

**INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTE DE PAPEL EM CERÂMICA VERMELHA**

LUÍS SÉRGIO PEIXOTO PESSANHA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Março de 2019

**INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
EFLUENTE DE PAPEL EM CERÂMICA VERMELHA**

LUÍS SÉRGIO PEIXOTO PESSANHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: D. Sc. Jonas Alexandre

Co-orientador: D. Sc. Afonso Rangel Garcez de Azevedo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Março de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

P475 Pessanha, Luis Sérgio Peixoto.

INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE PAPEL EM CERÂMICA VERMELHA / Luis Sérgio Peixoto Pessanha. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.

87 f. : il.

Bibliografia: 69 - 80.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2019.

Orientador: Jonas Alexandre.

Coorientador: Afonso Rangel Garcez de Azevedo.

1. resíduo. 2. lodo primário. 3. cerâmica vermelha. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE PAPEL EM CERÂMICA VERMELHA

LUÍS SÉRGIO PEIXOTO PESSANHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 26 de março de 2019.

Comissão Examinadora:

D. Sc. Fábio de Oliveira Braga – UFF

D. Sc. Rosane da Silva Toledo Manhães – UENF

D. Sc. Gustavo de Castro Xavier - UENF

D. Sc. Afonso Rangel Garcez de Azevedo - UFF
Co-orientador

D. Sc. Jonas Alexandre - UENF
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço este trabalho a Deus, por ter me dado saúde e forças para superar este grande desafio; à minha esposa Ingrid Farias, por ter me incentivado a iniciar o Mestrado e ter superado as dificuldades diárias ao meu lado; aos meus pais Sérgio Pessanha e Geliane Pessanha; à UENF, bem como o seu corpo docente e os técnicos de laboratório; as amizades conquistadas no decorrer do Mestrado; ao professor e co-orientador Afonso Azevedo; ao professor e orientador Jonas Alexandre, pela seriedade, apoio e incentivos, pois acreditou em meu potencial e me deu todo o suporte através de ensinamentos teóricos e práticos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Justificativa	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Argilas	5
3.2. Argilas de Campos dos Goytacazes	5
3.3. Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes	7
3.4. Cerâmica	8
3.4.1. Cerâmica Vermelha	8
3.4.1.1. Extração da argila	10
3.4.1.2. Preparo da massa cerâmica	11
3.4.1.3. Conformação	12
3.4.1.4. Secagem	14
3.4.1.5. Queima	15
3.4.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Cerâmica Vermelha	16
3.4.2.1. Porosidade Aparente (PA)	16
3.4.2.2. Absorção de Água (AA)	17
3.4.2.3. Massa Específica Aparente (MEA)	17
3.4.2.4. Retração Linear (RL)	18
3.4.2.5. Resistência à Flexão (RF)	18
3.5. Resíduos Sólidos	18
3.5.1. Reaproveitamento dos resíduos industriais na cerâmica vermelha	19
3.6. Papel	20
3.6.1. Resíduos provenientes da indústria de fabricação do papel	21
3.6.2. Destino do lodo primário	24

3.7. Histórico de pesquisas com resíduo de papel.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Materiais.....	32
4.1.1. Argila	32
4.1.2. Lodo Primário	32
4.1.3. Água.....	33
4.2. Métodos.....	33
4.2.1. Caracterização das matérias-primas	33
4.2.1.1. Caracterização Física.....	33
4.2.1.1.1. Análise Granulométrica	34
4.2.1.1.2. Limites de Atterberg	34
4.2.1.1.3. Massa específica real dos grãos	34
4.2.1.2. Caracterização Química.....	35
4.2.1.3. Caracterização Mineralógica	35
4.2.1.4. Análise Térmica (ATD/TG/DTG).....	35
4.2.1.5. Caracterização Morfológica.....	35
4.2.2. Determinação do Teor de Umidade	36
4.2.3. Processos de obtenção dos corpos de prova	36
4.2.3.1. Preparo da massa cerâmica.....	36
4.2.3.2. Formulação	38
4.2.3.3. Conformação	40
4.2.3.4. Secagem.....	41
4.2.3.5. Queima	41
4.2.4. Ensaio físicos e mecânicos dos corpos de provas	42
4.2.4.1. Absorção de Água (AA).....	43
4.2.4.2. Porosidade Aparente (PA)	43
4.2.4.3. Massa Específica Aparente (MEA).....	43
4.2.4.4. Retração Linear de Queima (RLQ).....	44
4.2.4.5. Resistência à Flexão (RF).....	44
4.3. Análise estatística dos resultados experimentais.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1. Caracterização das matérias-primas	46
5.1.1. Caracterização Física.....	46
5.1.1.1. Análise Granulométrica	46

5.1.1.2. Limites de Atterberg	47
5.1.1.3. Massa Específica Real dos Grãos	48
5.1.2. Caracterização Química	48
5.1.3. Caracterização Mineralógica	49
5.1.4. Análise Térmica (ATD/TG/DTG)	53
5.1.5. Caracterização Morfológica	56
5.2. Teor de Umidade	58
5.3. Resultado dos ensaios físicos e mecânicos	59
5.3.1. Porosidade Aparente	59
5.3.2. Absorção de Água	60
5.3.3. Massa Específica Aparente	62
5.3.4. Retração Linear de Queima	63
5.3.5. Resistência à Flexão	64
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6.1. Conclusão	66
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	68
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
Apêndice A: Controle da adição de água em cada mistura.....	81
Apêndice B: Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey.....	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – PRODUÇÃO BRASILEIRA DE PAPEL	1
FIGURA 2.1 – DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL POR TIPO DE DESTINAÇÃO.....	4
FIGURA 3.1–BLOCO CERÂMICO PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO.....	9
FIGURA 3.2 - FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DA CERÂMICA.	10
FIGURA 3.3 – EXTRAÇÃO DE ARGILA.....	11
FIGURA 3.4 – PREPARO DA MASSA CERÂMICA	12
FIGURA 3.5 – CONFORMAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS POR EXTRUSÃO.....	13
FIGURA 3.6 –SECAGEM DOS BLOCOS CERÂMICOS – NATURAL (A) E ARTIFICIAL (B).....	14
FIGURA 3.7 – QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS.....	15
FIGURA 3.8 – FLUXOGRAMA DOS POLUENTES DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL....	22
FIGURA 3.9 - LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>	23
FIGURA 3.10 – RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA. SOLO DE LATERÍTICO (A) E SOLO ALUVIONAR (B).....	26
FIGURA 3.11 – DENSIDADE APARENTE. SOLO DE LATERÍTICO (A) E SOLO ALUVIONAR (B) ...	27
FIGURA 3.12 - ABSORÇÃO DE ÁGUA. SOLO DE LATERÍTICO (A) E SOLO ALUVIONAR (B)	28
FIGURA 3.13 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO. SOLO DE LATERÍTICO (A) E SOLO ALUVIONAR (B).....	29
FIGURA 3.14 – MICROSCOPIA ÓPTICA DOS TIJOLOS: ARGILA PURA (A) E ARGILA COM LODO PRIMÁRIO (B)	30
FIGURA 4.1 - FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
FIGURA 4.2 – ARGILAS AMARELA E CINZA.....	32
FIGURA 4.3 – LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>	33
FIGURA 4.4- ESTADOS DE CONSISTÊNCIA	34
FIGURA 4.5 – MISTURA MECÂNICA DO LODO PRIMÁRIO COM ÁGUA DE AMASSAMENTO.	37
FIGURA 4.6 – GRÃOS DO RESÍDUO NA SUPERFÍCIE E NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CP.	38
FIGURA 4.7 – PENEIRAMENTO DO RESÍDUO M-5 E M-10 (A) E (B).	39
FIGURA 4.8 - PENEIRAMENTO COM AUXÍLIO DE MESA VIBRATÓRIA (A); RESÍDUO RETIDO NA PENEIRA (B).....	39
FIGURA 4.9 - MÁQUINA EXTRUSORA VERDÉS, MODELO BR-051.	40
FIGURA 4.10 – SECAGEM EM AMBIENTE NATURAL.	41
FIGURA 4.11 – SECAGEM EM ESTUFA SOLAB, MODELO SL-100.....	41

FIGURA 4.12 – FORNO INTI, MODELO FL-1300.....	42
FIGURA 5.1 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RESÍDUO E DAS MASSAS ARGILOSAS.....	47
FIGURA 5.2 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA ARGILA AMARELA.	50
FIGURA 5.3 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA ARGILA CINZA	50
FIGURA 5.4 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DO RESÍDUO DE PAPEL	51
FIGURA 5.5 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DO M-0 QUEIMADO A 850 °C.....	52
FIGURA 5.6 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DO M-10 QUEIMADO A 850 °C.....	52
FIGURA 5.7 – CURVAS DE TG / DTG DAS ARGILAS	53
FIGURA 5.8 – CURVAS DE ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD) DAS ARGILAS.....	54
FIGURA 5.9 – CURVAS DE TG / DTG DO LODO PRIMÁRIO.....	55
FIGURA 5.10 – CURVAS DE ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (ATD) DO LODO PRIMÁRIO	55
FIGURA 5.11 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DAS ARGILAS	56
FIGURA 5.12 – ANÁLISE QUÍMICA PONTUAL POR ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) DAS ARGILAS.	57
FIGURA 5.13 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DO RESÍDUO DE PAPEL	57
FIGURA 5.14 – ANÁLISE QUÍMICA PONTUAL POR ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) DO RESÍDUO DE PAPEL.	58
FIGURA 5.15 – POROSIDADE APARENTE DAS COMPOSIÇÕES QUEIMADAS A 700 E 850°C. .	60
FIGURA 5.16 – ABSORÇÃO E ÁGUA DAS COMPOSIÇÕES QUEIMADAS A 700 E 850 °C	61
FIGURA 5.17 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE DAS COMPOSIÇÕES QUEIMADAS A 700 E 850°C	62
FIGURA 5.18 – RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA DAS COMPOSIÇÕES QUEIMADAS A 700 E 850°C.	63
FIGURA 5.19 – TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO DAS COMPOSIÇÕES QUEIMADAS A 700 E 850°C.	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS E MEDIDAS MITIGADORAS DA EXTRAÇÃO DE ARGILA.....	11
TABELA 4.1 - FORMULAÇÃO UTILIZADA NA PESQUISA	38
TABELA 4.2 – PERCENTUAL DE ÁGUA ADICIONADA EM FUNÇÃO DAS MISTURAS.	40
TABELA 4.3 – DIVISÃO DOS CP’S POR MISTURA E TEMPERATURA.	42
TABELA 4.4 – PARÂMETRO PARA ABSORÇÃO DE ÁGUA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE BLOCOS CERÂMICOS	42
TABELA 5.1 – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO RESÍDUO E DAS MASSAS ARGILOSAS	46
TABELA 5.2 – LIMITES DE ATTERBERG	48
TABELA 5.3 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS DAS MATÉRIAS-PRIMAS	48
TABELA 5.4– CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS (% EM PESO).....	49
TABELA 5.5 – TEORES DE UMIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS	59
TABELA 5.6 – DESVIO PADRÃO DA POROSIDADE APARENTE.....	59
TABELA 5.7 – DESVIO PADRÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	61
TABELA 5.8 – DESVIO PADRÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE	62
TABELA 5.9 – DESVIO PADRÃO DA RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA.	63
TABELA 5.10 – DESVIO PADRÃO DA TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANFACER	Associação Nacional Fabricantes Cerâmicas Revestimento
ATD	Análises Térmicas Diferencial
COPAPA	Cia Paduana de Papéis
COVs	Compostos orgânicos voláteis
CP	Corpo de prova
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectrometria de energia dispersiva
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FRX	Fluorescência de raios X
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
LCFIS	Laboratório de Ciências Físicas
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEA	Massa Específica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PA	Porosidade Aparente
pH	Potencial hidrogeniônico
RF	Resistência a Flexão
RL	Retração Linear
RSU	Resíduos sólidos urbanos

TG	Termogravimétrica
USCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar os efeitos da mistura de um resíduo gerado durante a produção de papel em cerâmica vermelha, para confecção de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. O resíduo denominado lodo primário foi utilizado *in natura*, misturado com uma adição apropriada de água, em duas argilas distintas, denominadas argila amarela e cinza. As argilas e o resíduo são respectivamente dos municípios de Campos dos Goytacazes e Santo Antônio de Pádua, norte do Estado do Rio de Janeiro, e foram submetidos à caracterização química, física, mineralógica, térmica e morfológica. O preparo das formulações foi feito com 0% (como padrão de comparação), 5%, 10% e 15% em peso do resíduo. Os corpos de prova (CP) foram conformados por extrusão, queimados à 700 °C e 850 °C e posteriormente foram submetidos aos ensaios físicos e mecânicos como porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente, retração linear de queima e tensão de ruptura à flexão. Os resultados indicam que a incorporação do lodo primário *in natura* na cerâmica vermelha é viável, já que a resistência mecânica dos blocos cerâmicos aumentou com a adição do resíduo nas duas temperaturas em relação ao material de referência. Entretanto, recomenda-se utilizar 5% em peso de resíduo para as peças queimadas a 700 °C ou até 10% para as peças queimadas a 850 °C. Caso os percentuais de resíduo sejam maiores do que o sugerido para as duas temperaturas, a absorção de água das peças cerâmicas supera o percentual recomendado, inviabilizando a sua utilização.

Palavra-chave: resíduo, lodo primário, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

This research has the objective to evaluate the effects of residue mixture, generated during paper production, in red ceramic for preparation of ceramic blocks. The residue called primary sludge was used in nature, mixed with kneading water, in two distinct clays, called yellow and gray clay. The clays and residue are respectively from municipalities of Campos dos Goytacazes and Santo Antônio de Pádua, in north of Rio de Janeiro State, and were submitted to chemical, physical, mineralogical, thermal and morphological characterization. The preparation of formulations was done with 0% (as standard of comparison), 5%, 10% and 15% of residue weight. The specimens were extruded, burned at 700 °C and 850 °C, and then they were submitted to physical and mechanical tests, such as apparent porosity, water absorption, apparent specific mass, linear shrinkage and flexural strength. The results indicate that primary sludge in nature incorporation into red ceramic is viable, since the ceramic blocks mechanical strength increased with the addition of the residue at two temperatures, in relation at reference material. However, it is recommended to use 5% by weight of waste for the parts burned at 700 °C or until 10% for parts burned at 850 °C. If the residue percentage is higher than that recommended for the two temperatures, the water absorption of ceramic pieces exceeds the recommended percentage, making it unfeasible.

Keywords: residue, primary sludge, red ceramic.

1. INTRODUÇÃO

Devido o crescimento das atividades do setor construtivo estar atrelado aos impactos ambientais (RAUT *et al.*, 2012), a indústria da construção civil deve adaptar-se à materiais menos agressivos, duráveis e que exijam o mínimo de impacto possível para sua obtenção (WIEMES *et al.*, 2017). Isso requer linhas de pesquisas que busquem novas alternativas para a redução do consumo de matéria-prima, além de dar um destino ambientalmente correto aos resíduos industriais que, de outra forma, seriam despejados em locais inapropriados.

Os resíduos industriais são restos de materiais gerados durante o processo de fabricação dos mais variados tipos de produtos, e quando são descartados de forma inadequada, são as principais fontes de contaminação da água, do ar e do solo, podendo oferecer sérios riscos ao meio ambiente e à saúde humana.

Nesse contexto, estão inseridas as indústrias de fabricação de papel, que inerente ao seu processo produtivo e volume de produção (Figura 1.1), geram inevitavelmente uma grande quantidade de resíduos (SUTCU *et al.*, 2014; DEMIREL e ALTIN, 2017).

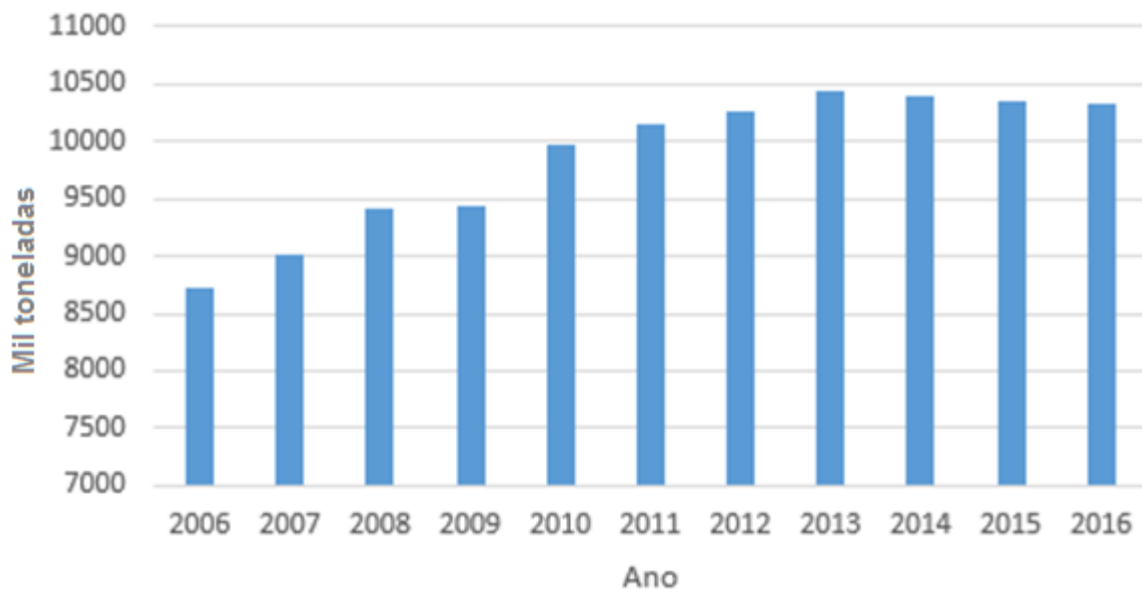


Figura 1.1 – Produção brasileira de papel. Fonte: Adaptado do IBÁ (2017).

Um fator alarmante segundo Azevedo *et al.* (2018) e Hong *et al.* (2018), é que os resíduos gerados nas estações de tratamento deste segmento são lançados em locais inapropriados, como aterro ou descarte oceânico, causando sérios problemas ambientais.

De acordo com Boni *et al.* (2004), os resíduos gerados pelas indústrias de fabricação de papel são divididos em categorias, e classificados da seguinte forma: resíduos provenientes da produção de fibras virgens de madeira (lodo primário); resíduos gerados por remoção de tintas das fibras (lodo de destinação); resíduo ativado do sistema biológico (lodo secundário); resíduo da produção de papel com o biológico (lodo combinado).

A reciclagem de resíduos é de grande interesse para as indústrias, principalmente devido às exigências dos órgãos ambientais, e uma das práticas estudadas para destinação correta destes tem sido a utilização em materiais da construção civil (RAUT *et al.*, 2012; AREIAS *et al.*, 2017).

Segundo Reinoso *et al.* (2010), a construção civil é o setor de atividade tecnológica mais adequado para consumir resíduos sólidos. O motivo para isso é a grande quantidade de matérias-primas utilizadas pelo setor.

No setor cerâmico, mensalmente são produzidos mais de 4 bilhões de blocos de vedação e estruturais e 1,3 bilhões de telhas, representando 4,8% da indústria da construção civil do país (MORAES, 2016). Pelo fato da indústria de cerâmica assimilar resíduos na sua produção, pesquisas pretendem proporcionar um destino ao lodo primário e garantir a viabilidade de sua utilização na cerâmica vermelha (CUSIDO *et al.*, 2015; VIEIRA *et al.*, 2016; GOEL e KALAMDHAD, 2017).

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é incorporar o lodo primário *in natura*, aproveitando toda a massa de água existente em sua composição, em duas argilas distintas, para verificar a viabilidade de produção de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar o lodo primário e as argilas, quanto à análise física, química, mineralógica, térmica e morfológica;
- Identificar o percentual máximo de lodo primário *in natura* a ser incorporado na massa cerâmica;
- Avaliar os efeitos da incorporação do lodo primário *in natura* nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos, para estabelecer o percentual de resíduo que garanta valores recomendados para a sua utilização.

2.3. Justificativa

O crescimento da população mundial, a mudança dos seus hábitos consumistas e o aperfeiçoamento de técnicas cada vez mais modernas de industrialização, resultaram em um aumento significativo de volume dos resíduos.

Os números referentes à geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) em 2016 revelam um total anual de quase 78,3 milhões de toneladas no país, resultante de uma queda de 2% no montante gerado em relação à 2015. O montante coletado em 2016 foi de 71,3 milhões de toneladas, o que registrou um índice de cobertura de coleta de 91% para o país, pequeno avanço comparado ao ano anterior, e que evidencia que 7 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2016).

No entanto, conforme a Figura 2.1, os índices de disposição final de RSU apresentaram retrocesso de 2015 para 2016 no encaminhamento ambientalmente adequado dos RSU coletados, passando de 58,7 para 58,4% do montante anual

disposto em aterros sanitários. As unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda estão presentes em todas as regiões do país e receberam mais de 81 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos na saúde (ABRELPE, 2016).

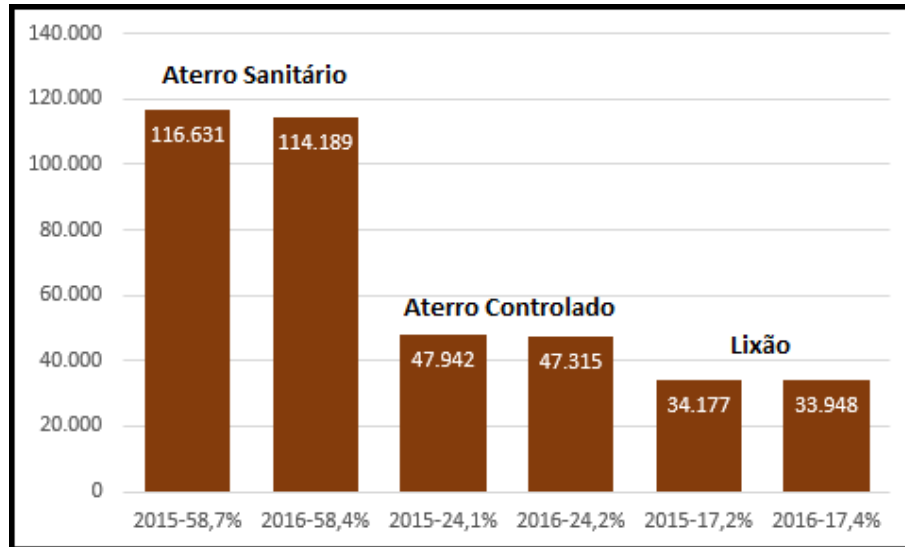


Figura 2.1 – Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil por tipo de destinação. Fonte: Adaptado da ABRELPE (2016).

Por outro lado, diversos impactos no meio ambiente ocorrem durante a extração da argila. A poluição do ar, devido à emissão de poeira proveniente das vias de acesso; a erosão do solo, devido à exposição a águas pluviais; o assoreamento dos cursos d'água, dentre outros, são exemplos dos impactos causados.

Portanto, esta pesquisa se apresenta como uma alternativa para reduzir o volume de extração de argilas, recursos naturais não renováveis, e simultaneamente, reduzir o descarte dos resíduos em locais inapropriados, pois a geração destes resíduos representa um consumo desnecessário de recursos naturais e ainda requer a ocupação do solo para a sua disposição.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Argilas

Segundo Santos (1989), as argilas são materiais extraídos da natureza fazendo parte dos vários tipos de solo constituintes da crosta terrestre. Esse material possui a granulometria fina (partículas de diâmetro inferior a 2 μ m) que adquire plasticidade quando é misturado a uma quantidade apropriada de água.

