



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

**INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA EM TIJOLO DE ARGILA COZIDA**

**WANISON ANDRÉ GIL PESSOA JÚNIOR**

**MANAUS/AM**

**2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

**WANISON ANDRÉ GIL PESSOA JÚNIOR**

**INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA EM TIJOLO DE ARGILA COZIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Química, na linha de Pesquisa de Métodos Analíticos e Estudos Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Genilson Pereira Santana

MANAUS/AM

2019

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P475i Pessoa Júnior, Wanison André Gil  
Incorporação de lodo de estação de tratamento de água em tijolo de argila cozida / Wanison André Gil Pessoa Júnior. 2019  
66 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Genilson Pereira de Santana  
Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas.

1. tijolo sustentável. 2. resíduo sólido industrial. 3. cerâmica vermelha. 4. polo oleiro. 5. iranduba. I. Santana, Genilson Pereira de II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

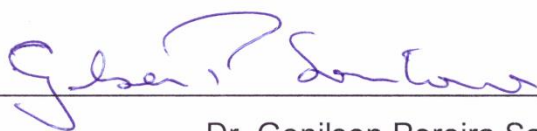
# “Incorporação de Iodo de ETA em tijolo de argila cozida”

**Wanison André Gil Pessoa Júnior**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química, do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Química.

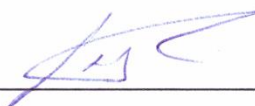
Aprovado, em 24 de abril de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA



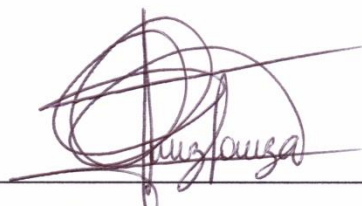
---

Dr. Genilson Pereira Santana  
Universidade Federal do Amazonas  
Orientador



---

Dr. Lizandro Manzato  
Membro Externo/IFAM



---

Dr. Luiz Kleber Carvalho de Souza  
Membro UFAM.

Dedico esta dissertação aos  
meus pais Sônia e Wanison, aos meus  
irmãos Fernando e Israel, às minhas tias, e a  
toda família Gil Pessoa.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tornaram a realização dessa dissertação possível.

Aos meus pais, Wanison e Sônia, irmãos, Fernando e Israel, à minha família e à Ingrity por sempre estarem do meu lado, me colocando nos eixos.

Ao orientador, Professor Dr. Genilson Santana pela orientação, paciência e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores Luiz de Souza e Nilton Campelo pelas contribuições realizadas no Exame de conhecimento.

Ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais IFAM-CMDI, na pessoa do Professor Dr. Lizandro Manzato, por permitir a utilização das instalações do laboratório e equipamento para realização dos ensaios de DRX e absorção de água.

Ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos na pessoa da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Virgínia Giacon e do técnico Diogo Milome – Análises de FRX e TG.

Ao Laboratório de Pavimentação LPAV – UFAM nas pessoas do Prof. Dr. Nilton Campelo, do mestre José Lucinaldo e do técnico Zeca – Preparação dos tijolos e os índices de Atterberg.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais – UEA na pessoa do Dr. José Costa – Análise de resistência à compressão.

À Central de Análises Químicas – CAQ – UEA na pessoa do Prof. Dr. Sérgio Duvoisin – Análise de IV-TF.

Ao CPRM Serviço Geológico do Brasil nas pessoas da responsável técnica Nilda Pantoja, e de Bruno Cativo, Larissa Torrezani Ceel – Granulometria.

Ao Laboratório de Química Analítica Ambiental – INPA nas pessoas do Prof. Dr. Ézio Sargentini e do técnico Marcos Bolson – Análises de toxicidade/lixiviação.

Aos meus amigos que participaram diretamente dessa jornada, sempre me apoiando e dando forças para superar esse obstáculo: Rayanne, Mitsuo e Gleicy.

## RESUMO

O descarte de lodo de estação de tratamento de água quando realizado de maneira inadequada causam contaminação do ambiente e riscos à saúde humana. No presente trabalho é proposta a reutilização do lodo na produção de tijolos de argila cozida como uma das alternativas viáveis e sustentáveis desse passivo ambiental. Para a realização deste estudo foram produzidos tijolos pelo método de extrusão e diferentes porcentagens (0, 5, 10, 20, 30 e 40%) de lodo. As misturas de lodo e argila foram aquecidas de 150 a 750 °C por uma hora e a 900 °C por três horas. Para o estudo da composição química e propriedades físicas da argila, lodo e tijolos produzidos foram utilizadas as seguintes técnicas: fluorescência de raios X, termogravimetria, difração de raios X e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier. A granulometria a laser e os índices de Atterberg (plasticidade) foram usados especificamente para caracterizar a textura da argila e lodo *in natura*, enquanto a resistência à compressão e absorção de água foram determinadas nos tijolos. O risco de contaminação por metais potencialmente tóxicos foi avaliado por lixiviação cujas concentrações foram determinadas por Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente. Os resultados indicaram que os componentes do lodo e argila não reagiram quimicamente entre si na produção dos tijolos. A análise de resistência à compressão mostrou que é viável substituir até 10% o lodo na argila, e atender o valor limite estipulado na NBR 15270-1 para tijolo convencional. Enquanto que os testes de lixiviação sugeriram a imobilização dos metais potencialmente tóxicos no processo de fabricação dos tijolos, corroborando assim com a minimização dos efeitos ambientais negativos gerados pelo descarte impróprio do lodo.

Palavras-chave: Tijolo Sustentável, resíduo sólido industrial, cerâmica vermelha.

## ABSTRACT

Water treatment plant (WTP) sludge when improperly disposed in natural water bodies causes environmental contamination and human health risks. The present work proposes the WTP from Manaus water treatment use in the baked clay bricks production by the extrusion method as a viable sustainable alternative to the environment. The baked clay bricks were produced with addition of the following percentage of dried WTP 0.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, and 40% and dried clay collected in the ceramic factory from Manaus (Iranduba – AM). The mixtures WTP and clay were burned from 150 to 900 °C. To avoid cracking in the firing process, temperatures in the 150, 300, 450, 600 and 750 °C temperatures were stable for one hour. Clay, WTP and bricks were characterized structurally by X-ray fluorescence, thermogravimetry, X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The physical and mechanical from clay and natural WTP was determined by laser granulometry and Attenberg plasticity indices. In bricks were performed resistance to compression and water absorption tests. The toxicity metal toxic level was available using to leached test whose metal concentrations were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The results indicated that the bricks obtained in the firing did not present chemical interactions between the components of the WTP and clay. The compressive strength analysis showed that it is possible to replace the WTP in the clay up to 10%, and to comply with the limit value stipulated in NBR15270/1 for conventional brick. The leaching tests suggested the potentially toxic metal immobilization in the brick burning process, thus corroborating with the negative environmental effect the minimization generated by the improper disposal of the WTP.

Keywords: Sustainable brick, industrial solid waste, red ceramics.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AA	Índice de absorção de água
ARGC	Argila calcinada
ARGN	Argila in natura
CCA	Cinza de casca de arroz
DRX	Difração de raios X
ETA	Estação de tratamento de água
FRX	Fluorescência de raios X
ICP-OES	Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente
IP	Índice de plasticidade
IV-TF	Análise de infravermelho com transformada de Fourier
LETA	Lodo de Estação de tratamento de água
LETAC	LETA calcinado
LETAN	LETA in natura
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEV	Microscopia de varredura eletrônica
RSI	Resíduos sólidos industriais
RV	Resíduo de vidro
SAN	Sais ácidos provenientes de baterias de chumbo
TCLP	Toxicity characteristic leaching procedure
TG/ATD	Análise termogravimétrica

## Lista de Figuras

Figura 1. Influência da quantidade de LETA (%) adicionado na resistência à compressão. ...	29
Figura 2. Influência da temperatura de queima na resistência à compressão.....	30
Figura 3. Localização da olaria onde foi coletada a argila. Fonte: Google Maps .....	37
Figura 4. Fluxograma do processo de produção dos tijolos .....	38
Figura 5. a) Misturador utilizado; b) Misturas do lodo:argila nas proporções 0 a 30% .....	38
Figura 6. DRX das amostras LETAN, LETAC, ARGN e ARGC.....	43
Figura 7. TG/DTG do a) LETAN e b) ARGN. ....	45
Figura 8. Espectros de IV-TF das amostras: ARGN, ARGC, LETAN e LETAC. ....	47
Figura 9. a) DRX e b) espectros de IV-TF dos tijolos obtidos.....	48
Figura 10. Curva granulométrica – LETAN.....	49
Figura 11. Resistência à compressão dos tijolos. ....	51
Figura 12. Índices de absorção (%) dos tijolos.....	53

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Palavras chaves com trabalhos encontrados nas respectivas bases de dados .....	20
Tabela 2. Tijolos obtidos a partir da incorporação de RSI .....	23
Tabela 3. Estudos utilizando LETA na produção de tijolos por queima.....	24
Tabela 4. Composição química dos LETA.....	28
Tabela 5. Valores de TCLP (mg/L) e limites de conc. de algumas Normas .....	31
Tabela 6. Análises de FRX da argila e do lodo, in natura e calcinado.....	42
Tabela 7. Distribuição de tamanho de partículas do ARGN e do LETAN (%) .....	49
Tabela 8. Limites de Atterberg do LETAN e do ARGN.....	50
Tabela 9. Concentração de metal em mg L <sup>-1</sup> lixiviados no ARGN, LETAN, LETAC e nos tijolos .....	54

## Sumário

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	15
<b>CAPÍTULO 1: A viabilidade do lodo de estação de tratamento de água na incorporação em tijolos de argila cozida</b> .....	17
1.1 Introdução .....	18
1.2 Metodologia .....	19
1.3 Incorporação de resíduos sólidos industriais (RSI) na produção de tijolos.....	21
1.4 Incorporação de LETA na produção de tijolos no mundo .....	24
1.4.1 <i>Influência da Composição química dos LETA na resistência à compressão</i> ....	28
1.4.2 <i>Influência da temperatura na análise de resistência à compressão</i> .....	30
1.4.3 <i>Testes de lixiviação</i> .....	31
1.4.4 <i>Estudos sobre LETA realizados no Brasil</i> .....	33
1.5 Conclusões .....	34
<b>CAPÍTULO 2: Investigação da incorporação de lodo de estação de tratamento de água em tijolo de argila cozida de Manaus</b> .....	35
2.1 Introdução .....	36
2.2 Materiais e Métodos.....	37
2.2.1 <i>Coleta do LETA e da Argila</i> .....	37
2.2.2 <i>Preparação dos tijolos</i> .....	38
2.2.3 <i>Caracterização estrutural das amostras</i> .....	39
2.2.3.1 <i>Composição química (FRX)</i> .....	39

2.2.3.2	<i>Análise térmicas (TG/DTG)</i> .....	39
2.2.3.3	<i>Caracterização cristalográfica (DRX)</i> .....	39
2.2.3.4	<i>Análise de Infravermelho (IV-TF)</i> .....	40
2.2.4	<i>Caracterizações físicas e mecânicas dos tijolos</i> .....	40
2.2.4.1	<i>Análise Granulométrica</i> .....	40
2.2.4.2	<i>Índice de Plasticidade</i> .....	40
2.2.4.3	<i>Resistência à compressão</i> .....	41
2.2.4.4	<i>Índice de Absorção de Água (AA)</i> .....	41
2.2.5	<i>Testes de Lixiviação</i> .....	41
2.3	<i>Resultados e Discussão</i> .....	41
2.3.1	<i>Caracterização Estrutural do LETA e da Argila</i> .....	41
2.3.1.1	<i>Composição química (FRX)</i> .....	41
2.3.1.2	<i>Caracterização cristalográfica (DRX)</i> .....	42
2.3.1.3	<i>Análises Térmicas (TG/DTG)</i> .....	44
2.3.1.4	<i>Análises de Infravermelho (IV-TF)</i> .....	46
2.3.2	<i>Caracterização Estrutural dos Tijolos</i> .....	47
2.3.3	<i>Caracterização física e mecânica dos tijolos</i> .....	49
2.3.3.1	<i>Análise Granulométrica</i> .....	49
2.3.3.2	<i>Índice de Plasticidade</i> .....	50
2.3.3.3	<i>Resistência à compressão</i> .....	51
2.3.3.4	<i>Índice de Absorção de Água (AA)</i> .....	52
2.3.4	<i>Testes de Lixiviação</i> .....	53

2.4	Conclusões .....	54
	<b>CAPÍTULO 3: Considerações Finais .....</b>	<b>56</b>
3.1	Considerações Finais .....	57
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

O Lodo de Estação de tratamento de água (LETA) é formado principalmente por resíduos sólidos orgânicos (algas, partículas orgânicas em suspensão, etc) e inorgânicos (argilas, siltes, areias, cálcio, magnésio), além de vírus, bactérias e colóides. De modo geral, os principais elementos encontrados no LETA são o silício, alumínio e ferro, cujos teores dependem diretamente do tipo de minerais que estão distribuídos na bacia da região (RAJASULOCHANA; PREETHY, 2016).

Em síntese a composição do LETA depende da origem da água extraída dos corpos hídricos, dos materiais que são descarregados, de possíveis contaminantes, da atividade antrópica quer seja urbana ou industrial, entre outros (MIROSLAV, 2008). Existem várias formas de descarte do LETA, sendo que as mais utilizadas são incineração, aplicação em solos, lançamento em esgotos ou direto nos rios e aterro sanitário (BABATUNDE; ZHAO, 2007).

Nas últimas décadas, o reuso e reciclagem do LETA tem demandado grande interesse por parte de pesquisadores, seja para minimizar os impactos ambientais que sua eliminação gera ou para agregar valor ao resíduo que tem grande potencial para formar novos materiais. A aplicação do LETA já foi reportado pela literatura na fabricação de diversos produtos, tais como: pigmento, cimento portland, potes cerâmicos, e tijolos geopoliméricos, devido ao alto teor de sílica e alumina em sua composição (LING et al., 2017, 2018; NIMWINYA et al., 2016; RODRÍGUEZ et al., 2010; SUKSIRIPATTANAPONG et al., 2015, KIZINIEVIC et al. 2013). Essas referências motivam reutilizar de uma forma sustentável o LETA, por exemplo, na incorporação em argila para produzir tijolos.

Dentre as vantagens na reutilização do LETA nos tijolos estão: preservação dos recursos naturais, neste caso os depósitos de argila; minimização dos problemas ambientais gerados no processo de queima, pela emissão de gases poluentes na atmosfera e causadores do efeito estufa, CO<sub>2</sub>, CO, vapor de água etc.; importância social e econômica que essa área industrial tem no mercado mundial, seja na geração de empregos ou na construção de edifícios, casas, etc.; e inertização de metais potencialmente tóxicos que possam estar presentes na composição química do lodo.

Sendo assim, nesta dissertação é proposta a substituição parcial da argila pelo LETA produzido no município de Manaus para produzir tijolos cerâmicos de argila cozida. Este busca propor o uso sustentável do LETA produzido por uma das estações de tratamento de

Manaus com geração aproximada de 17 toneladas diárias (SANTOS, 2016). Quanto do ponto de vista financeiro, se estima que o polo ceramista regional composto por cerca de 30 empresas poderia absorver todo o LETA produzido em Manaus na fabricação de tijolos de cerâmica cozida (MOTA et al., 2015).

A seguir serão apresentados os seguintes capítulos da dissertação: no capítulo 1 que é um artigo de revisão abordando os principais lodos reciclados em tijolos, trabalhos que utilizaram o LETA na produção de tijolos e na indústria da cerâmica vermelha, além dos principais processos de preparo, caracterização, ensaios físicos e químicos realizados para se obter um tijolo de boa qualidade. O próximo capítulo 2, tem-se um artigo contendo os ensaios de caracterização estrutural do LETA e da argila, os ensaios físicos e mecânicos dos tijolos, e os ensaios toxicológicos e de lixiviação dos produtos. E por fim, o capítulo 3 apresenta as considerações finais do trabalho.



**CAPÍTULO 1: A viabilidade do lodo de estação de tratamento de água na incorporação em tijolos de argila cozida**

## 1.1 Introdução

As Estações de tratamento de água (ETA) transformam as águas captadas em manancias, que são impróprias para consumo humano, em águas que atendam aos padrões de potabilidade exigidos em legislações ambientais. No Brasil, tais parâmetros como cor, turbidez, pH e cloro, entre outros, são definidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011).

O principal processo de transformação da água bruta em potável é o sistema de tratamento convencional, onde ocorrem várias etapas que tem por objetivo retirar as impurezas e substâncias patogênicas como bactérias e outros microorganismos contaminantes, além de corrigir o sabor e odor da água. As etapas realizadas nesse processo são: coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração e desinfecção para que ocorra enfim o bombeio a cidade.

