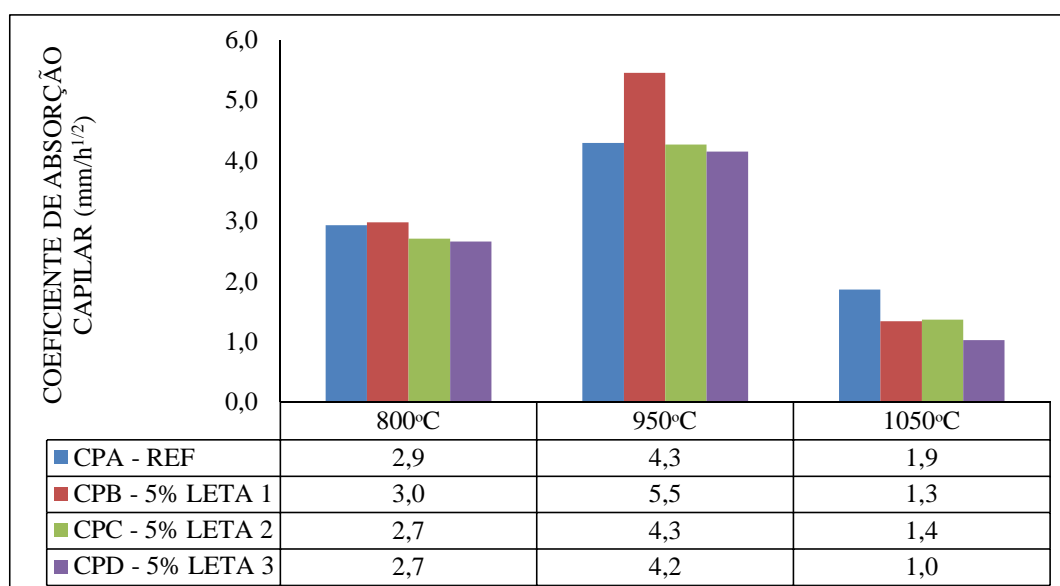


Figura 47 – Coeficiente de absorção capilar

Observa-se, na [Figura 47](#), que os maiores valores médios de S foram obtidos com as cerâmicas sinterizadas a 950°C. Os corpos de prova sinterizados à 800°C tem uma velocidade de absorção mais lenta do que os corpos de prova sinterizados a 950°C, que também atingem a saturação antes mesmo dos corpos de prova sinterizados na temperatura de

1050°C. Este comportamento confirma o que foi verificado nos ensaios de AAI, conforme tabela 31, cuja análise indicou que a temperatura de 950°C leva a uma AAI maior do que as duas outras temperaturas (figura 48).

Os resultados de coeficiente de absorção capilar na temperatura de 950°C tornam-se preocupantes, no tocante da durabilidade da cerâmica; uma alta absorção capilar, irá degradar a cerâmica exposta ao tempo com uma maior velocidade, o que impede o uso da mesma em edificações ou construções externas.

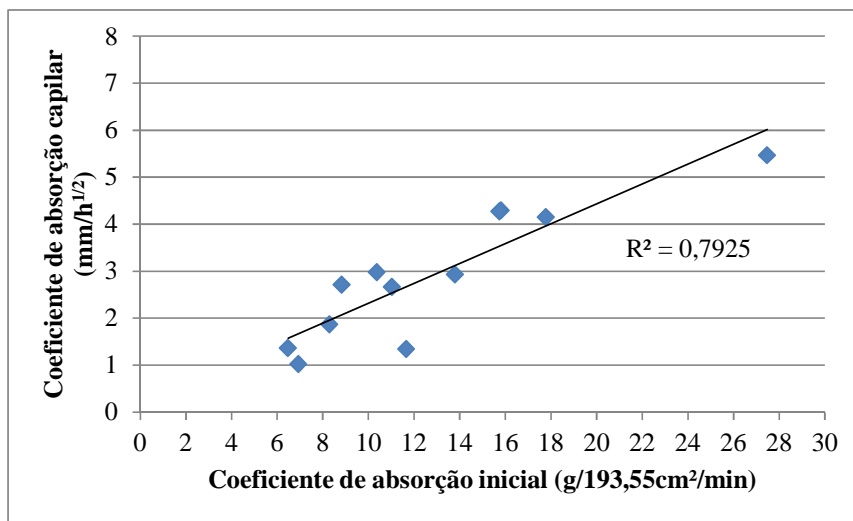


Figura 48 - Relação entre Coeficiente de absorção inicial com coeficiente de absorção capilar.

Os resultados obtidos pelo método RILEM também permitem estimar a porosidade total e a porosidade capilar das cerâmicas estudadas, cujos valores são apresentados na Figura 49. Percebe-se que grande parte da porosidade estimada pelo método deve-se à porosidade capilar.