De acordo com Grim (1953), as argilas são constituídas essencialmente por pequenas partículas cristalinas conhecidas por argilominerais, que são compostos quimicamente por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo ainda conter teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos. Além dos argilominerais é possível encontrar nas argilas impurezas de grãos de quartzo, mica, feldspato e outros minerais, sais solúveis e matéria orgânica.

A classificação das argilas pode ser feita segundo a sua formação, ou seja, argilas residuais e argilas sedimentares. Enquanto as argilas residuais são aquelas que permanecem no próprio local onde se formam, devido às condições adequadas de intemperismo, topografia e natureza da rocha matriz, as argilas sedimentares são as que foram transportadas geologicamente do local de sua formação para outros locais, por ação das águas, geleiras ou pelo vento (SANTOS, 1989).

3.2. Argilas de Campos dos Goytacazes

As argilas são materiais disponíveis em abundância em Campos dos Goytacazes, cujas grandes reservas se originaram da sedimentação de materiais transportados ao longo do curso do Rio Paraíba do Sul, que, tendo em vista as constantes variações de volume, depósitos argilosos se formaram (RAMOS *et al.*, 2008).

É uma característica local o fato de os depósitos argilosos apresentarem dois tipos de argila em camadas distintas, podendo apresentar composições diferentes e aspectos próprios, dependendo da região. Normalmente uma argila menos arenosa é encontrada na camada inferior, e na camada superior, uma argila mais arenosa (VIEIRA e PINHEIRO, 2011).

Conforme descrito nos primeiros estudos sobre a caracterização desta matéria-prima em Campos dos Goytacazes (ALEXANDRE, 2000), as argilas da região se caracterizam por obter como argilomineral predominante a caulinita, e também, que a maioria das argilas são classificadas como inorgânicas de elevada plasticidade, com teor de matéria orgânica inferior a 1%.

A plasticidade é uma propriedade do solo que consiste em maior ou menor capacidade para ser moldado sob certas condições de umidade, e o mineral responsável pelo seu desenvolvimento é a caulinita (AREIAS *et al.*, 2017), a qual também é responsável pela resistência mecânica das peças conformadas (ALEXANDRE, 2000).

Segundo Nirmala e Viruthagiri (2014), os óxidos de SiO_2 e Al_2O_3 correlacionam-se bem com a existência na forma de caulinita. Essa afirmação pode ser confirmada através da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, sendo um parâmetro indicativo da presença deste argilomineral. Dessa forma, quanto mais próximo o resultado for de 1,18, maior é a quantidade de caulinita presente na argila (GALVÃO *et al.*, 2008; VIEIRA e PINHEIRO, 2011; DEMATTÊ *et al.*, 2016).

Além da caulinita (argilomineral predominante) outros minerais podem ser encontrados nas argilas de Campos dos Goytacazes; sendo os mais comuns, quartzo, muscovita e gibbsita. O quartzo é uma impureza natural das argilas, está relacionado à presença de SiO_2 e atua como desplastificante antes da queima, podendo ser considerado inerte pelo menos até 950 °C, reduzindo dessa forma, as possíveis retrações no material cerâmico (VILLAREJO *et al.*, 2015); a muscovita (mica) é um mineral com morfologia lamelar, constituída de óxidos alcalinos e pode atuar como fundente na massa cerâmica; a gibbsita (óxido hidratado de alumínio) contribui para o aumento da refratariedade das argilas (VIEIRA e PINHEIRO, 2011).

Ainda sobre as principais características das argilas de Campos dos Goytacazes, destacam-se: elevado percentual de sílica (SiO_2), elevado teor relativo de alumina (Al_2O_3) e de óxido de ferro (Fe_2O_3). Além desses, há também baixo teor de compostos alcalinos e alcalinoterrosos (VIEIRA *et al.*, 2016).

De acordo com Taha *et al.* (2016), a sílica (SiO_2) indica a presença de silicatos, sendo conhecida por formar a estrutura dos corpos cerâmicos, enquanto a alumina (Al_2O_3) permite melhorar sua resistência mecânica através de sua transformação durante o processo de queima.

O óxido de ferro (Fe_2O_3) e o dióxido de titânio (TiO_2) são responsáveis pela coloração dos produtos cerâmicos após a queima. Enquanto o primeiro apresenta uma coloração avermelhada (VIEIRA *et al.*, 2008; DIZHUR *et al.*, 2016), o segundo é responsável por pigmentos brancos ou denominados clarificadores (FELTRIN *et al.*, 2013).

Os compostos alcalinos (K_2O , Na_2O) e alcalino terrosos (CaO e MgO) possuem efeito fundente, e forma uma fase líquida por fusão própria ou em relação com a sílica (SiO_2) (ROEDDER, 1959; EMILIANI e CORBORA, 1999). A formação da fase líquida é o principal mecanismo de sinterização da cerâmica vermelha. Ela tende a preencher as cavidades do corpo, devido ao fenômeno de capilaridade, contribuindo para a eliminação de porosidade (aberta e fechada), melhoria da resistência mecânica, redução da absorção de água e aumento da retração linear de queima (RIELLA *et al.*, 2002). Estes óxidos começam a vitrificar à temperaturas relativamente baixas (700 °C), formando vidros mais viscosos.

3.3. Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes

Campos dos Goytacazes é o maior município do estado do Rio de Janeiro, e está localizado na região norte do estado com uma área territorial de 4.026,696 km² e uma população de 490.288 (IBGE, 2016). Geograficamente a região está situada em um raio de aproximadamente 300 km dos grandes centros consumidores como Rio de Janeiro - RJ e Vitória - ES.

Uma das atividades econômicas atuantes e que contribuem para o desenvolvimento em Campos dos Goytacazes é a produção de cerâmica. Essa atividade faz do município o segundo maior produtor de tijolos do Brasil, gerando aproximadamente 60 milhões de peças mensais, entre tijolos, lajotas, ladrilhos rústicos e uma pequena parte de telhas, entre outros, respondendo por aproximadamente cinco mil empregos diretos. Atualmente esta produção é feita por mais de cem indústrias associadas ao Sindicato dos Ceramistas (VIEIRA *et al.*, 2016), além de outras indústrias que não estão associadas, mas que fazem parte deste ramo, bem como os empregos gerados por elas.

3.4. Cerâmica

A palavra cerâmica está ligada ao processo de transformação envolvido na produção dos materiais cerâmicos e vem do grego *keramikos*, que significa algo queimado. A definição de cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos e não-metálicos, sendo as peças fabricadas a partir da argila, que geralmente são obtidos através de tratamento térmico em temperatura elevada (ABC, 2017).

Os materiais cerâmicos têm composição química muito variada, desde compostos simples a misturas de várias fases complexas ligadas entre si. Estes materiais são considerados duros e resistentes, rijos e frágeis, com pouca tenacidade e pouca ductilidade, têm temperaturas de fusão relativamente altas e grande estabilidade química nos ambientes adversos, devido às suas fortes ligações químicas (SMITH,1998). Estas propriedades permitiram que a cerâmica fosse utilizada em vários seguimentos, como na construção de casas e vasilhames para uso doméstico, na construção de urnas funerárias e até como superfície para escrita. A cerâmica pode ser uma atividade artística, em que são produzidos artefatos com valor estético, ou uma atividade industrial em que são produzidos artefatos para uso na construção civil (ANFACER, 2017).

O setor cerâmico é bastante diversificado, apresentando grande variedade de produtos e processos produtivos. Suas aplicações podem ser introduzidas em diversos segmentos devido a diversos fatores como matéria-prima, propriedades e área de utilização.

3.4.1. Cerâmica Vermelha

O segmento da cerâmica que será abordado nesta pesquisa é o da cerâmica vermelha, empregado na construção civil, como os blocos cerâmicos para alvenaria de vedação (Figura 3.1).



Figura 3.1–Bloco cerâmico para alvenaria de vedação. Fonte: Acervo próprio.

A coloração avermelhada da cerâmica é influenciada pelo estado de oxidação do ferro, o tamanho das partículas de minerais de ferro, a temperatura de queima e o grau de vitrificação, a proporção de alumina, cal, magnésio e a composição dos gases que entram em contato com o material durante a queima (MURRAY, 2007).

Segundo Coutinho *et al.* (2016), as cerâmicas que ficam brancas após a queima contêm menos de 1% de Fe_2O_3 em sua composição; as cerâmicas que apresentam coloração rosácea contêm entre 1% e 5%; e as cerâmicas vermelhas contêm 5% ou mais de Fe_2O_3 .

Os blocos cerâmicos são produzidos a partir de matérias-primas beneficiadas e com materiais de características controláveis. Geralmente cada empresa tenta incorporar algum tipo de resíduo na massa, com o objetivo de conseguir alterar alguma propriedade específica na sua fabricação.

Em geral, a fabricação dos blocos cerâmicos envolvem etapas que são comuns durante seu processo (Figura 3.2), sendo que variações podem ocorrer em função do tipo de peça a ser fabricada, das características das matérias-primas e do estágio tecnológico da empresa.

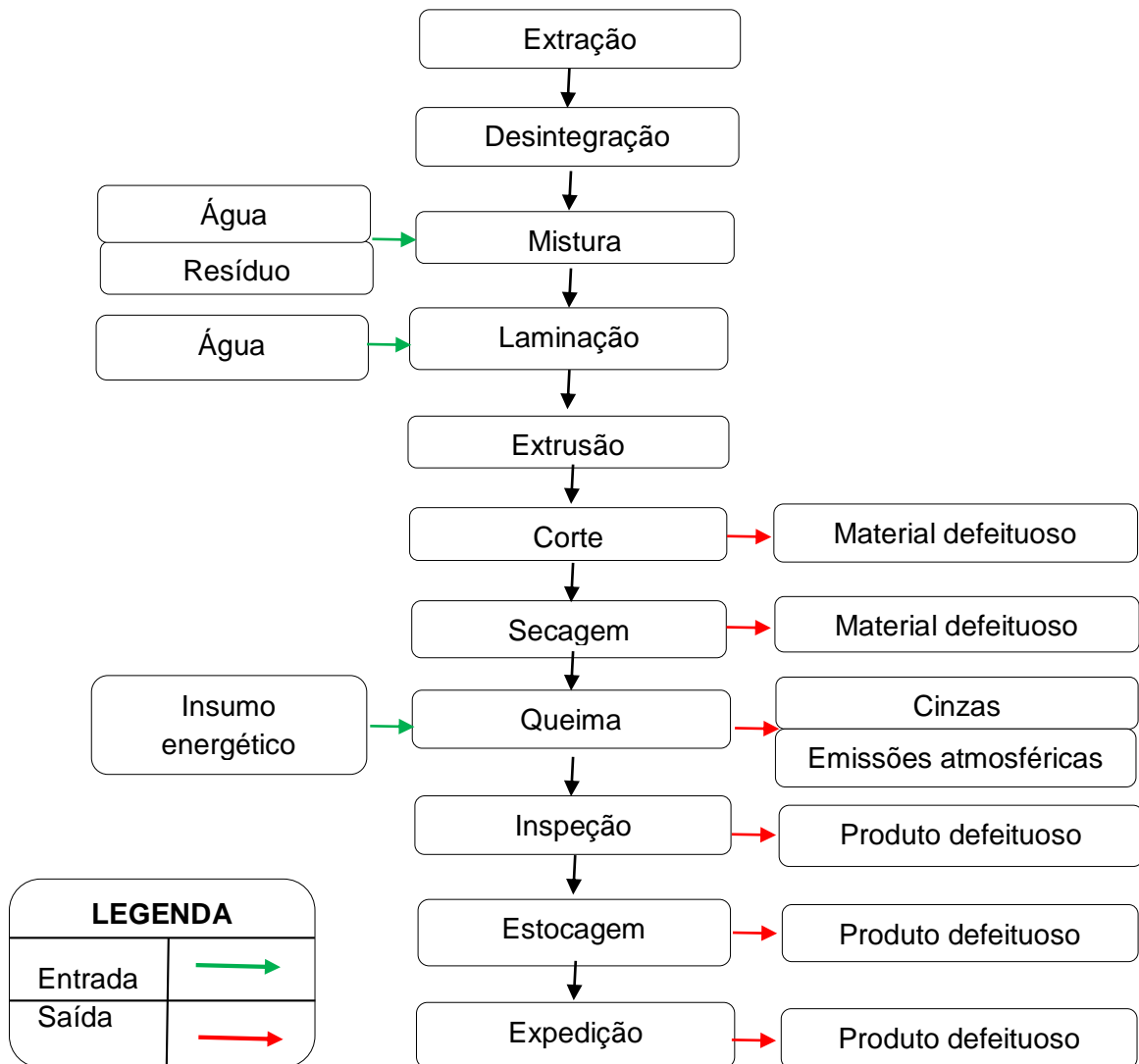


Figura 3.2 - Fluxograma dos processos de fabricação da cerâmica. Fonte: Adaptado da ABC (2017).

3.4.1.1. Extração da argila

A extração da argila (Figura 3.3) é a etapa inicial para o processo de fabricação da cerâmica. No entanto a extração ocorre a céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada, com auxílio de escavadeiras, pás carregadeiras, trator de esteira com lâmina, entre outros equipamentos.



Figura 3.3 – Extração de argila. Fonte: Acervo próprio.

Segundo Alexandre (2000), a profundidade de escavação obedece ao critério de seleção adotado pelos próprios ceramistas, dependendo do que consideram como produto utilizável ou delimitando a profundidade até o lençol freático. A extração de argila é uma atividade que gera diversos impactos sobre o meio ambiente. A Tabela 3.1 apresenta alguns impactos sobre o meio físico e suas respectivas medidas mitigadoras:

Tabela 3.1 – Principais impactos ambientais e medidas mitigadoras da extração de argila. Fonte: Adaptado da FEAM (2013).

Meio	Impacto Ambiental	Medidas Mitigadoras
Físico	Poluição do ar devido à emissão de poeira proveniente das vias de acesso.	Utilizar caminhões-pipa, durante o horário de movimentação dos caminhões e equipamentos.
	Erosão do solo devido à exposição a águas pluviais.	Realizar drenagem de águas pluviais.
	Assoreamento dos cursos d'água.	Drenar as águas pluviais.
	Emissão de ruídos devido à dragas, caminhões e máquinas.	Realizar a manutenção dos equipamentos e instalação de silenciadores nos escapamentos.

3.4.1.2. Preparo da massa cerâmica

A preparação da massa cerâmica (Figura 3.4) é um processo que geralmente ocorre no pátio da indústria, conhecida como preparação direta, sendo um passo

essencial para obtenção de um produto de alta qualidade e redução de perdas. Esse processo é dividido pelas seguintes etapas: destorroamento, dosagem, moagem, e homogeneização.



Figura 3.4 – Preparo da massa cerâmica. Fonte: Acervo próprio.

No destorroamento utilizam-se britadores de mandíbulas ou moinho de bolas para diminuir o tamanho das partículas do material, facilitando as etapas posteriores. A dosagem tem por objetivo misturar diferentes argilas, água e resíduos, quando aplicáveis, assim como tornar independente o funcionamento das máquinas, e estabelecer uma alimentação constante, evitando atrasos e paradas (MÁS, 2002; MOTTA *et al.*, 2001). A moagem é a etapa em que se controla as partículas dos grãos da massa, parâmetro de grande importância, já que irá influenciar na compactação e nas propriedades pós queima. A etapa de homogeneização tem a finalidade de permitir a produção de peças com propriedades finais as mais semelhantes possíveis, garantindo uma produtividade padronizada (VERDUCH, 1995).

3.4.1.3. Conformação

A etapa de conformação (Figura 3.5) é de fundamental importância para o processo cerâmico, pois é nesta etapa que o material adquire a forma geométrica e características estruturais desejadas. Na produção de blocos cerâmicos, os processos mais comuns e que merecem destaque são: conformação por extrusão e por prensagem.



Figura 3.5 – Conformação de blocos cerâmicos por extrusão. Fonte: Acervo próprio.

Extrusão é um processo de conformação plástica, limitada à fabricação de objetos de seção constante, muito utilizada na indústria de cerâmica vermelha. O equipamento utilizado é uma extrusora também conhecida como maromba, que consiste em forçar a massa a passar através de uma boquilha apropriada e responsável pela conformação final dos produtos (WIECKA *et al.*, 2014).

Para se obter bons resultados através do processo de extrusão é necessário controle absoluto durante o preparo da massa, controlando rigorosamente o teor de umidade para se obter uma plasticidade ideal. É necessário também adequar a velocidade de extrusão e o molde ao tipo de material extrusado (RIBEIRO, 2003). O cumprimento de tais observações permitirá mais qualidade do produto cerâmico e bons índices de rendimento durante o seu processamento, havendo, conseqüentemente, menos desgaste no equipamento.

A prensagem é baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. A operação compreende três etapas: preenchimento da cavidade do molde, compactação da massa e extração da peça (ABAJO, 2000).

O processo de prensagem pode ser realizado por vários métodos. Nas indústrias de cerâmica utiliza-se a prensagem uniaxial, cujo objetivo é obter peças uniformes de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas, bem como contribuir na obtenção de uma microestrutura adequada às características finais desejadas (ALBERO, 2000).

3.4.1.4. Secagem

No processo de homogeneização da massa cerâmica, certa quantidade de água é adicionada para dar características de plasticidade e facilitar a moldagem das peças. Desse modo, no processo de secagem, parte da água que havia sido utilizada deve ser evaporada.

Como a umidade da peça se encontra no interior de seus poros, a forma e estrutura destes terão uma grande influência sobre a secagem. À uma determinada velocidade de secagem, os efeitos que são gerados sobre cada corpo, podem ser muito diferentes entre cada um deles, e a umidade pode até se manter presa no interior dos poros da argila (HARTKE, 2004).

A secagem é acompanhada por uma redução da peça cerâmica quase linearmente, quando o teor de umidade diminuiu. Dessa forma, controlar o processo de secagem de corpos cerâmicos é de grande interesse para limitar a formação de defeitos, que em condições severas pode deteriorar a qualidade do produto e, especialmente, a resistência mecânica (HAMMOUDA *et al.*, 2015).

Existem dois tipos de secagem utilizadas para as peças cerâmicas: secagem natural (Figura 3.6a) ou secagem artificial (Figura 3.6b). A secagem natural acontece pela exposição das peças cerâmicas ao ar livre, aproveitando as condições climáticas. A secagem artificial consiste na instalação de estufas, na qual é possível incluir sistema de aquecimento ou de ventilação, elevando e mantendo a temperatura interna do material cerâmico.



Figura 3.6 –Secagem dos blocos cerâmicos – natural (a) e artificial (b). Fonte: Acervo próprio.

3.4.1.5. Queima

Nessa operação as peças adquirem suas propriedades finais. Um conjunto bastante complexo de reações físicas e químicas, dependentes da temperatura de queima, se processa no interior da massa argilosa (SANTOS, 1989). Sendo assim, a etapa de queima é considerada fundamental, pois nela o produto sofre alterações e transformações dentro do forno (Figura 3.7) que determinam sua qualidade e capacidade de atendimento do mercado consumidor (FARIAS *et al.*, 2012).



Figura 3.7 – Queima dos blocos cerâmicos. Fonte: ANICER (2013).

Segundo Kazmi *et al.* (2016), a temperatura de queima influencia significativamente o desempenho do tijolo, exercendo um papel importante no desenvolvimento de ligações entre as partículas de argila.

De acordo com Abajo (2000), devido às alterações e transformações que ocorrem nos produtos cerâmicos durante o processo de queima, as fases de aquecimento e de resfriamento devem acontecer de forma controlada, pois estas mudanças ocorrem em diferentes intervalos de temperatura.

Santos (1989) avaliou os efeitos da temperatura do produto cerâmico, tendo sido utilizada uma argila caulinítica, e concluiu que por volta de 110 °C ocorre a perda de massa no material cerâmico, relacionada à eliminação de água absorvida pelas partículas dos minerais presentes na massa argilosa; entre 110 °C e 400 °C acontece a oxidação da matéria orgânica; entre 400 °C e 800 °C sucede a desidroxilação da caulinita na qual resulta na formação da metacaulinita amorfa; entre 900 °C a 1000 °C transcorre a formação de novas fases cristalinas, possivelmente relacionadas à formação da mullita após a total decomposição da estrutura da caulinita.

Pinheiro e Holanda (2010) também avaliaram os efeitos da temperatura nas peças de cerâmica vermelha ricas em caulinita, e foi identificado que o material apresenta uma pequena dilatação, seguido de três retrações durante o aquecimento. A dilatação ocorre por volta de 500 °C, devido à expansão térmica do material. Já as retrações acontecem da seguinte forma:

- A primeira retração acontece entre 500 °C e 650 °C, devido à aproximação das partículas pela perda de água.
- A segunda retração ocorre entre 700 °C e 850 °C, sendo atribuída ao início da sinterização.
- A terceira retração acontece entre 900 °C e 1000 °C devido à recristalização de novas fases cerâmicas e início da vitrificação da massa argilosa.

Os produtos cerâmicos podem ser queimados em diferentes fornos e a seleção do melhor forno depende da eficiência de produção desejada, do investimento necessário e combustível utilizado. Logo, os fornos são classificados de acordo com o ciclo de operação e podem ser divididos em contínuos e intermitentes.

Os fornos contínuos trabalham em ciclos de 24 horas/dia, sem necessidade de paradas para carga e descarga dos produtos, o calor é aproveitado para aquecer o ar combustão ou para pré-aquecer a carga enfiada. Os fornos intermitentes trabalham em ciclo periódico de carga-queima-descarga. O calor utilizado para aquecer a carga e a estrutura do forno não é recuperado no final da queima, nem durante a fase de resfriamento. Todo o calor retirado na massa dos produtos e na massa estrutural do forno é dissipado para o ambiente (SANTOS, 1989).

3.4.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Cerâmica Vermelha

3.4.2.1. Porosidade Aparente (PA)

Na indústria cerâmica, a porosidade permite avaliar a qualidade do produto final. Um material poroso pode apresentar poros abertos, sendo aqueles que têm contato com a superfície externa do material, ou poros fechados, que são os poros internos sem acesso ao exterior.

A porosidade aberta quando comparada à porosidade fechada é mais importante, porque ela afeta diretamente várias propriedades como resistência mecânica, capacidade de isolamento térmico e acústico, permeabilidade, etc. (SALEIRO E HOLANDA, 2012).

3.4.2.2. Absorção de Água (AA)

A absorção de água é um parâmetro importante que rege a durabilidade dos materiais cerâmicos, sendo uma propriedade ligada à porosidade aparente, que apresentam o mesmo padrão de tendência de variação.

Absorção de água é a quantidade de água necessária para encher os poros existentes em um corpo cerâmico. O ar escapa quando o material é imerso, permitindo a livre passagem da água entre seus poros.

Segundo Taha *et al.* (2016), a absorção de água depende principalmente da porosidade aberta acessível nas amostras sinterizadas. Quantidades elevadas de poros abertos resultam em maior taxa de absorção de água e, conseqüentemente, elevados riscos de degradação dos tijolos.

Dessa forma, quanto menos espaço há entre as partículas para que a água penetre, menor será a absorção de água, o que garante uma maior resistência, e conseqüentemente maior durabilidade do produto.

3.4.2.3. Massa Específica Aparente (MEA)

A Massa Específica Aparente está diretamente ligada à Porosidade Aparente e Absorção de Água das peças, ou seja, quanto menores esses valores, maiores os valores de Massa Específica Aparente das peças queimadas (SANTIS *et al.*, 2013).