Esse tratamento nas ETA convencionais gera uma grande quantidade de resíduo sólido na forma de lodo de estação de tratamento de água (LETA), que são retirados dos decantadores/flotadores ou das lavagens dos filtros e produzidos pelo efeito de coagulantes nas etapas de coagulação e floculação, os principais são os sais inorgânicos à base de ferro e alumínio, como o sulfato de alumínio e o cloreto de férrico (CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; EWASIS et al., 2017).

Com o intuito de reutilizar o LETA de forma sustentável e agregar valor a este resíduo, várias aplicações já foram relatadas. Algumas dessas estão descritas a seguir: como coagulante no tratamento de água e na remoção de fósforo, tanto para lodos ricos em alumínio, quanto para policloreto de alumínio e ferro que são recuperados por via ácida (AHMAD et al., 2016; KEELEY et al., 2016; NAIR; AHAMMED, 2015; YANG et al., 2014).

O LETA rico em óxido de ferro e alumínio vem sendo usado como adsorvente na remoção de metais potencialmente tóxicos como cobre e chumbo (CASTALDI et al., 2015) e na remoção de fósforo (Li, 2018). Por outro lado, o lodo rico em alumínio é utilizado no arado de solos, devido a sua capacidade de adsorção de fósforo e outros ânions (OKUDA et al., 2014) e na desidratação de lodos de estação de tratamento de esgotos (LI et al., 2016).

LETA contendo óxido de ferro e ácido húmico tem a capacidade de adsorver íons de cádmio na água, em valores de pH variando de 6,0 a 8,0 (SISWOYO; MIHARA; TANAKA, 2014) e aqueles ricos em ferro e manganês conseguem imobilizar arsênio em solos contaminados (LEWIŃSKA et al., 2018). LETA também pode ser utilizado como possível

substituto na fabricação de tijolos de argila cozida, devido à sua composição química parecida com a da argila. O aproveitamento do LETA na indústria de construção é bastante promissor do ponto de vista ambiental e econômico, já que além de se obter um produto de qualidade, o ciclo de vida de um rejeito, desmerecido economicamente, aumenta, contribuindo para a preservação do ambiente. Ademais, a exploração das jazidas naturais de argila diminuem.

Mediante o exposto, esta revisão tem por objetivo expor um panorama geral da importância da reutilização de resíduos sólidos industriais (RSI) na fabricação de tijolos de argila cozida, assim como abranger estudos que investigaram a incorporação do LETA em tijolos de argila cozida, desde os tipos de preparos, ensaios físicos e mecânicos, até os modos de caracterização estrutural dos tijolos obtidos e a toxicidade e lixiviação dos LETA, tanto no Brasil quanto no mundo.

## 1.2 Metodologia

O levantamento bibliográfico foi realizado a partir de buscas nas seguintes bases de dados: Periódico Capes, Google Acadêmico, Science Direct e Scopus, entre os anos 2005 e 2018, com as seguintes palavras-chave: lodo de estação de tratamento de água, lodo de ETA, tijolo, tijolo de argila cozida, *water treatment plant*, *water treatment plant sludge*, *wastewater treatment plant*, *drinking water treatment plant sludge*, *brick*, *clay brick*, *fired clay brick* (Tabela 1).

A partir desses, encontraram-se três artigos de revisão que tratavam sobre o tema da incorporação de RSI em tijolos, divulgados entre os anos 2000 e 2015. Assim, este trabalho se concentrou em artigos publicados entre 2016 e 2018 para RSI. Já para o tema: incorporação do LETA nos tijolos, foram utilizadas literaturas científicas no período de 2005 a 2018. Vale ressaltar que a reciclagem do LETA vem sendo amplamente estudada por pesquisadores de todo o mundo, como mostra a Tabela 1.

Entretanto, as pesquisas científicas voltadas para a investigação do LETA como matriz em tijolos de argila cozida ainda são escassas. Quando utilizados os filtros: 1) artigos publicados na língua inglesa, em revistas com mínimo de qualis Capes B5 (química), ou 2) artigos que não possuem qualis em química, mas possuem qualis B1 em engenharia I ou ciências ambientais (casos das revistas *Water Science and Technology* e *Advances in environmental research*) foram encontrados apenas nove artigos científicos publicados no mundo.

Tabela 1. Palavras chaves com trabalhos encontrados nas respectivas bases de dados

Palavra-Chave	Google Acadêmico	Periódico Capes	Science Direct	Scopus
Lodo de estação de tratamento de água	14.900	-	15	17
“Lodo de estação de tratamento de água”	536	-	0	12
Lodo de ETA	5.800	-	19	9
“Lodo de ETA”	531	-	3	4
Tijolo	16.100	-	71	11
“Tijolo”	16.000	-	71	11
Tijolo de argila cozida	1.710	-	0	0
“Tijolo de argila cozida”	2	-	0	0
Water treatment plant	265.000	610.284	353.182	71.857
“Water treatment plant”	24.400	17.024	12.242	17.678
Water treatment plant sludge	158.000	56.701	46.833	9.637
“Water treatment plant sludge”	1.260	157	84	185
Wastewater treatment plant	138.000	108.250	76.821	31.228
“Wastewater treatment plant”	170.000	38.606	33.821	16.515
Drinking water treatment plant sludge	25.600	8.948	8.932	363
“Drinking water treatment plant sludge”	53	10	13	6
Clay bricks	23.700	11.059	10.400	2.916
“Clay bricks”	14.400	2.837	2.719	1.505
Fired clay bricks	16.800	2.946	4.233	648
“Fired clay bricks”	2.090	506	483	258

Para pesquisas realizadas no Brasil, abriu-se exceção para revistas publicadas na língua portuguesa (Cerâmica, Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Revista Matéria - UFRJ), cujo o tema pesquisado foi exposto em quatro artigos.

### **1.3 Incorporação de resíduos sólidos industriais (RSI) na produção de tijolos**

O tijolo tem papel fundamental na indústria de materiais de construção e é utilizado há muito tempo, devido a sua resistência, durabilidade e confiabilidade. Estima-se que são utilizados no mundo 4.000 milhões de toneladas de argila para produzir cerca de 1.500 bilhões desse material por ano, processadas por mais 100.000 fornos de alta escala com chaminés fixas (VELASCO et al., 2016). Outro destaque é o baixo custo, uma peça de tijolo comum de 200 x 200 x 200 mm custa US\$ 0,15.

Entretanto, a fabricação de tijolos pelo processo de queima provoca dois problemas ambientais. O primeiro é o esgotamento dos depósitos da argila (matéria-prima) em função da alta produção de telhas, blocos, potes ornamentais, utensílios de casa, produtos da indústria de cerâmica branca, e vermelha à base de argila. Quanto a isso, o Brasil apresenta um quadro preocupante, Monteiro e Vieira (2014) afirmam em seu artigo de revisão, que os 3,7 bilhões de toneladas de argila presentes nos depósitos oficiais do país acabariam em pouco mais de 20 anos, se o consumo atual de 180 milhões de toneladas se mantiver. Por outro lado, a indústria de tijolos de argila cozida é um setor tradicional na economia do Brasil, seja na geração de empregos ou na construção de edifícios.

O segundo é a emissão de gases poluentes na atmosfera como o vapor de água, oxigênio, dióxido de enxofre, amônia, cloro, óxido nítrico, cianeto de hidrogênio, flúor, monóxido de carbono e dióxido de carbono (TOLEDO et al., 2004). Dentre os quais, encontram-se alguns dos principais gases responsáveis pelos efeito estufa e o aumento do buraco na camada de ozônio. Uma alternativa para tornar o processo de fabricação de tijolos sustentável é a incorporação de RSI, entre eles os lodos industriais, formados nas estações de tratamento de efluentes de fábricas ou indústrias.

Ukwatta et al. (2018) investigou a emissão de cinco gases poluentes diferentes (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO, CO e HCN) durante o processo de queima (1.050 °C) dos tijolos de argila e de argila incorporados com 25% de resíduos de duas estações de tratamento de esgotos diferentes na cidade de Melbourne, Austrália. O impacto da toxicidade humana apresentou valores de redução entre 40 e 50%, isso se deve ao fato de que a incorporação desse resíduo nos tijolos de argila evitam a lixiviação de metais potencialmente tóxicos presentes em sua composição.

Dito isso, é de suma importância que os recursos naturais, como a argila, sejam substituídos, mesmo que parcialmente por lodos ou outros RSI. Primeiro por agregar valor a um resíduo, que se eliminado erroneamente pode causar vários danos ambientais, dando a ele

um destino nobre e segundo por fornecer uma solução viável a escassez dos depósitos de argila naturais.

A incorporação de vários tipos de RSI nos tijolos convencionais tem sido estudados, com intuito de relatar a importância ambiental, técnica e econômica destes resíduos na fabricação de tijolos. Zhang (2013) divide sua pesquisa em três categorias principais, baseadas no método de produção, são elas: tijolos de argila cozida (processo de queima), cimentação e geopolimerização. Dando ênfase aos tijolos de argila cozida, foram relatados 24 tipos de RSI, porém nenhum estudo que trata sobre o LETA foi citado.

Outro estudo, realizado por Boltakova et al. (2017), na Rússia, abrangendo a utilização de RSI inorgânicos entre os anos de 2.000 e 2.015 classificou os tijolos cerâmicos em sete grupos, de acordo com o resíduo utilizado: indústria de mineração; enriquecimento de minério, metalúrgicos, lodos, cinzas, caldeiras e resíduos de fabricação de produtos químicos. O autor afirma que nesse período foram defendidas 34 dissertações e geradas 29 patentes que tratam sobre esse assunto e serviram como referência para a pesquisa. Mais uma vez, nenhuma citação que trata do reaproveitamento do LETA foi feita.

A Tabela 2 mostra algumas pesquisas realizadas no triênio 2016-2018 com diversos RSI provenientes de lodos de estação de tratamento de esgoto, mineração, indústria cerâmica, agricultura, galvanoplastia, produção de curtume etc. Estão representados na tabela pesquisas realizadas na Europa, Ásia, América do Sul, Oceania e África, tornando evidente que a procura por novos materiais considerados sustentáveis e de baixo custo tem mobilizado pesquisadores de diversos países do mundo.

Entre os RSI estudados, foi possível incorporar de 1 a 5% de lodo galvânico sem alterar as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos. (PÉREZ-VILLAREJO et al., 2015). Arsenovic et al (2012) conseguiram resultados satisfatórios de resistência mecânica e características de lixiviação nos tijolos produzidos a partir de 6% de lodo industrial.

A produção de tijolos também foi investigada e bem-sucedida para resíduos da indústria de vidro, bagaço de cana de açúcar, cinza de casca de arroz (CCA), lodo de estação de tratamento de esgoto, lodo da indústria de extração de óleo (oliva), lodo da indústria têxtil etc (CUSIDÓ; CREMADES, 2012; ELICHE-QUESADA; CUNHA; CORPAS-IGLESIAS, 2015; HEREK et al., 2012; KAZMI et al., 2016a, 2016b, 2018).

Quanto a metodologia empregada na fabricação de tijolos, Velasco et al. (2014) descrevem os principais mecanismos, são eles: por prensagem, por extrusão, a mais comum nas indústrias, e por moldagem. Além disso, concordam ao afirmar que os principais ensaios

utilizados para testar a eficiência do novo material são absorção de água, a densidade, e ensaio de compressão.

Tabela 2. Tijolos obtidos a partir da incorporação de RSI

Referência	Resíduo (% adicionada na matriz de argila)	Local
Coletti et al. (2016)	Lodo de indústria cerâmica	Itália
Mohajerani; Kadir; Larobina (2016)	Pontas de cigarro (2,5 a 10%)	Austrália
Phonphuak; Kanyakam; Chindaprasirt (2016)	Resíduo da indústria de vidro (0 a 10%)	Tailândia
Eliche-Quesada e Leite-Costa (2016)	Cinzas - Combustão do bagaço da azeitona (0 a 50%)	Espanha
Sutcu et al. (2016)	Resíduo do moinho de azeitona (0 a 10%)	Turquia
Taha et al. (2016)	Resíduo da mineração da calamina (0 a 40%)	Marrocos
Ukwatta et al. (2016)	Lodo estação de tratamento de esgoto (5 a 50%)	Austrália
Vieira et al. (2016)	Lodo da indústria do papel (10%)	Brasil
Zhang et al. (2016)	Sedimentos de lago, cinzas e lodo de estação de tratamento de esgoto	China
Abbas et al. (2017); Leiva et al. (2016)	Cinzas volantes - produção de carvão (0 a 25%); (0 a 80%)	Paquistão; Espanha
Adazabra; Viruthagiri; Shanmugam (2017)	Resíduos da fabricação da manteiga de carité	Índia
Goel e Kalamdhad (2017)	Dejetos sólidos urbanos (5 a 20%)	Índia
Juel; Mizan; Ahmed (2017)	Lodo de curtume (10 a 40%)	Bangladesh
Coletti et al. (2018)	Resíduo de traquito – pedreiras (5 a 15%)	Itália
Zhang et al. (2018)	Lodo galvânico (0 a 10%)	China

A norma brasileira NBR 15270-1 (ABNT, 2017) que define os padrões de qualidade para esses ensaios estabelece como requisitos mínimos para resistência no ensaio de compressão e absorção de água para a fabricação de tijolos de vedação em parede vazada com furos horizontais em 1,5 MPa e de 8 a 25%, respectivamente, e 4 MPa e de 8 a 25% para tijolos maciços ou perfurados verticalmente.

## 1.4 Incorporação de LETA na produção de tijolos no mundo

A Tabela 3 reúne nove estudos, realizados entre 2005 e 2017, que reutilizaram o LETA na substituição parcial da argila no processo convencional de produção de tijolo de argila cozida (queima). Não foram levados em consideração estudos que fabricavam tijolos por cimentação e geopolimerização. Os três métodos para fabricar os moldes dos tijolos, a prensagem, a extrusão e a moldagem foram relatados por três autores, cada.

Tabela 3. Estudos utilizando LETA na produção de tijolos por queima

Ref.	Material (% m/m)	Tam. (mm)	Cond. de secagem/queima	Testes realizados
Huang; Pan; Liu (2005)	LETA (0 a 30%) e Resíduo de escavação de solo (70 a 100%)	60 x 30 x 20 Prensagem	Secos em estufa a 105 °C por 24 h e calcinados de 800 a 1.100 °C, com tempos de 1 a 6 h, em um forno elétrico	AA, compressão, densidade PF, encolhimento e FRX
Ramadan; Fouad; Hassanain (2008)	LETA (50 a 80%)	50 x 50 x 50 Extrusão	Seco por 6 dias em uma caixa fechada e 6 dias a luz do sol e calcinados a 950, 1.000, 1.050 e 1.100 °C	AA, compressão e redução da resistência depois de 7 dias dentro da água, PF, eflorescência, taxa de sucção inicial e FRX
Chiang et al. (2009)	LETA (75 a 100%) e CCA (0 a 25%)	20 x 50 (cilindro) Prensagem	Seco em estufa por 105 °C, e calcinados em forno elétrico em três pontos: 105 °C/2h; 600°C/2h e o ponto final entre 800 e 1.100 °C por 3 h, com rampa de aquecimento de 5 °C/min	AA, compressão, densidade, porosidade, MEV, FRX, quantificação de metais potencialmente tóxicos (ICP), Lixiviação e DRX
Elangovan e Subramanian (2011)	LETA (0 a 50%)	40 x 40 x 40 Moldagem	Seco a T.A. por 7 dias e em estufa por 1h entre 100 e 120 °C e calcinados por 2 h a temperaturas entre 700 e 950 °C	AA, compressão, PF, eflorescência, quantificação de metais potencialmente tóxicos
Hegazy; Fouad; Hassanain (2012)	LETA, sílica de fumo e CCA(25: 50: 25%) (50:25: 25%) e (25: 25: 50%)	50 x 50 x 20 Extrusão	Seco por 6 dias em uma caixa fechada e 6 dias a luz do sol e calcinados a 900, 1.000, 1.100 e 1.200 °C	AA, compressão, eflorescência, FRX e DRX
Victoria (2013)	LETA (0 a 20%)	70 x 70 x 70 Moldagem	Seco em sacolas plásticas por 7 dias e 7 dias ao ar natural, calcinadas por 3 h de 850 a 1.050 °C	AA, compressão, densidade, PF, encolhimento, lixiviação,eflorescência, MEV, FRX e DRX
Benlalla et al. (2015)	LETA (0 a 30%)	80 x 30 x 20 Moldagem	Seco a luz do sol por 72 h e na estufa a 105 °C/ 48h e calcinados em um forno elétrico a 800, 900 e 1.000 °C por 2 h, rampa de aquecimento 5 °C/min	AA, compressão, densidade, porosidade, encolhimento linear, MEV, FRX, e DRX



Krishnan;				
Jewaratnam;	LETA (20 a 60%) e	100 x 250 x	Seco a luz do sol por 5- 6 dias e	AA, compressão,
Jewaratnam	argila (laterita)	80 Extrusão	calcinados a 950, 1.000 e	eflorescência e lixiviação
(2017)			1.050°C	
Tantawy e		23 x 13	Seco ao ar por 24 h e na estufa a	
Mohamed	LETA (15 a 60%)	(cilindro)	105 °C por 24 h e calcinado em	AA, compressão, densidade,
(2017)		Prensagem	forno mufla variando a	IV-TF, MEV, TG e DRX
			temperatura de 700 a 1.000 °C	

Notas: m/m - porcentagem massa/massa; PF – Perda ao fogo; AA – Absorção de água; CCA- Cinza de casca de arroz

Todos os trabalhos usaram a secagem dos tijolos crus antes do processo de queima para evitar que as moléculas de água, presentes no interior da amostra, ao migrarem para a superfícies provocassem rachaduras no produto, devido as altas temperaturas. Outros fatores externos que afetam esse mecanismo de transporte, além da temperatura, são: umidade, pressão, velocidade da rampa de aquecimento e a natureza da superfície do material (YATAGANBABA; KURTBAŞ, 2016).