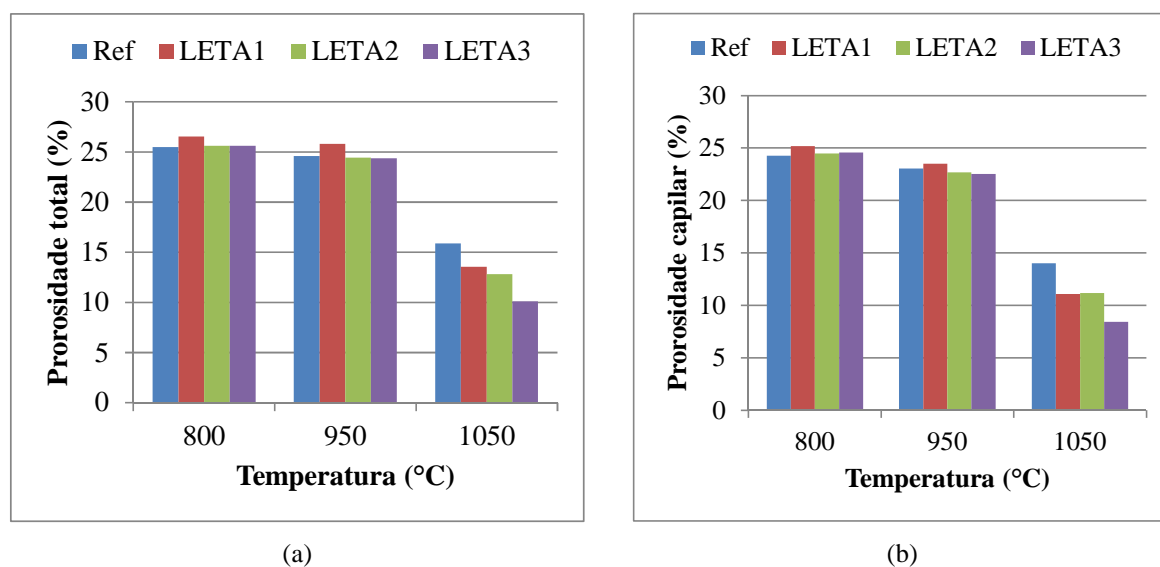


Figura 49 – Porosidade das cerâmicas: (a) Total e (b) Capilar

4.3.3 Resistência à flexão

Com os resultados de resistência à flexão dos corpos de prova, efetuou-se uma análise de variância ANOVA.

A tabela 33 apresenta os resultados da ANOVA, onde se analisou os efeitos isolados das 4 composições dos corpos de prova (Ref + 3 adições de LETA) e da temperatura, assim como a interação destes sobre os resultados dos ensaios de resistência à flexão.

Tabela 33 – Efeitos da temperatura e do tipo de corpo de prova sobre a resistência

Efeitos	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância p	Fcrítico	Efeito Significativo
Tipo de CP	35,84	3	11,95	11,23	0,000001	2,667	Sim
Temperatura	2496,32	2	1248,16	1173,17	0,000000	3,059	Sim
Tipo de CP x Temperatura	82,46	6	13,74	12,92	0,000000	2,162	Sim
Erro	153,20	144	1,06				

Onde: GDL = Graus de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

Todos os fatores analisados, bem como a interação entre eles apresentam efeito significativo sobre a variável de resposta resistência á flexão. A figura 48 apresenta as médias do efeito isolado da temperatura sobre a resistência à flexão dos corpos de prova.

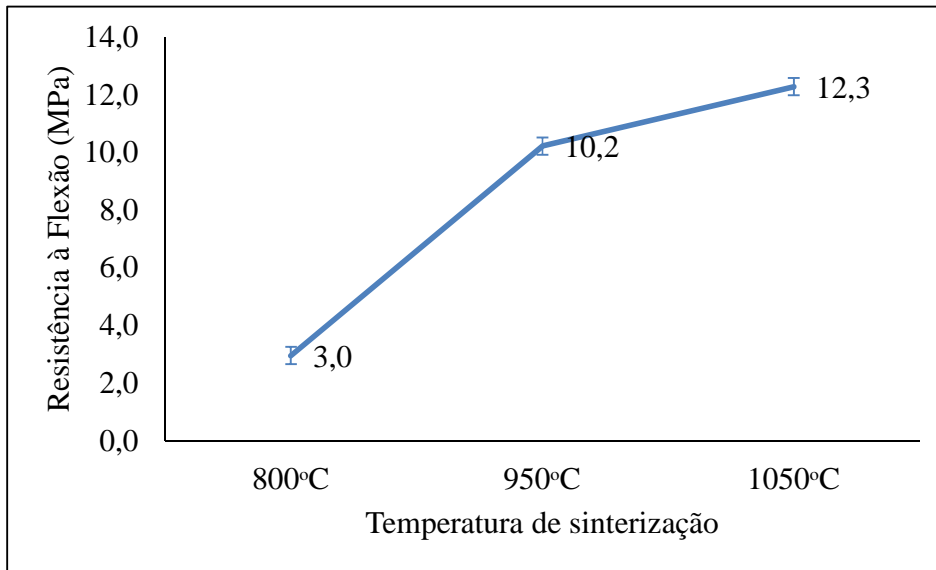


Figura 50 – Efeito da temperatura sobre a resistência dos corpos de prova

Na figura 48 percebe-se claramente que a temperatura é fator determinante na resistência dos corpos de prova. Os resultados são condizentes com a literatura, onde a maior temperatura de sinterização (1050°C), apresenta a maior resistência (12,3 MPa).

A figura 49 apresenta o efeito isolado da composição dos corpos de prova sobre a resistência.