Segundo Taha *et al.* (2016) e Phonphuark *et al.* (2016), a Massa Específica Aparente é consideravelmente maior com o aumento da temperatura de queima. O aumento desta propriedade é um resultado direto da sinterização e mecanismos de densificação.

3.4.2.4. Retração Linear (RL)

A Retração Linear corresponde à variação percentual de comprimento apresentada pelas peças cerâmicas quando são submetidas a altas temperaturas.

Para garantir a estabilidade dimensional de um produto, geralmente almeja-se a obtenção da retração de queima mais baixa possível e, acima de tudo, a mais constante possível ao longo da produção. Para isso, deve-se evitar as variações de composição das matérias-primas que fazem parte da massa e objetivar a formulação de massas que apresentem baixa sensibilidade às variações naturais do processo de fabricação (MELCHIADES *et al.*, 2001; FULGÊNCIO, 2015).

3.4.2.5. Resistência à Flexão (RF)

A resistência à flexão dos materiais cerâmicos é influenciada pela temperatura de queima, sendo notavelmente maior com a elevação da temperatura. Esse fato pode ser explicado pela melhoria do processo de vitrificação, que tende a preencher os poros e reduz as regiões de fraqueza nos materiais sinterizados (TAHA *et al.*, 2016).

Um ensaio fundamental para avaliar a resistência à fratura dos materiais cerâmicos é o ensaio de Resistência à Flexão. A realização deste, consiste na aplicação de uma carga crescente em determinado ponto de uma barra geometricamente padronizada, atuando simultaneamente esforços de tração e compressão.

3.5. Resíduos Sólidos

Segundo a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), definem-se resíduos sólidos aqueles que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se também os lodos provenientes de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição e outros líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água. A sua classificação é feita da seguinte forma:

- Resíduo classe I – Perigosos: São aqueles que apresentam periculosidade (risco à saúde pública e risco ao meio ambiente), ou seja, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.
- Resíduo classe II A – Não inertes: São aqueles que não apresentam periculosidade, mas podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.
- Resíduo classe II B – Inertes: São aqueles que, quando amostrado de uma forma representativa, segundo a NBR 10007/2004 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada, à temperatura ambiente, conforme a NBR 10006/2004 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A destinação adequada de um resíduo leva em conta diversos fatores, como estado físico, a presença de metais pesados e de restrições ambientais. De qualquer forma a alternativa de reciclagem para reaproveitamento de qualquer tipo de resíduo, quando viável, é seguramente a solução mais racional a ser tomada.

3.5.1. Reaproveitamento dos resíduos industriais na cerâmica vermelha

Uma das indústrias que mais se destaca no reaproveitamento de resíduos industriais, sem dúvida, é a indústria de cerâmica (WIEMES *et al.*, 2017). Está comprovado através de inúmeros pesquisadores (CUSIDÓ *et al.*, 2015; VIEIRA *et al.*, 2016; YESILAYA *et al.*, 2017; KIZINIEVIC *et al.*, 2018) que o setor tem um enorme potencial para absorver estes tipos de resíduos. O reaproveitamento destes no desenvolvimento de produtos cerâmicos torna-se uma fonte economicamente viável e ecologicamente correta para o descarte final dos resíduos (CULAU *et al.*, 2012).

O reaproveitamento dos resíduos industriais na cerâmica é viável, porque as massas utilizadas na indústria de cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituídas de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto aspecto de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes (MENEZES *et al.*, 2002).

Os resíduos combustíveis, por exemplo, são provenientes de processos industriais com grande percentual de matéria orgânica e com alto poder calorífico.

Além dos resíduos das estações de tratamento de rejeitos urbanos, resíduos da indústria têxtil e resíduo da exploração de carvão, também estão incluídos os resíduos da indústria de fabricação de papel (DONDI *et al.*, 1997a).

A utilização dos resíduos combustíveis nas indústrias de cerâmica pode ocorrer de duas maneiras distintas. Quando misturados aos combustíveis responsáveis pela queima do corpo cerâmico, os resíduos combustíveis liberam calor devido às reações exotérmicas, o que favorece a economia de combustível. Quando incorporados à massa cerâmica, pode haver implicações nas propriedades finais do corpo cerâmico e nas suas características de processamento, pois estes resíduos podem aumentar a formação de poros e conseqüentemente reduzir a resistência mecânica das peças cerâmicas (MENEZES *et al.*, 2002).

3.6. Papel

O papel é um dos materiais mais importantes e multifuncionais que conhecemos. Há séculos faz parte do cotidiano da humanidade, sendo um dos produtos mais consumidos no mundo. Como meio básico de educação, comunicação e informação para a maioria das pessoas, o papel compõe cartas, documentos, jornais, livros e revistas e, assim, contribui para a transmissão do conhecimento. Serve também, a um amplo espectro de usos residenciais e comerciais, como: papéis para escrever, produtos para higiene e limpeza, papéis para impressão, caixas, papéis para embalagens. (IBA, 2015).

Independente de sua finalidade, os papéis devem apresentar boa resistência para não romper-se com facilidade, e os fatores que determinam essas propriedades estão relacionados, principalmente, à matéria-prima, aos reagentes químicos e aos processos mecânicos empregados em sua produção (SANTOS *et al.*, 2001).

O termo papel é genericamente dado a uma folha formada, seca e acabada em uma máquina de papel, de uma suspensão de fibras vegetais, as quais foram desintegradas, refinadas e depuradas e tiveram ou não a adição de outros ingredientes, para dar ao produto final características de utilização. É quase uma operação mecânica, apesar dos aspectos químicos e físicos serem todos importantes na determinação final das propriedades da folha. O princípio da fabricação do papel é a tendência das fibras celulósicas se unirem e assim permanecerem após secas (KLOCK *et al.*, 2013).

As principais fontes de matéria-prima para fabricação de celulose e papel são oriundas de reflorestamentos, sendo em sua totalidade das espécies pinus e eucalipto, que possuem diferenças marcantes, e entre elas se destaca o comprimento das fibras.

As fibras de eucalipto apresentam um comprimento entre 0,5 e 1,5 mm. O Pinus, por sua vez, apresenta fibras longas entre 3 e 6 mm e, conseqüentemente, dá origem a papéis com elevadas resistências físico-mecânicas, que além de proporcionarem características específicas ao papel, permitem maior velocidade nas máquinas de papel, devido à maior resistência da folha úmida e seca e à maior facilidade de drenagem (BASSA *et al.*, 2007).

3.6.1. Resíduos provenientes da indústria de fabricação do papel

A Indústria de fabricação do papel está presente em todo o mundo e está crescendo a cada ano em índices de até 30%. Inevitavelmente, uma das conseqüências desse crescimento é a geração de grande quantidade de resíduos, que é considerado um efluente de responsabilidade ambiental pelo fabricante (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Segundo Pokhrel e Viraghavan (2004), estes resíduos são gerados em diferentes etapas do processo, conforme a Figura 3.8.

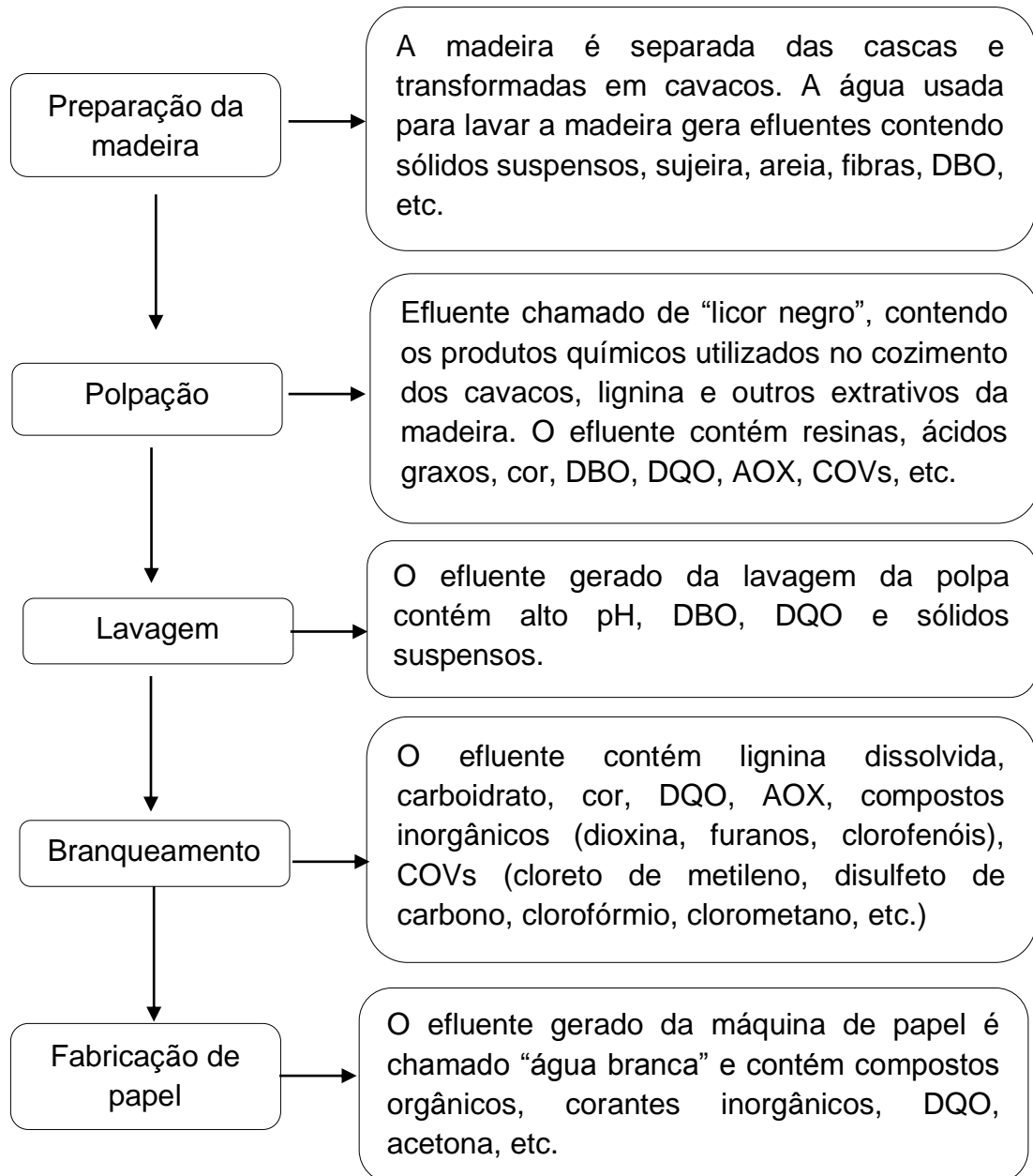


Figura 3.8 – Fluxograma dos Poluentes do processo de fabricação de papel. Fonte: Adaptado de Pokhrel e Viraraghavan (2004).

Boni *et al.* (2004), classificam estes resíduos como lodo, em virtude das enormes quantidades de água demandadas em suas operações processuais, e estes lodos estão divididos nas seguintes categorias:

- Lodo primário;
- Lodo de destinação;
- Lodo secundário;
- Lodo combinado.

Os lodos gerados nas diferentes etapas da produção do papel apresentam elevado teor de sólidos em suspensão (PINHEIRO *et al.*, 2008) e para removê-los, o lodo é encaminhado para um tanque de decantação, onde ocorrerá o seu tratamento em nível primário (GUERRINI *et al.*, 2017). Este tratamento dá origem ao lodo primário (Figura 3.9), que segundo Boni *et al.* (2004), é proveniente das fibras virgens da madeira.



Figura 3.9 - Lodo primário *in natura*. Fonte: AZEVEDO *et al.*, (2018).

O lodo primário é composto por materiais que podem variar muito de uma unidade fabril para outra, e sua composição depende de fatores, que estão relacionados à matéria-prima e produtos químicos utilizados durante a fabricação do papel (FRIAS *et al.*, 2015).

De acordo com Vigil de la Villa *et al.* (2007), o lodo primário contém cerca de 60% da matéria seca com celulose, caulinita e calcita.

Segundo Asquini *et al.* (2008), o lodo primário contém água, pequenas partículas de celulose e outros compostos orgânicos, sais inorgânicos e cargas minerais.

Para Sutcu e Akkurt (2009), o lodo primário apresentou como fases cristalinas majoritárias a calcita e traços de celulose.

Cusido *et al.* (2015) e Joshi *et al.* (2017), apresentam o lodo primário como um resíduo contendo cerca de 50% em peso de água, 30% em peso de caulim, celulose, calcita (carbonato de cálcio) e em proporções menores compostos orgânicos e metais pesados.

Como pode ser observado acima, a calcita (CaCO_3) aparece no lodo primário nas diferentes pesquisas. Sua presença está associada ao óxido de cálcio (CaO)

(SUTCU e AKKURT, 2009; BURUBERRI *et al.*, 2015), e o seu predomínio no lodo pode favorecer a formação da fase vítrea durante a sinterização das peças cerâmicas (CUSIDÓ *et al.*, 2015), assim como, contribuir para a formação de uma estrutura porosa após o tratamento térmico devido à perda de CO₂ (SUTCU e AKKURT, 2009).

Segundo Todor (1976), a decomposição da calcita começa à cerca de 675 °C, e à 950 °C sua decomposição estará completa. Porém, se a calcita estiver associada a outros minerais, a sua temperatura de decomposição poderá ser reduzida.

A presença de outros argilominerais no lodo primário, pode ser considerada como um ponto positivo na incorporação em massa argilosa, como é o caso da caulinita, muscovita e o talco. Segundo Vigil de La Villa *et al.* (2007), eles podem atuar como aceleradores na ativação de metacaulinita a partir de uma temperatura controlada.

Conforme descrito na NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), o lodo primário pode ser classificado como um resíduo sólido não perigoso, sendo enquadrados como classe II A – não inertes. Porém dependendo do teor de metais pesados e outras substâncias, o lodo primário pode ser considerado tóxico pelas normas brasileiras, e deve ser descartado corretamente (VIEIRA *et al.*, 2016). Este fato, é em virtude do enorme volume desses resíduos e do forte impacto ambiental que têm nos recursos hídricos e por conseguinte, em toda a sociedade.

3.6.2. Destino do lodo primário

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estima que mais de 250 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados por ano, dos quais 30% aproximadamente são atribuíveis ao papel. Estima-se que para cada tonelada de papel produzido, são gerados aproximadamente 0,4 toneladas de resíduos (TOCZYLOWSKA-MAMINSKA, 2017).

A maior parte dos resíduos de papel é descartada em aterros sanitários (GUERRINI *et al.*, 2017), contaminando o solo e as águas subterrâneas (AZEVEDO *et al.*, 2018) ou descarte oceânico, causando graves problemas de poluição ambiental (HONG *et al.*, 2018).

No município de Santo Antônio de Pádua, localizado no noroeste fluminense, está situada a Companhia Paduana de Papéis – COPAPA, fornecedora do resíduo para esta pesquisa. Atualmente são produzidos 36.000 ton./ano de papéis, gerando

um montante de aproximadamente 13.320 ton./ano de resíduos, em que são lançados em aterro sanitário.

3.7. Histórico de pesquisas com resíduo de papel

Modolo *et al.* (2011) demonstraram a viabilidade da produção de telhas de fibramento incorporando lodo primário; Buruberry *et al.* (2015) concluíram que o resíduo de papel tem compatibilidade química com as matérias-primas tradicionalmente utilizadas para produzir clínquer; Azevedo *et al.* (2018) identificaram a viabilidade na incorporação do lodo primário da indústria de fabricação de papel para uso em argamassa, reduzindo em até 10% em peso o uso da cal.

Khalid (2015) alcançou bons resultados com a incorporação de 10% de lodo primário em tijolo cerâmico, resultando em aprimoramentos no isolamento térmico, redução de densidade e resistência à compressão aceitável; Cusido *et al.* (2015), concluíram que um tijolo de argila adicionado com até 15% de lodo primário é viável para construção civil, pois o produto cerâmico final é de qualidade similar à cerâmica convencional, além de possuir melhoria nas propriedades de isolamento térmico e acústico, obteve desempenho mecânico aceitável; Vieira *et al.* (2016) concluíram que a incorporação de 10% do lodo primário no corpo cerâmico, composto pela mistura de duas argilas distintas, seguida de queima à 750°C, obtém uma resistência à compressão aceitável para construção civil, de acordo com as normas brasileiras.

Goel e Kalamdhad (2017) fizeram uma investigação sobre o uso do lodo de papel em tijolos. Para a confecção dos tijolos foram utilizados dois tipos de solos (laterítico e aluvionar) e adição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de lodo de papel, queimados à 850 °C e 900 °C. O desempenho da incorporação do lodo de papel foi avaliado através da retração linear, densidade aparente, absorção de água e resistência à compressão, conforme recomendado pelos códigos de padrão indianos e ASTM relevantes.

A Figura 3.10 (a) e (b) mostram que para ambos os tipos de solo, a qualquer temperatura de queima, os tijolos com adição de lodo de papel apresentaram Retração Linear de queima mais baixa do que os tijolos de 0% de lodo de papel.

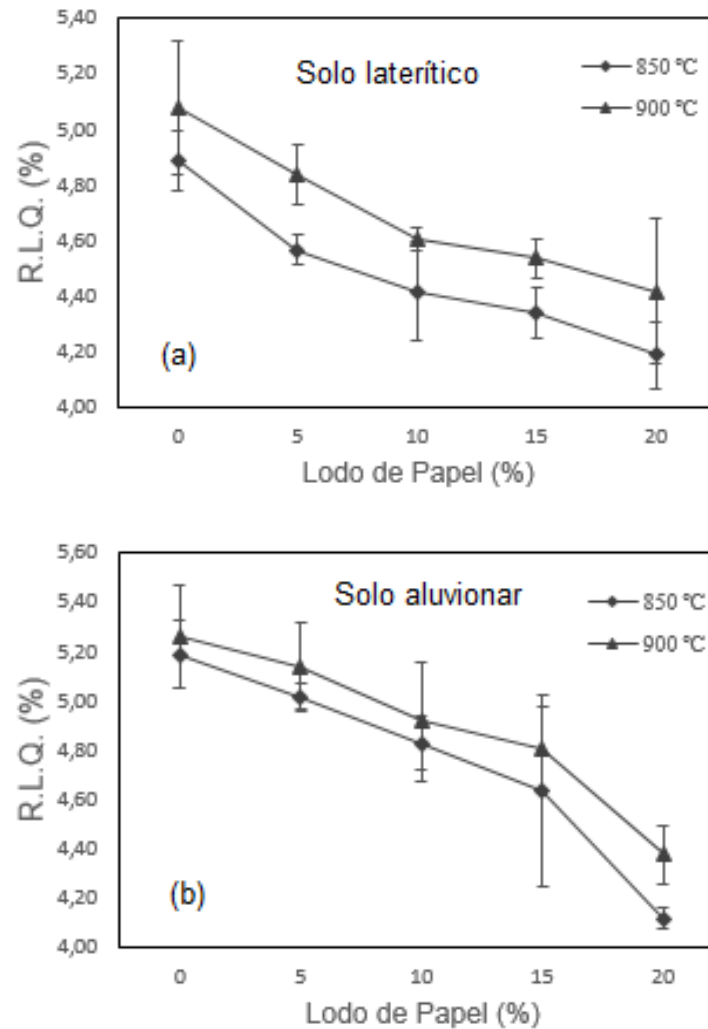


Figura 3.10 – Retração Linear de Queima. Solo de laterítico (a) e solo aluvionar (b). Fonte: Adaptado de Goel e Kalamdhad (2017).

A Figura 3.11 (a) e (b) mostram que independentemente da temperatura de queima, a adição de resíduos reduz a densidade aparente dos tijolos. No entanto, a densidade aparente aumenta com a elevação da temperatura de queima, revelando mais densificação.

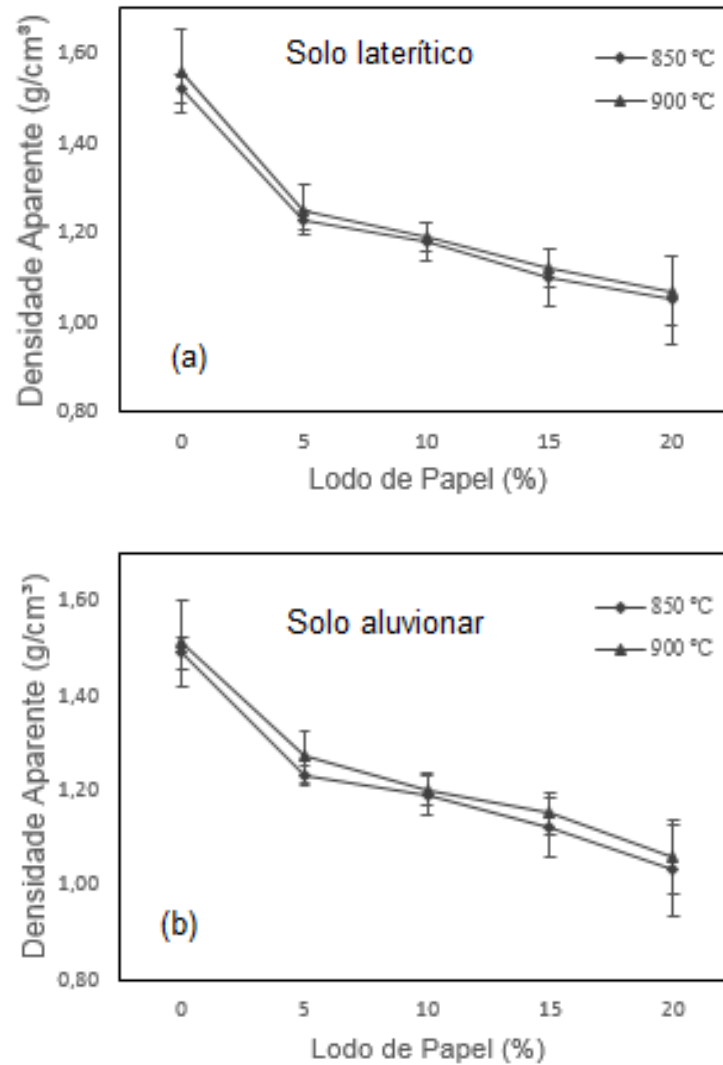


Figura 3.11 – Densidade Aparente. Solo de laterítico (a) e solo aluvionar (b). Fonte: Adaptado de Goel e Kalamdhad (2017).

O resultado da Absorção de Água mostrado na Figura 3.12 (a) e (b) revelam que a quantidade máxima de lodo de papel para ser adicionado é de 10% em peso. Caso contrário, resulta em valores de Absorção de Água excessivamente altos, não atendendo aos padrões de tijolos convencionais.