Quanto aos testes realizados, todos os autores apresentam em seu estudo os principais testes para avaliação da eficiência dos tijolos: absorção de água, resistência à compressão. Outros ensaios importantes foram a densidade, o encolhimento na queima e a eflorescência. Três trabalhos quantificaram o teor de alguns metais potencialmente tóxicos, entre eles Zn, Pb, Cu, Cr e Cd, e estudaram a toxicidade destes elementos por meio do teste de lixiviação (CHIANG et al., 2009; KRISHNAN; JEWARATNAM; JEWARATNAM, 2017; VICTORIA, 2013)

Huang; Pan e Liu (2005) estudaram a possibilidade de agregar o LETA, produzido em uma ETA de Taiwan, na produção de tijolos, utilizando como matriz o resíduo de escavação de solo, nas porcentagens em massa 0, 15 e 30% de lodo. Baseado nos testes realizados, o bloco com 15% de lodo, calcinado a 1.050 °C por três horas pode ser usado na fabricação de tijolos de 1° grau, pois os resultados estão dentro do limite especificados pela normal local, maiores que 14,2 MPa para compressão, menores que 15% para absorção de água e entre 1,8 e 2 g cm<sup>-3</sup> para densidade compressão.

O LETA (75 a 100%) produzido em Taiwan também foi usado como matriz, incorporando CCA (0 a 25%) para formar tijolos em temperaturas que variaram entre 800 e 1.100 °C. A adição de CCA aumentou a porosidade das amostras, e as temperaturas mais altas aumentaram a resistência à compressão. As amostras com 85% de lodo calcinadas a 1.100 °C apresentaram cerca de 15% de absorção de água e valores bem maiores que 14,2 MPa, em concordância com os padrões da norma taiwanesa (CHIANG et al., 2009).

Ramadan; Fouad; Hassanain (2008) investigaram o uso de LETA do Egito para substituição parcial da argila na fabricação de tijolos, foram estudadas quatro proporções de lodo (% m/m - massa/massa): 50, 60, 70 e 80% e quatro temperaturas de calcinação: 950, 1.000, 1.050 e 1.100 °C. As análises físicas como absorção de água, compressão, perda ao fogo e eflorescência foram realizadas de acordo com as especificações determinadas pelas normas egípcias e britânicas. Os resultados obtidos mostraram que o ponto ótimo encontrado foi o de 50% de lodo, a resistência à compressão desta amostra variou entre 6,86 e 11,76 MPa para as temperaturas de 950 e 1.100 °C, respectivamente. A partir de 1.000 °C, o tijolo de 50% apresentou valores superiores aos blocos comerciais estudados (2,25 e 7,74 MPa) e aos da Norma britânica de 7,35 MPa requerida para tijolos tipo A, que requerem alta resistência.

O teor máximo de incorporação de LETA (Índia) na argila sem comprometer a resistência dos tijolos foi estabelecido em 20% (m/m). As amostras foram produzidas por moldagem, utilizando a mistura de LETA (0 a 50%) e argila (50 a 100%) e as calcinando em temperaturas que variaram de 700 a 950 °C por duas horas. Os testes para verificar a eficiência dos tijolos produzidos foram compressão, absorção de água, perda ao fogo e eflorescência. Amostras contendo 5% m/m satisfizeram o limite mínimo de compressão expressa na Norma indiana para tijolos classe 5 (Indian Standard, 1976). Porém, a amostra de tijolo 20% calcinada a 850 °C foi considerada a mais adequada para a construção de paredes com suporte de carga, apresentando resistência de 1,79 Mpa (ELANGO VAN; SUBRAMANIAN, 2011).

A substituição completa da argila por uma mistura de LETA (utilizada como matriz) com sílica de fumo (SF) e CCA também foi avaliada.. Três proporções (% m/m) foram estudadas: Lodo ETA : SF: CCA (1) 25: 50: 25; (2) 50: 25: 25 e (3) 25: 25: 50, cada série foi queimada a 900, 1.000, 1.100 e 1.200 °C. As propriedades mecânicas foram realizadas de acordo com as especificações da Norma egípcia e comparadas com uma amostra controle de argila. Os resultados de compressão do LETA: SF:CCA variaram de 5,03 a 8,12 MPa e foram superiores ao encontrado pela amostra controle 5,69 a 6,80 MPa. O ponto ótimo de operação encontrado para produção de tijolos foi o da série (2), tornando-o assim um promissor competidor dos tijolos comerciais acessíveis no mercado egípcio. (HEGAZY; FOUAD; HASSANAIN, 2012)

Victoria (2013) reutilizou o LETA (Nigéria) na produção de tijolos de argila cozida. Cinco diferentes proporções de argila e lodo (% m/m) foram utilizadas, 0, 5, 10, 15 e 20% , à temperaturas de calcinação que variaram entre 850 e 1.050 °C. Os resultados das propriedade físicas e mecânicas mostraram que temperatura de queima e proporção do lodo são dois

fatores determinantes na qualidade do tijolo, os valores de compressão e densidade diminuíram e a absorção de água cresceu a medida que a proporção de lodo foi aumentada. O maior valor de compressão foi o da amostra com 5% de lodo a 1.050 °C, 11,87 MPa, com 14,07% de absorção de água, apresentando potencial para o uso em tijolos. Verificou-se ainda que a aparência (coloração) dos blocos foi melhorada com o aumento do lodo adicionado.

O LETA produzido no Marrocos foi usado na fabricação de tijolos em diferentes proporções (5 a 30% m/m) e temperaturas de queima (800, 900 e 1.000°C) a fim de estimar os efeitos da incorporação desse resíduo na microestrutura e nas propriedades da argila. As propriedades tecnológicas foram determinadas por meio de técnicas como Difração de raios X (DRX) e Microestrutura de varredura eletrônica (MEV), além das análises físicas e mecânicas como compressão, densidade, encolhimento linear e absorção de água. Os resultados indicaram que (1) as amostras testadas são densas e apresentam resistência mecânica elevada, sem deformações e defeitos, características imprescindíveis nos tijolos, (2) o ponto ótimo recomendado foi de 20% de lodo, com 30% de teor ótimo de umidade e temperaturas de queima entre 900 e 930 °C, e (3) os tijolos produzidos podem ser aplicados em produtos de terracota e na formulação de materiais com alta porosidade (BENLALLA et al., 2015).

Krishnan; Jewaratnam; Jewaratnam (2017) compararam as propriedades físicas e mecânicas de tijolos comerciais, a partir de testes como compressão, absorção de água, densidade, eflorescência, perda ao fogo etc, com os produzidos a partir da reciclagem do LETA misturados com laterita (tipo de argila encontrado na região). As proporções de lodo utilizados variaram entre 20 a 60%, e as temperaturas utilizadas foram 950, 1.000 e 1.050 °C. Os resultados alcançados indicaram que os tijolos com 40 a 60% de lodo foram os pontos ótimos e obtiveram valores superiores aos tijolos comerciais vendidos na Malásia.

Um estudo das propriedades físicas e cerâmicas dos tijolos produzidos de argila, retirada de um depósito no Egito, foi realizado substituindo-a parcialmente por LETA (15 a 60%), queimados a temperaturas entre 700 e 1.000 °C. Análises de DRX, Infravermelho por transformada de Fourier (IV-TF), MEV, Análise termogravimétrica (TG) e Fluorescência de raios X (FRX) foram empregadas para determinar a composição química das amostras. A caracterização física foi realizada por compressão, absorção de água e densidade. Os resultados demonstraram que (1) a resistência à compressão aumentou até a temperatura de 850 °C, e em temperaturas maiores, houve um decréscimo, associada a formação de fases amorfas que facilitam a vitrificação e contribuem para a melhora da densificação até a temperatura de 850 °C, e (2) o ponto ótimo para formação do tijolo variando entre 15 e 30% de LETA (TANTAWY; MOHAMED, 2017).

#### 1.4.1 Influência da Composição química dos LETA na resistência à compressão

A Tabela 4 apresenta a composição química dos lodos citados na Tabela 3. A composição dos lodos varia bastante entre os locais onde foram coletados, devido às características únicas das bacias hidrográficas usadas como fonte no tratamento de água como tipo de solo, tipo de floresta, gradientes, além de outros fatores como clima (intensidade e distribuição de chuvas), ocupação do solo, e o tipo de coagulante usado no tratamento. Porém, apesar dessa variabilidade, os constituintes majoritários de praticamente todos os LETA são o  $\text{SiO}_2$ , o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (RAMIREZ et al., 2017).

Tabela 4. Composição química dos LETA.

Referência	Local	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	LOI	Razão Molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Huang; Pan e Liu (2005)	Taiwan	52,75	20,15	6,75	0,3	-	3,69	0,872	13,45	4,44
Ramadan; Fouad e Hassanain (2008)	Egito	43,12	15,97	5,26	5,56	0,85	0,26	0,52	26,79	4,58
Chiang et al. (2009)	Taiwan	53,36	15,28	21,01	1,2	-	5,41	-	-	5,92
Elangovan e Subramaniam (2011)	Índia	12	-	-	-	-	0,18	-	38	-
Hegazy; Fouad e Hassanain (2012)	Egito	43,12	15,97	5,26	5,56	0,85	0,26	0,52	26,79	4,58
Victoria (2013)	Nigéria	29,6	28,03	8,05	1,48	0,38	0,84	-	22,6	1,79
Benlalla et al. (2015)	Marrocos	27,12	62,66	1,16	1,25	0,37	0,83	0,24	5,11	0,73
Krishnan; Jewaratnam; Jewaratnam (2017)	Malásia	58,4	17,44	5,465	0,074	0,308	1,013	0,04	-	5,68
Tantawy e Mohamed (2017)	Egito	59,7	10,52	4,38	6,01	2,2	1,16	1,53	11,1	9,63

A Figura 1 mostra a influência da adição de LETA na substituição parcial da argila na preparação de tijolos quando comparados aos ensaios de resistência à compressão. É possível observar que os autores são quase unânimes em relacionar o decréscimo da resistência à

compressão com o acréscimo de LETA na argila, inferindo assim que a quantidade de LETA incorporado é fator determinante na diminuição do desempenho de força dos tijolos.

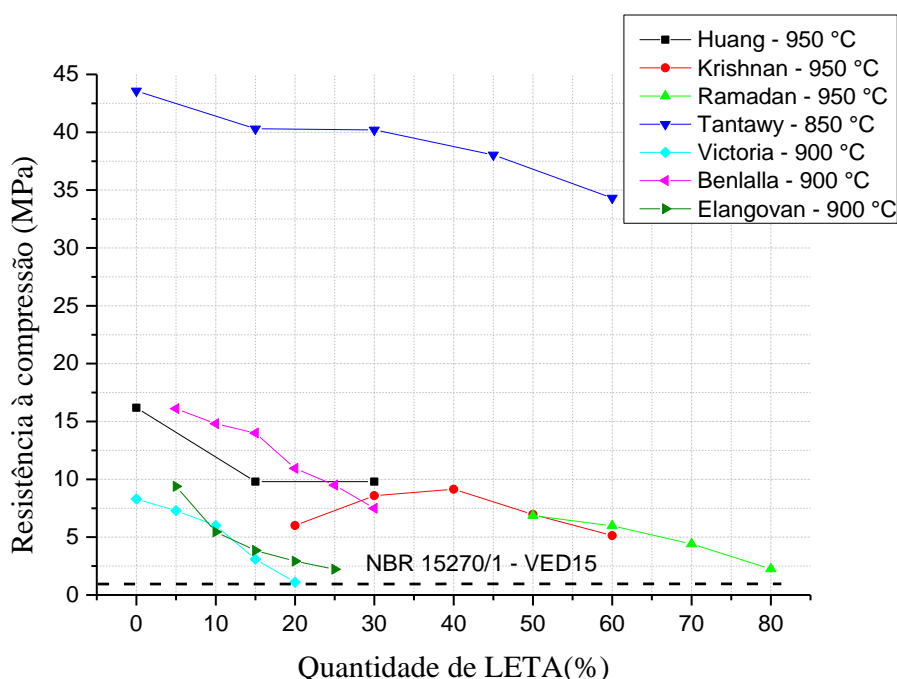


Figura 1. Influência da quantidade de LETA (%) adicionado na resistência à compressão.

Os tijolos produzidos por Victoria (2013) foram os que apresentaram os menores valores de resistência. Isso pode estar relacionado com a composição química tanto do LETA quanto da argila utilizada. Estima-se que com a adição de 20% de LETA, o tijolo produzido apresentou uma redução de mais de 85% no valor de resistência quando comparado ao tijolo sem LETA. A autora atribui este efeito à pequena porcentagem de sílica na composição do LETA (29,6%) quando comparado aos valores da argila (60%).

Por outro lado, Tantawy e Mohamed (2017) obtiveram os melhores resultados de resistência com valores ultrapassando a marca de 30 Mpa (20% LETA). No entanto, quando comparado a argila houve redução de aproximadamente 20% de resistência. Mesmo assim, esses valores atendem com louvor a norma brasileira NBR 15270-1 que estabelece 1,5 MPa para tijolos convencionais.

Ainda a partir da Figura 1, é possível observar que os pontos ótimos de análise mais altos foram das amostras Ramadan - 950 °C, Krishnan - 950 °C e Tantawy - 850 °C, para valores de incorporação de LETA de 50, 40 e 30%, respectivamente. Esse fato está relacionado com o alto teor de sílica em sua composição. Oportunamente, esses foram os três lodos que apresentaram maior razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  dentre os artigos consultados, 4,58; 5,68 e 9,63, ou seja, um teor de alumina baixo quando comparado ao teor de sílica.

### 1.4.2 Influência da temperatura na análise de resistência à compressão

Os autores consultados nessa revisão são unânimes em apontar a resistência à compressão extremamente dependente da temperatura de queima dos tijolos. É possível notar na Figura 2 que em praticamente todas as amostras, o valor de resistência aumenta a medida que a temperatura de queima também cresce.

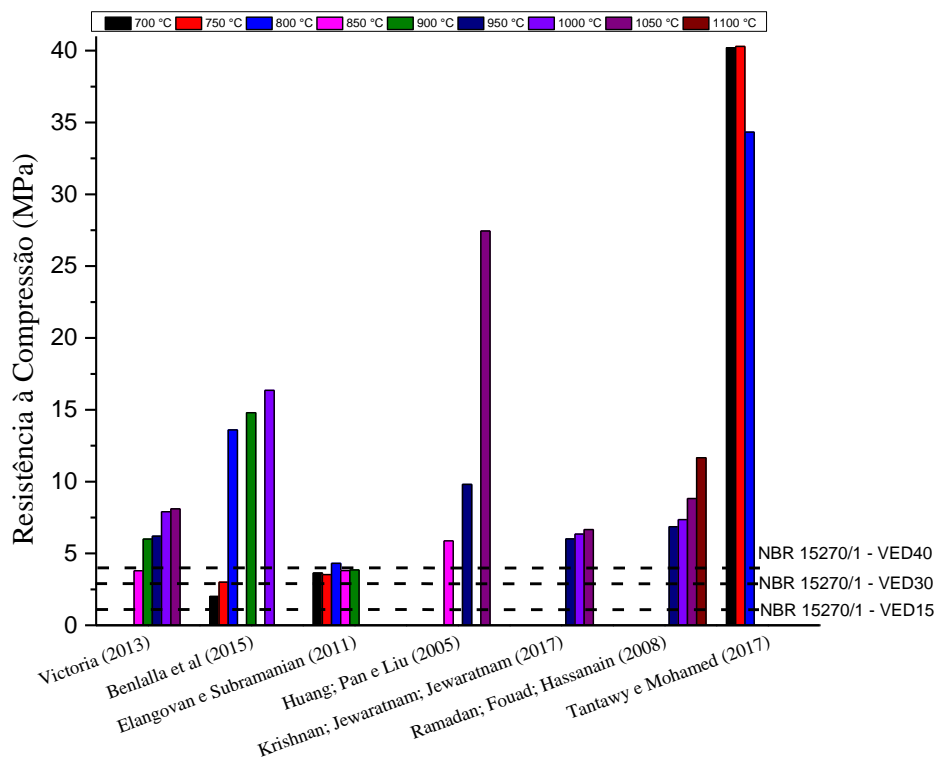


Figura 2. Influência da temperatura de queima na resistência à compressão.