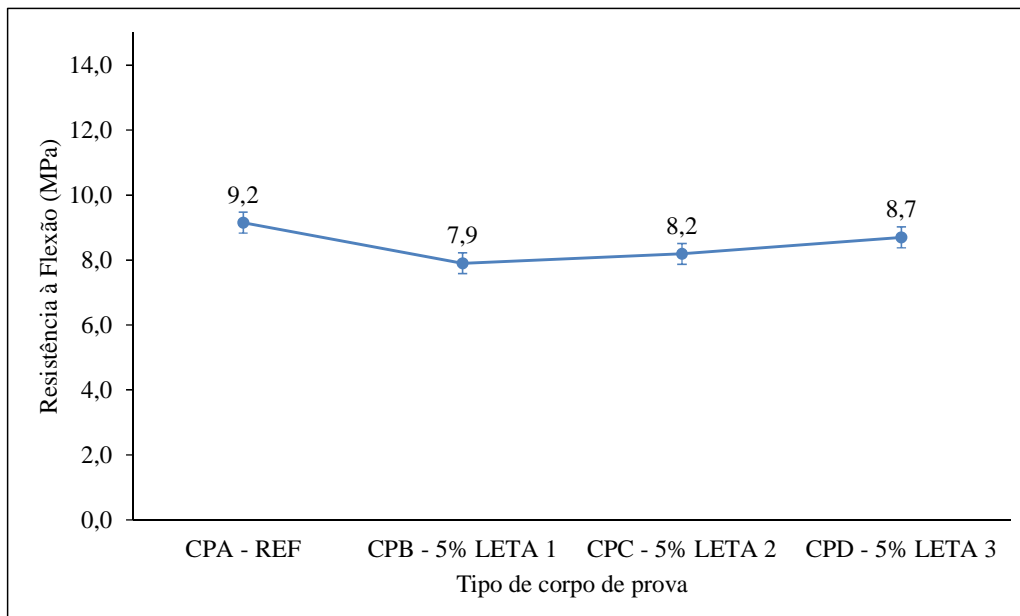


Figura 51 – Efeito isolado da composição dos corpos de prova sobre a resistência

As composições dos corpos de prova com adição de LETA apresentam diferença máxima entre si de 0,5 MPa ou 5,5% e a variação entre os dois pontos mais distantes é de 1,3

MPa, o que representa 14% de mudança. Quando analisa-se a diferença entre os corpos de prova referência e a média dos corpos de prova com adição de LETA, verifica-se que a amplitude da diferença cai a 10%. No entanto, percebe-se que o tipo de corpo de prova tecnicamente, tem fraco efeito sobre a resistência à flexão.

A figura 50 apresenta o efeito da interação da temperatura com a composição do corpo de prova sobre a resistência.

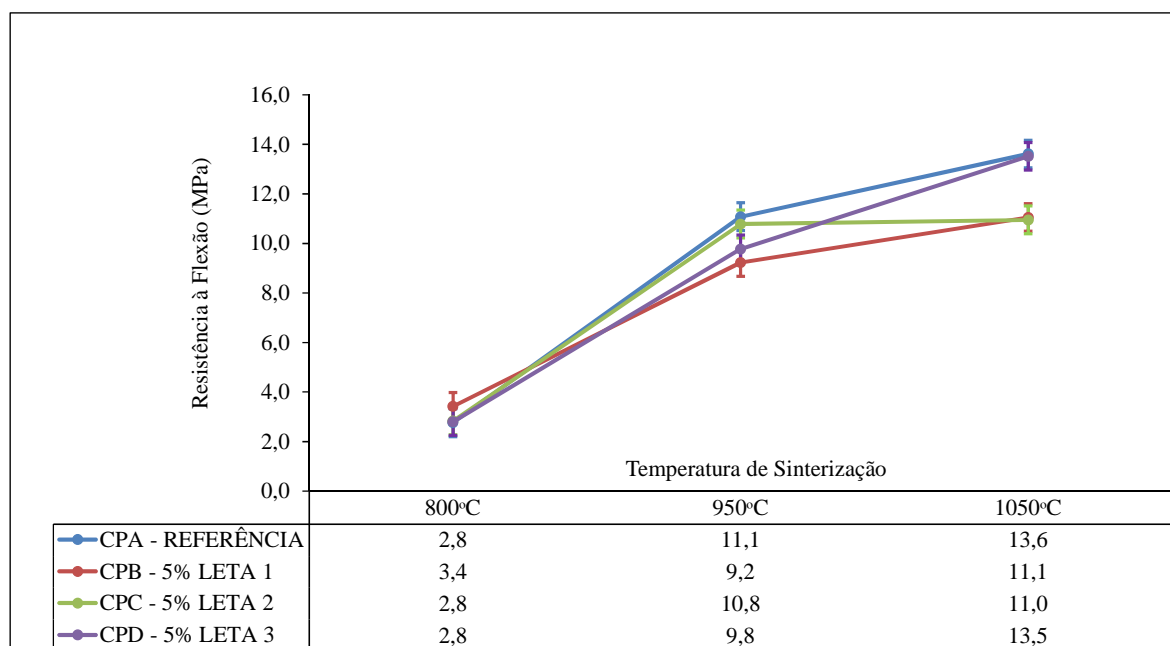


Figura 52 – Efeito da interação da temperatura e da composição do corpo de prova sobre a resistência

Conforme figura 50, verifica-se que os comportamentos dos corpos de prova são muito semelhantes na temperatura de 800°C; suas diferenças de resistência não são significativas tecnicamente.

Na temperatura de 950°C, os corpos de prova apresentam diferenças de resistência entre si mais significativas. Os corpos de prova CPB, apresentam a menor resistência e isto pode ser reflexo da alta quantidade de sólidos voláteis contidos no LETA 1, conforme tabela 22. Os demais corpos de prova com LETA, têm diferença de 1 MPa entre suas médias. No entanto, a maior diferença aparece entre os corpos de prova referência e a média da resistência dos corpos de prova com adição de LETA, onde os corpos de prova referência tem resistência superior de 13%. Este impacto já esperado acontece, pois qualidade da mistura é pior e a decomposição de alguns constituintes do LETA deixam os corpos de prova mais porosos e com uma resistência menor do que os corpos de prova referência. (MENEZES et al., 2006), (CHIOU et al., 2006), (MORUZZI, 2008), (SOARES, 2008).

Por fim a temperatura de 1050°C apresenta dois patamares de resistência; o primeiro em torno de 11 MPa e o segundo em torno de 13,5 MPa. Os corpos de prova com adição de LETA apresentaram comportamento influenciado pela quantidade de STF nos LETAS, conforme tabela 22. Os corpos de prova com adição de LETA 3, apresentaram o maior percentual de STF das três amostras de LETA com 46%. Isto ajudou os corpos de prova a não gerarem grandes vazios. No entanto, os corpos de prova com adição de LETA 1 e LETA 2 tiveram suas resistências impactadas pela pequena quantidade de STF (37% e 37,7%), visto que a grande quantidade de umidade e matéria orgânica nos LETAS, 63% e 62,3% respectivamente, contribuíram para a formação de uma massa mais úmida, facilitando a geração de poros.