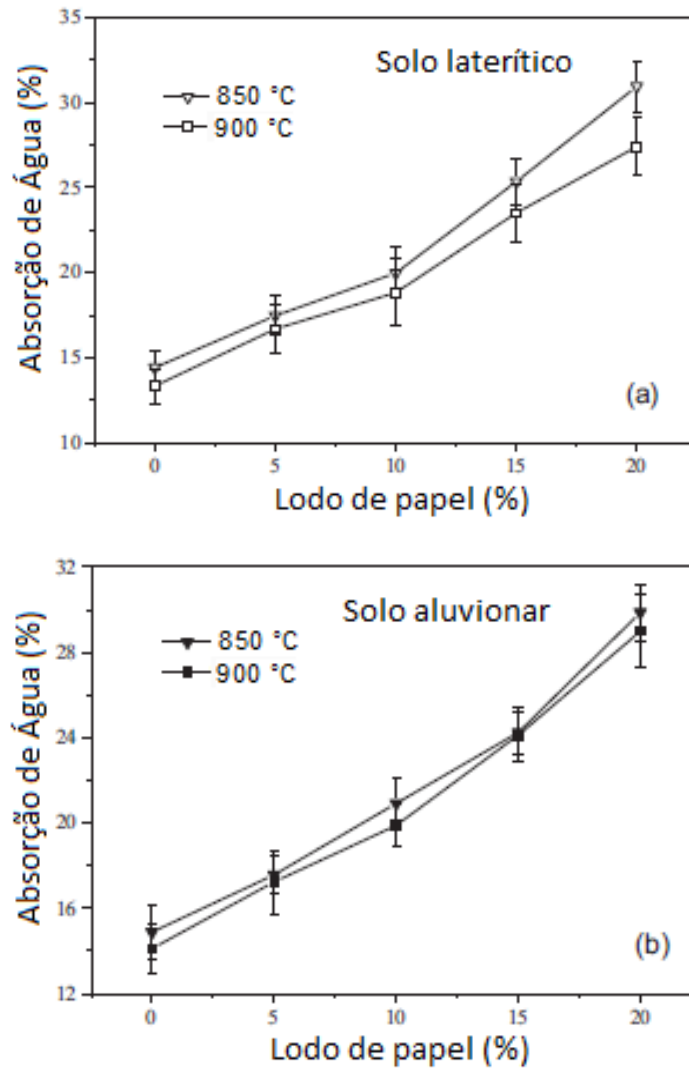


Figura 3.12 - Absorção de Água. Solo de laterítico (a) e solo aluvionar (b). Fonte: Adaptado de Goel e Kalamdhad (2017).

A Figura 3.13 (a) e (b) mostram que a Resistência à Compressão diminui com a adição crescente de lodo de papel, tanto para as temperaturas de queima, como para os dois tipos de solo.

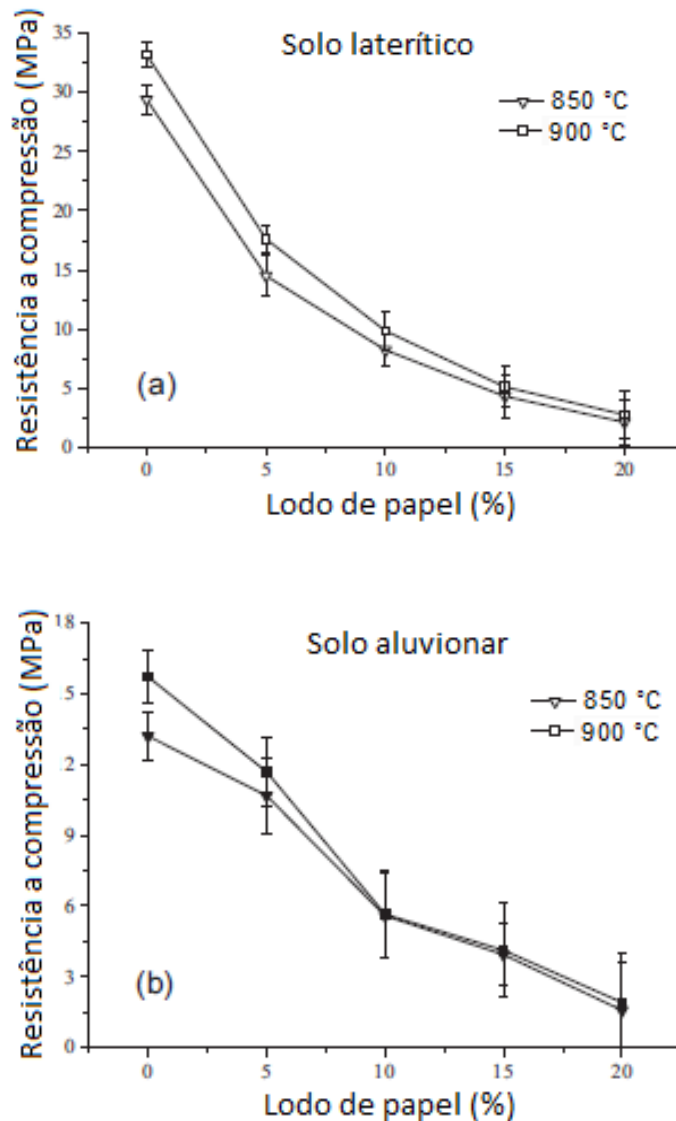


Figura 3.13 – Resistência a compressão. Solo de laterítico (a) e solo aluvionar (b). Fonte: Adaptado de Goel e Kalamdhad (2017).

Geralmente as propriedades dos produtos cerâmicos são dependentes da composição das argilas e das condições de processamento empregados. Mas um outro fator que pode influenciar em suas propriedades é a adição de resíduo, como pode ser visto através da pesquisa de Goel e Kalamdhad (2017).

A incorporação do lodo de papel na massa cerâmica pode levar a um aumento da porosidade do material cerâmico (FREYBURG e SCHWARZ, 2007; VIEIRA *et al.*, 2016). Esta maior porosidade reduz a massa do tijolo, o que explica a redução da densidade e da resistência mecânica, em resposta à redução na seção transversal efetiva do material (TURGUT e YESILATA, 2008; MUÑOZ *et al.*, 2013).

Segundo Vieira *et al.* (2016), os resultados dos ensaios físicos e mecânicos podem ser atribuídos a fases e poros formados na estrutura cerâmica. Estes poros se

formam devido à combustão da matéria orgânica e decomposição da calcita, que além de ser responsáveis pela redução da resistência mecânica, também podem ser responsáveis pelo aumento da absorção de água e redução da retração das peças.

A Figura 3.14 (a) e (b) mostra a microscopia óptica da cerâmica com o lodo primário queimado à 750 °C, na qual é possível confirmar uma quantidade relativamente maior de poros, conforme indicados pelas setas.

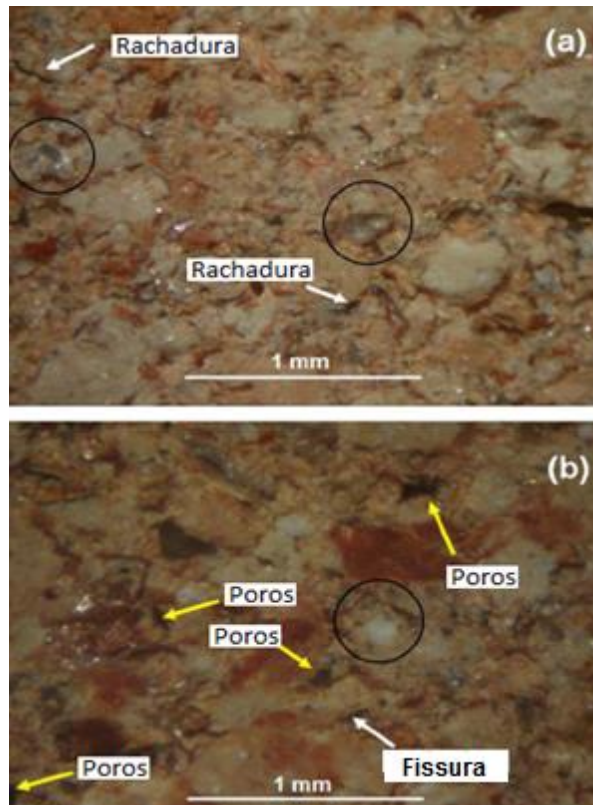


Figura 3.14 – Microscopia óptica dos tijolos: Argila pura (a) e argila com lodo primário (b). Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2016).

O uso do lodo primário nos trabalhos até aqui apresentados se procedeu através de determinados processos que são comuns entre eles. Esses processos consistem em um tratamento prévio do lodo antes de adicioná-lo em argila e efetuar a mistura. Ou seja, o resíduo é submetido à etapa de secagem, trituração e de peneiramento, diferente dos processos empregados nesta pesquisa, que se apresenta com a proposta diferenciada, talvez inovadora, de utilização do lodo primário em cerâmica vermelha, que será descrito no próximo capítulo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos empregados nesta pesquisa estão descritos na Figura 4.1, contemplando esquematicamente cada procedimento adotado para a realização das atividades.

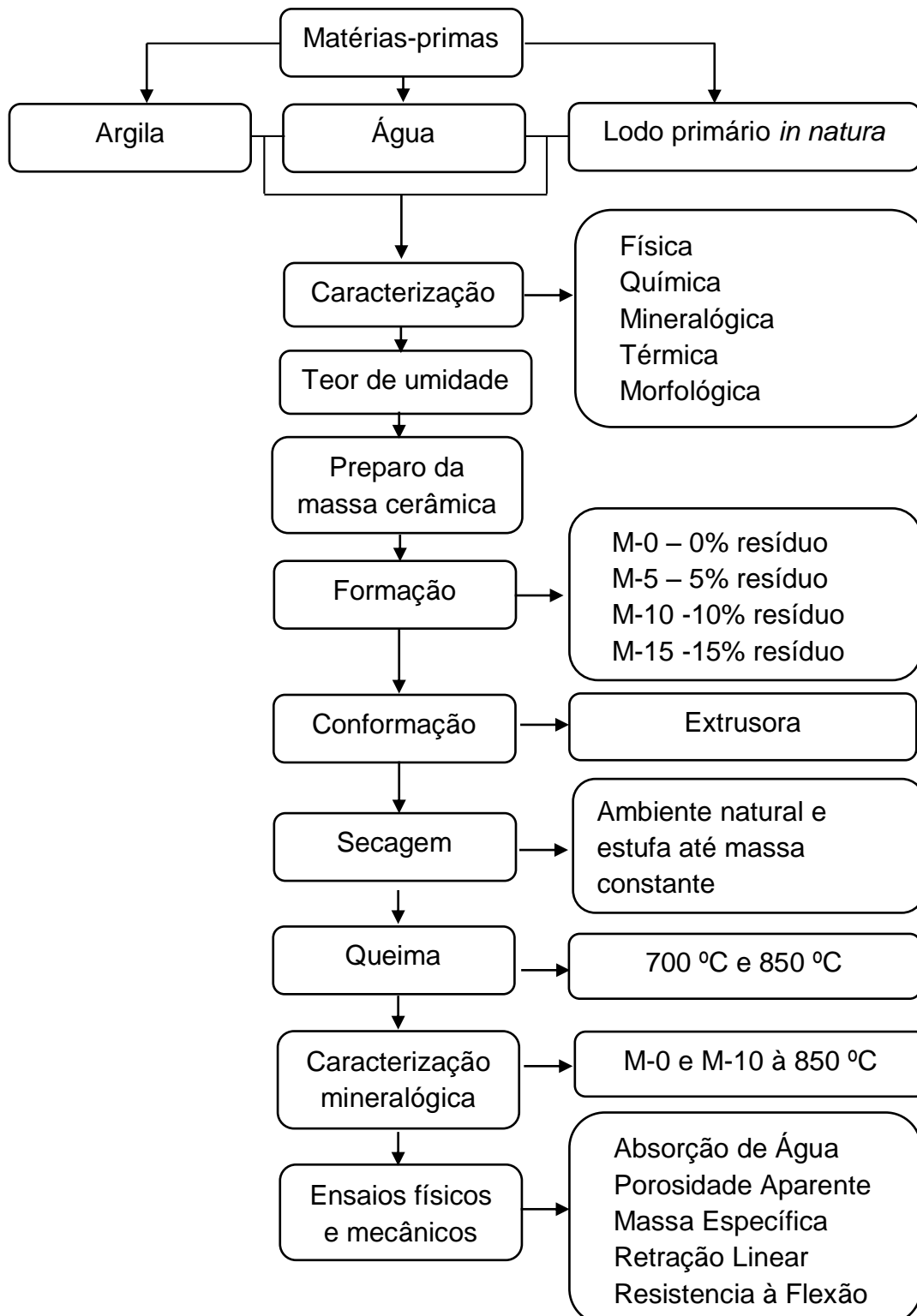


Figura 4.1 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental.

4.1. Materiais

Os materiais empregados no desenvolvimento desta pesquisa são: argila, lodo primário *in natura* e água.

4.1.1. Argila

A massa cerâmica é composta pela mistura de duas argilas (amarela e cinza) conforme Figura 4.2. Tais argilas foram coletadas no depósito da Indústria de Cerâmica Gama e Silva, localizado na região de Campos dos Goytacazes – RJ, na qual é utilizado um traço de 2:1 para confecção de bloco cerâmico para alvenaria de vedação.



Figura 4.2 – Argilas amarela e cinza.

4.1.2. Lodo Primário

O lodo primário (Figura 4.3) que atualmente é descartado em aterro sanitário, foi cedido e transportado *in natura* pela CIA Paduana de Papeis–COPAPA, localizada no município de Santo Antônio de Pádua – RJ, até o campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).



Figura 4.3 – Lodo primário *in natura*.

4.1.3. Água

A água utilizada na pesquisa foi fornecida pela UENF, que é abastecida pela empresa Águas do Paraíba, concessionária de água e esgoto do município de Campos dos Goytacazes – RJ.

4.2. Métodos

4.2.1. Caracterização das matérias-primas

As argilas e o resíduo utilizados como massa cerâmica foram submetidos à caracterização química, mineralógica, térmica, morfológica e física.

Para realização das quatro primeiras análises, foi separada uma amostra representativa de 5,0 gramas de cada material, passados na peneira 200 (74 μm), e posteriormente encaminhados para o processo de secagem em estufa (105 ± 5) °C até atingir massa constante.

Para a caracterização física foram separados 300 g de material, para cada mistura utilizada, passados na peneira 40 (420 μm).

4.2.1.1. Caracterização Física

Os ensaios para se obter a caracterização física das matérias-primas foram todos executados no Laboratório de Solos do LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes-RJ.

4.2.1.1.1. Análise Granulométrica

Para determinar as dimensões das partículas das matérias-primas utilizadas, foram realizados os ensaios de granulometria a laser, para o resíduo de papel, e por peneiramento e sedimentação para as misturas utilizadas na pesquisa, seguindo os procedimentos adotados pela NBR 7181/2017 (ABNT, 2017).

4.2.1.1.2. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg são métodos que permitem determinar os limites de consistência do solo, partindo do princípio que um solo de granulometria fina pode existir em qualquer dos quatro estados físicos, conforme a Figura 4.4, dependendo do seu teor de umidade.

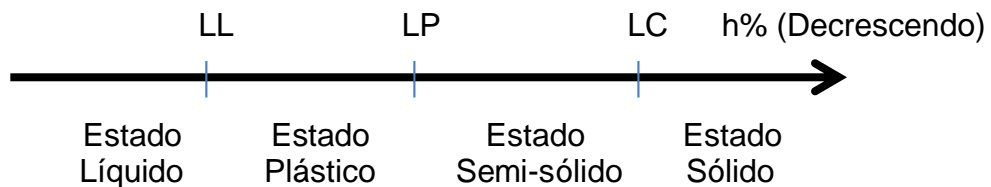


Figura 4.4- Estados de Consistência. Fonte: Adaptado de CAPUTO (1988).

A partir da adição de uma quantidade apropriada de água, uma série de testes e ensaios foram feitos, possibilitando definir o Limite de Liquidez (LL), o Limite de Plasticidade (LP) e o Índice de Plasticidade (IP) do solo. Os limites são obtidos através da NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016 (ABNT, 2016) respectivamente, já o índice de plasticidade é a diferença entre os limites, expresso em porcentagem, onde o resultado foi obtido através da equação:

$$IP = LL - LP \quad (01)$$

4.2.1.1.3. Massa específica real dos grãos

A massa específica real dos grãos das matérias-primas foram realizadas segundo recomendação da NBR 6508/1984 (ABNT, 1984) e NBR 6457/1986 (ABNT, 1986), com a utilização de picnômetros.

4.2.1.2. Caracterização Química

Para a identificação dos componentes químicos das amostras, foi realizada uma análise química qualitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX). O equipamento utilizado é da marca SHIMADZU EDX-700, do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV / UENF

4.2.1.3. Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica foi feita a partir da difração de raios X (DRX). Através deste equipamento é possível identificar as fases cristalinas que estão presentes nos materiais pesquisados. O equipamento utilizado é um difratômetro de pó Rigaku, modelo Ultima IV, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) com ótica de focalização Bragg-Brentano, que pertence ao Laboratório de Ciências Físicas – LCFIS / UENF. O difratômetro opera em geometria theta-theta, com o tubo de raios X e o detector movendo-se simultaneamente e de forma sincronizada no plano vertical, enquanto a amostra permanece fixa na posição horizontal. A potência é de 40 kV por 30 mA, varredura passo a passo de $0,02^\circ$ e tempo de acumulação de 2 s.

4.2.1.4. Análise Térmica (ATD/TG/DTG)

As curvas de Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (TG) foram utilizadas para identificar o comportamento térmico das massas. Essas curvas apresentam a ocorrência eventual de transformações endotérmica ou exotérmica provocadas pelo tratamento térmico imposto às amostras. O equipamento utilizado é da marca BP Engenharia, modelo RB 3000 do Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV / UENF.

4.2.1.5. Caracterização Morfológica

A observação e análise da morfologia das partículas presentes nas amostras foram feitas a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta técnica possibilita observar a superfície dos materiais, bem como, sua textura com ampliações da ordem de centenas de milhares de vezes. O equipamento utilizado

é da marca SHIMADZU SSX-50 SUPERSCAN do Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV/UENF.

4.2.2. Determinação do Teor de Umidade

Para determinar o teor de umidade das matérias-primas, foi empregado o método gravimétrico. Ou seja, as amostras úmidas foram pesadas individualmente em um recipiente previamente pesado. Posteriormente estas amostras foram submetidas à secagem em estufa à 100 ± 5 °C e após atingirem massa constante, a massa de água que havia em cada amostra foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$$u = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (02)$$

onde,

u = umidade (%)

Mu = massa úmida (g)

Ms = massa seca (g)

4.2.3. Processos de obtenção dos corpos de prova

4.2.3.1. Preparo da massa cerâmica

A quantidade de água de amassamento que compõe a massa cerâmica é um requisito significativo e que deve ser considerada na fabricação das peças. Portanto, a água de amassamento utilizada foi baseada nos resultados obtidos a partir dos Limites de Atteberg, através da equação recomendada por ALEXANDRE (1997):

$$am = \frac{LL}{2} + 2\% \quad (03)$$

onde,

am = água de amassamento (%)

LL = limite de liquidez (%)

Considerando que a água de amassamento utilizada na massa cerâmica é composta pela fração de água existente na argila, pela fração de água existente no lodo primário e por uma fração de água a ser acrescentada, o preparo da massa cerâmica foi feito de acordo com as seguintes etapas:

- As argilas foram trituradas mecanicamente e passadas em peneira 10 (2000 μm) conforme o procedimento adotado pela Indústria de Cerâmica Gama e Silva;
- O Lodo primário foi utilizado *in natura*, aproveitando toda a massa de água existente em sua composição.
- A fração de água acrescentada, foi adicionada apenas no lodo primário *in natura*.
- O lodo primário *in natura* e a fração de água adicionada foram misturados mecanicamente (Figura 4.5) por um período de 05 minutos e após a homogeneização completa, o resíduo foi submetido à peneira 10 (2000 μm) na qual passou livremente;



Figura 4.5 – Mistura mecânica do lodo primário com água de amassamento.

- Após o peneiramento do resíduo, o mesmo foi adicionado nas argilas, obtendo dessa forma a massa cerâmica utilizada na pesquisa.

É importante destacar que, na fase inicial da pesquisa, testes foram realizados. Inicialmente, o lodo primário *in natura* e a fração de água adicionada foram misturados de forma manual e sem o auxílio da peneira. Desta forma, foram constatados grandes acúmulos de partículas do resíduo de papel na superfície do CP e na sua seção transversal (Figura 4.6). Sendo assim, a mistura mecânica e o peneiramento do resíduo foram feitos com objetivo de confeccionar CP com partículas mais dispersas.

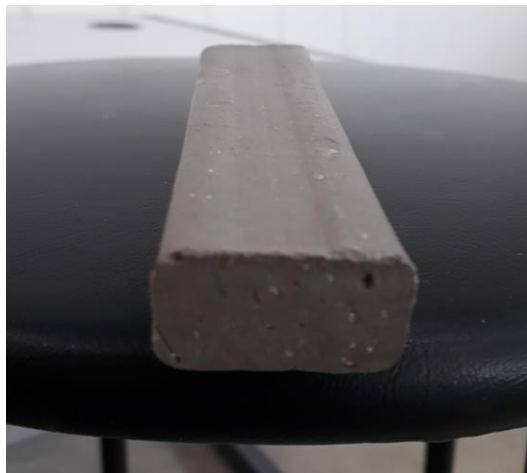


Figura 4.6 – Grãos do resíduo na superfície e na seção transversal do CP.

4.2.3.2. Formulação

Conforme a Tabela 4.1, foram preparadas quatro misturas distintas, utilizando 0,0% (como padrão de comparação), 5,0%, 10,0% e 15,0% em peso de resíduo.

Tabela 4.1 - Formulação utilizada na pesquisa

Mistura	Lodo (% em peso)	Argila (% em peso)
M-0	0,0	100,0
M-5	5,0	95,0
M-10	10,0	90,0
M-15	15,0	85,0

O item anterior apresenta de forma sucinta a passagem do resíduo de papel pela peneira 10 (2000 μm), ou seja, sem retenção. Porém neste item será abordado

de forma mais detalhada como foi feito o peneiramento do resíduo para as respectivas misturas utilizadas:

- M-5 e M-10, o resíduo passou livremente pela peneira, sem auxílio de equipamento, Figura 4.7 (a) e (b);
- M-15, o resíduo passou livremente pela peneira, porém, foi necessário o auxílio de uma mesa vibratória (Figura 4.8a) por um período de dez minutos para a retirada do resíduo que ficou retido na peneira (Figura 4.8b).

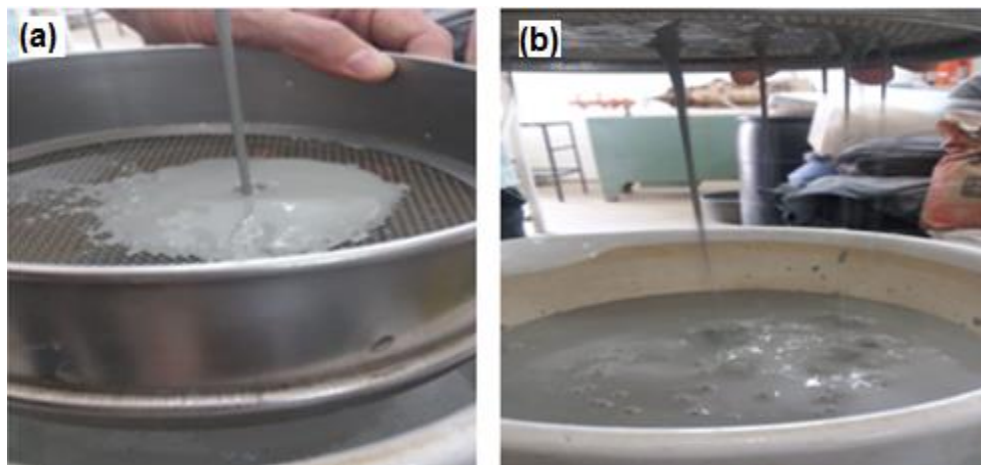


Figura 4.7 – Peneiramento do resíduo M-5 e M-10 (a) e (b).