O maior aumento do valor de resistência aconteceu no tijolo produzido por Huang; Pan e Liu (2015). Quando calcinado a 950 °C, um aumento de 40% ocorreu em relação ao mesmo material com queima em 850 °C, e em torno de 65% quando queimado em 1050 °C. Victoria (2013) confere isso ao término do processo de cristalização e efetiva sinterização das amostras em altas temperaturas.

Por outro lado, Elangovan e Subramanian (2011) afirmam que o aumento de temperatura não teve efeito significativo no valor ótimo de resistência à compressão, 5,85% de aumento entre 700 e 900 °C. Devido a isso, temperaturas altas de sinterização podem ser evitados, alcançando assim uma economia de energia.

Extraordinariamente, a resistência à compressão do tijolo produzido por Tantawy e Mohamed (2017) aumentou até a temperatura de queima de 850 °C, e diminuiu acima disso.

O autor associou esse fato a formação de fases amorfas, o que facilita a vitrificação e contribui para o aumento da densificação dos tijolos até 850 °C e depois diminui quando calcinado a 1000 °C, afetando negativamente as propriedades mecânicas do tijolo.

### 1.4.3 Testes de lixiviação

A natureza tóxica, agregada à facilidade de dissociação e a alta solubilidade dos metais potencialmente tóxicos, tornam a quantificação destes elementos e o teste de lixiviação nos resíduos extremamente importantes, já que além de contaminar solos, rios, lençóis freáticos etc, prejudicam a saúde humana se acumulando nos rins, fígado, pulmão, cabelo e pele. Doenças como hipertensão arterial, câncer, distúrbios mentais e perdas de funções cerebrais estão associadas a exposição destes metais (SZYCZEWSKI et al., 2009).

A Tabela 5 mostra os resultados dos testes de lixiviação dos tijolos produzidos com o LETA realizado por três diferentes autores citados na Tabela 3 e o valor mínimo permitido destes elementos, nas respectivas normas de seus países, além de limites definidos na norma brasileira (ABNT, 10004).

Tabela 5. Valores de TCLP (mg/L) e limites de conc. de algumas Normas

Conc. TCLP (mg/L) tijolos	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	Hg	Fe	Mn	Ni	Al
Chiang et al. (2009)*	<0,005	<0,009	<0,005	<0,008	<0,006	-	-	-	-	-
Victoria (2013)**	0,12	<0,001	0,047	0,003	0,049	<0,001	0,685	0,045	0,077	5,18
Krishnan; Jewaratnam; Jewaratnam (2017)***	<1,0	-	<1,0	-	-	-	-	-	<1,0	<1,0
Limites de Conc. TCLP (mg/L)										
Taiwan EPA*	25,0	5,0	-	1,0	5,0	-	-	-	-	-
USEPA**	-	5,0	-	1,0	5,0	0,2	-	-	-	-
NESREA**	-	5,0	-	1,0	5,0	0,2	-	-	-	-
EQA Malásia***	1,0	0,5	1,0	-	-	-	5,0	1,0	1,0	-
NBR 10,004 (2004)										
Brasil	-	1,0	-	0,5	5,0	0,1	-	-	-	-
Resolução 357/2005										
CONAMA Brasil	0,18	0,01	0,009	0,001	0,05	0,0002	0,3	0,1	0,025	0,1
Portaria n° 2.914/2011										
Brasil	5	0,01	2,0	0,005	0,05	0,001	0,3	0,1	0,07	0,2

Chiang et al. (2009) seguiram o procedimento de lixiviação e características tóxicas (TCLP – *toxicity characteristic leaching procedure*) requerido pela Administração de proteção ambiental de Taiwan (Taiwan EPA – *Environmental Protection Administration of Taiwan*) na norma NIEA R201.10T (Taiwan EPA, 2003) para avaliar os seguintes metais potencialmente tóxicos Zn, Pb, Cu, Cd e Cr, todos eles apresentaram concentrações abaixo do limite máximos determinados pela norma.

Victoria (2013) realizou os testes de TCLP seguindo a metodologia descrita pela Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA - *US Environmental Protection Agency*) para Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Fe, Mn, Ni e Al. (USEPA, 1988). Os índices de lixiviação para Pb, Cd e Cr foram menores que o limites máximos aceitáveis impostos tanto pela USEPA quanto pela Agência de execução de normas e regulamentos da Nigéria (NESREA- *Nigerian Environmental Standards and Regulations Enforcement Agency*).

Krishnan; Jewaratnam; Jewaratnam (2017) usaram os métodos SW846 1,311 (USEPA, 1992), SW846 6,010C (USEPA, 2007) e SW846 7,473 (USEPA, 1996) estabelecidos pela USEPA para realizar o testes de TCLP. A detecção dos metais potencialmente tóxicos Cu, Al, Pb, Zn, Ni foi realizada por Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e obtiveram níveis aceitáveis quando comparados com os limites de lixiviação da Norma Malasiana estabelecida pelo Ato de qualidade ambiental 1974 (EQA 1974 – *Environmental Quality Act*) (EQA, 1974).

Ainda de acordo com a Tabela 5, nota-se que os limites impostos de lixiviação pelas agências de Taiwan EPA, USEPA e NESREA apresentam os mesmos valores de concentrações. Quando se compara a norma brasileira que trata de resíduos sólidos NBR 10004 (ABNT, 2004) com os outros, percebe-se um rigor maior quando se trata dos metais Cd e Hg, apresentando a metade dos limites determinados pelas outras normas.

Para o Pb, a norma mais rigorosa é a EQA Malásia com  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$  e as mais brandas apresentam valores dez vezes maiores. A norma malaia também limita os valores de Cu, Fe, Mn e Ni, o que não acontece com as outras. Porém, ela não traz em seu rol os valores máximos dos metais Cd, Cr e Hg, presentes nas demais.

As Resolução 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005) e a Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde estabelecem as condições e padrões de potabilidade para águas doces e para substâncias químicas que representam risco à saúde, respectivamente. Nota-se que os valores máximos permitidos são bem menores quando comparados aos limites impostos pelas normas que tratam de lixiviação dos resíduos sólidos.



A Resolução 357/2005 é rígida ao estabelecer limites para os metais Zn, Cu, Cd, Hg, Ni e Al menores do que a Portaria n° 2.914/2011. Chama a atenção o valor máximo permitido para os metais Zn e Cu, 27 e 200 vezes menor, respectivamente. São esses parâmetros de qualidade da água que determinam a proibição do descarte do LETA em bacias hidrográficas.

#### **1.4.4 Estudos sobre LETA realizados no Brasil**

O uso de LETA em materiais de cerâmicas vermelhas vem sendo estudados por alguns pesquisadores brasileiros. Mymrin et al. (2017) estudaram o reuso do LETA, produzido no estado do Paraná, em uma mistura com resíduo da indústria de vidro (RV) e sais ácidos provenientes de baterias de chumbo (SAN) na substituição da argila. A mistura com lodo: RV: SAN 50: 25: 25 apresentou o maior valor de resistência a flexão, 22,6 MPa quando calcinado a 950 °C.

Monteiro et al. (2008) incorporaram o LETA (0 a 10%), produzido na cidade de Goytacazes (RJ), em argila, e os queimou nas temperaturas de 700, 900 e 1.100 °C. As análises físicas realizadas foram densidade, retração linear, absorção de água, ruptura à flexão, e as caracterizações estruturais foram TG, DRX e FRX. Os resultados demonstraram a diminuição da resistência mecânica e o aumento da absorção de água a medida que o lodo era adicionado, limitando a incorporação de LETA na produção de blocos cerâmicos em menos de 10%.

A utilização do LETA, produzido no Distrito Federal, com porcentagens de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 21,12; 35,96 e 10,32, respectivamente, foi relatada na produção de blocos cerâmicos, junto a resíduos de cinza de lenha e de CCA (DE MEDEIROS et al., 2010). O reuso de LETA, produzidos em São Paulo e em Londrina (PR), incorporados a argila também foram estudados para fabricação de cerâmicas vermelhas e pavimentos rodoviários, respectivamente (COELHO et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2011).

Quanto a produção de tijolos de argila cozida, Teixeira et al. (2006) investigaram a incorporação de 0 a 30% m/m de LETA, produzido em Presidente Prudente (SP) na argila, queimado em temperaturas de 900, 950, 1.000 e 1.050°C. Os tijolos foram produzidos por prensagem e foram utilizados dois tipos de lodo, de acordo com o coagulante usado na época da coleta, ETA-Fe (cloreto férrico) e ETA-Al (sulfato de alumínio). Além dos testes mecânicos: absorção de água, porosidade, massa específica aparente, resistência à compressão e ruptura à flexão, foram realizadas caracterizações microestruturais em técnicas como DRX, TG e a quantificação de metais potencialmente tóxicos por espectrometria de absorção atômica. Os resultados obtidos mostraram que (1) a incorporação de altos teores de lodo

pioram as propriedades físicas e tecnológicas do material cerâmico, e (2) os pontos ótimos de produção de tijolos foram 10% ETA-Al e 20% ETA-Fe, queimados a 950 °C.

Tartari et al. (2011a, 2011b) fizeram tijolos do tipo 6 furos usando LETA (4 a 16%) e os queimou a temperaturas de 950 e 1.050 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e duas horas de sinterização. A partir dos testes de contração linear, absorção de água, porosidade aparente e ruptura a flexão foi observado que amostras com percentual superiores a 8% de lodo apresentaram trincas e deformidades lineares em sua estrutura. Entretanto, a produção de tijolos argila-lodo por extrusão pode ser realizada nas condições de umidade reais do lodo na saída da centrífuga até 8% m/m, visto que além da redução da exploração da argila (recurso natural), há ainda a contribuição para a economia na adição de água no processo de produção de tijolos de argila cozida.

## 1.5 Conclusões

Nesta revisão é possível observar a viabilidade da substituição parcial tanto dos RSI quanto de LETA na argila para produção de tijolos sob o ponto de vista econômico, agregando valor a um resíduo de custo baixo e ajudando a minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado destes resíduos. Também nota-se que o LETA apresenta composições químicas diferentes entre si, dependentes dos tipos de solo da região, do coagulante utilizado no tratamento de água, fonte, tipo de floresta. E que a composição química interfere diretamente na quantidade de LETA que se pode incorporar à argila que variaram de 10 a 50%.

A quantidade de LETA adicionada e a temperatura de queima são dois fatores cuja análise de resistência à compressão é extremamente dependente. Nota-se que na maioria dos trabalhos o aumento da temperatura de queima é proporcional ao aumento da força de resistência e inversamente proporcional à adição de LETA, devido ao aumento de absorção de água.

Por fim, a calcinação do LETA incorporado à argila para produzir tijolos é benéfica ambientalmente, já que a partir das análises de toxicidade e lixiviação as concentrações dos metais potencialmente tóxicos presentes no LETA diminuem drasticamente ou mesmo são inertizados. Vale lembrar que todos os tijolos apresentaram níveis de concentração bem abaixo dos limites recomendados pelas resoluções correspondentes.

**CAPÍTULO 2: Investigação da incorporação de lodo de estação de tratamento de água em tijolo de argila cozida de Manaus**

## 2.1 Introdução

Nos últimos anos, há vários estudos com intuito de reciclar e incorporar resíduos sólidos industriais (RSI) na argila para formar novos produtos cerâmicos como telhas, artefatos como vasos, potes, blocos, vidro e principalmente tijolos, tanto no Brasil quanto no exterior. Entre as justificativas para a utilização dos RSI estão o potencial valor econômico, já que a utilização de um resíduo diminuiria o custo final do produto. Wolff; Schwab e Conceição (2015) estimam que a incorporação de LETA no tijolo gera uma economia de 318 dólares por tonelada de argila. Além de minimizar os passivos ambientais existentes como a futura escassez dos depósitos naturais de argila, as escavações que afetam a paisagem do município, e os gases poluentes.

Quando se trata a nível regional, o problema ambiental está diretamente relacionado com a questão econômica. Monteiro e Vieira (2014) afirmam que em 20 anos as jazidas de argila no Brasil estariam esgotadas nesse ritmo de consumo. Se esta previsão se confirmar, afetaria gravemente a economia do município de Iranduba, já que o Polo oleiro gera cerca de 2.000 empregos diretos e indiretos no município, abrangendo entre prestadores de serviços e fornecedores, cerca de 6.000 trabalhadores e é responsável por 90% dos produtos cerâmicos consumidos na cidade de Manaus, o que representa em termos quantitativos 35 toneladas de tijolos por mês (ACERAM, 2012; MOTA et al, 2015).

Outro ponto de destaque no cenário da região é a destinação incorreta do LETA produzido no município de Manaus. Estima-se que atualmente na cidade se despeja em torno de 17 toneladas, diariamente, de LETA diretamente no igarapé do Bombeamento, sem tratamento prévio (SANTOS, 2016). Estes resíduos são ainda despejados ao igarapé do Franco e Mindú, antes de serem lançados a margem esquerda do Rio Negro (BATALHA, 2012).

A literatura reporta apenas o trabalho de Santos; Melo Filho; Manzato (2018a, 2018b) cujos resultados de resistência à compressão de 57 e 79 MPa, com 28 dias de cura. Entretanto, os custos elevados da produção de geopolímeros ainda não tornam possível sua fabricação em escala industrial. O que motiva um estudo sobre a produção de tijolos a partir de LETA, devido à sua composição química ser similar à da argila, apresentando como componentes majoritários a alumina e a sílica. Além disso, a utilização do LETA produzido na cidade de Manaus na fabricação dos tijolos ajudaria a resolver dois problemas ambientais: a destinação incorreta desse passivo ambiental e a escassez dos depósitos de argila

Mediante o exposto, este estudo propõe investigar a incorporação do LETA produzido na cidade de Manaus em tijolos de argila cozida, com intuito de ampliar o ciclo de vida desse passivo ambiental e ao mesmo tempo diminuir os custos da indústria oleira relacionados à fabricação de tijolos convencionais.

## 2.2 Materiais e Métodos

A metodologia consistiu basicamente em cinco etapas: i) Coleta do LETA e da argila; ii) Preparação dos tijolos e iii) Caracterização estrutural e iv) Caracterização física e mecânica e v) Ensaio de lixiviação.

### 2.2.1 Coleta do LETA e da Argila

O LETA usado nesse trabalho foi produzido por uma ETA localizada no Complexo de produção da ponta do Ismael – Manaus e cedido pelo Programa Águas para Manaus. As águas brutas utilizadas por essa estação foram captadas basicamente do Rio Negro e o coagulante utilizado no tratamento foi o sulfato de alumínio.

Enquanto que a argila foi coletada diretamente do estoque de material de uma olaria, localizada na rodovia AM 070 (S 3°09'08.5" e W 60°04'45.4"), em Iranduba (Figura 3). A coleta foi realizada na entrada do caixão alimentador para que uma representação macro da mistura adotada nos tijolos comerciais fosse obtida



Figura 3. Localização da olaria onde foi coletada a argila. Fonte: Google Maps

### 2.2.2 Preparação dos tijolos

A Figura 4 mostra o fluxograma do processo realizado para a produção dos tijolos. O LETA e a Argila foram secos em estufa por 24 horas a 105 °C e moídos por 2 h no moinho de bolas, separadamente.

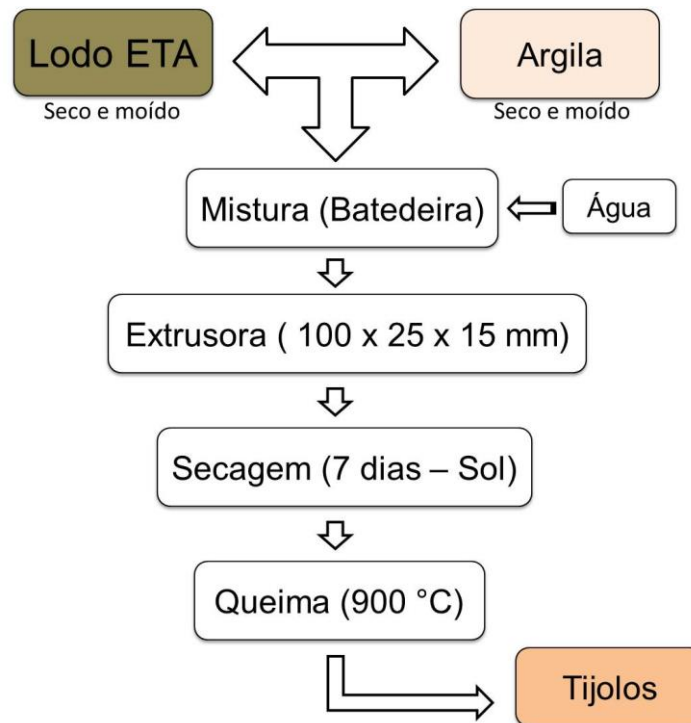


Figura 4. Fluxograma do processo de produção dos tijolos

Logo depois, os dois materiais foram misturados junto com 30% m/m de água em uma bateadeira, conforme a Figura 5a, nas proporções (m/m) de LETA de 0, 5, 10, 20, 30 e 40%. As amostras depois de misturadas na bateadeira podem ser visualizadas na Figura 5b.