Para comprovar estatisticamente este impacto, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência das cerâmicas com adição de LETA, onde analisou-se o impacto isolado e a interação da quantidade de STF presentes no LETA e a temperatura de sinterização sobre a resistência dos corpos de prova. A tabela 34 apresenta os resultados.

Tabela 34 – Efeitos da quantidade de STF e da temperatura de sinterização sobre a resistência à flexão

Efeitos	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância p	Fcrítico	Efeito Significativo
STF	5,07	1	5,07	4,33	0,040919	3,97	Sim
Temperatura	1283,56	2	641,78	548,75	0,000000	3,12	Sim
STF x Temperatura	44,28	2	22,14	18,93	0,000000	3,12	Sim
Erro	84,21	72	1,17				

Onde: GDL = Graus de liberdade; SQ = Soma quadrada; MQ = Média quadrada.

Os STF isoladamente apresentaram efeito significativo menor que a temperatura, com diferença de 6%, no entanto, tiveram papel fundamental no comportamento da resistência dos corpos de prova com LETA. A figura 51 apresenta a influência dos STF no comportamento da resistência dos corpos de prova.

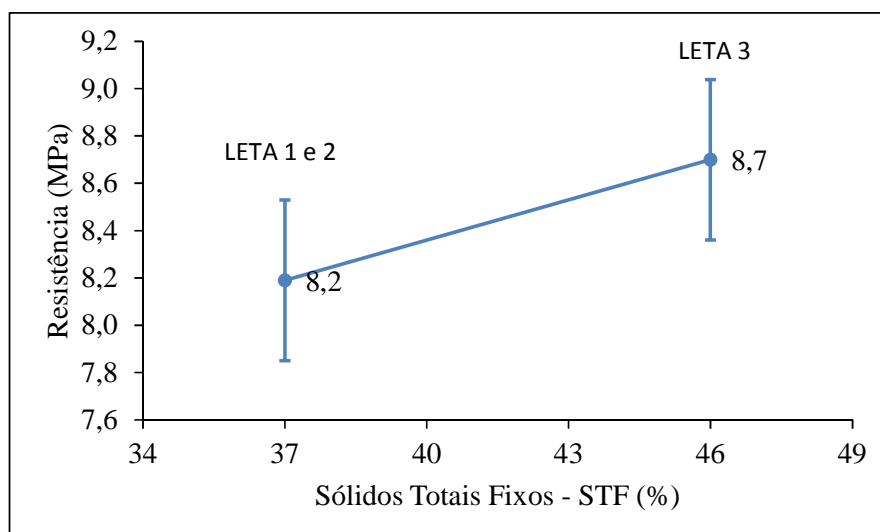


Figura 53 – Efeito da quantidade de STF dos LETAS nos corpos de prova

Conforme tabela 34 e figura 51, o efeito isolado não é tecnicamente significativo, no entanto em conjunto com a temperatura de sinterização o efeito dos STF evidencia uma tendência de comportamento nos corpos de prova com adição de LETA. A maior quantidade de STF (46%) tende a ajudar a tornar o corpo de prova mais resistente, quando há adição de LETA.

A menor quantidade de STF (37%), irá gerar um corpo de prova com menor resistência já que o restante da composição do LETA é umidade e matéria orgânica. A matéria orgânica e a umidade evaporam ou se fundem, facilitando a formação de poros e com isso diminuindo a resistência, comprovando que a incorporação do LETA, introduz perda de qualidade no corpo de prova. (MORUZZI, 2008), (CHIOU et al., 2006).

A figura 52 apresenta a o impacto dos STF dos LETAS em conjunto com a temperatura de sinterização sobre a resistência à flexão dos corpos de prova.