Figura 4.8 - Peneiramento com auxílio de mesa vibratória (a); resíduo retido na peneira (b).

Em virtude da massa de água existente na composição do lodo primário *in natura*, à medida que aumenta a quantidade de lodo, simultaneamente deve-se reduzir a quantidade de água a ser adicionada. Dessa forma, o máximo de lodo

primário *in natura* utilizado nesta pesquisa foi com 15%, que compõe 84,25% de água da massa cerâmica. Caso fosse utilizado 20% de lodo primário *in natura* seria necessário retirar parte da água da composição do lodo, conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Percentual de água adicionada em função das misturas.

Mistura	Lodo (%)	Água adicionada (%)
M-5	5,0	71,32
M-10	10,0	43,25
M-15	15,0	15,75
M-20	20,0	-11,20

É importante salientar que o controle detalhado da água que foi adicionada em cada mistura está apresentado no Apêndice A.

4.2.3.3. Conformação

Foram conformados oitenta CP nas dimensões 120 x 30 x 20 mm (comprimento, largura e espessura). A conformação foi feita a partir de uma extrusora (Figura 4.9) da marca Verdés, modelo BR-051 - fabricação 1999 - série 024, do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV / UENF.



Figura 4.9 - Máquina extrusora Verdés, modelo BR-051.

4.2.3.4. Secagem

O processo de secagem dos CP's foi executado de duas maneiras distintas, quais sejam: secagem em ambiente natural (Figura 4.10) e secagem em estufa (105 \pm 5) °C até massa constante (Figura 4.11). O equipamento utilizado é da marca SOLAB, modelo SL-100, do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV / UENF.



Figura 4.10 – Secagem em ambiente natural.



Figura 4.11 – Secagem em estufa SOLAB, modelo SL-100.

4.2.3.5. Queima

A queima dos CP's foi realizada no forno da marca INTI, modelo FL-1300, do Laboratório de Engenharia Civil – UENF (Figura 4.12). As temperaturas utilizadas foram de 700 °C e 850 °C, sendo quarenta CP's para cada temperatura, distribuídos em dez CP's para cada mistura (Tabela 4.3). A taxa de aquecimento foi de 2°C/min.

até atingir a temperatura de patamar, mantendo-se por 180 min. na temperatura de patamar. O resfriamento foi obtido por convecção natural até temperatura ambiente.



Figura 4.12 – Forno INTI, modelo FL-1300.

Tabela 4.3 – Divisão dos CP's por mistura e temperatura.

Mistura	700 °C	850 °C
M-0	10 CP	10 CP
M-5	10 CP	10 CP
M-10	10 CP	10 CP
M-15	10 CP	10 CP

4.2.4. Ensaio físicos e mecânicos dos corpos de provas

Os ensaios físicos e mecânicos são feitos para avaliar a qualidade dos produtos cerâmicos, e os classificam dentro das recomendações para cada uso específico.

Santos (1989) fez a classificação dos blocos cerâmicos levando em consideração os valores limites para Absorção de Água e a Resistência à Flexão, sendo estes apresentados pela Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetro para Absorção de Água e resistência à flexão de blocos cerâmicos. Fonte Santos (1989).

Tipo de cerâmica	Absorção de Água (AA)	Resistência a Flexão (RF)
Blocos cerâmicos	Máximo de 25%	Mínimo de 1,5 MPa

Dessa forma, além das avaliações dos blocos cerâmicos conforme as classificações feitas por Santos (1989), os blocos também foram avaliados através dos ensaios de Porosidade Aparente, Massa Específica Aparente, Retração Linear de Queima, de acordo com a metodologia descrita pelo referido autor.

4.2.4.1. Absorção de Água (AA)

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (04)$$

onde:

AA - Absorção de água (%)

M_u - Massa do CP úmido (g)

M_s - Massa do CP Seco (g)

4.2.4.2. Porosidade Aparente (PA)

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (05)$$

onde:

PA - porosidade aparente (%)

M_u - Massa do CP úmido (g)

M_s - Massa do CP seco (g)

M_i - Massa do CP imerso em água (g)

4.2.4.3. Massa Específica Aparente (MEA)

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (06)$$

onde:

MEA - massa específica aparente (g/cm³).

M_s - Massa do CP seco (g)

M_u - Massa do CP úmido (g)

M_i - Massa do CP imerso em água (g)

4.2.4.4. Retração Linear de Queima (RLQ)

$$RLQ = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad (07)$$

onde:

RLQ - Retração Linear de Queima (%).

L_s - Comprimento após a secagem em estufa (mm).

L_q - Comprimento após a queima (mm).

4.2.4.5. Resistência à Flexão (RF)

Nesta pesquisa os CP's foram avaliados através do ensaio de Resistência à Flexão em três pontos. Para isso foi utilizada uma prensa universal hidráulica, marca EMIC, modelo DL 3000. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,1 mm/min e a distância entre cutelos foi de 9,0 cm.

$$RF = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (08)$$

onde:

RF - tensão de ruptura à flexão (MPa).

P - carga máxima suportada pelo corpo e prova (N).

L - distância entre os apoios do CP (mm).

b - largura do CP (mm).

h - altura do CP (mm).

4.3. Análise estatística dos resultados experimentais

Para avaliar os parâmetros obtidos após os ensaios físicos e mecânicos dos corpos cerâmicos, foi utilizada a análise de variância (ANOVA) do delineamento inteiramente casualizado (DIC) ($\rho \leq 0,05$), com o intuito de verificar se existe diferença significativa entre os tratamentos realizados. Uma vez comprovada a diferença estatística, foi realizado o teste de comparações de médias pelo método de Tukey ($\rho \leq 0,05$), a fim de verificar quais das misturas são diferentes entre si.

A comprovação da diferença estatística pela análise de variância (ANOVA) é feita quando o valor de $F_{\text{calculado}}$ for maior que o valor de F_{tabelado} . Caso contrário, todos os tratamentos realizados são estatisticamente iguais ao nível de significância estudado.

No Tukey os testes são realizados, calculando uma distância padronizada, conhecida como DMS (distância mínima significativa). Sempre que a diferença entre duas médias for menor que esta distância, os tratamentos apresentam a mesma média experimental. Quando ocorre ao contrário, as médias são diferentes entre si. Dessa forma, a análise estatística dos resultados experimentais está apresentada no Apêndice B.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização das matérias-primas

5.1.1. Caracterização Física

5.1.1.1. Análise Granulométrica

Estão representadas na Tabela 5.1 as frações correspondentes ao lodo primário e as massas argilosas, e na Figura 5.1 suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 5.1 – Frações granulométricas do resíduo e das massas argilosas

Mistura	Lodo Adicionado (%)	Pedregulho			Areia			Silte (%)	Argila (%)	Classificação USCS
		Grosso (%)	Médio (%)	Fino (%)	Grossa (%)	Média (%)	Fina (%)			
Lodo	-	-	-	-	-	-	26,0	66,0	8,0	CH
M-0	0,0	-	-	-	0,2	0,9	13,0	35,7	50,2	
M-5	5,0	-	-	-	0,3	1,1	14,0	38,0	46,6	
M-10	10,0	-	-	-	0,3	4,5	17,7	31,7	45,8	
M-15	15,0	-	-	-	0,2	4,0	15,4	35,5	44,9	

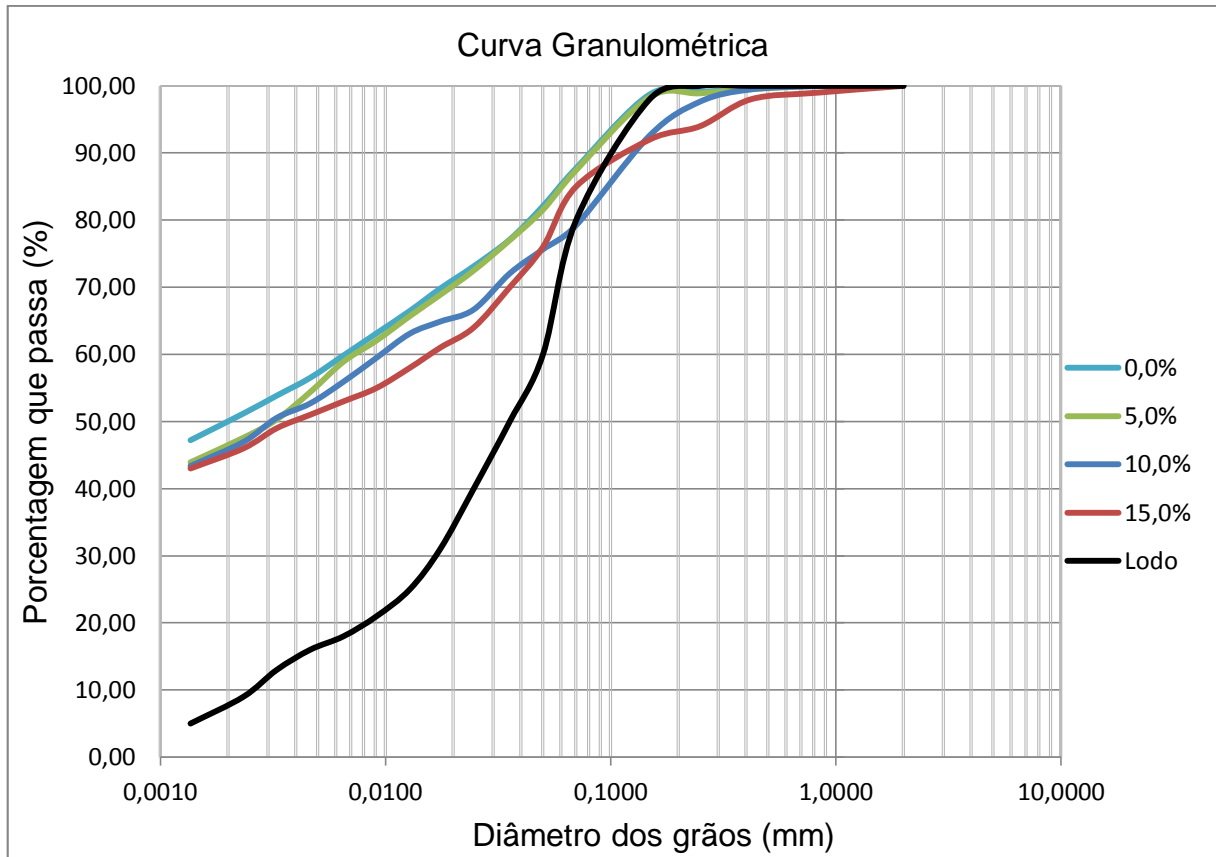


Figura 5.1 – Curvas de distribuição granulométrica do resíduo e das massas argilosas

Observa-se que o resíduo de papel apresenta 8% de partículas com diâmetro inferior a 2 μm . Dessa forma, à medida que foram adicionados os percentuais do resíduo, houve o decréscimo da fração argila para as respectivas misturas, variando entre 50,2 à 44,9%. Apesar desta redução, a análise granulométrica mostrou que as misturas são formadas com predomínio da fração argila, seguidas das frações silte e areia, e que a massa argilosa possui faixa granulométrica recomendada por Pedroti (2011) para uso em cerâmica vermelha, cuja fração argila deve ser igual ou superior a 30% e igual ou inferior a 70%.

5.1.1.2. Limites de Atterberg

A Tabela 5.2 mostra os valores obtidos para os limites de Atterberg das massas argilosas pesquisadas.

Tabela 5.2 – Limites de Atterberg

Série	Resíduo (%)	Argila (%)	LL	LP	IP
M-0	0,0	100,0	55,7	28,6	27,1
M-5	5,0	95,0	53,5	27,5	26,0
M-10	10,0	90,0	51,6	27,5	24,1
M-15	15,0	85,0	49,7	26,6	23,1

Nota-se que o lodo primário modifica os Limites de Atterberg. Ou seja, à medida em que o lodo é adicionado na massa cerâmica, há uma redução nos valores dos LL, LP e IP. Isso possivelmente ocorre devido ao resíduo de papel não apresentar plasticidade. Contudo, os valores obtidos se enquadram dentro dos intervalos recomendados para o processo de conformação por extrusão em cerâmica vermelha, que de acordo com Santos (1992) são de 30 a 60% para o LL, 15 a 30% para o LP e 10 a 30% para o IP.

5.1.1.3. Massa Específica Real dos Grãos

Através da Tabela 5.3 são apresentados os resultados da massa específica real dos grãos das matérias-primas utilizadas, na qual é possível identificar que o lodo primário apresenta massa específica menor do que as argilas. Esse resultado é um indicativo de que, quanto maior o percentual de lodo primário na massa cerâmica, mais leve será a peça produzida.

Tabela 5.3 Massa específica real dos grãos das matérias-primas

Matéria-prima	γ (g/cm ³)
Argila amarela	2,66
Argila cinza	2,54
Lodo primário	1,56

5.1.2. Caracterização Química

Através da Tabela 5.4 são apresentadas as composições químicas das argilas e do lodo primário. Nota-se que as argilas são constituídas essencialmente por óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), e em menor predominância por óxido de

ferro (Fe_2O_3), óxido de potássio (K_2O), dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de enxofre (SO_3) respectivamente. Já no lodo primário, o predomínio é do óxido de cálcio (CaO) e em menor proporção Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 e SO_3 .

Tabela 5.4– Caracterização química das matérias-primas (% em peso)

Matéria-Prima	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	K₂O	TiO₂	SO₃	CaO
Argila amarela	45,43	37,72	9,98	3,08	1,76	1,23	0,42
Argila cinza	50,12	40,02	3,93	1,80	1,54	1,69	0,56
Lodo primário	8,03	9,46	0,65	1,25	0,40	0,86	70,84

Com base nos dados apresentados na Tabela citada, é possível afirmar que a argila cinza possui maior presença de SiO_2 e Al_2O_3 do que a argila amarela, logo a argila cinza é classificada como uma argila mais forte. Destaca-se também que devido à grande presença do SiO_2 e Al_2O_3 , e pela a relação que há entre eles, o argilomineral predominante nas duas argilas é a caulinita. O predomínio do CaO no lodo primário está relacionado à matéria-prima e aos produtos químicos utilizados durante a fabricação do papel, e sua presença está associada à calcita.

Apesar dos resultados mostrarem percentuais diferentes na composição química, observa-se que as matérias-primas possuem os mesmos elementos. Dessa forma, a incorporação do lodo primário em argila pode ser um ponto favorável.

5.1.3. Caracterização Mineralógica

Segundo Xavier *et al.* (2008), a principal influência nas propriedades dos corpos cerâmicos não se deve apenas à composição química da massa cerâmica, mas também à composição mineralógica. Portanto, com o intuito de identificar as mudanças que ocorreram na composição mineralógica do material cerâmico, foi feita a análise por difração de raios X antes da queima para as matérias-primas individualmente, e depois da queima para algumas composições escolhidas aleatoriamente na temperatura de 850 °C.

Através das Figura 5.2 e 5.3 são apresentados os difratogramas de raios X das argilas amarela e cinza, respectivamente.

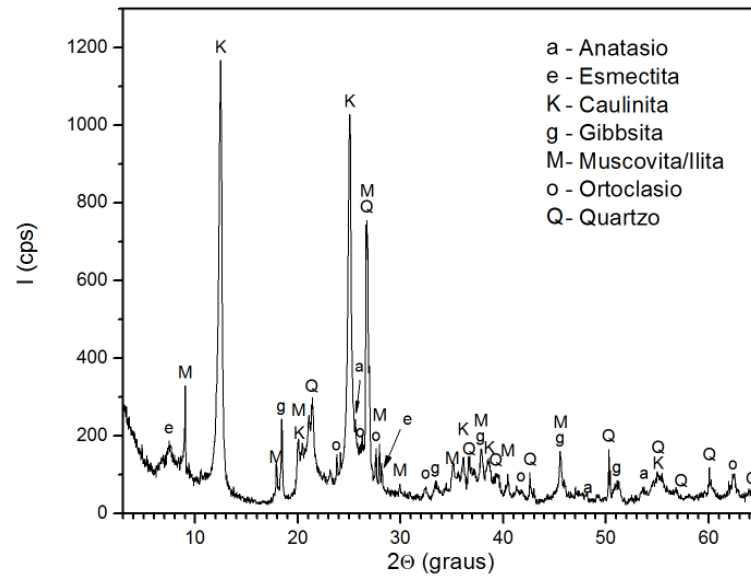


Figura 5.2 – Difratoograma de raios X da argila amarela.

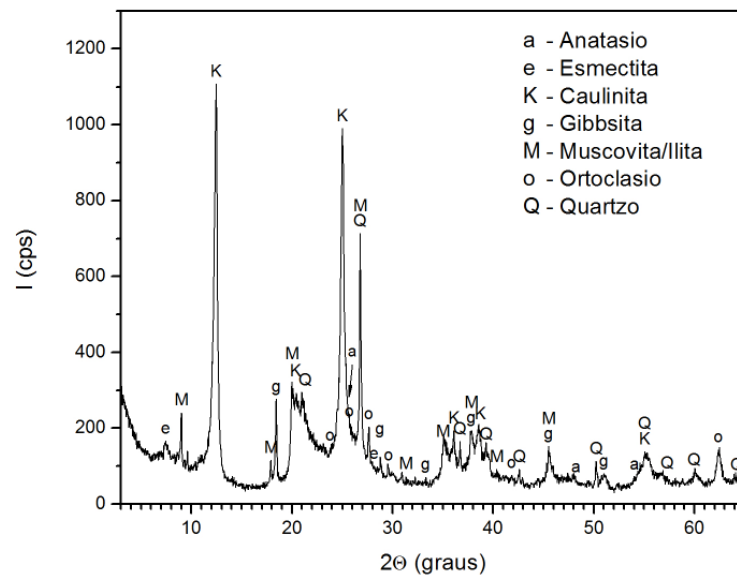


Figura 5.3 – Difratoograma de raios X da argila cinza

Nota-se que o principal pico cristalino apresentado pelas argilas é a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sendo um argilomineral responsável pelo desenvolvimento da plasticidade da massa cerâmica e resistência mecânica das peças. Observam-se também picos característicos de quartzo que está relacionado à presença de SiO_2 , muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e traços de anatásio (TiO_2), esmectita ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e ortoclásio ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$). Estes resultados corroboram com a análise química (Tabela 5.4), e com os primeiros estudos sobre a caracterização das argilas de Campos dos Goytacazes (ALEXANDRE, 2000).

A Figura 5.4 apresenta o difratograma de raios X do lodo primário utilizado na pesquisa.

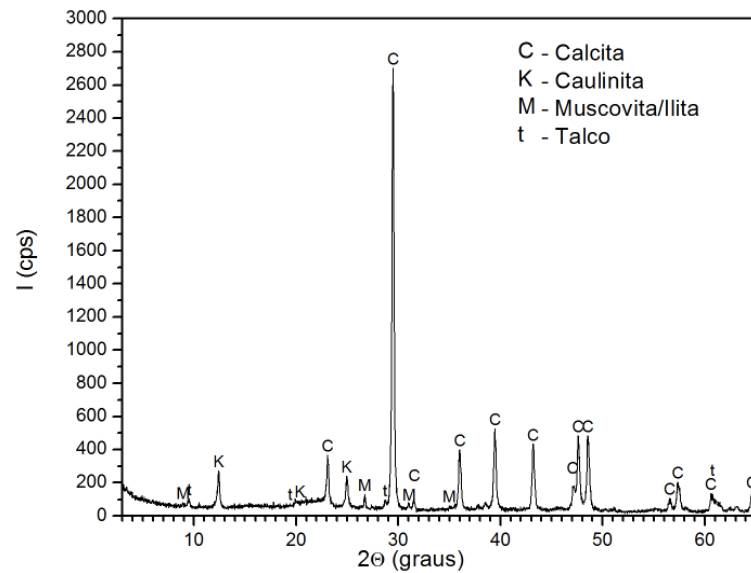


Figura 5.4 – Difratoograma de raios X do resíduo de papel

Observa-se que o principal constituinte cristalino do lodo é a calcita (CaCO_3) devido ao alto teor de CaO (Tabela 5.4). Sua presença como fase cristalina principal também é observada na literatura (SUTCU e AKKURT, 2009; BURUBERRI *et al.*, 2015; CUSIDÓ *et al.*, 2015; JOSHI *et al.*, 2017) e sua predominância pode ser um ponto favorável na resistência mecânica do material cerâmico. Percebe-se também a presença de outros minerais no lodo, como a caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Estes minerais podem reduzir as tensões geradas no material cerâmico, além de se transformar em aditivo mineral a partir do controle da temperatura de queima.

Através da Figura 5.5 e 5.6 são apresentados os difratogramas de raios X para as composições M-0 e M-10, queimadas à 850°C .

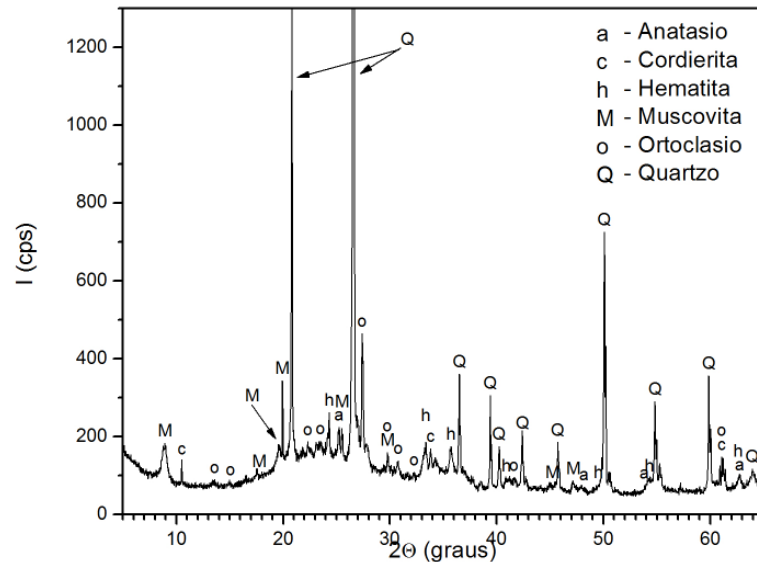


Figura 5.5 – Difratoograma de raios X do M-0 queimado a 850 °C

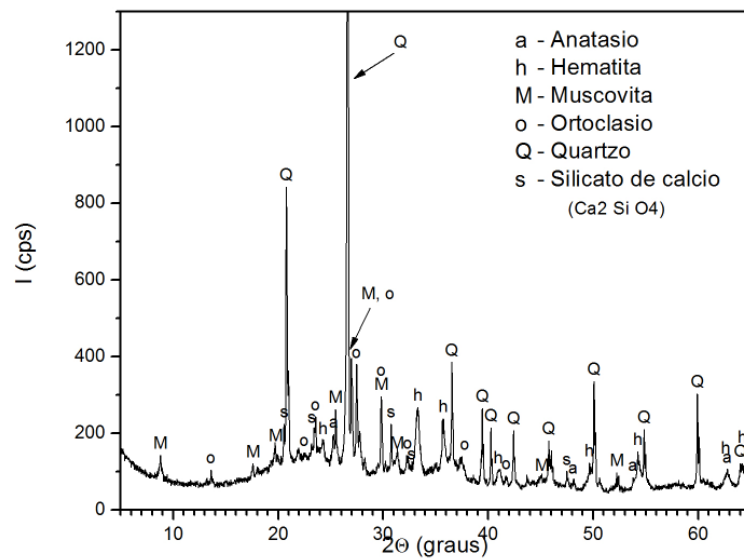


Figura 5.6 – Difratoograma de raios X do M-10 queimado a 850 °C

Percebe-se que a caulinita não foi identificada, pois nesta temperatura ela já sofreu desidroxilação (aproximadamente 500 °C), transformando-se em metacaulinita, fase amorfa. Contudo o quartzo se apresenta como o principal constituinte cristalino das massas cerâmicas após a queima, que assim como a muscovita, são fases residuais, provenientes da matéria-prima no seu estado natural. Percebe-se também, a existência de duas fases cristalinas que não haviam sido identificadas antes da queima, a hematita e o silicato dicálcico.