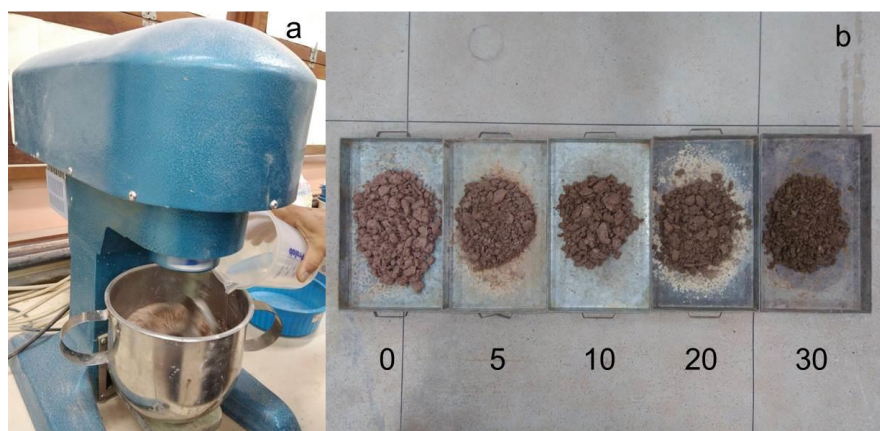


Figura 5. a) Misturador utilizado; b) Misturas do lodo:argila nas proporções 0 a 30%

Foi possível notar uma coloração escura para amostras com teor maior de LETA. Notou-se ainda uma textura mais plástica para amostras com menos LETA. Não foi possível

moldar o corpo de prova para tijolos com 40% de LETA, provavelmente determinado pelo baixo índice de plasticidade do lodo, estabelecendo assim o limite que foi possível moldar os tijolos em 30%.

Os blocos maciços de 100 mm de comprimento, 25 mm de largura e 15 mm de espessura foram compactados em uma extrusora, secos por sete dias à luz do sol e queimados em forno tipo mufla, modelo GP Científica, a 900 °C por três horas para produção dos tijolos. Para evitar as rachaduras no processo de queima, deixaram-se estáveis as temperaturas nos patamares de 150, 300, 450, 600 e 750 °C, durante uma hora.

A temperatura de calcinação em 900 °C foi estabelecida com o intuito de seguir os procedimentos adotados pelas várias indústrias cerâmicas presentes no Polo oleiro de Iranduba, que utilizam essa temperatura de queima rotineiramente.<sup>1</sup>

Os tijolos foram nomeados de acordo com a porcentagem de lodo em sua composição, tijolo 5 (5% de lodo), tijolo 10 (10% de lodo), e assim sucessivamente até chegar no tijolo 40 (40% de lodo). Ademais o lodo e a argila *in natura* foram nomeados de LETAN e ARGN, enquanto o lodo e a argila calcinados a 900 °C, LETAC e ARGC, respectivamente.

### **2.2.3 Caracterização estrutural das amostras**

#### **2.2.3.1 Composição química (FRX)**

A composição química das amostras foi realizada por FRX por energia dispersiva. O espectrômetro utilizado nessa pesquisa foi o EPSILON 3XL, marca PANalytical, capaz de analisar elementos da Tabela periódica entre o sódio (Na) e o Urânio (U).

#### **2.2.3.2 Análise térmicas (TG/DTG)**

A estabilidade térmica foi determinada por TG/DTG. As curvas termogravimétricas foram obtidas em um analisador térmico simultâneo TG/DTG, marca TA Instrument, modelo SDT Q600, em atmosfera de nitrogênio 5.0, fluxo de 30 mL min<sup>-1</sup>, razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, em cadinho de  $\alpha$ -alumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) contendo aproximadamente 10 mg de amostra até 1.000 °C.

#### **2.2.3.3 Caracterização cristalográfica (DRX)**

A caracterização cristalográfica do LETA e da argila *in natura*, bem como suas misturas (proporções), seco e calcinado foi determinada por DRX, em um aparelho Bruker D2 Phaser, fonte de Cu ( $k\alpha$ ), 30 Kv, 10 mA, fenda de 0,6 mm e ângulo de difração variando de 5

---

<sup>1</sup> Comunicação Pessoal de José Lucinaldo Ferreira de Souza, em Janeiro de 2018.

a 70° (0,02o 2θ min<sup>-1</sup>, constante de tempo 1 s), utilizando o método de pó. Utilizou-se o programa X'Pert HighScore Plus para identificação das fases minerais.

#### **2.2.3.4 *Análise de Infravermelho (IV-TF)***

As análises de IV-TF foram realizadas em um espectrofotômetro IRAffinity-1S acoplado a um acessório de refletância total atenuada (ATR) (Shimadzu) na faixa de 4000 a 500 cm<sup>-1</sup>, a temperatura ambiente.

#### **2.2.4 *Caracterizações físicas e mecânicas dos tijolos***

##### **2.2.4.1 *Análise Granulométrica***

O tamanho e a distribuição das partículas do LETAN foram obtidos pelo método de espalhamento de laser utilizando-se um granulômetro Malvem, modelo Mastersizer 2000. O dispersante utilizado na análise foi água, e a terminologia para solos definida pela norma brasileira NBR 6502 (ABNT, 1995) utilizada para classificar o tamanho de partículas do LETAN.

##### **2.2.4.2 *Índice de Plasticidade***

As características de plasticidade do LETAN e do ARGN foram determinadas através do método de Casagrande, e são constituídas pelos índices de Atterberg: limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP).

O LL é o teor de umidade que representa o limite entre o estado líquido e o plástico, enquanto o LP representa o limite entre o estado plástico e o estado semi-sólido. Já a plasticidade é definida como uma propriedade que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume (CAPUTO, 1996).

O LL foi determinado seguindo a norma NBR 6459 (ABNT, 2016), e utilizando o aparelho e o cinzel para solos argilosos de Casagrande. Para a determinação do LP e cálculo do IP se usou a norma NBR 7180 (ABNT, 2016). O IP foi calculado de acordo com a equação 1, onde IP = Índice de plasticidade, LL = Limite de liquidez e LP = Limite de plasticidade.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$



### 2.2.4.3 *Resistência à compressão*

A determinação da resistência à compressão dos tijolos foi realizada de acordo com a norma brasileira NBR 15270-2 (ABNT, 2017) em uma máquina universal INSTRON 5984, com razão da tensão aplicada de 0,05 Mpa/s.

### 2.2.4.4 *Índice de Absorção de Água (AA)*

O índice de absorção de água (AA) foi calculado de acordo com a Norma brasileira NBR 15270-2 (ABNT, 2017), e determinado pela equação (2):

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde,  $m_u$  e  $m_s$  representam a massa úmida, deixada submersa em água por 24 h, e a massa seca de cada corpo de prova, respectivamente, expressas em gramas.

### 2.2.5 *Testes de Lixiviação*

A lixiviação dos metais tóxicos foi realizada baseando-se na norma ASTM D 6234-98. As amostras LETAN, LETAC, ARGN, ARGC e os tijolos foram submersos em água deionizada na proporção de 1:20 (amostra: água), utilizou-se ácido nítrico para que o pH fosse ajustado entre 4,5 e 5,0. O tempo de extração foi de 18 horas a uma rotação aproximada de 30 rpm. O extrato foi filtrado através de Micropelícula de 0,45  $\mu$ m, e as concentrações dos metais Zn, Pb, Cu, Cd, Cr, Ag, Fe, Mn, Ni e Al determinados por ICP- OES, Thermo Icap 7000S.

## 2.3 **Resultados e Discussão**

### 2.3.1 *Caracterização Estrutural do LETA e da Argila*

#### 2.3.1.1 *Composição química (FRX)*

A Tabela 6 apresenta os resultados das análises de FRX dos lodos e argilas in natura e calcinados. Nota-se que a sílica, a alumina e o óxido férrico representam mais de 95% da composição das argilas e mais de 80% nos lodos. Também se observou que a calcinação não alterou drasticamente a composição química das amostras.

Estes dados atendem aos requisitos mínimos para um tijolo de argila cozida de boa qualidade, cuja soma destes compostos deve ser maior que 75%. Porém, estes requisitos pedem ainda que a combinação dos compostos de sódio e potássio seja menor que 2%. Valores maiores que esse limite afetam a plasticidade, a resistência e durabilidade do produto. Por essa razão, produzir tijolos exclusivamente a partir do LETA se torna inviável, já que o

teor de  $K_2O$  é maior do que o previsto. Entretanto, uma substituição parcial do lodo na argila é viável devido à composição semelhante entre as duas. (MURMU; PATEL, 2018; WEBB, 1994).

Tabela 6. Análises de FRX da argila e do lodo, in natura e calcinado.

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Outros	Razão Molar SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ARGN	64,40	26,42	6,16	-	-	1,43	1,59	4,14
ARGC	65,01	26,71	5,32	-	-	1,32	1,64	4,13
LETAN	55,42	26,32	10,06	0,67	1,62	3,41	2,5	3,57
LETAC	56,24	27,33	9,40	0,65	1,70	3,31	1,37	3,49

Ainda de acordo com a Tabela 6, se nota que não houve mudanças significativas nos três principais constituintes majoritários, a sílica aumentou 0,61% para a argila quando calcinado e 0,82% para o LETA. Também houve aumento no teor de alumina na calcinação, 0,29% e 1,01% para a argila e LETA, respectivamente. Em contrapartida, os teores de óxido férrico apresentaram redução de 0,84% na calcinação da argila e 0,66% na do LETA.

### 2.3.1.2 Caracterização cristalográfica (DRX)

A análise de DRX do LETA, Figura 6, mostra que as fases cristalinas identificadas no LETAN foram o SiO<sub>2</sub> (JCPDS 01-077-1060), o rutilo (JCPDS 01-088-1174), a caulinita (JCPDS 01-075-0938), gibsita (JCPDS 01-077-1000) e a muscovita 2M<sub>1</sub> (JCPDS 01-076-0668) enquanto que no LETAC foi verificada a presença de quartzo  $\alpha$  (JCPDS 01-089-8935), além do surgimento de uma fase de hematita (JCPDS 01-089-8103), e da muscovita desidroxilada (JCPDS 00-046-0741).

As fases cristalinas identificadas na ARGN foram o quartzo (JCPDS 01-085-1054), a caulinita (JCPDS 00-029-1488), a goetita (01-081-0464) e a muscovita 2M<sub>1</sub> (JCPDS 01-076-0668), já na ARGC, o quartzo (JCPDS 01-085-1054) não apresentou alterações em sua estrutura, porém houve o surgimento de uma fase de hematita (JCPDS 01-089-8103), a ocorrência da desidroxilação da mica muscovita 2M<sub>1</sub> em muscovita desidroxilada (JCPDS 00-046-0741) e a desidratação da goetita.

A caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) presente no DRX do LETAN é formada por uma folha de unidades tetraédricas de silício, [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>, unidas a uma folha de unidades octaédricas de alumínio [Al(OH)<sub>6</sub>]<sup>9-</sup> através de ligações de hidrogênio entre os oxigênios comuns das camadas, OH-O (SPERINCK et al., 2011). Ao analisar o difratograma do LETAC, o

desaparecimento das reflexões características desse mineral ( $2\theta$  12.53 e entre 19 a 25°) é visível. Isto se deve ao fato de que quando calcinada a temperaturas entre 450 e 600 °C, as ligações químicas das moléculas de água são quebradas e a caulinita se transforma em um produto instável e amorfo chamado metacaulinita ( $A_{12}Si_2O_7$ ), difícil de ser identificado na análise de DRX (ZEMENOVÁ et al., 2014).

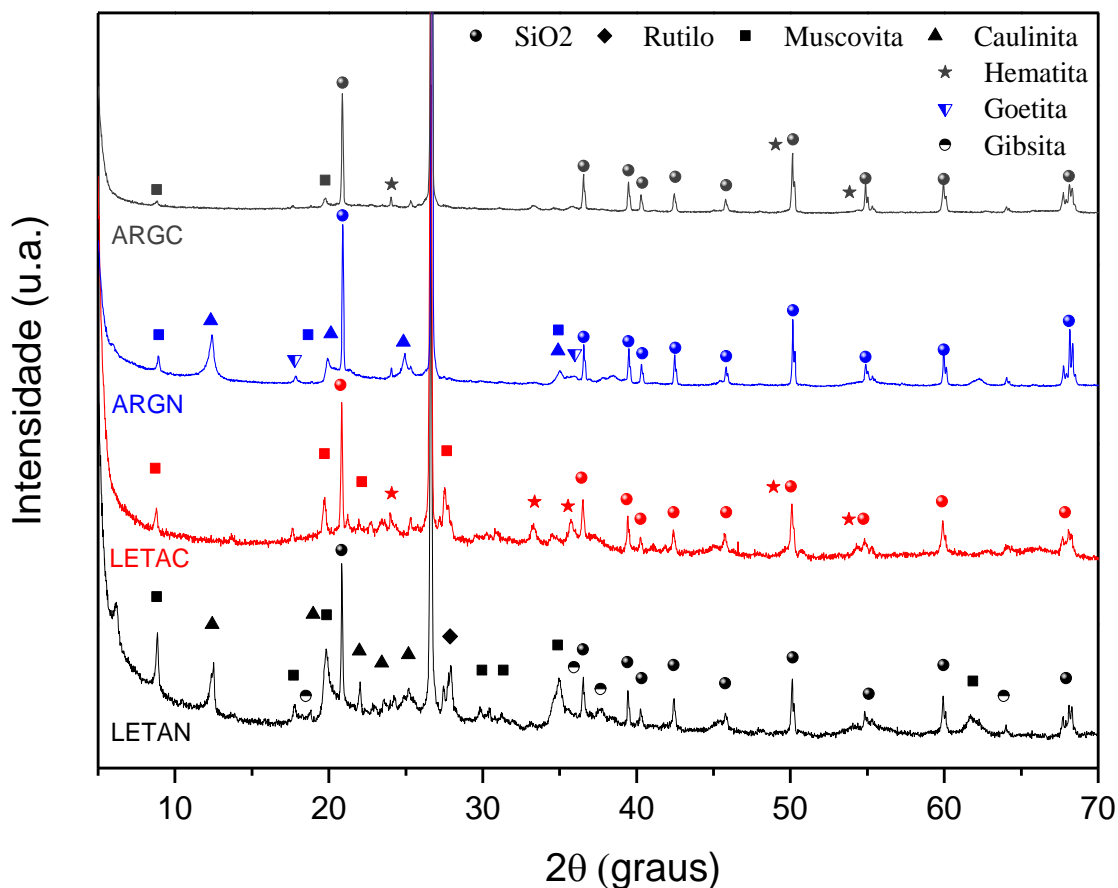


Figura 6. DRX das amostras LETAN, LETAC, ARGN e ARGC.

Outro mineral presente no LETAN, a mica muscovita  $2M_1$ , de fórmula estrutural  $K_2(Al_{3.74}Fe_{0.26})(SiAl_2O_{20})(OH)_4$ , ao ser calcinada transformou-se em muscovita desidroxilada ( $KAl_3SiO_{11}$ ). Segundo Keppler (1990), a principal diferença estrutural entre as duas está na coordenação do Al na camada octaédrica. Enquanto que na muscovita o Al é coordenado octaédricamente por O e OH, a muscovita desidroxilada apresenta o Al, rodeado por cinco átomos de O na configuração bipiramidal trigonal.

Ainda de acordo com a Figura 6, é possível notar o desaparecimento da fase de rutilo ( $2\theta$  27.76°) e gibsita  $Al(OH)_3$  ( $2\theta$  18, 37 e 63°) e o surgimento da hematita ( $2\theta$  23, 33 e 35°) no LETAC. Além disso, quando se compara os difratogramas do lodo e da argila, observa-se uma cristalinidade maior na argila, provavelmente causado pela maior proporção de quartzo

( $2\theta$  20, 26 e 50°, alta cristalinidade) em sua estrutura. Este fato é corroborado pelas reflexões bem mais definidas, tanto da caulinita quanto da muscovita nos difratogramas do lodo.

### **2.3.1.3** *Analises Térmicas (TG/DTG)*

A partir das análises de TG e DTG (Figura 7a) do LETAN, observaram-se quatro picos. O primeiro, antes de 100 °C está relacionado à evaporação da água absorvida, o segundo em ~ 368 °C à perda de matéria orgânica e à desidroxilação parcial da gibsita (REDAOUI et al., 2017), e os dois últimos em 480 e 738 °C associados a desidroxilação da caulinita e da muscovita, respectivamente.