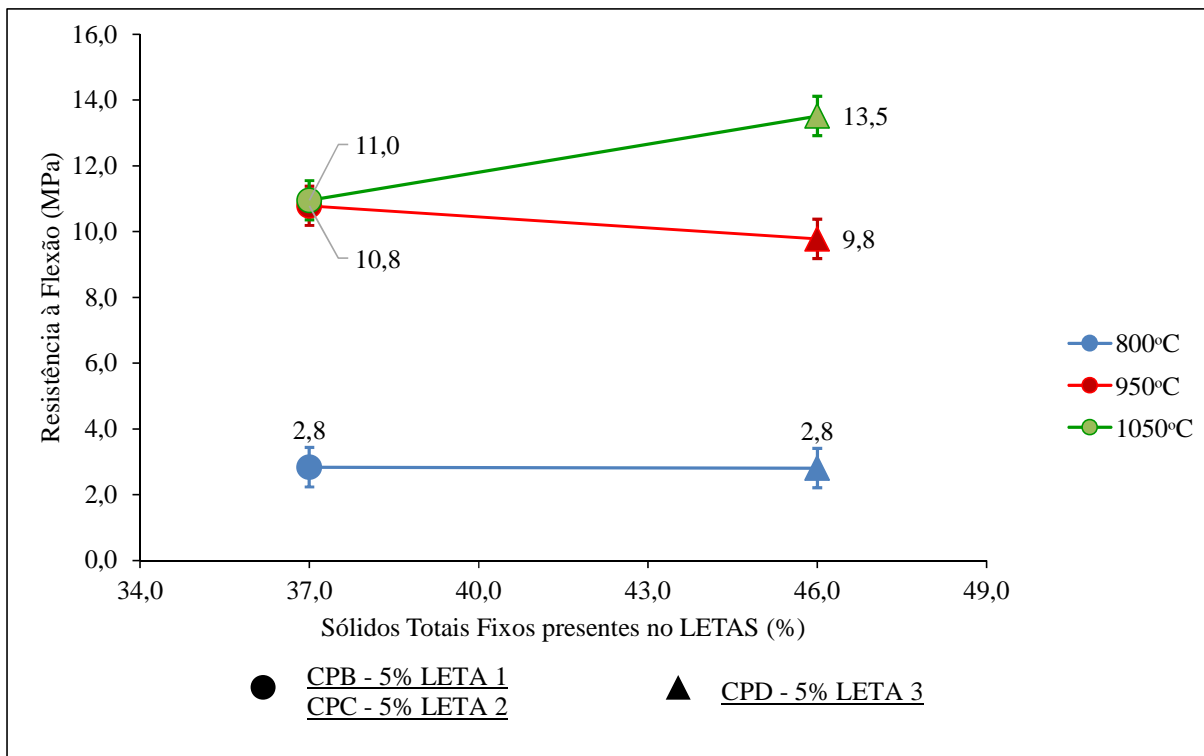


Figura 54 – Influência da temperatura e dos STF dos LETAS na resistência à flexão

Conforme figura 52, se observa o efeito do teor de STF associado com o efeito das 3 temperaturas de sinterização, na resistência à flexão. Em 800°C não há alteração na média das resistências com a mudança no percentual de STF nos LETAS. Na temperatura de 950°C, há uma pequena queda na média das resistências dos corpos de prova, porém é interessante observar que as diferenças produzidas parecem não ser significativas. Na temperatura de sinterização de 1050°C, a quantidade de STF no LETA mostra maior influência sobre a resistência à flexão das cerâmicas. Os LETAS 1 e 2 com 37% de STF levaram as cerâmicas a obter uma menor resistência em média de 11 MPa, isto deve-se ao fato de que o restante da composição dos LETAS nestas temperaturas (63%), evaporaram ou fundiram com a massa cerâmica, facilitando o aumento de poros e dificultando a coalescência da massa na fase vítrea. (BARBA et al. 2000).

Além deste aspecto, o LETA 1 apresenta 21,1% de sólidos voláteis, o que ajuda a propiciar uma menor resistência nas cerâmicas. O LETA 2, apresenta 12,2% a mais de sólidos voláteis do que o LETA 3, o que possivelmente propicia uma menor resistência das cerâmicas com lodo da coleta 2, quando comparados as cerâmicas com LETA 3.

Em contrapartida, as cerâmicas com LETA 3, com 46% de STF, apresentam menor dificuldade na coalescência, pois a umidade e matéria orgânica do LETA

correspondem a 54% de sua composição. O LETA 3 apresenta 48% e 12,2% a menos sólidos voláteis que o LETA 1 e 2 respectivamente, o que diminui a evaporação de componentes e aumenta a resistência à flexão dos corpos de prova CPD, quando comparados aos CPB e CPC.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho estudou a proposta de adição de LETA, gerado em períodos distintos do ano, à cerâmica vermelha. Desta forma, são apresentadas as considerações finais:

Existe **variabilidade na composição química do LETA** conforme o período do ano. Os principais aspectos que podem influenciar nesta variabilidade são a quantidade de coagulantes utilizados no tratamento da água, a qualidade da água do corpo hídrico em virtude de suas características como turbidez e matéria orgânica, assim como o tempo de limpeza dos decantadores.

As principais **características do LETA** que influenciaram as propriedades das cerâmicas vermelhas foram a quantidade de STF, STV, a umidade do LETA e a quantidade de CaO adicionada na prensagem do mesmo.

A interação entre as **temperaturas de sinterização e as características dos LETAS** demonstram que a adição do LETA na cerâmica vermelha altera suas propriedades conforme temperatura de sinterização, onde a propriedade mais afetada é a absorção de água.

Da mesma forma que os LETAS, os corpos de prova cerâmicos também foram **classificados ambientalmente** obtendo-se a classificação de “Resíduo Classe II A – Não Inerte”, solubilizando Al e Fe.

O **impacto da composição química das 3 amostras de LETA** com adição de 5% em cerâmica vermelha, alteram os resultados das propriedades nas temperaturas de sinterização de 950°C, com uma AAI média, 25% superior à cerâmica de referência, e em 1050°C, a AA obteve um valor médio, 22% inferior ao da cerâmica de referência, inviabilizando a aplicação do LETA para fabricação de tijolos nestas duas temperaturas. No entanto, quando sinterizados em 800°C, os ensaios dos corpos de prova demonstram que a adição deste resíduo em cerâmica vermelha é viável e, que o seu uso não impacta tecnicamente nas propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova, pois apresentam os mesmos resultados que a cerâmica de referência. Este resultado mostra-se positivo em virtude desta temperatura ser usualmente utilizada na fabricação de cerâmicas vermelhas, parecendo uma alternativa de reciclagem interessante.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade no estudo realizado, sugerem-se as seguintes propostas:

- Executar estudo similar, utilizando técnica de secagem do LETA sem adição de Cal.
- Efetuar análise de durabilidade das cerâmicas.
- Caracterizar ambientalmente as cerâmicas em 800°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERS A. P. F.; MELCHIADES F. G.; MACHADO R.; BALDO J. B.; BOSCHI A. O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X.** Revista Cerâmica Industrial. Vol 48, p. 34 - 37. 2002.

ALEXANDRA, F.S.S.; ANTÔNIO, O.V.M.; ARIANA, B.L.C.; FERNANDO, A.E.L. **Orientações básicas acerca do impacto do lodo gerado nas ETAS, alternativas de tratamento/disposição e legislação correlata.** Procuradoria Geral de Justiça de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

AMORÓS, J.L.A. **A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial: Parte III: variáveis do processo de compactação.** Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v.6, n.1, p.15-23, jan./fev. 2001.

ANAND, K.B.; VASUDEVAN, V.; RAMAMURTHY, K. **Water permeability assessment of alternative masonry systems.** Building and Environment. v. 38. p. 947 – 957. India. 2003.