A hematita está presente nas duas composições (M-0 e M-10), provavelmente oriunda da goethita (oxi-hidróxido de Fe), presente nas argilas de região Norte

Fluminense, que pela baixa cristalinidade e superposição de picos com a caulinita é difícil de ser identificada na amostra natural. No entanto, vale destacar a presença de ferro nas matérias-primas argilosas apresentada na Tabela 5.4.

O silicato dicálcico ($\text{Ca}_2 \text{SiO}_4$) na composição M-10, possivelmente trata-se de uma fase proveniente da reação entre o resíduo de papel e a argila, relacionada à decomposição da calcita durante o processo de queima e da sílica amorfa (VIEIRA *et al.*, 2016). Segundo Saraswathy e Há-Won (2007); Asquini *et al.* (2008); Taha *et al.* (2016), o silicato dicálcico contribui para a melhor resistência mecânica dos materiais cerâmicos.

5.1.4. Análise Térmica (ATD/TG/DTG)

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam o comportamento térmico das argilas amarela e cinza, através da análise gravimétrica (TG/DTG) e análise térmica diferencial (ATD) respectivamente.

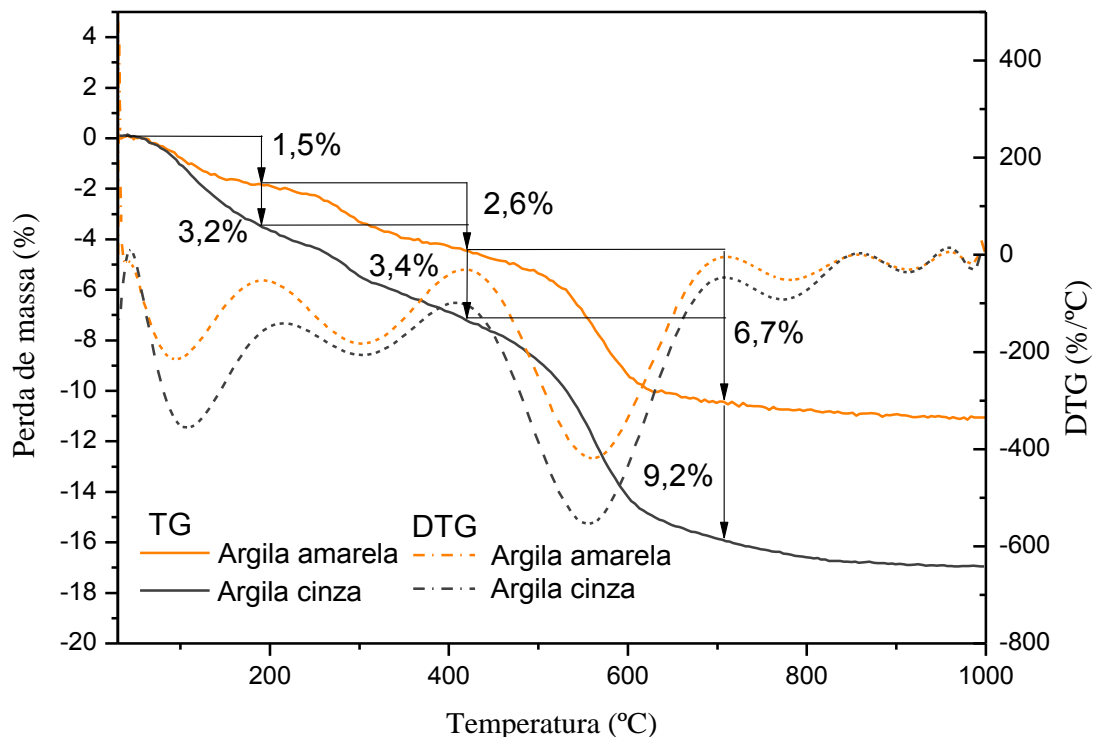


Figura 5.7 – Curvas de TG / DTG das argilas

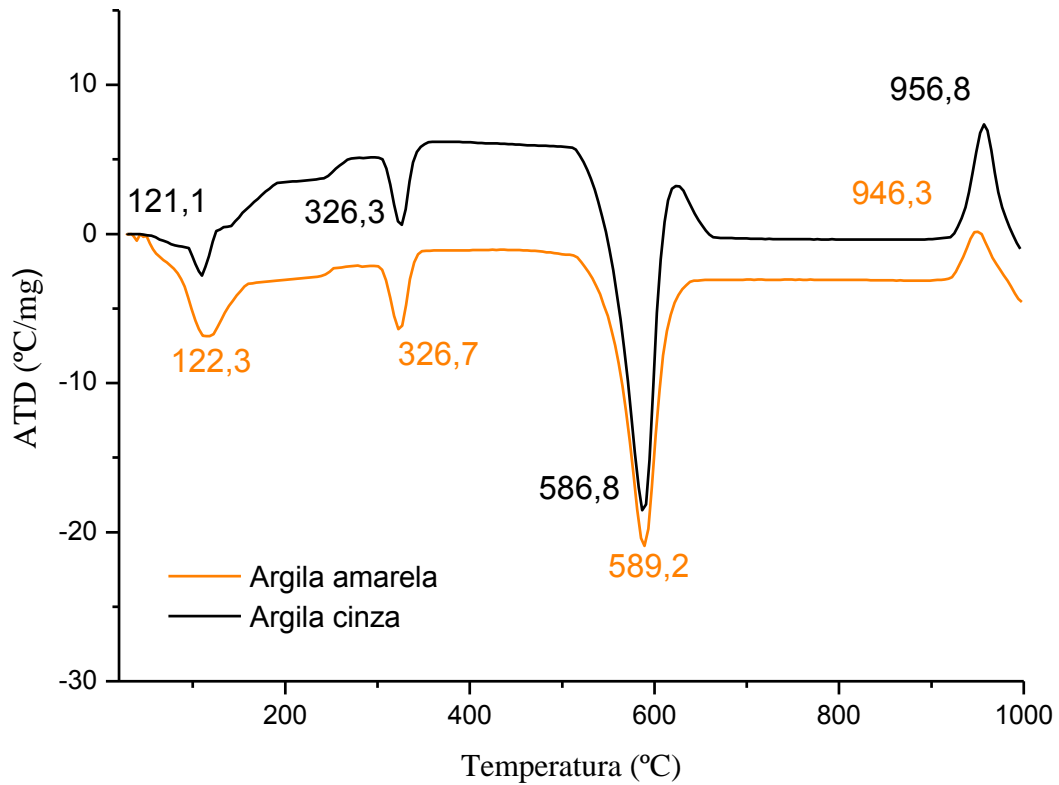


Figura 5.8 – Curvas de análise térmica diferencial (ATD) das argilas

Constata-se através das figuras citadas, que de acordo com o aumento da temperatura, as argilas apresentam comportamento térmico similar, corroborado pela análise mineralógica realizada por difração de raios X. Nas temperaturas iniciais, em torno de 120 °C, houve o primeiro evento endotérmico, associado a uma perda de massa de 1,5% e 3,2%, possivelmente relacionada à eliminação da água; o segundo evento endotérmico ocorre por volta de 320 °C, associado a uma perda de massa entre 2,6% e 3,4%, devido à oxidação da matéria orgânica, desidroxilação dos oxihidróxidos de alumínio (gibbsita) e de ferro (goetita); o terceiro evento endotérmico acontece próximo de 600 °C, apresentando uma perda de massa mais intensa, entre 6,7% e 9,2%, devido à desidroxilação da caulinita; o evento exotérmico que ocorre entre 940 °C e 960 °C, possivelmente está relacionado à nucleação da mullita após a total decomposição da estrutura da caulinita.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam o comportamento térmico do lodo primário, através da análise gravimétrica (TG/DTG) e análise térmica diferencial (ATD) respectivamente.

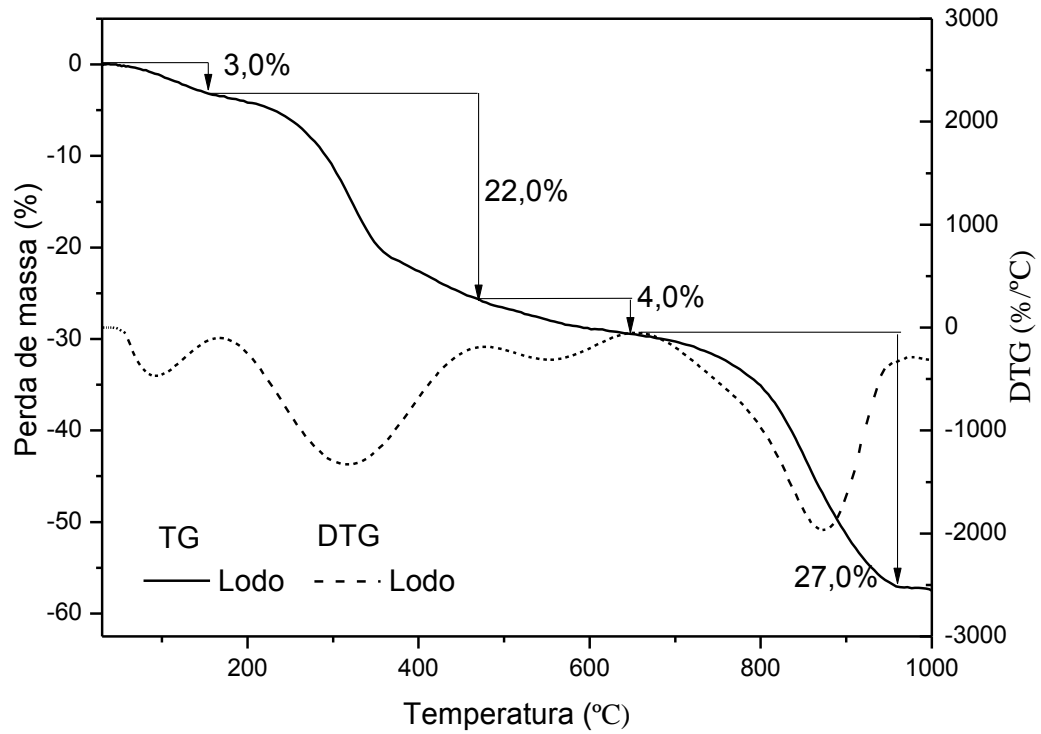


Figura 5.9 – Curvas de TG / DTG do lodo primário

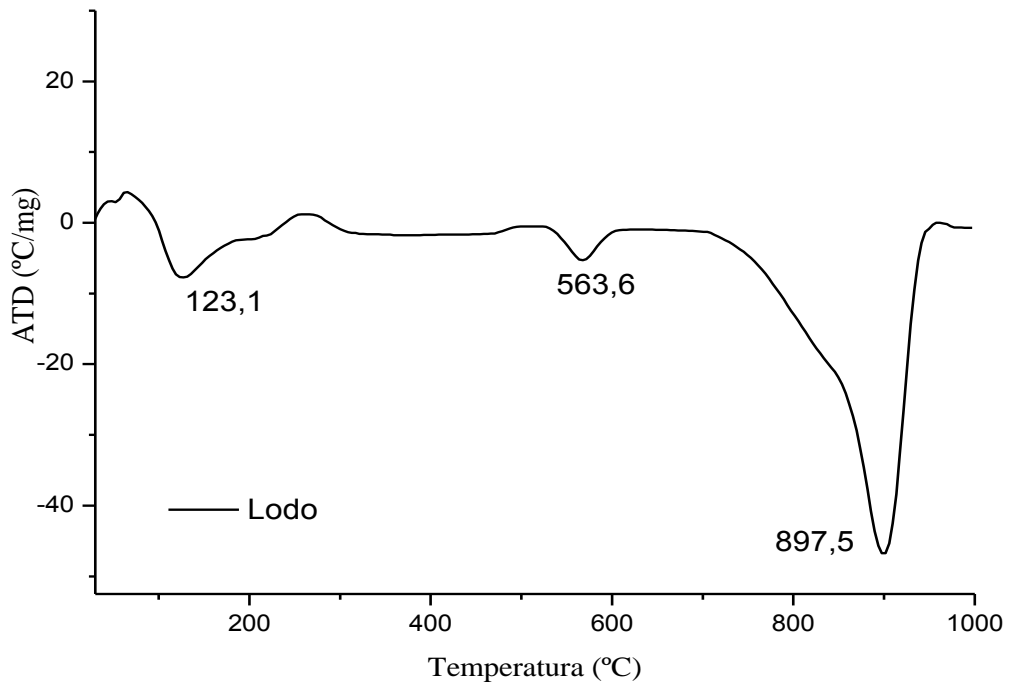


Figura 5.10 – Curvas de análise térmica diferencial (ATD) do lodo primário

Em aproximadamente 120 °C, observa-se o primeiro evento endotérmico, associado a uma perda de massa de 3,0%, possivelmente devido à remoção de água absorvida; é possível observar também outras duas perdas de massa de 22,0% e 4,0% respectivamente, compreendidas nas temperaturas entre 300 °C e 600 °C,

devido à combustão da matéria orgânica sólida e desidroxilação da caulinita; o último evento endotérmico, em torno de 900 °C, apresenta uma perda de massa de 27,0%, e está associado à decomposição da calcita (CaCO_3), que geralmente começa se decompor a cerca de 700 °C, e termina em 950 °C (TODOR, 1976), com a eliminação de CO_2 e formação de CaO .

5.1.5. Caracterização Morfológica

A seguir, são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas quais é possível observar que tanto as argilas quanto o resíduo de papel apresentaram partículas de tamanhos e formas distintas, e que devido à quantidade de poros existentes (pontos negros observados nas imagens), é possível dizer que os materiais não estão interligados quimicamente.

A Figura 5.11 apresenta as argilas como uma forma mais compacta, devido à maior energia de superfície das partículas menores, que favorecem o mecanismo de aglomeração. Sua configuração mostra que as argilas são constituídas por partículas na forma de placas finas e irregulares, possivelmente atribuídas aos minerais do tipo caulinita, muscovita e quartzo, como pode ser comprovada na difração de raios X (Figuras 5.2 e 5.3).

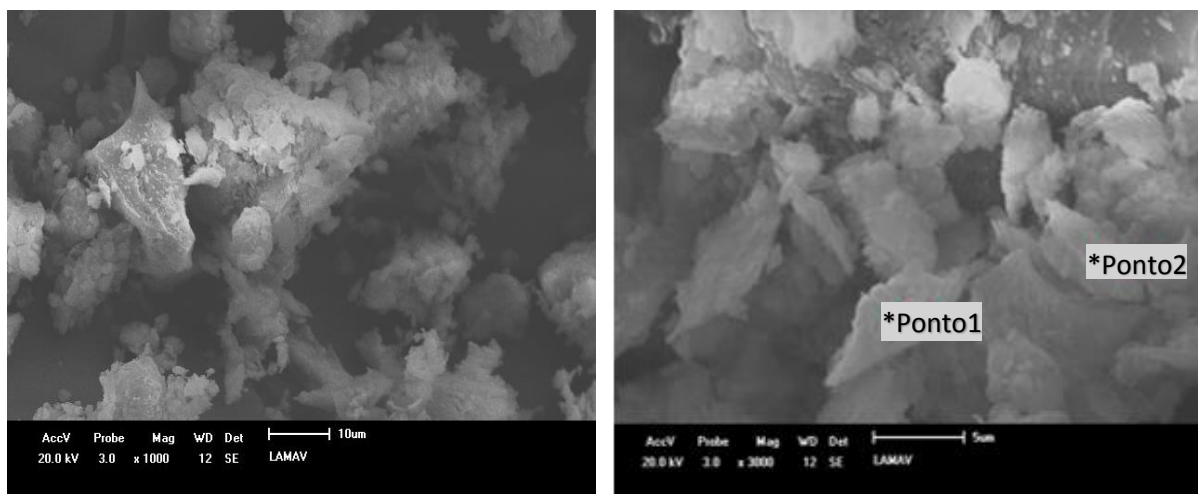


Figura 5.11 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das argilas

Através da análise química pontual por espectrometria de energia dispersiva (EDS) apresentada pela Figura 5.12, é possível verificar que as partículas das argilas são constituídas principalmente por alumínio e silício, e em menor intensidade por

potássio e ferro, confirmando os resultados obtidos por fluorescência de raio X (FRX) Tabela 5.4.

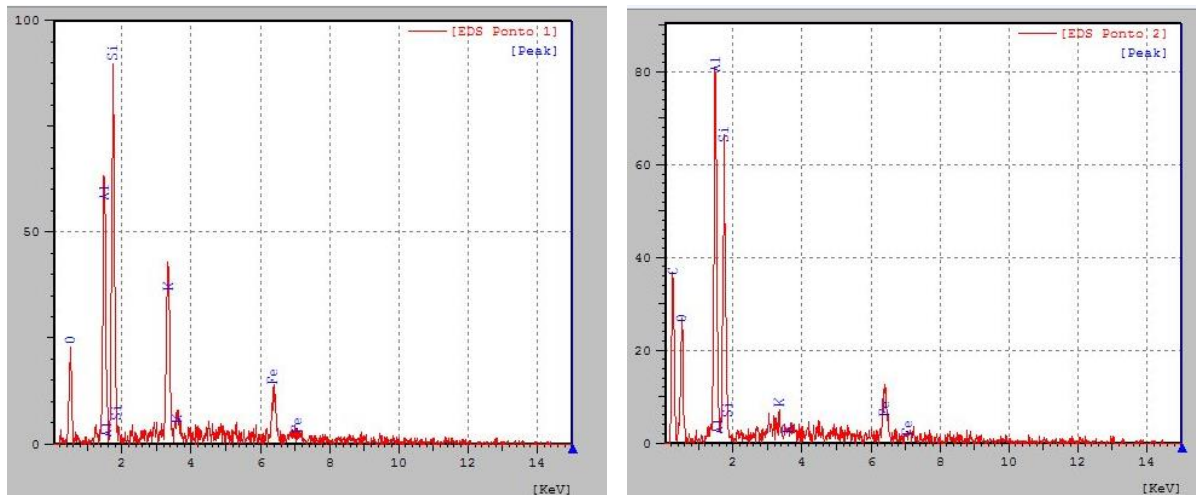


Figura 5.12 – Análise química pontual por espectrometria de energia dispersiva (EDS) das argilas.

Por intermédio da Figura 5.13 é possível observar que o resíduo de papel apresenta-se com uma forma mais alongada, devido à ligação que ocorre entre as partículas de natureza fibrosa. A concentração das fibras na composição do lodo primário, é um fator favorável para seu uso em materiais da construção civil, e a forma alongada das fibras, pode promover maior adesão interfacial na massa cerâmica. De acordo com Cavdar *et al.* (2017), as fibras conferem uma capacidade de absorção de energia muito elevada e, conseqüentemente, elevada resistência mecânica.

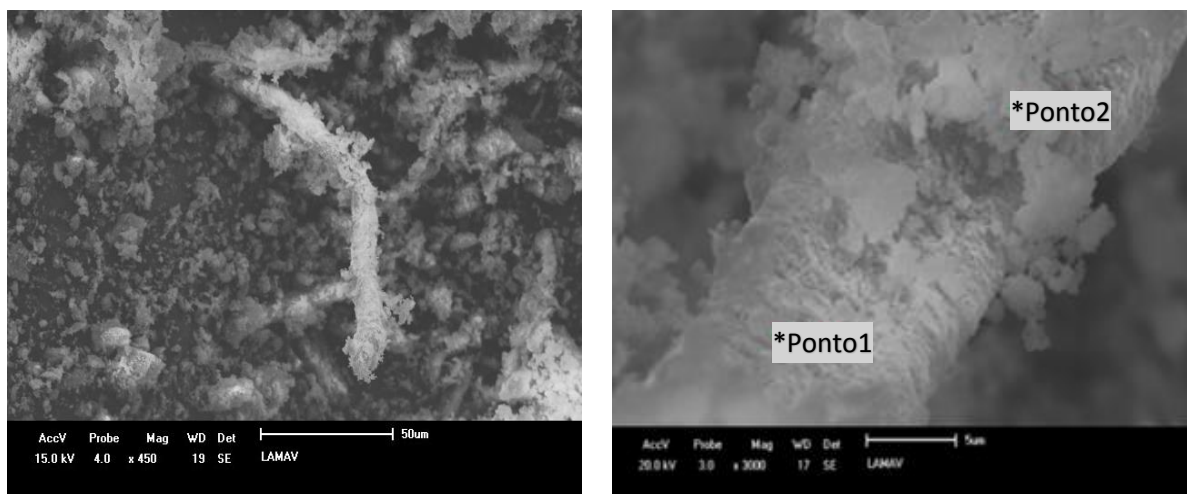


Figura 5.13 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do resíduo de papel

Mediante a análise química pontual por espectrometria de energia dispersiva (EDS) apresentada pela Figura 5.14, é possível verificar a presença significativa de cálcio no resíduo de papel, e em menor intensidade de alumínio, silício e ferro. A presença destes elementos no resíduo de papel mostra a variação na composição química durante as diversas etapas da fabricação do papel. Desta forma, é possível afirmar que as características apresentadas pelo lodo primário é um ponto positivo para a sua utilização na indústria de cerâmica, pois mostra sua semelhança com a composição química apresentada pelas argilas pesquisadas.

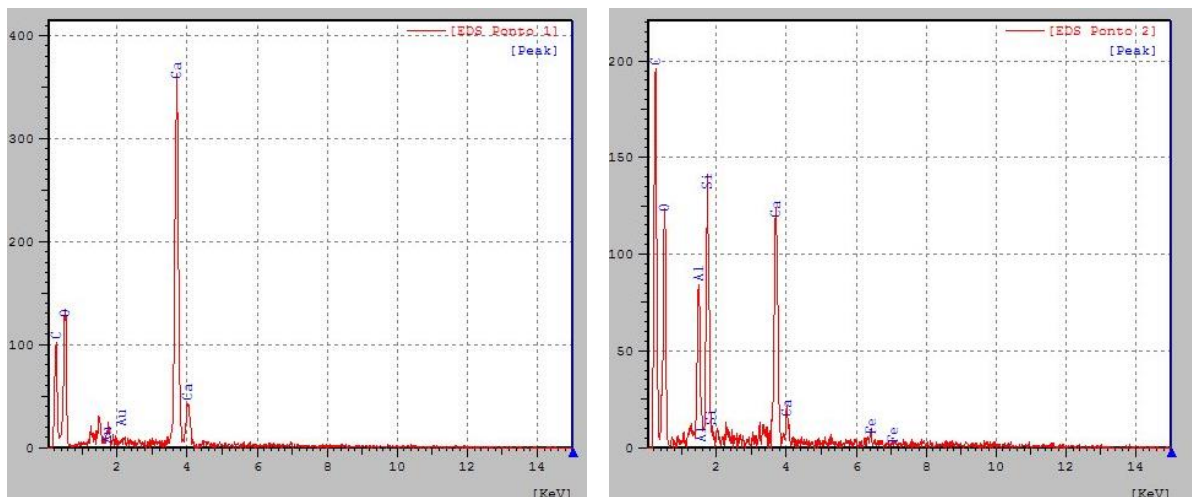


Figura 5.14 – Análise química pontual por espectrometria de energia dispersiva (EDS) do resíduo de papel.