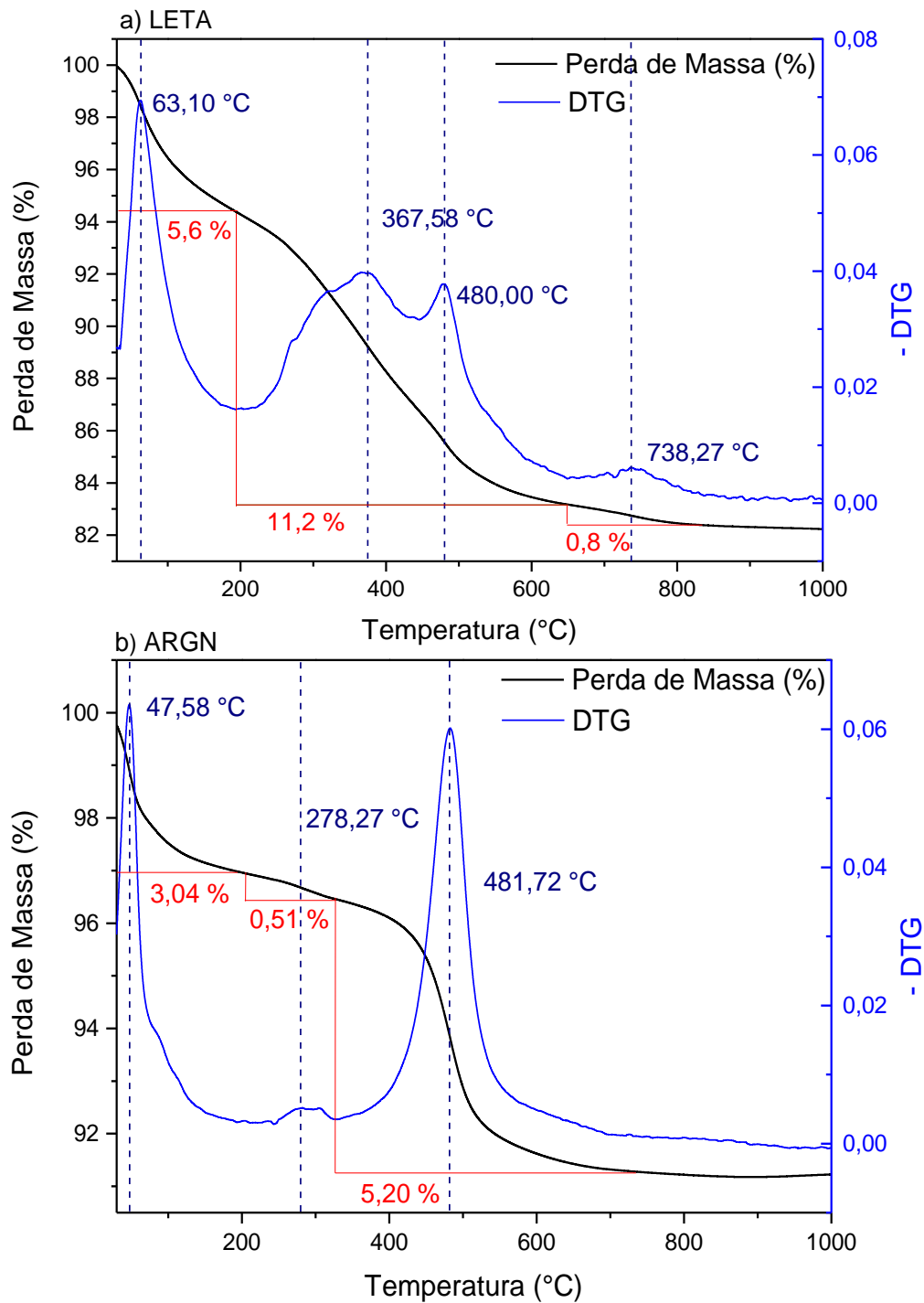
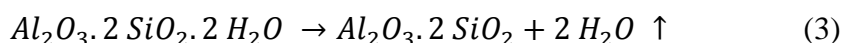


Figura 7. TG/DTG do a) LETAN e b) ARGN.

Devido à desidratação e desidroxilação durante o processo de calcinação, há três estágios significantes de perda de massa, 5,6% entre 20 e 193 °C, relacionado à perda de moléculas de água absorvidas pela estrutura (OLIVEIRA et al., 2018); 11,2% entre 200 e 650 °C, referente a decomposição de matéria orgânica de baixo peso molecular, desidroxilação da gibsitá e a formação da metacaulinita (eq. 3) que nada mais é do que um material amorfo que

mantém as placas hexagonais da caulinita original e transforma o alumínio octaédrico em alumínio tetraédrico (GENG; SUN, 2018; ILIĆ; MITROVIĆ; MILIČIĆ, 2010; ONCHOKE; FRANCLEMONT; WEATHERFORD, 2018). E por fim 0,8% de 650 a 850 °C, associado à desidroxilação da muscovita (GRIDI-BENNADJI et al., 2008; GUGGENHEIM; CHANG; GROSS, 1987).



Por outro lado, a argila possui apenas três picos como pode ser visto na Figura 7b: 1) 48° C, cuja reação de desidratação ocorre entre 20 e 185 °C, com uma perda de massa de 3,04%; 2) 278 °C, relacionado à desidroxilação da goetita em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e perda de massa de 0,51% (BODIAN et al., 2018; EL AFIFI; ATTALLAH; BORAI, 2016; NDZANA et al., 2018), e 3) 482 °C, atribuído a desidroxilação da caulinita, entre 330 e 750°C com perda de massa de 5,20%. Estes valores corroboram os dados encontrados nas análises de DRX, cujo maior teor de caulinita e muscovita se faz presente no lodo.

#### 2.3.1.4 *Análises de Infravermelho (IV-TF)*

O espectro no IV-TF da ARGN (Figura 8) apresenta bandas características da caulinita em 3.695, 3.654, 3.644 cm<sup>-1</sup> associadas às vibrações de estiramento dos grupos hidroxilas, localizadas na superfície interna que formam as ligações entre as camadas e em 3.620 e 935 cm<sup>-1</sup> atribuídas aos grupos OH<sup>-</sup> no interior das folhas octaédricas.

De acordo com Parker (1969) os espectros de IV-TF da caulinita apresentam duas fortes bandas de absorção na região de estiramento do OH<sup>-</sup> com máximas em 3.695-3.700 cm<sup>-1</sup> e 3.620-3.625 cm<sup>-1</sup>, outros autores indicam duas bandas na região 1.000-900 cm<sup>-1</sup> associada à vibração de flexão e quatro bandas na região 3.700-3.600 cm<sup>-1</sup> associadas ao estiramento de grupos OH<sup>-</sup> (LORENTZ et al., 2018; MADEJOVA, 2003). Já o espectro do LETAN mostra a presença de matéria orgânica na região entre 1.300 e 2.000 cm<sup>-1</sup> e 3.500 e 3.900 cm<sup>-1</sup>, o que apoia o resultado encontrado na análise térmica.

As bandas de absorção que são exibidas nos espectros tanto da ARGN e quanto do LETAN são as seguintes: 3.420 e 1.640 cm<sup>-1</sup>, atribuídas às vibrações de estiramento OH<sup>-</sup> das camadas de água internas, e das moléculas de água localizados no exterior da superfície das partículas de argila (CARDOSO et al., 2018). Em 910 cm<sup>-1</sup> correspondente à vibração de flexão de Al-OH, em 794, 750 (ARGN) e 543 cm<sup>-1</sup> às bandas de vibração da ligação Si-O-Al, e em 995, 1.025 e 1.162 cm<sup>-1</sup> à vibração de estiramento de Si-O (CHENG et al., 2010).

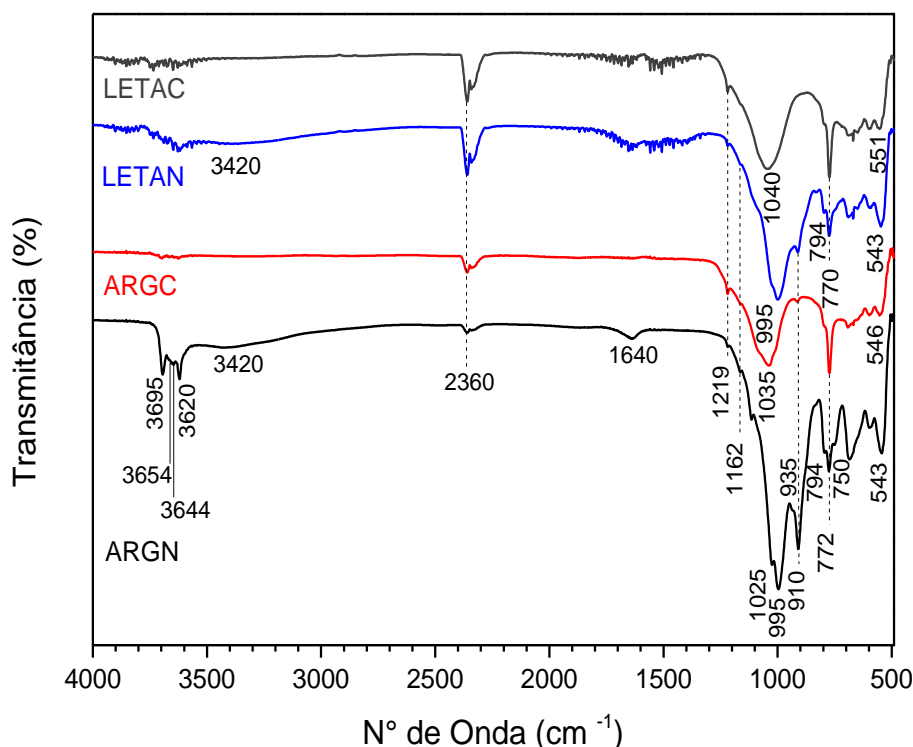


Figura 8. Espectros de IV-TF das amostras: ARGN, ARGC, LETAN e LETAC.

Por fim, o espectro mostra uma banda próxima a  $1.219\text{ cm}^{-1}$  e outra em  $772\text{ cm}^{-1}$  na ARGN e  $770\text{ cm}^{-1}$  no LETAN provenientes da vibração de estiramento do quartzo (AZZI et al., 2016), além de uma banda em  $2.360\text{ cm}^{-1}$  devido à presença de  $\text{CO}_2$  atmosférico (DAREZERESHKI, 2011; SILVA-VALENZUELA et al., 2018).

Quando comparados os espectros do LETAN e da ARGN com os dos LETAC e ARGC (calcinados), nota-se o desaparecimento das bandas características da caulinita na região próximo a  $3.500\text{ cm}^{-1}$ , da banda  $910\text{ cm}^{-1}$  atribuído à vibração de flexão Al-OH, presente nas ligações também da gibsitita, e das bandas correspondentes ao estiramento de H-O-H em  $3.420$  e  $1.640\text{ cm}^{-1}$ . Fato que já era esperado devido às etapas de desidroxilação da caulinita, a formação da metacaulinita e da evaporação da água absorvida pela superfície da argila, ocorridas no processo de queima.

### 2.3.2 Caracterização Estrutural dos Tijolos

As Figuras 9a e 9b mostram os difratogramas e os espectros de IV-TF dos tijolos, respectivamente. É possível destacar que não houve alterações significativas na estrutura da argila à medida que a proporção de lodo aumenta, isso indica que não ocorreram interações químicas entre a argila e o LETA.

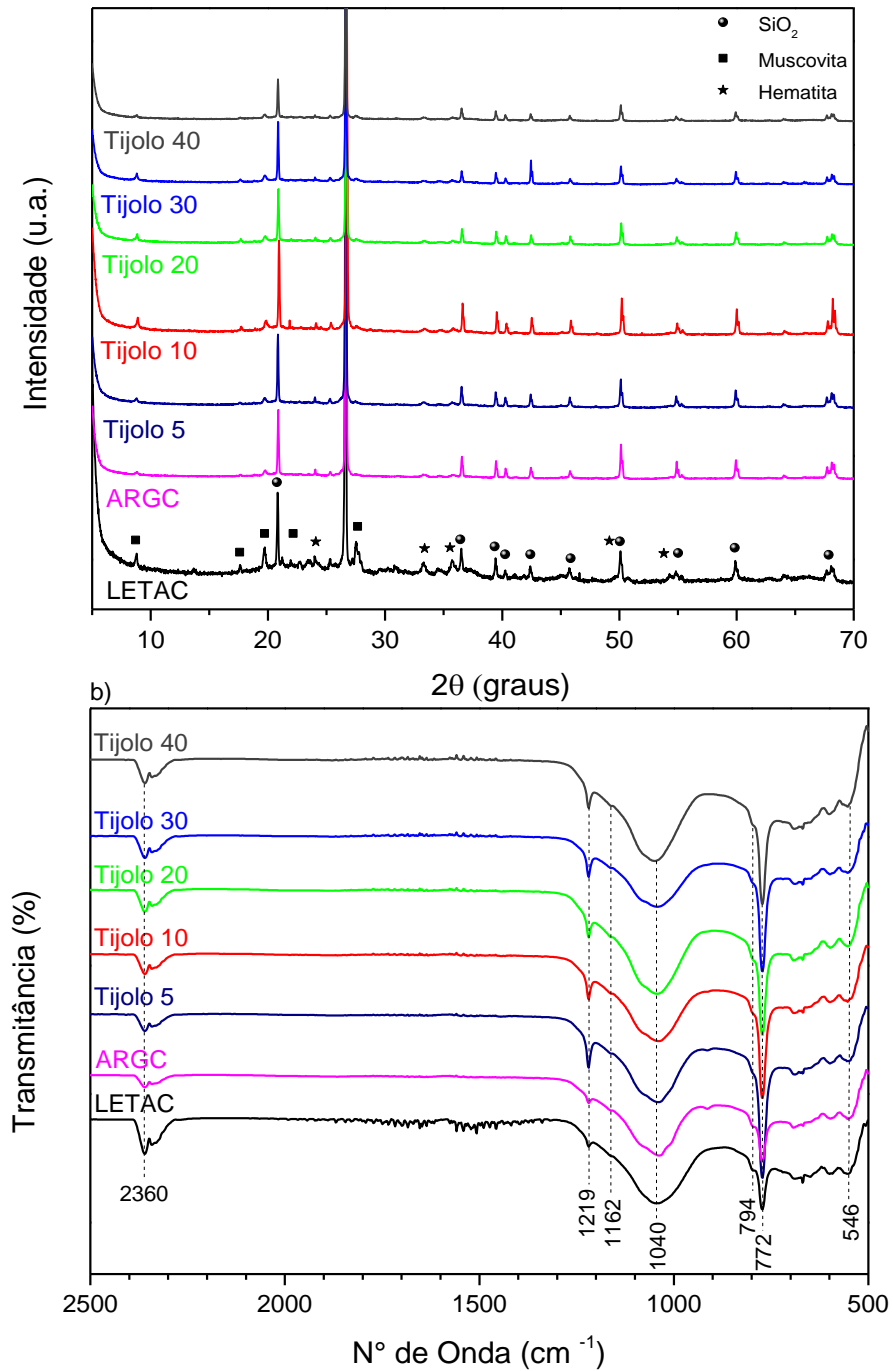


Figura 9. a) DRX e b) espectros de IV-TF dos tijolos obtidos.

As fases cristalinas identificadas por DRX nos tijolos foram as mesmas identificadas acima no ARGC e LETAC: quartzo (JCPDS 01-085-1054) com picos característicos em  $2\theta$  20, 26 e  $50^\circ$ , muscovita desidroxilada (JCPDS 00-046-0741) e hematita (JCPDS 01-089-8103) com picos em  $2\theta$  23, 33 e  $35^\circ$ .

A partir da análise de IV-TF também se observou mesmas bandas características presentes no ARGC e LETAC detalhados acima: quartzo 1.219 e  $772 \text{ cm}^{-1}$ ;  $\text{CO}_2$  atmosférico



em  $2.360\text{ cm}^{-1}$ ; ligação Si-O-Al em  $794$  e  $546\text{ cm}^{-1}$ ; e à vibração de estiramento Si-O em  $1.162, 1.040\text{ cm}^{-1}$ .

### 2.3.3 Caracterização física e mecânica dos tijolos

#### 2.3.3.1 Análise Granulométrica

A Tabela 7 exibe a distribuição de tamanho de partículas do ARGN e do LETAN (%) de acordo com a classificação disposta na NBR 6502 (ABNT, 1995) cujos solos são definidos como argila, quando a sua granulometria apresenta dimensões menores que  $0,002\text{ mm}$  ( $2\text{ }\mu\text{m}$ ); siltes, com dimensões compreendidas entre  $0,002\text{ mm}$  ( $2\text{ }\mu\text{m}$ ) e  $0,063\text{ mm}$  ( $63\text{ }\mu\text{m}$ ); e areias diâmetros entre  $0,063\text{ mm}$  ( $63\text{ }\mu\text{m}$ ) e  $2,0\text{ mm}$  ( $2.000\text{ }\mu\text{m}$ ).