ANDRÉS, A.; DÍAZ, M. C.; COZ, A.; ABELLÁN, M. J.; VIGURI, J. R. **Physico-chemical characterization of bricks all through the manufacture process in relation to efflorescence salts.** Journal of the European Ceramic Society. V. 29, p.1869–1877, 2009.

ANGELI, M.; HÉBERT, R.; MENÉNDES, B.; DAVID, C.; BIGAS, J. P. **Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering stone with sodium sulphate.** Engineering Geology. V. 15, p. 193 – 199, 2010.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 21. ed. Washington. APHA. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1:** Componentes Cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2:** Componentes Cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3:** Componentes Cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b.

AWWA. **Polymeric inorganic coagulants**. Denver. EUA. AWWA Research Foundation, 1989.

BARBA, A.; BELTRÁN V.; FEH, C.; GARCIA, J.; GOMES, F.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. Casteilón, España. Instituto de Tecnología Cerámica, 291p. 2002.

BASTOS, F. A.; **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

BERSCH R. A. **Avaliação da ação da florescência em cerâmica vermelha com adição de lodo de fosfatização**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2011.

BLOOT, E. L. **Avaliação do uso de delineamento de misturas na formulação de massas cerâmicas multicomponentes tradicionais**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais na Cerâmica. Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville – SC. 2010.

BÓ, M. D.; GILABERT, F. A.; SANCHES, E.; BOSCHI, A. O.; HOTZA, D.; SOLER, V. C. **Simulação matemática do processo de têmpera em materiais cerâmicos compostos por uma matriz vítrea e partículas cristalinas de quartzo**. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense. Revista técnico científica, v.3, n.1, p. 662 – 672. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. Site. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 17 de maio de 2014.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. n. 18. 2012.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Relatório técnico 32 – Perfil da Argila**. 2009.

BREHM, F. A.; **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil**. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil**. Ambiente Construído. v. 13, n. 2, p.15 – 27. Porto Alegre. 2013.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8° ed. LTC. 2012.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. Cap. 26. p. 863 - 904. Ipsis Gráfica e Editora, São Paulo, 2007.

CHIOU, I. J.; WANG, K. S.; CHEN, C. H. LIN, Y. T. **Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash**. Waste Management. v. 26. p. 1453–1461. 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo, 2009.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Site. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em 17 de agosto de 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Site. Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br/>> Acesso em: 25 de setembro de 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Relatório final de tratabilidade: Frente 1 – estudos de concepção e tratabilidade da água**. Rev 02. São Paulo. 2009.

COMPANHIA ESPÍRITO SANTENSE DE SANEAMENTO (CESAN). Site. Disponível em: <<http://www.cesan.com.br/>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE: CONAMA **RE nº 357 de 17 de março de 2015**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE: CONAMA **RE nº 430 de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. 2011.

CONTRERAS, M.; MARTÍN, M.I.; GÁSQUEZ, M. J.; ROMERO, M. BOLÍVAR, J.P. **Valorisation of ilmenite mud waste in the manufacture of comercial ceramic**. Constrution and building materials. n. 72. p. 31 – 40. Spain. 2014.

CORDEIRO J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil. 1993.

CORNWELL, D. A. Handbook of practice - water treatment plant waste management. AWWA Research Foundation and American Water Work Association. 431p. 1 ed., Virginia. 1987.

CORNWELL, D. A.; MUTTER, J.; RODNEY, N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial applications marketing of water plant residuals**. AWWA Research Foundation and American Water Work Association. 2000. 183p.

CRUZ, J. G. H.; **Alternativas para a aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento de efluente de uma lavanderia industrial.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. RS. 2004.

CUSTÓDIO, A.; CUSTÓDIO, M.; COREGGIO, R.P.; CARGNIN, M. **Estudo da compactação de massas para cerâmica vermelha.** Revista Técnico Científica do Instituto Federal de Santa Catarina. 2012.

DALSASSO, R.L.; SENS, M.L. **Filtração direta com pré-Floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxicloreto de alumínio: estudo com água de manancial eutrofizado.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 11, n. 3, p. 241-249, 2006.

DAYTON, E. A.; BASTA, N. T. **Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute.** Journal Water Environment Research, v 73, n. 1, p. 52 – 57, 2001.

DEFEZ, B.; FAJARNÉS, G. P.; SANTIAGO, V.; SORIA, J. M.; LLUNA, E. **Influence of the load application rate and statistical model for brittle failure on the bending strength of extruded ceramic tiles.** Ceramics International. v. 39. p. 3329 – 3335. 2013.

DEMATOS, M.; COSTA, G.J.; FONSECA, D. A.; BRAGA, J.P.C.; JANZEN, W. **Redução do volume de lodo gerado em estações de tratamento de água – a proposta de recuperação do coagulante pelo processo de acidificação no sistema Rio Manso.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001.

DIAS, L.M.; BATALIONE, G.; MORAIS, F.U.; SOBRINHO, J. F.; RIBEIRO, M.C.; LISBOA, M. S. **Alternativa de destinação final do lodo de estação de tratamento de água – Fabricação de blocos cerâmicos II.** 27º Congresso da Associação Interamericana de Engenharia Sanitária 2008.

DIAS, S. N.; BLANCO, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta.** Instituto Nacional de ciências e Tecnologia em Salinidade. Fortaleza – CE. 2010.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2º edição, volume I. 792 p. Editora Rima. 2005.

DONDI, M. **Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados.** Revista Cerâmica Industrial, vol 11 nº 3. p 7 – 11. 2006.

FERRANTI, E. M.; GEHLING, G. R. **Alternativa para desidratação de lodos de estação de tratamento de água (ETA) em leitos de secagem – condicionamento químico com resíduo de cal.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005.

FERREIRA, F.S.S.; SOBRINHO, P. A. **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água.** Revista de Engenharia Sanitária Ambiental. São Paulo: 1997, vol.3, n.3 e 4.