5.2. Teor de Umidade

O teor de umidade das matérias-primas empregadas na pesquisa está apresentado na Tabela 5.5. As argilas apresentaram o valor médio de 5,0% de teor de umidade devido ao armazenamento em ambiente coberto e também devido ao seu pré-processamento, ou seja, trituração mecânica e peneiramento. Já o lodo primário *in natura* apresentou o valor de 58,91% em virtude das enormes quantidades de água demandadas em suas operações processuais, sendo um percentual próximo ao descrito na literatura (CUSIDÓ *et al.*, 2015; SUTCU *et al.*, 2014; GOEL e KALAMDHAD, 2017).

Tabela 5.5 – Teores de umidade das matérias-primas

Amostra	Teor de umidade (%)
Argila	5,0
Lodo primário <i>in natura</i>	58,91

5.3. Resultado dos ensaios físicos e mecânicos

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios físicos e mecânicos das peças cerâmicas, em função dos diferentes teores do lodo primário e das diferentes temperaturas de queima, nos quais são comparados com determinados resultados encontrados na literatura.

5.3.1. Porosidade Aparente

Analisando a Tabela 5.6 e a Figura 5.15, observa-se que independente da temperatura de queima, não houve influência significativa na porosidade aparente das peças cerâmicas sem adição do lodo primário. As mudanças nesta propriedade ocorreram a partir da incorporação do lodo, e podem ser atribuídas às fases na estrutura cerâmica, devido às transformações que ocorrem durante o processo de queima do resíduo. Quando as temperaturas de queima atingem determinados patamares, ocorre a liberação de grande quantidade de água aprisionada no resíduo de papel, que é altamente úmido, alterando suas composições de maneira mais objetiva. Dessa forma, as mudanças nesta propriedade, em termos percentuais, mesmo em pequena magnitude, influenciam diretamente os blocos cerâmicos que serão produzidos, visto que durante o processo de queima há alterações na composição do material dentro da matriz.

Tabela 5.6 – Desvio padrão da Porosidade Aparente

Massa	700 °C (%)	850 °C (%)
M-0	37,25 ± 0,25	37,62 ± 0,14
M-5	38,63 ± 0,15	36,35 ± 0,33
M-10	40,34 ± 0,24	36,66 ± 0,76
M-15	43,05 ± 0,22	38,69 ± 0,49

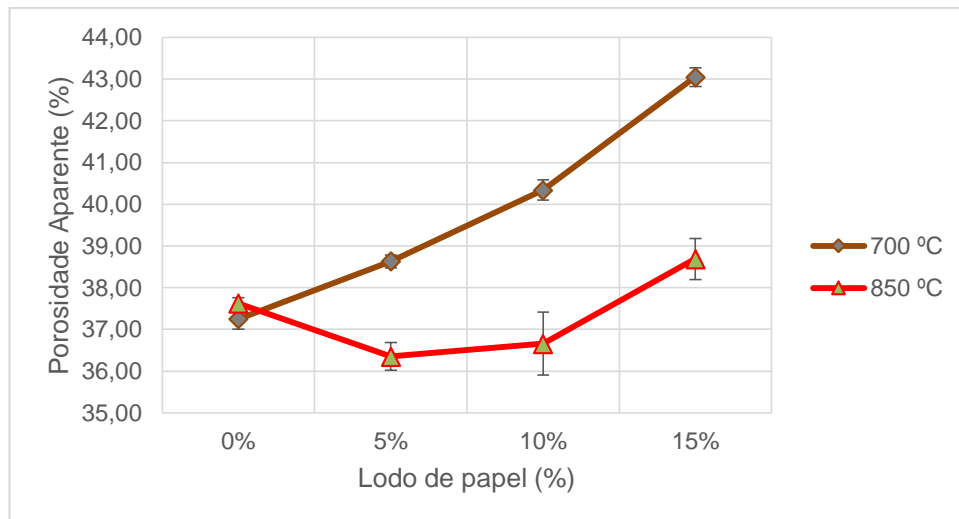


Figura 5.15 – Porosidade Aparente das composições queimadas a 700 e 850°C.

Para as peças cerâmicas queimadas à 700 °C, nota-se que quanto maior o teor de lodo primário na composição, maiores são os valores da porosidade aparente. Este aumento pode estar atribuído à combustão da matéria orgânica e ao início da decomposição da calcita.

Observa-se uma redução nos valores da porosidade aparente para as misturas de 5% e 10% do lodo, em que as peças foram queimadas a 850 °C. Esta redução chega a 2,6%, se comparado com as peças cerâmicas sem o resíduo, e está associada aos respectivos valores de 36,35% e 36,66%, estatisticamente semelhantes, possivelmente atribuída a maior densificação da peça cerâmica decorrente do início do processo de sinterização. O aumento do valor da porosidade aparente na temperatura de 850 °C, ocorre com a adição de 15% do lodo, na qual é 2,9% superior às peças sem o resíduo, porém 10,13% inferior às peças com o mesmo percentual do lodo queimadas à 700 °C. Provavelmente à 700 °C, sendo quase o início da desidroxilação da calcita (TODOR, 1976), deve existir maior quantidade de poros abertos do que à 850 °C. No entanto, uma quantidade maior do lodo, 15%, provoca uma maior porosidade que as demais composições, conforme apresentadas nos resultados.

5.3.2. Absorção de Água

Assim como aconteceu com a porosidade aparente, observam-se a Tabela 5.7 e a Figura 5.16, que independente da temperatura de queima, não houve influência

significativa na absorção de água das peças cerâmicas sem adição do resíduo. As peças sem o incremento do lodo, queimadas à 700 °C e 850 °C, apresentam valores dentro da faixa recomendada para a sua utilização, que é de 25% (SANTOS, 1989). Uma vez que a absorção de água é uma propriedade relacionada à formação de poros do material cerâmico, nota-se também que, a partir da incorporação do lodo primário foi que ocorreram mudanças na absorção de água.

Tabela 5.7 – Desvio padrão da Absorção de Água

Massa	700 °C (%)	850 °C (%)
M-0	23,52 ± 0,19	23,51 ± 0,08
M-5	24,66 ± 0,09	22,73 ± 0,21
M-10	26,27 ± 0,17	23,34 ± 0,52
M-15	29,22 ± 0,19	25,57 ± 0,43

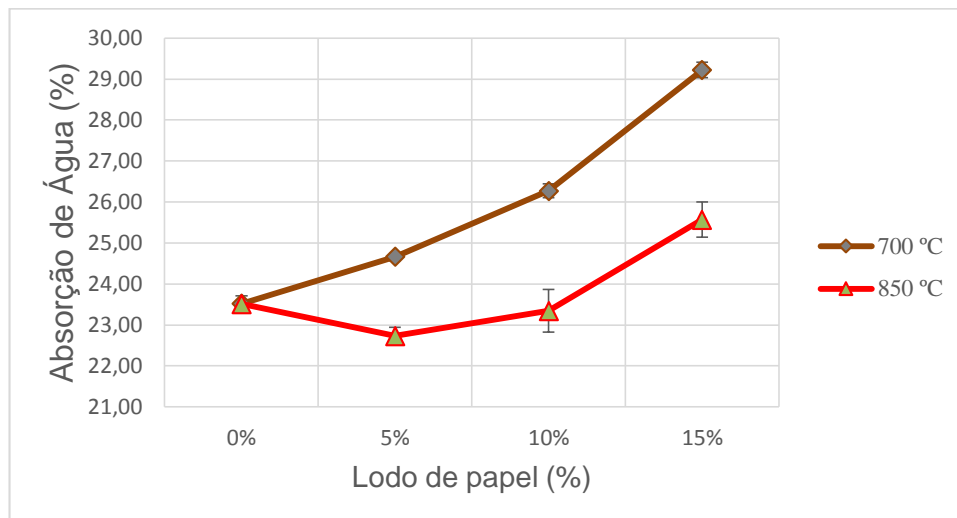


Figura 5.16 – Absorção e Água das composições queimadas a 700 e 850 °C

Para as peças cerâmicas queimadas à 700 °C, houve uma tendência de aumento da absorção de água, logo, somente a mistura de 5% do lodo atendeu o recomendado com 24,66%. A tendência de aumento desta propriedade, em função do lodo primário, também é confirmada na literatura (SUTCU *et al.* 2014; CUSIDÓ *et al.* 2015; GOEL e KALAMDHAD, 2017), e está relacionada aos mesmos fenômenos que levaram à maior porosidade aparente das peças cerâmicas.

Com a queima à 850 °C, houve uma queda nos valores de absorção de água para as peças com 5% e 10% de lodo primário, em relação às peças sem o lodo. Esta redução está associada à melhora da propriedade, possivelmente atribuída a menor porosidade superficial do material, devido aos mecanismos de sinterização. Destaca-

se que as peças com 10% do lodo são estatisticamente similares às peças sem o lodo. Com a adição de 15% do lodo, houve um aumento do valor da absorção de água, atingindo o valor de 25,57%, superior à faixa recomendada.

5.3.3. Massa Específica Aparente

Através da Tabela 5.8 e Figura 5.17, verifica-se uma tendência de redução dos valores da massa específica aparente, quando as peças são submetidas à menor temperatura e à medida em que se aumenta o percentual do lodo primário. Na temperatura de 700 °C, a redução foi de 3% entre M-0 e M-10 e 7% entre M-0 e M-15. Na mesma proporção observa-se na temperatura de 850 °C, na qual houve o decréscimo de 2% e 6% entre M-0 e M-10, e entre M-0 e M-15 respectivamente.

Tabela 5.8 – Desvio padrão da Massa Específica Aparente

Massa	700 °C (g/cm ³)	850 °C (g/cm ³)
M-0	1,58 ± 0,00	1,60 ± 0,00
M-5	1,57 ± 0,01	1,60 ± 0,00
M-10	1,54 ± 0,00	1,57 ± 0,01
M-15	1,47 ± 0,00	1,51 ± 0,01

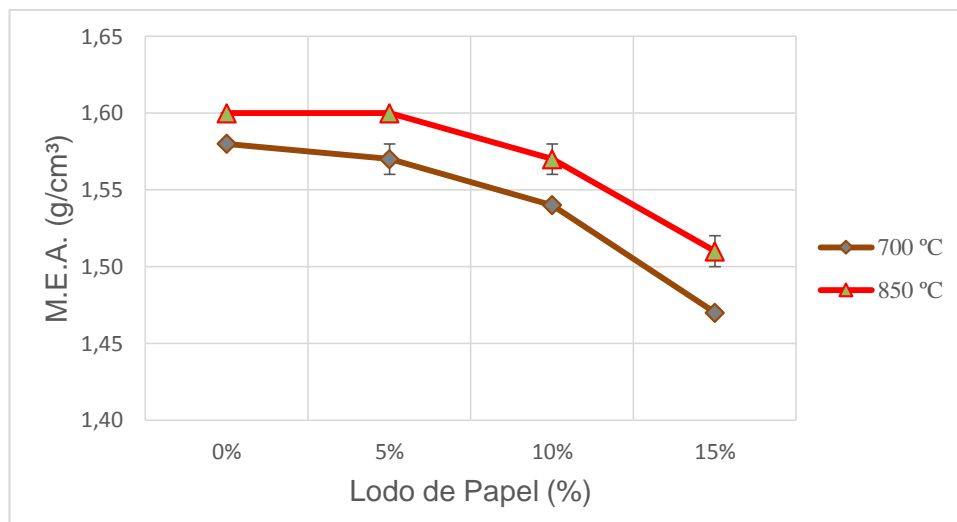


Figura 5.17 – Massa Específica Aparente das composições queimadas a 700 e 850°C

Como pôde ser observado, a massa específica aparente está diretamente ligada à absorção de água e porosidade aparente. Enquanto o valor das duas últimas propriedades tendem a aumentar (Figura 5.15 e 5.16), o valor da massa específica aparente tende a diminuir. Este resultado é atribuído à menor densificação das peças

cerâmicas, já que, quanto menor a temperatura de queima, mais vazios existirão nas peças, e também, devido ao peso do lodo primário que foi constatado através da Tabela 5.3, ser aproximadamente 50% mais leve que as argilas utilizadas na pesquisa.

5.3.4. Retração Linear de Queima

Constata-se através da Tabela 5.9 e da Figura 5.18, a influência das diferentes temperaturas na retração linear de queima dos corpos cerâmicos. Assim como aconteceu com os resultados encontrados por Goel e Kalamdhad (2017), quanto maior a temperatura de queima, maior é a retração das peças. Nesta pesquisa, na temperatura à 850 °C, a retração foi em média 50% maior em relação às peças queimadas à 700 °C. Esta ocorrência pode ser atribuída à liberação gasosa de eventos de desidroxilação de alguns minerais da composição da massa cerâmica, e ainda aos mecanismos do início do processo de sinterização, que estimula a maior proximidade das partículas sólidas quando as peças cerâmicas são submetidas à maior temperatura. Desse modo, quanto mais avançada a sinterização, maior é a retração linear das peças cerâmicas.

Tabela 5.9 – Desvio padrão da Retração Linear de queima.

Massa	700 °C (%)	850 °C (%)
M-0	0,32 ± 0,17	0,75 ± 0,09
M-5	0,28 ± 0,12	0,79 ± 0,10
M-10	0,26 ± 0,12	0,75 ± 0,25
M-15	0,37 ± 0,15	0,90 ± 0,07

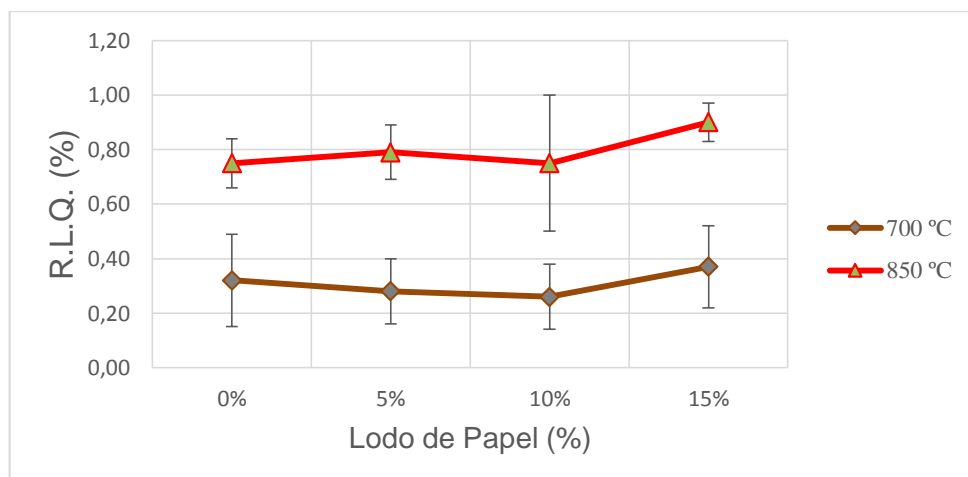


Figura 5.18 – Retração linear de queima das composições queimadas a 700 e 850°C.

Outra avaliação que pode ser feita observando a Tabela 5.9 e a Figura 5.18, é que a adição do lodo primário não influenciou nesta propriedade, diferentemente da influência que o lodo teve nas pesquisas de Sutcu *et al.* (2014); Goel e Kalamdhad (2017). As pequenas variações se enquadram dentro do erro estatístico, e podem ser devido ao alto teor de calcita presente no resíduo de papel, em que proporcionou uma retração proporcional com o início da sinterização do material cerâmico. Este aspecto é favorável ao produto cerâmico, já que uma excessiva retração pode gerar o aparecimento de fissuras nas peças.

5.3.5. Resistência à Flexão

De acordo com a Tabela 5.10 e Figura 5.19, percebe-se o aumento da resistência à flexão dos blocos cerâmicos com o aumento da temperatura de queima e à medida em que se adiciona até 10% do lodo primário, sendo esta adição estatisticamente semelhante à incorporação de 15% para as duas temperatura. Com o aumento da temperatura de queima a resistência das peças cerâmicas elevou em média 36,74%, já com a adição do lodo primário o aumento foi em média de 27,74%. Destaca-se portanto que, em todos os casos, os blocos cerâmicos apresentam valores dentro do limite recomendado, ou seja, 1,5 MPa (SANTOS, 1989).

Tabela 5.10 – Desvio padrão da Tensão de ruptura à flexão.

Massa	700 °C (MPa)	850 °C (MPa)
M-0	5,56 ± 0,15	7,75 ± 0,36
M-5	6,41 ± 0,34	8,79 ± 0,25
M-10	7,24 ± 0,40	9,90 ± 0,32
M-15	7,22 ± 0,39	9,32 ± 0,26

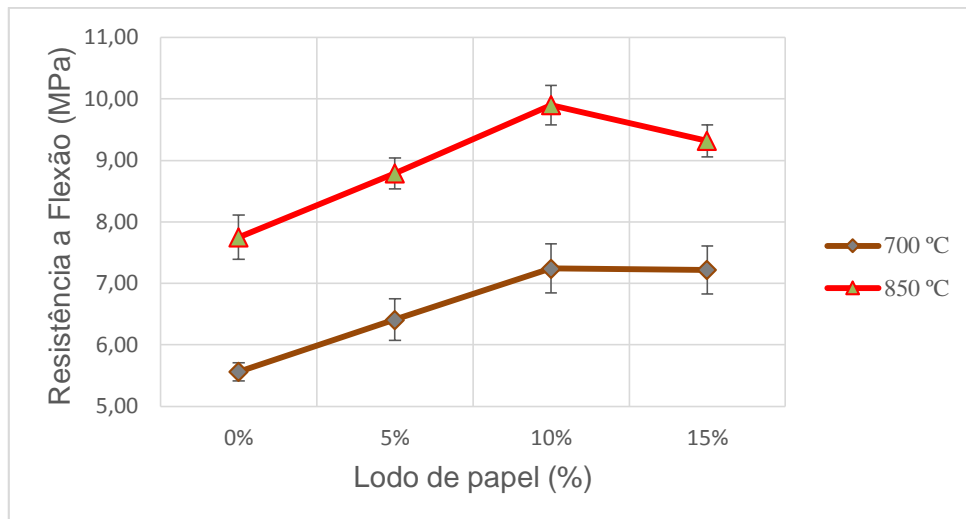


Figura 5.19 – Tensão de ruptura à flexão das composições queimadas a 700 e 850°C.

O aumento da resistência mecânica das peças queimadas em maior temperatura, já era de se esperar. Este fato pode ser explicado devido à maior densificação do material cerâmico, em consequência da redução da porosidade, em relação às peças queimadas em menor temperatura. Da mesma forma, esta ocorrência pode ser explicada para as peças com 5% e 10% de incorporação do primário, queimadas à 850 °C. Estas peças apresentaram menor porosidade (Figura 5.15) e as melhores resistências. No entanto percebe-se que não apenas estas, mas todas as peças com o lodo apresentaram boas resistências, inclusive melhores do que as peças sem o lodo, independente da porosidade.

O aumento da resistência à flexão com a adição do lodo primário, vai de encontro ao fato de que, a razão principal para o aumento da resistência mecânica em cerâmica vermelha é a redução da porosidade. Tal comportamento também não se alinha com os resultados encontrados por Pinheiro (2008), que obteve resistências menores em função do aumento da incorporação do resíduo. Portanto, é muito provável que o aumento da resistência ocorreu devido à utilização do lodo primário *in natura* com suas características fibrosas, vistas microscopicamente na Figura 5.13.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusão

Com base nos resultados apresentados pela caracterização física, constatou-se que, apesar do lodo primário possuir apenas 8% de fração argila e não apresentar plasticidade, as massas cerâmicas se enquadram dentro das faixas recomendadas para uso em cerâmica vermelha.

A caracterização química revelou maior presença de SiO_2 e Al_2O_3 na argila cinza, logo esta é classificada como uma argila mais forte do que a argila amarela. Esta análise revelou também que o principal componente químico do lodo primário é o CaO .

Através da caracterização mineralógica, notou-se que as duas argilas possuem os mesmos minerais, tendo como fases cristalinas majoritárias a caulinita. Já o lodo primário apresentou picos predominante de calcita.

Pela caracterização morfológica, observou-se que as argilas são constituídas por partículas finas, irregulares e aglomeradas, enquanto o lodo primário é constituído por partículas alongadas e fibrosas.

As propriedades físicas e mecânicas das peças cerâmicas foram influenciadas com a utilização do lodo primário *in natura*.

À medida em que se adiciona o resíduo, há uma tendência de aumento da porosidade aparente e da absorção de água das peças queimadas à 700 °C, atribuído à decomposição da calcita. Já nas peças queimadas à 850 °C, há uma pequena redução, nas mesmas propriedades, para as misturas que contém 5% e 10% do resíduo, devido ao início do processo de sinterização.

A redução dos valores da massa específica aparente nas peças submetidas à menor temperatura e com o aumento do percentual de resíduo, ocorreu respectivamente em consequência da menor densificação e devido ao lodo primário ser mais leve do que as argilas.

Destaca-se também que, estatisticamente, não houve variação na retração linear de queima com a adição crescente do lodo primário *in natura* em ambas temperaturas, diferente dos resultados encontrados na resistência à flexão. Nesse caso, a incorporação do lodo *in natura*, com suas características fibrosas, em todos os percentuais usados fez com que aumentasse a resistência das peças em relação

ao material de referência, atendendo portanto, as recomendações tanto dos blocos de vedação, em que foi o objetivo da pesquisa, quanto dos blocos estruturais, para os quais são exigidos uma resistência mínima de 6,0 MPa (Santos, 1989).

Dessa forma, pode-se considerar que é viável a utilização do lodo primário *in natura*, aproveitando toda a massa de água existente em sua composição, em cerâmica vermelha para processo de bloco cerâmico. Para as argilas utilizadas nesta pesquisa, recomenda-se usar 5% em peso de lodo primário para as peças queimadas à 700 °C ou até 10% de resíduo para as peças queimadas à 850 °C. Caso os percentuais de resíduo sejam maiores do que o sugerido nas duas temperaturas, a absorção de água dos blocos cerâmicos supera o percentual recomendado, impossibilitando a sua utilização.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a incorporação do lodo primário *in natura* em outras argilas para confecção de blocos cerâmicos;
- Incorporar o lodo primário *in natura* nos blocos cerâmicos e submetê-los em temperatura superior à 850 °C;
- Confeccionar blocos cerâmicos, utilizando o lodo primário *in natura* sem à mistura mecânica e sem o auxílio da peneira;
- Testar o processo de prensagem para a confecção dos blocos cerâmicos incorporados com o lodo primário *in natura*;
- Realizar o ensaio de compressão para os blocos cerâmicos incorporados com o lodo primário *in natura*;
- Identificar e analisar os gases que podem ser liberados durante a etapa de queima dos blocos cerâmicos incorporados com o lodo primário *in natura*;
- Avaliar a economia de energia que o lodo primário *in natura* pode proporcionar nos blocos cerâmicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M. F. (2000). *Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos*, Beralmar S. A., Terrassa. p.193-266.2.

ALBERO, J.L.A. (2000). *A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O preenchimento da cavidade do Molde*. Cerâmica Industrial, p.23-28.

ALEXANDRE, J. (1997). Caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado em Ciências da Engenharia. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ.

ALEXANDRE, J. (2000). *Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ.

ANA GABRIELA MONNERAT CARVALHO BASSA; FRANCIDES GOMES DA SILVA JUNIOR; VERA M. SACON (2007). *Mixtures of Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla and Pinus taeda wood chips for kraft pulp production by Lo-Solids*. Scientia. Forestalis. V. 75, p. 19-29.