Tabela 7. Distribuição de tamanho de partículas do ARGN e do LETAN (%)

Amostras	Fração argila	Silte	Areia
	(< $2\text{ }\mu\text{m}$ )	( $2 \leq x < 63\text{ }\mu\text{m}$ )	(> $63\text{ }\mu\text{m}$ )
ARGN	16,9	71,2	11,9
LETAN	8,9	66,3	24,8

A curva granulométrica (Figura 10) mostra que o LETAN corresponde majoritariamente a siltes, com uma pequena porção de argila, enquanto o ARGN apresenta em sua maioria, dimensões referentes à siltes e argila. Os diâmetros D10, D50 e D90 encontrados para o LETAN foram de  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $20\text{ }\mu\text{m}$  e  $124\text{ }\mu\text{m}$ , e para o ARGN foram  $1,2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $8,8\text{ }\mu\text{m}$  e  $67,0\text{ }\mu\text{m}$ , respectivamente. O que evidencia um tamanho de partículas menor no ARGN.

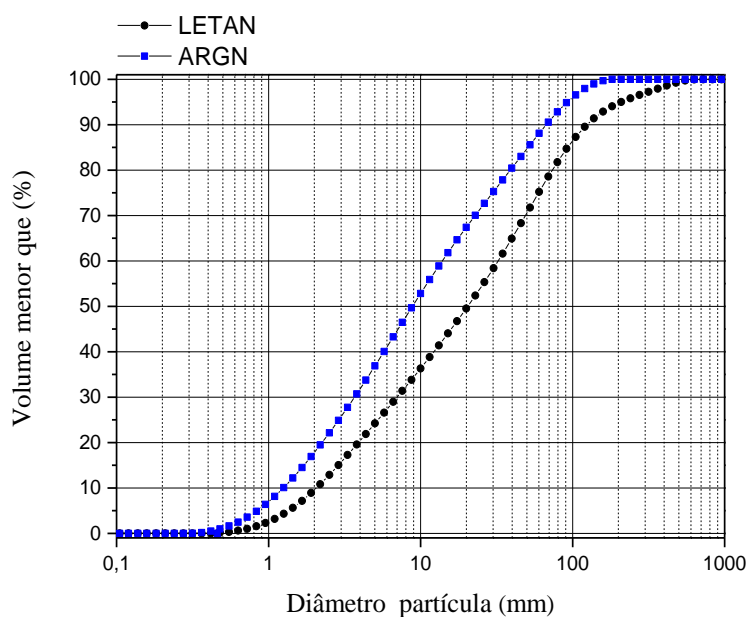


Figura 10. Curva granulométrica – LETAN

As frações referentes à argila e siltes representaram mais de 75% no LETAN e 88% no ARGN. Isso mostra que a etapa de moagem é suficiente para obtenção de amostras com tamanho médio de partículas ideal obter um tijolo com propriedades físicas e mecânicas de qualidade. Um fator determinante na escolha de não realizar o peneiramento das amostras para retirada de partículas de areia, a fim de simular o comportamento diário da indústria cerâmica, para evitar mais uma etapa no processo de fabricação dos tijolos.

### 2.3.3.2 *Índice de Plasticidade*

A Tabela 8 mostra os índices de plasticidade de Atterberg do LETAN e do ARGN. A partir dessas informações é possível afirmar que o LETAN não possui um LP adequado para fabricação de produtos de cerâmica vermelha compreendida na faixa entre 18 e 30%, o que inviabiliza o seu uso exclusivo para esse fim. Entretanto, o LETAN apresentou o valor de IP adequado para fabricação de tijolos situada entre 10 e 35% (DONDI, 2003).

Tabela 8. Limites de Atterberg do LETAN e do ARGN

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)
LETAN	56	45	11
ARGN	56	30	26

O IP define a zona em que o solo está no estado plástico e, por ser alto para as argilas e nulo para as areias, fornece um critério para se ajuizar o caráter argiloso da amostra. Assim, quanto maior o IP, mais plástico será o solo. É importante lembrar que a extrusão (principal método de compactação na fabricação de tijolos) necessita de uma massa que seja plástica para moldagem dos produtos.

A partir disto, se pode inferir que a incorporação parcial do LETAN na argila é viável devido ao fato de que a ARGN pode ser classificada como altamente plástica por apresentar valor de IP >15, e o LETAN classificado como medianamente plástico por apresentar valor compreendido entre  $7 < IP < 15$ . (CAPUTO, 1996).

Outro ponto a se destacar é que o valor de LL foi idêntico nas duas amostras, porém o valor de LP do LETAN foi muito mais alto do que o de ARGN. Isso se deve ao fato de que uma pequena porcentagem de matéria orgânica eleva o valor de LP, sem elevar o do LL, justificando assim o baixo valor de IP (LEE; KIM; YOO, 2018).

### 2.3.3.3 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de compressão (Figura 11) são os mais importantes testes para determinar a qualidade dos tijolos. Geralmente, são afetados pela porosidade, tamanho de partículas e o tipo de cristalização da amostra. Em geral, a adição de LETA baseado em alumina diminui a força de resistência e aumenta a absorção de água (GOMES et al., 2019; TOYA et al., 2007).

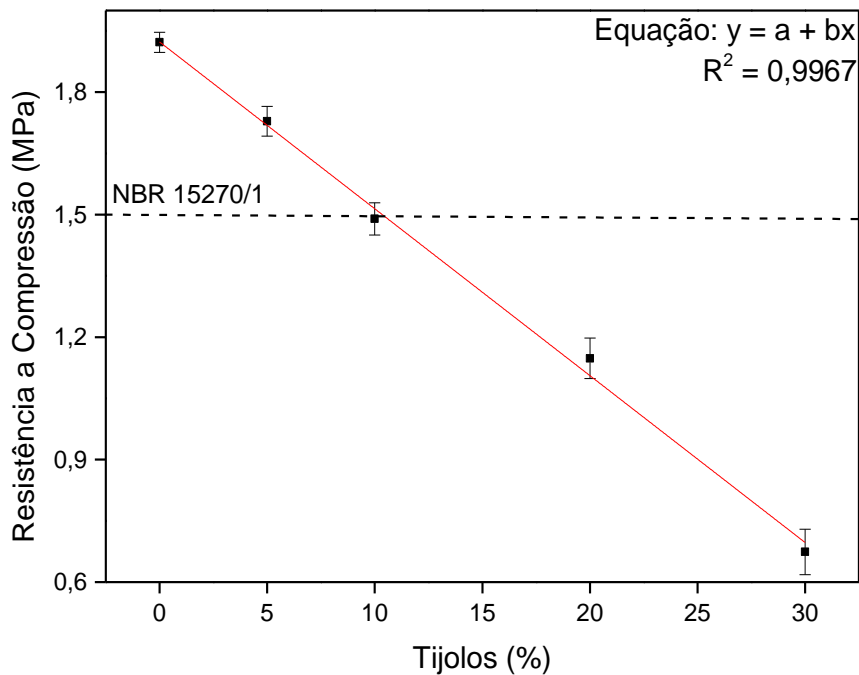


Figura 11. Resistência à compressão dos tijolos.

O decaimento dos valores de resistência descrito na literatura está de acordo com os resultados obtidos: 0% - 1,92 ± 0,024 MPa, 5% - 1,72 ± 0,036 MPa, 10% - 1,49 ± 0,039 MPa, 20% - 1,14 ± 0,049 MPa e 30% - 0,67 ± 0,055 MPa. Esses dados indicaram que a resistência à compressão dos tijolos decresce linearmente de acordo com o aumento da proporção de LETA na argila.

Também foi possível observar que somente os tijolos 5 e 10% atenderam ao limite mínimo de resistência à compressão estipulado pela norma, NBR15270/1, para um tijolo convencional de qualidade. Obtendo-se como ponto ótimo o tijolo com 10% de LETA, valor condizente com o tijolo produzido por Torres (2012), onde valores acima de 10% afetaram significativamente os resultados de absorção de água e resistência.

Quando é comparado o tijolo 10 (ponto ótimo de análise) com o tijolo 0 sem adição de LETA, é possível observar uma redução de cerca de 20% de resistência. Valor menor do que os encontrados por Elangovan e Subramaniam (2011) e Victoria (2013) que foram de 58% e 28%, respectivamente.

#### 2.3.3.4 *Índice de Absorção de Água (AA)*

O índice de absorção de água (AA) é um indicador de durabilidade, a partir dele é possível obter informações da porosidade do material, quanto maior a porosidade maior a absorção de água. Valores baixos significam uma permeabilidade aceitável para os tijolos e uma boa resistência em ambientes naturais (AOUBA et al., 2016; MUNIR et al., 2018).

O AA encontrado para o tijolo sem adição do LETA foi de  $18,5 \pm 0,19\%$ , se percebe ainda um acréscimo linear dos valores de absorção de água à medida que a porcentagem de adição de LETA no tijolo aumenta. Resultado concordante com a literatura que afirma que a adição de LETA na argila aumenta a porosidade das amostras, e os vazios na estrutura são preenchidos por moléculas de água mais facilmente. (ANDRADE et al., 2018; BORIES et al., 2014; WENG; LIN; CHIANG, 2003)

Os valores obtidos de AA para os tijolos são: tijolo 5 -  $19,7 \pm 0,81\%$ ; tijolo 10 -  $20,8 \pm 0,45\%$ , tijolo 20 -  $23,4 \pm 0,71\%$ , tijolo 30 -  $25,9 \pm 0,30\%$ , o que indica que uma maior porosidade para o tijolo 30 com maior porcentagem de LETA.

A Figura 12 exhibe os limites indicados na NBR 15270-1 para tijolos de boa qualidade, entre 18 e 25%. É possível observar que o AA é diretamente proporcional a quantidade adicionada de LETA ao tijolo. Somente o tijolo 30 ultrapassou o limite imposto pela norma, o que o inviabiliza para fabricação dos tijolos. Esses dados apresentaram resultado semelhante ao publicado por Benlalla et al (2005) que encontrou valores de AA entre 18 e 28%, para tijolos entre 5 e 30% de incorporação de LETA.

É possível afirmar ainda que o resultado obtido corroborou o definido pela literatura onde a quantidade de LETA adicionado (%) tem efeito significativo nos valores de AA, e conseqüentemente nos de resistência à compressão, já que quanto maior o valor de água absorvida pela estrutura da argila, pior será as suas propriedades mecânicas, ou seja, é uma relação inversamente proporcional (AL-FAKIH et al., 2019; ALGAMAL; KHALIL; SALEEM, 2018).

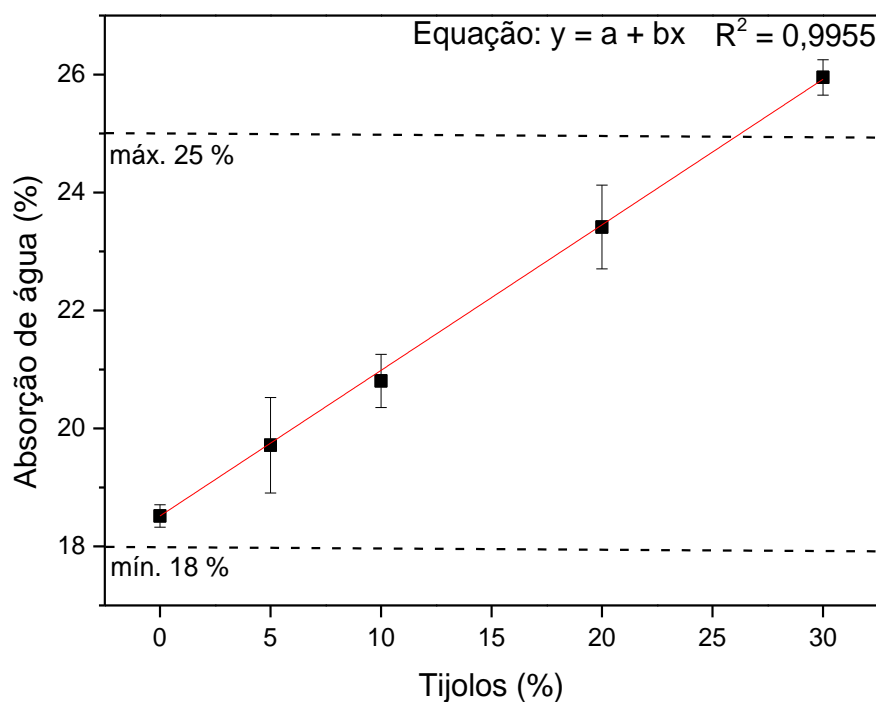


Figura 12. Índices de absorção (%) dos tijolos.

#### 2.3.4 Testes de Lixiviação

Os resultados dos ensaios de lixiviação (Tabela 9) indicaram uma redução da concentração de metais lixiviados quando ocorre uma calcinação e a fabricação dos tijolos. Em particular, o tijolo 10, melhor resultado de resistência à compressão, cujos valores de todos os metais lixiviados (exceto o Zn) foram reduzidos quando comparados ao LETAN. O valor de Zn maior no tijolo 10 do que no LETAN é explicado pela concentração de Zn lixiviado ser maior no ARGN.

Os metais Fe, Mn e Al apresentaram redução de cerca 92,0, 99,9 e 85,0%, valores que sugerem a imobilização desses metais em altas temperaturas durante a fabricação de tijolos, provavelmente atribuídos à presença de sílica que aumenta a formação de ligações e contribui para redução da lixiviação dos metais potencialmente tóxicos (SARANI et al., 2018; TAHA et al., 2018).

É importante frisar que todas as amostras apresentaram resultados de concentração de metais lixiviados condizentes com os limites impostos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004) que trata de resíduos sólidos, para os metais Pb, Cd e Cr. Isso pode ser explicado pelo fato de o LETA ser classificado como Resíduo Classe II A – Não Inerte, e não perigoso.

Também foi possível observar que o LETAN apresentou concentrações de Fe, Al e Mn em não conformidades com as condições e padrões de potabilidade estabelecidos pela

Resolução 357/2005 do CONAMA e da Portaria n° 2.914/2011 no ministério da saúde, para águas doces.

Tabela 9. Concentração de metal em mg L<sup>-1</sup> lixiviados no ARGN, LETAN, LETAC e nos tijolos

Conc. TCLP (mg/L) tijolos	Zn	Pb	Cu	Cd	Cr	Ag	Fe	Mn	Ni	Al
ARGN	0,0019	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,0008	0,0001	0,0076
LETAN	0,0002	0,0003	ND	0,0008	0,0025	0,0012	1,1253	3,9031	0,0004	3,0756
LETAC	ND	ND	ND	ND	0,0006	ND	0,0014	ND	ND	0,0178
Tijolo 0	0,0007	0,0004	ND	ND	0,0005	0,0005	0,0398	0,0012	0,0001	0,0815
Tijolo 5	0,0002	ND	ND	ND	0,0001	ND	0,0013	0,0001	ND	0,0147
Tijolo 10	0,0005	ND	ND	ND	0,0008	0,0010	0,0955	0,0005	ND	0,4753
Tijolo 20	0,0013	0,0001	ND	ND	0,0010	0,0005	0,0359	0,0007	ND	0,1598
Tijolo 30	ND	ND	ND	ND	0,0004	ND	0,0012	ND	ND	0,0097
Limites de Conc.										
TCLP (mg/L)										
NBR 10,004 (2004)										
Brasil	-	1,0	-	0,5	5,0	-	-	-	-	-
Resolução 357/2005										
CONAMA Brasil	0,18	0,01	0,009	0,001	0,05	-	0,3	0,1	0,025	0,1
Portaria n°										
2.914/2011 Brasil	5	0,01	2	0,005	0,005	-	0,3	0,1	0,07	0,2

Esse dado mostra a importância da reutilização do LETA de forma sustentável e os riscos à saúde humana que o descarte inadequado em leitos de rios pode provocar, como o câncer (KHAN et al., 2013). Ademais, a exposição a elevados níveis de Mn durante a gravidez já foi associado na literatura ao não desenvolvimento intelectual de crianças, e também a hiperatividade. Além de causar problemas neurológicos e déficits envolvendo as funções cognitivas e motoras nos humanos, e à doença de Parkinson. (BOUCHARD et al., 2007; CHOWDHURY et al., 2016; WASSERMAN et al., 2006).

## 2.4 Conclusões

As análises de plasticidade revelaram que não é possível produzir tijolos utilizando somente o LETA, devido ao seu limite de plasticidade ser alto, em consequência da matéria orgânica presente em sua estrutura. Contudo, os índices de plasticidade e as análises de granulometria sugeriram a possibilidade da substituição parcial do LETA na argila para fabricação de materiais oriundos da indústria da cerâmica vermelha.

O trabalho apresentado mostrou que os componentes do LETA e da argila não apresentaram interações químicas entre si, e que foi possível substituir até 10% do LETA na argila, e atender o valor limite de resistência à compressão, estipulado na NBR 15270-1 para tijolos ou blocos de vedação em paredes vazadas com furos ou vazados horizontais. Fato de essencial importância que minimiza os impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado do LETA.