FERREIRA, S. S. F.; WAELKENS B. E.; **Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua**

disposição em estações de tratamento de esgotos. Revista de Engenharia Sanitária Ambiental. São Paulo. Vol 14 nº3. p.317-326. 2009.

GONÇALVES, T. C. D. **Salt crystallization in plastered or rendered walls.** 2007. Tese (PhD em Engenharia Civil). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

INSTITUTO TRATA BRASIL. (TRATA BRASIL). **Ranking de Saneamento.** Site. Disponível em: < <http://www.tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento>>. Acesso em 07 julho. 2013

KALINKIN, A. M.; Kalinkina, E. V.; Zalkind, O. A.; Makarova, T. I.; **Inorganic Material**, vol. 41, pg 1073 – 1079. Russia, 2005.

KAZMIERCZAK, C. S. **Desempenho de paredes de materiais cerâmicos a penetração de água da chuva: uma análise de fatores condicionantes.** 1989. 127 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1989.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** Cap. 18. p. 563 - 586. Ispis Gráfica e Editora, 2º edição, São Paulo, 2010.

KIM, Y.C.; LEE, K. H.; SASAKI, S.; HASHIMOTO, K.; IKEBUKURO, K.; KARUBE, I.; **Photocatalytic sensor for chemical oxygen demand determination based on oxygen electrode.** Journal Analytical Chemistry, Volume 72. nº 14. 2000.

KIZINIEVIC, O.; ZURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIC, V.; ZURAUSKAS, R. **Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products.** Construction and building materials. nº 41. p 464 – 473. Lithuania. 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos da qualidade e tratamento de água.** Editora Átomo, 3º edição. 496 p. Campinas – SP, 2010.

LIEW, A. G.; IDRIS, A.; SAMAD, A.A.; WONG, C. H. K.; JAAFAR, M. S.; BAKI, A. M. **Reusability of sewage sludge in clay bricks.** J Mater Cycles Waste Manag n. 6 p. 41 – 47. 2004.

LONDRINA. Plano Municipal de Saneamento Básico. **Relatório de diagnóstico da situação do Saneamento.** Londrina, 2008.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. **Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico.** Bioscience Journal - Biosci. J. v. 27. n. 1. p. 70 – 76. 2011.

MENDES, F., COELHO, N. **Estudo do uso da Moringa oleifera para remoção de prata e manganês em águas.** Revista Horizonte Científico. v1, p. 1-18. Uberlândia, Brasil. 2007.

MENEZES, R.R.; CAMPOS, L. F.; NEVES G. de A.; FERREIRA, H. C. **Aspectos fundamentais da expansão por umidade: uma revisão. Parte I: Aspectos históricos, causas e correlações.** Revista Cerâmica Industrial, vol 52 n. 321. p.1-14. São Paulo. 2006.

MONTEIRO, S.N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J.I.; SANCHÉS, R.; VIEIRA, C.M.F.; **Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic.** Construction and Building Materials. Vol. 22, p 1281 – 1287. 2008.

MORAES, C. A. M.; KIELING, A. G.; CAETANO, M.O.; GOMES, L.P.; **Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating.** Resources, Conservation and Recycling. v.54 p. 1170 – 1176. 2010.

MORUZZI, R. B. **Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETAII) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha.** 4º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. 2008.

MULLER E. A.; **Avaliação do uso de lodos de estação de tratamento de água como matéria-prima na confecção de tijolos cerâmicos: Estudo de caso - eta bolonha.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

NAGA, S. M., EL-MAGHRABY, A. **Industrial waste as raw materials for tile making.** Key Engineering Materials. V.206 – 213, p. 1787 – 1790. Switzerland, 2002.

OBUSENG, V.; NAREETSILE, F.; KWAAMBWA, H. M.; **A study of the removal of heavy metals from aqueous solutions by Moringa oleifera seeds and amine-based ligand 1,4-bis[N,N-bis(2-picoyl)amino]butane.** Analytica Chimica Acta, Vol.730, p 87– 92, 2012.

OLIVEIRA, D. C.; BASTOS, R. K. X.; PIMENTA, J. F. P.; BORGES, N. B.; FREITAS, A. G. **Performance evaluation of a sedimentation unit: Hydraulic parameters and their influence sediment water quality.** Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. Vol 1. N. 3. 2007.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica Industrial. v. 50. p. 324 – 330. 2004.

OLIVEIRA, J. C. S.; LIRA, B. B.; YADAVA, Y. P.; SILVA, C. M. M.; SANTOS, T. W. G. **Importância do carbonato de cálcio na fabricação de tijolos.** Revista Cerâmica Industrial, vol 16 n. 5. p 34-38. 2011.

OLIVEIRA, N. S.; **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Site. Disponível em: <<http://www.un.org/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2014a.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Site. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2014b.

PAVANELLI, G.; **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2001.

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

PENDIAS, A. K. **Trace elements in soils and planst.** Fourth edition. Boca Raton, CRC Press. New York, 2011.

PEREIRA, E. G.; **Aproveitamento de resíduo da estação de tratamento de água de Cubatão para a fabricação de elementos construtivos estruturais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008

PEREIRA, S. L. M.; **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame.** Dissertação de Mestrado – Programa de pós graduação engenharia urbana e ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2011.

PETRUCCI, E. G. **Materiais de construção.** Editora Globo. São Paulo. 2007.

PIEPER, K.M.C. **Avaliação do uso de Geossintético para o desague e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água.** Programa de Pós-Graduação de Eng Civil. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre. RS. 2008.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. **Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica industrial. São Paulo. Vol 56 n. 339. p.237-243. 2010.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL.** Joinvile, 2003.