AREIAS, I. O. R.; VIEIRA, C. M. F.; MANHÃES, R. da S.T.; INTORNE, A. C. (2017). *Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha*. Cerâmica, v. 63, p. 343-349.

ASQUINI, L; FURLANI, E; BRUCKNER, S; MASCHIO, S. (2008). *Production and characterization of sintered ceramics from paper mill sludge and glass cullet*. Chemosphere, v. 71, p. 83-89.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC (Brasil) (org.). Informações Técnicas: Definição e Classificação. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4submenu=46>>. Acesso em: 03 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2016). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica – Solo. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO – ANFACER. História da Cerâmica. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br/historia-cerâmica>. Acesso em: 01 agosto 2017.

AZEVEDO; ALEXANDRE; XAVIER; PEDROTI (2018). *Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective*. Journal of Cleaner Production, v.192, p.335-346.

BONI M. R.; D'APRILE L.; CASA G. (2004). *Environmental quality of primary paper sludge*. Journal of Hazardous Materials, v. 108, p.125-128.

BURUBERRI, L., SEABRA, M. P., LABRINCHA, J. A. (2015). *Preparation of clinker from paper pulp industry wastes*. Journal of Hazardous Materials, v. 286, p.252–260.

CAVDAR, A.D., YEL, H., BORAN, S., PESMAN, E., (2017). *Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler*. Construction and Building Materials. v. 142 (1), p. 410-416.

CAPUTO, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos*. v. 1, 6ª Edição, p. 53.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F. (2016). *Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha*. Cerâmica, v. 62, p. 249-255.

CULAU, F.; MORO, C.; BALESTRERI, L.; GARCIA, M. (2012). *Sustentabilidade: Uma Proposta de Possibilidades Estéticas e Funcionais entre Linguagens do Design e da Cerâmica*. Ciências Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 13, p.125-140.

CUSIDÓ, J. A.; CREMADES, L. V.; SORIANO, C.; DEVANT, M. (2015). *Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Tenyears of industrial experience*. Applied Clay Science, v. 108, p.191–198.

VIGIL DE LA VILLA, R.; FRÍAS, M. ; ROJAS, I. S. ; VEGAS, I.; GARCIA, R. (2007). *Mineralogical and morphological changes of calcined paper sludge at different temperatures and retention in furnace*. Applied Clay Science, v. 36, p. 279-286.

DEMATTÊ, A.L.; RAMIREZ-LOPEZ, L.; RIZZO, R.; NANNI, R.M.; FIORIO, R.P.; FONGARO, T.C. (2016). *Remote sensing from ground to space platforms associated with terrain attributes as a hybrid strategy on the development of a pedological map*, Remote Sens. v.8, p. 826.

DEMIREL, B.G; ALTIN, A. (2017) *Production of sorbent from paper industry solid waste for oil spill cleanup*. Marine Pollution Bulletin. v. 125, p. 341-349.

DIZHUR, D.; LUMANTARNA, R.; BIGGS, D.; INGHAM, J. (2016). *In-situ assessment of the physical and mechanical properties of vintage solid clay bricks*. Materials and Structures. v. 50, p. 1-14.

DOMINIQUE, E; HERVÉ, K; CLAUS, H; ELIE, K; ANTOINE, E; CRISTINA, L. (2019). *Design of low cost semi-crystalline calcium silicate from biomass for the improvement of the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements*. Materials Chemistry and Physics, v. 223, p. 98-108

DONDI, M.; MARSIGLI, M; FABRI, B. (1997a). *Recycling of industrial and urban waste in brick production – A Review (Part 2)*. Tile & Brick International, v. 13, p.302-308.

EL YAKOUBI; ABERKAN, M.; OUADIA, M. (2006). *Use potentialities of Moroccan clays from the Jbel Kharrou area in the ceramic industry*. Comptes Rendus Geoscience. v. 338, p. 693-702.

EMILIANI, G.P. e CORBORA, F. (1999). *Tecnologia Cerámica – La Lavorazione*, Gruppo Editoriale Faenza Editrice. v. 1, p. 97.

GOEL e KALAMDHAD (2017). *An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing*. Construction and Building Materials, v. 148, p. 334-343

FARIAS, A. (2012). *Utilização de eco-inovação no processo de manufatura de cerâmica vermelha*. RAI – Revista de Administração e Inovação, v. 9, p.154-174.

FELTRIN, J.; SARTOR, M.; NONI, A.; BERNARDIN, A.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. (2013). Superfícies fotocatalíticas de titânia em substratos cerâmicos. Parte I: Síntese, estrutura e fotoatividade. *Cerâmica*, v. 59, p. 620-632.

FREYBURG, S.; SCHWARZ, A. (2007). *Influence of the clay type on the pore structure of structural ceramics*. Journal of the European Ceramic Society, v. 27, p. 1727-1733.

FRIAS, M., RODRIGUEZ, O., SANCHEZ DE ROJAS, M. I., (2015). *Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials*. Construction and Building Material, v. 74, p. 37–48.

FULGÊNCIO, E. B. G. A (2015). *Estudo do aproveitamento de conchas de marisco visando a incorporação em massa de porcelanato*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal da Paraíba – PB.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM (2013). *Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha*. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf. Acesso em: 08 dez. 2018.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; COUTO, E.G.; ROBERTS, D.A. (2008). *Relationships between the mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 63, p. 259–271.

GRIM, R. E., “Clay Mineralogy” 1ª ed, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1953.

GUERRINI, A., CARVALHO, P., ROMANO, G., MARQUES, R.C., LEARDINI, C. (2017). *Assessing efficiency drivers in municipal solid waste collection services through a nonparametric method*. Journal of Cleaner Production. v. 147, p. 431-441.

HAMMOUDA, I.; Jlassi, K.; MIHOUBI, D (2015). *Changes in the physic mechanical characteristics of a ceramic paste during drying*. Comptes Rendus Mécanique. v. 343, p. 419-428

HARTKE, R. F. (2004). *Análise numérica de um secador contínuo utilizado na indústria de cerâmica vermelha*. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (ABCM). Rio de Janeiro, Brazil.

HONG; YONG; JE; SEUNG; HYOUNG (2018). *Influence of calcination and cooling conditions on pozzolanic reactivity of paper mill sludge*. Construction and Building Materials. v. 166, p. 257-270.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Contagem populacional em 2016. Disponível em <http://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 agosto 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2015). Produtos / Papel. Disponível em <http://iba.org/pt/produtos/papel>. Acesso em 05 out. 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2017). Dados e Estatísticas. Disponível em <http://iba.org/pt/produtos/papel>. Acesso em 05 out. 2018.

JOSHI, G.; NAITHANI, S.; VARSHNEY, V.K.; BISHT, S.S; RANA, V. (2017). *Potential use of waste paper for the synthesis of cyanoethyl cellulose: a cleaner production approach towards sustainable environment management*. Journal of Cleaner Production. v. 142, p. 3759-3768.

KAZMI, S.M.S; ABBAS, S; SALEEM, M.A; MUNIR, M.J; KHITAB, A. (2016). *Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes*. Construction and Building Materials. v. 120 p. 29-41.

KHALID S. SHIBIB (2015). Effects of waste paper usage on termal and mechanical properties of fired brick. Heat and Mass Trasnfer. v. 51, p 685-690.

KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V.; MALAISKIENE, J. (2018). Analysis of the effect of paper sludge on the properties, microstructure and frost resistance of clay bricks. *Construction and Building Materials*. v. 169, p. 689-696.

KLOCK, UMBERTO; SULATO DE ANDRADE, ALAN; HERNANDEZ, JOSÉ ANZALDO (2013). *Polpa e papel*. 3ª ed. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/manualpolpa2013.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2018.

MÁS, E. (2002). *Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha*. Editora Pólo Produções Ltda, São Paulo. (Apostilas).

MELCHIADES, F. G., CAROLINA DEL ROVERI, JAIRO SOTÉRIO, LUCIANO L. SILVA e ASELMO O. BOSCHI (2001). *Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões*. *Cerâmica industrial*, v. 6, p.27-33.

MENEZES, R. R.; NEVES G. A.; FERREIRA, H. C., (2002). *O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 303–313.

MODOLO R., FERREIRA, V. M., MACHADO, L. M., RODRIGUES, M., COELHO, I., (2011). *Construction materials as a waste management for cellulose sludge*. *Waste Management*, v. 31, p.370–377.

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

MONTEIRO e VIEIRA (2004). *Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil*. *Applied Clay Science*, v. 27, p. 229-234.

- MORAES, N. (2016) *La Cerámica en Brasil*. Ziegelindustrie Internation, p.1. Acesso em: http://anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/06/zi_abr_2016.pdf
- MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. (2001). *As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos*. Cerâmica Industrial, v. 6, p. 28-39.
- MUÑOZ, P.; MORALES, M.P.; LETELIER, V.; MENDÍVIL, M. (2016). Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 241-252.
- MUÑOZ, P.; JUAREZ, M.; MORALES, P.; MENDÍVIL, M. (2013). *Improving the thermal transmittance of single-brick walls built of clay bricks lightened with paper pulp*. *Energy and Buildings*, v. 59, p. 171-180.
- MURRAY, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy - Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskitesepiolite, and Common Clays, 1ª Ed.*, Elsevier, Amsterdam, Holanda 142-144.
- NIRMALA, G. e VIRUTHAGIRI, G. (2014). *FT-IR characterization of articulated ceramic bricks with wastes from ceramic industries*. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* v. 126, 129–134.
- PEDROTI; ALEXANDRE; XAVIER; MONTEIRO; VIEIRA; BAHIANSE (2011). *Desenvolvimento de massa cerâmica para blocos queimados e prensados*. *Cerâmica Industrial*, v. 16, p. 25-30.
- PHONPHUAK, N.; KANYAKAM, S.; CHINDAPRASIRT, P. (2016). *Utilization of waste glass to enhance physicalementhanical propertiesof fired clay brick*. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3057-3062.
- PINHEIRO, B.C.A., HOLANDA, J.N.F. (2010) *Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha*. *Cerâmica* 56: 237-243.

PINHEIRO, R.M.; VIEIRA, C.M.F.; RODRIGUES, R.S.; MONTEIRO, S.N. (2008). *Recycling of waste from the paper production into red ceramic*. Revista Matéria. v. 13, p. 220-227.

PINHEIRO (2008). *Reciclagem de lodo primário da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel em cerâmica vermelha*. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. (2004). *Treatment of pulp and paper mill wastewater-a review*. Science of the Total Environment. v. 333, p. 37-58.

RAMOS, I. S.; ALEXANDRE, J; ALVES, M. G.; VOGEL, V; GANTOS, M (2008). *A indústria cerâmica vermelha de Campos dos Goitacazes e a inclusão social das artesãs da baixada campista através do projeto Caminhos de Barro*. Cerâmica v. 54, p. 280-286.

RAUT, S.P.; SEDMAKE, R.; DHUNDE, S.; RALEGAONKAR, R.V.; MANDAVGANE, S. (2012). *Reuse of recycle paper mill waste in energy absorbing light weight bricks*. Construction and Building Materials, v. 27, p. 247–251

REINOSA, J.; SILVA, A.; MARCOS, F.; CASTANHO, S.; MOYA, J.; FERNANDEZ, J. (2010). *High chemical stability of stoneware tiles containing waste metals*. Journal of the European Ceramic Society. v. 30, p. 2997-3004.

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

RIELLA, H.G.; FRANJNDLICH, E.U de C.; DURAZZO, M. (2002). *Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas*. Revista Cerâmica Industrial, v. 7, n. 3, p. 33-36.

- ROEDDER, E. (1959). *Silicate melt systems*. Physics and Chemistry of the Earth. v. 3, p. 224-297.
- SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. (2012). *Processing of red ceramic using a fast-firing cycle*. Cerâmica, v.58.
- SANTIS, B. C.; SICHIERI, E. P.; ROSSIGNOLO J. A.; FERREIRA, G.; FIORELLI, J. (2013). *Caracterização de massas cerâmicas do estado de S. Paulo para produção de agregados leves para concreto*. Cerâmica, v. 59, p.198-205.
- SANTOS, C. P.; REIS, I. N.; MOREIRA, J. E. B.; BRASILEIRO, L. B. (2001). *Papel: como se fabrica*. Química Nova na Escola, p.1-7.
- SANTOS, P.S. (1975). *Tecnologias de Argilas, Fundamentos e Aplicações*. Editora Universitária, São Paulo.
- SANTOS, P. S. (1989). *Ciência e Tecnologia das Argilas*. v. 1, 2ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- SANTOS, P.S. (1992) *Ciência e Tecnologia das Argilas*. v. 1, 3ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- SARASWATHY e HA-WON SONG (2007). *Corrosion performance of rice husk ash blended concrete*. Construction and Building Materials. v. 21, p. 1779-1784.
- SMITH, W.F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 3ª Edição, Lisboa-Pt, Ed. Mc GRAW-HILL, p. 892.
- SUTCU, M e AKKURT, S. (2009). *The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity*. Ceramics International. v. 35, p. 2625-2631

SUTCU, M.; DÍAZ, J. J.; RABANAL, F. P.; AKKURT, O. (2014). *Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste*. Energy and Buildings, v. 75, p. 69-108.

TAHA, Y; BENZAAZOUA, M; HAKKOU, R, MANSORI, M. (2016). *Natural clay substitution by calamine processing wastes to manufacture fired bricks*. Journal of Cleaner Production, v. 135, p. 847–858.

TOCZYLOWSKA-MAMINSKA, R. (2017). *Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 78, p. 764-772.

TODOR, D.N. (1976). *Thermal analysis of minerals*. Inglaterra: Abacus Press. 256p.

TURGUT, P.; YESILATA, B. (2008). *Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks*. Energy and buildings, v. 40, p. 679–688.

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

VERDUCH, A. G. (1995). *Características de las arcillas empleadas en la fabricación de ladrillos*. Técnica Cerâmica, n° 232, p. 214–228.

VIEIRA, C.M.F; SÁNCHEZ, R; MONTEIRO, S.N. (2008). *Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil*. Construction and Building Materials. v. 22 p. 781–787.

VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R. M. (2011). *Avaliação de Argilas Cauliníticas de Campos dos Goytacazes Utilizadas para Fabricação de Cerâmica Vermelha*. Cerâmica, v 57, p.319-323.

VIEIRA, C.M.F.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N.; LALLA, N.; QUARANTA, N. (2013). *Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic*. Journal of Materials Research and Technology, v. 2, p. 88-92.

VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R. M.; RODRIGUES, R. J. S.; CANDIDO, V. S.; MONTEIRO, S. N. (2016). *Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits*. Applied Clay Science, v. 132–133, p.753–759.

VIEIRA, C.M.F., MORAIS, A. S. C., MONTEIRO, S. N., DELAQUA, G. C. G. (2016). *Teste indústrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente*. Cerâmica, v. 62, p. 376-385.

VILLAREJO, L.; MARTÍNEZ, S.; HURTADO, B.; QUESADA, D.; NIETO, C.; SOTO, P. (2015). *Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks*. Applied Clay Science, v.105–106, p. 89–99.

WIECKA, R.; DUAILIBI, J. (2014). *Extrusão em Cerâmica Vermelha: Princípios Básicos, Problemas e Soluções*. Cerâmica Indústrial, v. 18, p.16-23.

WIEMES, L.; PAWLOWSKY, U.; MYMRIM, V. (2017). *Incorporation of indústrial wastes as raw materials in brick's formulation*. Journal of Cleaner Production, v. 42, p. 69-77.

XAVIER, R. Y., SANTOS, G. R. DOS, MELCHIADES, F. G., BOSCHI, A. O. (2008). *Estudo da validade da reformulação de massas baseada exclusivamente na composição química de uma massa indústrial de porcelanato esmaltado*. Revista Cerâmica Indústrial, v. 13, p. 29-33.

YESILAYA, S; CAKIB, M; ERGUNC, H. (2017). *Usage of marble wastes in traditional artistic stoneware clay body*. Ceramics International v. 43, p. 8912–8921.

Apêndice A - Controle da adição de água em cada mistura

Argila seca (%)	Massa de água da argila (%)	Resíduo seco (%)	Massa de água do resíduo (%)	LL (%)	TRAÇO - M0 (100% DE ARGILA / 0,0% DE LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>)						
95	5	41,09	58,91	56							
Argila úmida (g)	100% de argila seca (g)	Massa de água da argila (g)	100% de argila seca (g)	0% de resíduo seco (g)	Total de material seco (g)	100% solo úmido (g)	0,0% resíduo úmido (g)	Total material umido (g)	Massa de água no material (g)	Água de amassamento (LL/2)+2 = 30%	água à adicionar (g)
6000	5700	300	5700	0	5700	6000	0,00	6000,00	300,00	1710,00	1410,00

Argila seca (%)	Massa de água da argila (%)	Resíduo seco (%)	Massa de água do resíduo (%)	LL (%)	TRAÇO - M5 (95% DE ARGILA / 5% DE LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>)						
95	5	41,09	58,91	56							
Argila úmida (g)	100% de argila seca (g)	Massa de água da argila (g)	95% de argila seca (g)	5% de resíduo seco (g)	Total de material seco (g)	95% de argila úmida (g)	5% resíduo úmido (g)	Total material umido (g)	Massa de água no material (g)	Água de amassamento (LL/2)+2 = 30%	água à adicionar (g)
6000	5700	300	5415	285	5700	5700	693,60	6393,60	693,60	1710,00	1016,40

Argila seca (%)	Massa de água da argila (%)	Resíduo seco (%)	Massa de água do resíduo (%)	LL (%)	TRAÇO - M10 (90% DE ARGILA / 10% DE LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>)						
95	5	41,09	58,91	56							
Argila úmida (g)	100% de argila seca (g)	Massa de água da argila (g)	90% de argila seca (g)	10% de resíduo seco (g)	total de material seco (g)	90% de argila úmida (g)	10% resíduo úmido (g)	Total material umido (g)	Massa de água no material (g)	Água de amassamento (LL/2)+2 = 30%	água à adicionar (g)
6000	5700	300	5130	570	5700	5400	1387,20	6787,20	1087,20	1710,00	622,80

Argila seca (%)	Massa de água da argila (%)	Resíduo seco (%)	Massa de água do resíduo (%)	LL (%)	TRAÇO - M15 (85% DE ARGILA / 15% DE LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>)						
95	5	41,09	58,91	56							
Argila úmida (g)	100% de argila seca (g)	Massa de água da argila (g)	85% de argila seca (g)	15% de resíduo seco (g)	total de material seco (g)	85% de argila úmida (g)	15% resíduo úmido (g)	Total material umido (g)	Massa de água no material (g)	Água de amassamento (LL/2)+2 = 30%	água à adicionar (g)
6000	5700	300	4845	855	5700	5100	2080,80	7180,80	1480,80	1710,00	229,20

Argila seca (%)	Massa de água da argila (%)	Resíduo seco (%)	Massa de água do resíduo (%)	LL (%)	TRAÇO - M20 (80% DE ARGILA / 20% DE LODO PRIMÁRIO <i>IN NATURA</i>)						
95	5	41,09	58,91	56							
Argila úmida (g)	100% de argila seca (g)	Massa de água da argila (g)	80% de argila seca (g)	20% de resíduo seco (g)	total de material seco (g)	80% de argila úmida (g)	20% resíduo úmido (g)	Total material umido (g)	Massa de água no material (g)	Água de amassamento (LL/2)+2 = 30%	água à adicionar (g)
6000	5700	300	4560	1140	5700	4800	2774,40	7574,40	1874,40	1710,00	-164,40

Apêndice B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey

➤ Porosidade Aparente

Tabela 4.5 – ANOVA 700 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	186,941	3	62,3136	1330,97	2,86627
Resíduo	1,68546	36	0,04682		
Total	188,626	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 700 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	1,38	x	
M-0 e M-10	3,09	x	
M-0 e M-15	5,80	x	
M-5 e M-10	1,71	x	
M-5 e M-15	4,41	x	
M-10 e M-15	2,70	x	
DMS			0,26

Tabela 4.5 – ANOVA 850 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	33,51986	3	11,17329	46,93623	2,866266
Resíduo	8,569891	36	0,238053		
Total	42,08975	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 850 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	1,28	x	
M-0 e M-10	0,96	x	
M-0 e M-15	1,06	x	
M-5 e M-10	0,32		x
M-5 e M-15	2,34	x	
M-10 e M-15	2,03	x	
DMS			0,58

➤ Absorção de Água

Tabela 4.5 – ANOVA 700 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	183,578	3	61,1925	2174,73	2,86627
Resíduo	1,01297	36	0,02814		
Total	184,591	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 700 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	1,14	x	
M-0 e M-10	2,75	x	
M-0 e M-15	5,70	x	
M-5 e M-10	1,61	x	
M-5 e M-15	4,56	x	
M-10 e M-15	2,95	x	
DMS			0,20

Tabela 4.5 – ANOVA 850 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tratamento	45,8985	3	15,2995	121,119	7,21984E-19	2,86627
Resíduo	4,54744	36	0,12632			
Total	50,4459	39				

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 850 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	0,77	x	
M-0 e M-10	0,17		x
M-0 e M-15	2,07	x	
M-5 e M-10	0,61	x	
M-5 e M-15	2,84	x	
M-10 e M-15	2,24	x	
DMS			0,43

➤ Massa Específica Aparente

Tabela 4.5 – ANOVA 700 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	0,07112	3	0,02370	1309,897	2,86627
Resíduo	0,00065	36	0,00001		
Total	0,07177	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 700 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	0,02	x	
M-0 e M-10	0,05	x	
M-0 e M-15	0,11	x	
M-5 e M-10	0,03	x	
M-5 e M-15	0,09	x	
M-10 e M-15	0,06	x	
DMS			0,01

Tabela 4.5 – ANOVA 850 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	0,05031	3	0,01676	613,7632	2,86627
Resíduo	0,00098	36	0,00002		
Total	0,05129	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 850 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	0,00		x
M-0 e M-10	0,03	x	
M-0 e M-15	0,09	x	
M-5 e M-10	0,03	x	
M-5 e M-15	0,09	x	
M-10 e M-15	0,06	x	
DMS			0,01

➤ Retração Linear de Queima

Tabela 4.5 – ANOVA 700 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	0,074	3	0,025	1,221	2,86627
Resíduo	0,723	36	0,020		
Total	0,796472	39			

Tabela 4.5 – ANOVA 850 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	0,1466	3	0,0489	2,22548	2,86627
Resíduo	0,7909	36	0,02197		
Total	0,9376	39			

➤ Resistência à Flexão

Tabela 4.5 – ANOVA 700 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	8,36	3	2,79	17,05	2,87
Resíduo	5,88	36	0,16		
Total	14,24	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 700 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	0,85	x	
M-0 e M-10	1,68	x	
M-0 e M-15	1,66	x	
M-5 e M-10	0,83	x	
M-5 e M-15	0,81	x	
M-10 e M-15	0,02		x
DMS			0,48

Tabela 4.5 – ANOVA 850 °C ($p \leq 0,05$).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	Ftab
Tratamento	25,09	3	8,36	46,14	2,87
Resíduo	6,53	36	0,18		
Total	31,62	39			

Tabela 4.6 – Teste de Tukey 850 °C ($p \leq 0,05$).

Mistura	Diferença entre médias	Diferentes	Iguais
M-0 e M-5	1,05	x	
M-0 e M-10	2,15	x	
M-0 e M-15	1,58	x	
M-5 e M-10	1,10	x	
M-5 e M-15	0,53	x	
M-10 e M-15	0,50		x
DMS			0,51