QUESADA, D. E.; GARCÍA, C.M.; CARTAS, M. L. M.; PALOMINO, M.T.C.; VILLAREJO, L. P.; PÉREZ, N. C.; IGUESIAS, F. A. C. **The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks.** Applied Clay Science. v. 52 p. 270 – 276. 2011.

RIBEIRO, F. L. M.; **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA Itabirito – MG.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. 2007.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, A. A. L. LABRINCHA, J. A. **Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas.** Revista Cerâmica Industrial, vol 8 n. 1. p 37-42. 2003.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO, J. M. N. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. Editora Edgard Blucher. LTDA. p 344. 2003.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2001.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **RILEM TC 116-PCD**: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. *Materials and Structures*. v. 32. p 174-179. Apr 1999.

ROVERI, C. D.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T. **Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP**. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 53, p. 436 – 441. 2007.

SABOGAL-PAZ; DI BERNARDO. **Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e disposição dos resíduos gerados na estação de tratamento de água**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

SANTIS, B. C.; SICHIERI, E. P., ROSSIGNOLO, J. A.; FERREIRA G., FIORELLI, J. **Caracterização de massas cerâmicas do estado de São Paulo para a produção de agregados leves para concreto**. *Revista Cerâmica Industrial*. v.59. p. 198 – 205. 2013.

SANTOS, C. V. P.; SILVA, A. R.; FILHO, M. A. S. G.; NETO, E. F.; RABELO, A. A. **Índice de Plasticidade e Análise Racional de Argilas de Marabá (PA) para Avaliação das Zonas de Extrusão**. *Revista Cerâmica Industrial*. V. 17. p. 25 – 27. 2012.

SANTOS, I. S. S.; RAMIRES, M. V. V.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H. C.; KERN, A. P.; CAMARGO, S. A. **Caracterização e identificação do resíduo: Lodo da estação de tratamento do município de São Leopoldo**. 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre. 2001.

SANTOS, I. S. S.; SILVA, I. W. **Manual da Cerâmica Vermelha**. 1º Edição. Porto Alegre, RS, 1995.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, v.1, 1989.

SILVA, C.A.; SILVEIRA, C.; SILVA, F.A.; KLEN, M. R. F.; BERGAMASCO, R.; **Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação / floculação da água com os coagulantes pac e moringa oleífera**. *Revista Engevista*, V. 14, n. 3. p. 302-309. 2012.

SILVA, R. J. S. M. **Humidade ascensional – Dimensionamento de sistemas de ventilação da base das paredes**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto. Porto. Portugal. 2012.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina. Londrina. Paraná. 2012.

SIMPSON, A.; BURGESS, P.; COLEMAN, S.J.M. **The management potable water treatment sludge: Present situation in UK.** CIWEM - Conference on Innovafions in Potable Water Sludge Treatment and Disposal held in London. 2002.

SMITH. W. F.; **Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais.** 3 ed. Portugal: McGRAW-HILL. 892 p. 1998.

SOARES, D. C. S. C. **Estudo estrutural de produtos da degradação de [Pd₂(C², N-(dmpa)₂(u-dppf) Cl₂].** Dissertação de Mestrado. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

SOARES, R. A. L. **Influência do teor de calcário no comportamento físico, mecânico e microestrutural de cerâmicas estruturais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. Rio Grande do Norte. 2008.

SOUZA M.B. **Estudo do lodo gerado na estação de tratamento de água de Buíque – PE: caracterização, quantificação e identificação de oportunidades de minimização dos resíduos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe – PPGQ . São Cristóvão. 2009.

SOUZA S. P. **Ciência e tecnologia das argilas.** 2º Edição. São Paulo, EDUSP, 1975. v.1 e 2.

TALLINI, V. M. J.; **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água, micro esferas de vidro de jateamento, sais de neutralização de ácidos de baterias e areia de fundição.** Dissertação de Mestrado. Engenharia e ciências dos materiais. Universidade Federal do Paraná. 2009.

TATARI R. **Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Engenharia Química. Toledo. 2008

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A. SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. **The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials.** Applied Clay Science. v.53, p. 561 – 565. 2011.

TSUTIYA, M. T; HIRATA A. Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água do estado de São Paulo.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa – Paraíba. 2001.

TZOUPANOS, N.D.; ZOUBOULIS, A.I. **Preparation, characterisation and application of novel composite coagulants for surface water treatment.** Water Research v. 45 n. 12. p. 3614 – 3626. 2011.

VALADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. **Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa.** Revista Bragantia. v. 62. n.1. p. 111 – 118. 2003

VANACOR, R. N. **Avaliação do coagulante orgânico veta organic utilizado em uma estação de tratamento de água para abastecimento público.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2005.

VELASCO, P. M.; ORTÍZ, M. P. M.; GIRÓ, M. A. M.; VELASCO, L. M. **Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review.** Construction and Building Materials. Vol. 63, p 97 – 107. 2014.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Utilização de granito em massa cerâmica para telhas. Cerâmica industrial. v. 9. p. 28 – 32. 2004.

VILLAREJO, L. P.; IGLESIAS, F. A. C.; MARTÍNEZ, S. M.; ARTIAGA, R.; COSP, J. P.; **Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry.** Construction and building materials. n. 35. p 656-665. 2012.

VITORINO, J.P.D.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. **Caraterização e incorporação de resíduos provenientes de estação de tratamento de água em cerâmica argilosa.** Revista Cerâmica Industrial. n. 55. p 385 – 392. 2009.

WERLE, A.P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação.** 2010. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WIECK, R.; DUAILIBI, J. **Extrusão em cerâmica vermelha: Princípios básicos, problemas e soluções.** Revista Cerâmica Industrial. v. 18, p.16 – 23. 2013.

ZAMORA, R.M.R.; AYALA, F.E.; GARCIA, L.C.; MORENO A.D.;SCHOUWENAARS, R. **Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges.** Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. Coyoacán, México. n. 43. p 1562 – 1568. 2008.

ANEXO A