Também foi possível concluir através das análises de absorção de água que a porosidade dos solos está ligada diretamente proporcional aos índices de AA, e que à medida que se adicionava LETA na argila, a AA aumentava linearmente, possivelmente devido a porosidade do LETA ser maior do que o da argila. Mesmo assim, foi possível adicionar até 20% do resíduo na argila sem ultrapassar o valor limite estipulado na NBR 15270-1 para este tipo de análise.

E por fim, os testes de lixiviação comprovaram que houve a inertização dos metais potencialmente tóxicos em todas as amostras quando submetidos à calcinação no processo de produção dos tijolos. Além disso, por ser um resíduo sólido não perigoso, nenhuma amostra apresentou valores de concentração de metais lixiviados inconsistentes com o valor estipulado pela norma brasileira NBR 10.004.

## **CAPÍTULO 3: Considerações Finais**



### 3.1 Considerações Finais

Este estudo mostrou que incorporar LETA na argila para produção dos tijolos é uma alternativa viável de reutilizar esse resíduo de forma sustentável, apresentando como vantagens econômicas: agregar valor a um resíduo considerado de baixo custo, a abundância de LETA gerado em uma ETA de Manaus e a manutenção dos vários empregos direta e indiretamente ligados ao polo ceramista regional. Assim como vantagens ambientais de diminuir a exploração de jazidas naturais de argila no município de Iranduba, e evitar que o LETA seja despejado incorretamente no leito dos rios, o que pela legislação vigente no Brasil é considerado crime ambiental.

Hoje, levando em consideração que se produz 17 toneladas de LETA, diariamente, em uma ETA no município de Manaus. É possível afirmar que o polo ceramista regional poderia abarcar em sua totalidade o LETA na produção, não somente de tijolos (limitados em até 10% pela NBR 15270-1 que trata do valor mínimo de resistência à compressão), mas também de outros produtos de cerâmica vermelha como potes ornamentais, telhas e vasilhas com valores de incorporação de LETA acima de 10%.

Evidentemente que para esse processo se tornar realidade, se fazem necessários estudos de viabilidade econômica, além da produção desses produtos em escala industrial, atividade inexistente até o presente momento na região. Outra sugestão para trabalhos futuros seria investigar a emissão de gases poluentes liberados no processo de queima dos tijolos de argila cozida incorporados com LETA, e identificar, quantificar e comparar os possíveis impactos ambientais ocasionados.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, S. et al. Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties. **Journal of Building Engineering**, v. 14, p. 7–14, 2017.
- ACERAM (ASSOCIAÇÃO DOS CERAMISTAS DO ESTADO DO AMAZONAS). Relatório da APL de Base Mineral. Central de Resíduos, 2012.
- ADAZABRA, A. N.; VIRUTHAGIRI, G.; SHANMUGAM, N. Management of spent shea waste: An instrumental characterization and valorization in clay bricks construction. **Waste Management**, v. 64, p. 286–304, 2017.
- AHMAD, T. et al. Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 606–611, 2016.
- AL-FAKIH, A. et al. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks : An update review. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 37–54, 2019.
- ALGAMAL, Y.; KHALIL, N. M.; SALEEM, Q. M. Usage of the sludge from water treatment plant in brick-making industry. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 53, n. 3, p. 504–510, 2018.
- ANDRADE, J. J. DE O. et al. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 192, p. 159–168, 2018.
- AOUBA, L. et al. Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residues. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 7–13, 2016.
- ARSENOVIC, M.; RADOJEVIC, Z.; STANKOVIC, S. Removal of toxic metals from industrial sludge by fixing in brick structure. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 7–14, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Classificação de Resíduos. Rio de Janeiro: 2004a. p. 71.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Lixiviação de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro: 2004b. p. 16.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Solubilização de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro: 2004c. p. 03.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: Amostragem de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro: 2004d. p. 21.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: 2017. p. 1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: 2017.

p. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 2016. p.5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro: 1995. p.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: 2016. p.3.

AZZI, A. DE A. et al. Characterization of clays from the Corumbataí formation used as raw material for ceramic industry in the Santa Gertrudes district , São Paulo, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 133, p. 232–242, 2016.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches towards water treatment works sludge management: An international review of beneficial re-uses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129–164, 2007.

BATALHA, C. T. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZA DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA CIDADE DE MANAUS**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2012.

BENLALLA, A. et al. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171–177, 2015.

BODIAN, S. et al. Thermo-mechanical behavior of unfired bricks and fired bricks made from a mixture of clay soil and laterite. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 172–179, 2018.

BOLTAKOVA, N. V et al. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics . Review of Russian experience for the years 2000 – 2015. **Waste Management**, v. 60, p. 230–246, 2017.

BORIES, C. et al. Development of eco-friendly porous fired red clay bricks using pore-forming agents : A review. **Journal of Environmental Management**, v. 143, p. 186–196, 2014.

BOUCHARD, M. et al. Hair Manganese and Hyperactive Behaviors: Pilot Study of School-Age Children Exposed through Tap Water. **Environmental Health Perspectives**, v. 115, n. 1, p. 122–127, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria MS Nº 2914 de 12 de Dezembro de 2011. Brasília, 2011.

BRASIL. Resolução CONAMA 357 de 17 de Março de 2005. Brasília, 2005.

CAPUTO, H. P. Plasticidade e consistência dos solos. In: LTC (Ed.). . **Mecânica dos solos e suas aplicações. Fundamentos**. 6 ° ed. Rio de Janeiro RJ: [s.n.]. p. 52–60.

CARDOSO, R. et al. Effects of clay's chemical interactions on biocementation. **Applied Clay Science**, v. 156, p. 96–103, 2018.

CASTALDI, P. et al. Copper(II) and lead(II) removal from aqueous solution by water treatment residues. **Journal of Hazardous Materials**, v. 283, p. 140–147, 2015.

CHENG, H. et al. A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloysite — A mid-infrared and near-infrared study. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 77, p. 856–861, 2010.

CHIANG, K. et al. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, p. 76–82, 2009.

CHOWDHURY, S. et al. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 476–488, 2016.

CNS382-R2002, Building with ordinary brick, Natl. Stand. Repub. China, 2007

COELHO, R. V. et al. USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 2, p. 11–22, 2015.

COLETTI, C. et al. Use of industrial ceramic sludge in brick production: Effect on aesthetic quality and physical properties. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 219–227, 2016.

COLETTI, C. et al. Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: Effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 792–807, 2018.

CREMADES, L. V.; CUSIDÓ, J. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1071–1080, 2018.

CUSIDÓ, J. A.; CREMADES, L. V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. **Waste Management**, v. 32, p. 1202–1208, 2012.

DAREZERESHKI, E. One-step synthesis of hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nano-particles by direct thermal-decomposition of maghemite. **Materials Letters**, v. 65, p. 642–645, 2011.

DE MEDEIROS, E. N. M. et al. Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planeamento. **Cerâmica**, v. 56, p. 399–404, 2010.

DONDI, M. Technological characterisation of clay materials: experimental methods and data interpretation. **International Ceramics Journal**, p. 55–59, 2003.

EL AFIFI, E. M.; ATTALLAH, M. F.; BORAI, E. H. Utilization of natural hematite as reactive barrier for immobilization of radionuclides from radioactive liquid waste. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 151, p. 156–165, 2016.

ELANGO VAN, C.; SUBRAMANIAN, K. Reuse of alum sludge in clay brick manufacturing. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 11, n. 3, p. 333–341, 2011.

ELICHE-QUESADA, D.; CUNHA, R. A.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Effect of sludge from oil refining industry or sludge from pomace oil extraction industry addition to clay ceramics. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 202–211, 2015.

ELICHE-QUESADA, D.; LEITE-COSTA, J. Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. **Waste Management**, v. 48, p. 323–333, 2016.

EWAIS, E. M. M. et al. Insulating refractory bricks from water treatment sludge and rice husk ash. **Refractories and Industrial Ceramics**, v. 58, n. 2, p. 136–144, 2017.

GENG, J.; SUN, Q. Effects of high temperature treatment on physical-thermal properties of clay. **Thermochimica Acta**, v. 666, p. 148–155, 2018.

GOEL, G.; KALAMDHAD, A. S. Degraded municipal solid waste as partial substitute for manufacturing fired bricks. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 259–266, 2017.

GOMES, S. D. C. et al. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge : A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 145, p. 148–159, 2019.

GRIDI-BENNADJI, F. et al. Structural transformations of Muscovite at high temperature by X-ray and neutron diffraction. **Applied Clay Science**, v. 38, p. 259–267, 2008.

GUGGENHEIM, S.; CHANG, Y.-H.; GROSS, A. F. K. VAN. Muscovite dehydroxylation : High-temperature studies. **American Mineralogist**, v. 72, p. 537–550, 1987.

HEGAZY, B. E.-D. E.; FOUAD, H. A.; HASSANAIN, A. M. Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making. **Advances in environmental research**, v. 1, n. 1, p. 83–96, 2012.

HEREK, L. C. S. et al. Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. **Ceramics International**, v. 38, p. 951–959, 2012.

HUANG, C.; PAN, J. R.; LIU, Y. Mixing Water Treatment Residual with Excavation Waste Soil in Brick and Artificial Aggregate Making. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 2, p. 272–277, 2005.

ILIĆ, B. R.; MITROVIĆ, A. A.; MILIČIĆ, L. R. THERMAL TREATMENT OF KAOLIN CLAY TO OBTAIN METAKAOLIN. **Hem. ind.**, v. 64, n. 41, p. 351–356, 2010.

Indian Standard IS:1077: Specification for common burnt clay building bricks.

JUEL, M. A. I.; MIZAN, A.; AHMED, T. Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. **Waste Management**, v. 60, p. 259–269, 2017.

KAZMI, S. M. S. et al. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, 2016a.

KAZMI, S. M. S. et al. Manufacturing of sustainable clay bricks : Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29–

41, 2016b.

KAZMI, S. M. S. et al. Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1867–1880, 2018.

KEELEY, J. et al. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. **Water Research**, v. 88, p. 502–509, 2016.

KEPPLER, H. Ion exchange reactions between dehydroxylated micas and salt melts and the crystal chemistry of the interlayer cation in micas. **American Mineralogist**, v. 75, p. 529–538, 1990.

KHAN, S. et al. Drinking water quality and human health risk in Charsadda district , Pakistan. **Journal of Cleaner Production**, v. 60, p. 93–101, 2013.

KIZINIEVIC, O. et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464–473, 2013.

KRISHNAN, P.; JEWARATNAM, J.; JEWARATNAM, J. Recovery of Water Treatment Residue into Clay Bricks. v. 56, n. 2011, p. 1837–1842, 2017.

LEE, Y.; KIM, I.; YOO, Y.-S. Stabilization of High-Organic-Content Water Treatment Sludge by Pyrolysis. **Energies**, v. 11, n. 3292, p. 1–14, 2018.

LEIVA, C. et al. Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 114–118, 2016.

LEWIŃSKA, K. et al. Potential of Fe-Mn wastes produced by a water treatment plant for arsenic immobilization in contaminated soils. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 184, p. 226–231, 2018.

LI, J. et al. Effect of adding alum sludge from water treatment plant on sewage sludge dewatering. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 1, p. 746–752, 2016.

LING, Y. P. et al. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, v. 143, p. 300–306, 2017.

LING, Y. P. et al. Properties evaluation and fabrication of green clay reformulated from water sludge. v. 44, p. 1411–1419, 2018.

LORENTZ, B. et al. Characterization of Florida kaolin clays using multiple-technique approach. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 326–333, 2018.

MADEJOVA, J. FTIR techniques in clay mineral studies. **Vibrational Spectroscopy**, v. 31, p. 1–10, 2003.

MANAUS AMBIENTAL. Disponível em: [www.manausambiental.com.br](http://www.manausambiental.com.br). Acesso em 20/12/2017.

MIROSLAV, K. Opportunity for water treatment sludge re-use. **GeoScience Engineering**, v. LIV, n. 1, p. 11–22, 2008.

- MOHAJERANI, A.; KADIR, A. A.; LAROBINA, L. A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. **Waste Management**, v. 52, p. 228–244, 2016.
- MONTEIRO, S. N. et al. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1281–1287, 2008.
- MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 599–610, 2014.
- MOTA, S. et al. Ecoefficiency and Enviroment Ergonomics to the production of ceramic bricks in the Brazilian Amazon. **Procedia Manufacturing**, v. 3, p. 5579–5586, 2015.
- MUNIR, M. J. et al. Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1122–1135, 2018.
- MURMU, A. L.; PATEL, A. Towards sustainable bricks production: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 112–125, 2018.
- MYMRIN, V. et al. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 367–373, 2017.
- NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 272–281, 2015.
- NDZANA, G. M. et al. Characteristics of clay minerals in soil particles from an argillic horizon of Alfisol in central China. **Applied Clay Science**, v. 151, p. 148–156, 2018.
- NESREA (2009) National Environmental (Sanitation and Waste Control) Regulations Abuja, Nigeria.
- NIMWINYA, E. et al. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 128–134, 2016.
- OKUDA, T. et al. Removal of coagulant aluminum from water treatment residuals by acid. **Water Research**, v. 60, p. 75–81, 2014.
- OLIVEIRA, H. A. et al. Estimating isotherm parameters of drying clay for the ceramic industry of Sergipe , Brazil. **Applied Clay Science**, v. 161, n. April, p. 211–214, 2018.
- ONCHOKE, K. K.; FRANCLEMONT, C. M.; WEATHERFORD, P. W. Structural characterization and evaluation of municipal wastewater sludge (biosolids) from two rural wastewater treatment plants in East Texas, USA. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 204, p. 514–524, 2018.
- PARKER, T. W. A classification of kaolinites by infrared spectroscopy. **Clay Minerals**, v. 8, p. 135, 1969.
- PÉREZ-VILLAREJO, L. et al. Valorization and inertization of galvanic sludge waste in clay bricks. **Applied Clay Science**, v. 105–106, p. 89–99, 2015.

PHONPHUAK, N.; KANYAKAM, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3057–3062, 2016.

RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, p. 175–184, 2016.

RAMADAN, M. O.; FOUAD, H. A.; HASSANAIN, A. M. Reuse of Water Treatment Plant Sludge in Brick Manufacturing. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 4, n. 10, p. 1223–1229, 2008.

RAMIREZ, K. G. et al. Potential uses of waste sludge in concrete production. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 28, n. 6, p. 821–838, 2017.

REDAOUI, D. et al. Mechanism and Kinetic Parameters of the Thermal Decomposition of Gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$  by Thermogravimetric Analysis. **Acta Physica Polonica A**, v. 131, n. 3, p. 562–565, 2017.

RODRÍGUEZ, N. H. et al. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 778–786, 2010.

SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica**, v. 64, p. 276–283, 2018.

SANTOS, G. Z. B. DOS. **Argamassa geopolimérica à base de lodo de estação de tratamento de água calcinado**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas UFAM, 2016.

SANTOS, G. Z. B. DOS; MELO, J. D. A.; MANZATO, L. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, p. Epub, 2018.

SARANI, N. A. et al. Properties and environmental impact of the mosaic sludge incorporated into fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 300–310, 2018.

SILVA-VALENZUELA, M. DAS G. et al. Applied Clay Science Enrichment of clay from Vitoria da Conquista ( Brazil ) for applications in cosmetics. **Applied Clay Science**, v. 155, n. January, p. 111–119, 2018.

SISWOYO, E.; MIHARA, Y.; TANAKA, S. Determination of key components and adsorption capacity of a low cost adsorbent based on sludge of drinking water treatment plant to adsorb cadmium ion in water. **Applied Clay Science**, v. 97–98, p. 146–152, 2014.

SPERINCK, S. et al. Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin — a molecular dynamics study. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, p. 2118–2125, 2011.

SUKSIRIPATTANAPONG, C. et al. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 20–30, 2015.

SUTCU, M. et al. Effect of olive mill waste addition on the properties of porous fired clay



bricks using Taguchi method. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 185–192, 2016.

SZYCZEWSKI, P. et al. Research on heavy metals in Poland. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 18, n. 5, p. 755–768, 2009.

TAHA, Y. et al. Natural clay substitution by calamine processing wastes to manufacture fi red bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 847–858, 2016.

TAHA, Y. et al. Leaching and geochemical behavior of fired bricks containing coal wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 209, p. 227–235, 2018.

TANTAWY, M. A.; MOHAMED, R. S. Applied Clay Science Middle Eocene clay from Goset Abu Khashier : Geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture. **Applied Clay Science**, v. 138, p. 114–124, 2017.

TARTARI, R. et al. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, p. 387–394, 2011a.

TARTARI, R. et al. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 387–394, 2011b.

TEIXEIRA, S. R. et al. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural (Effect. **Cerâmica**, v. 52, p. 215–220, 2006.

TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561–565, 2011.

TOLEDO, R. et al. Gas release during clay firing and evolution of ceramic properties. **Applied Clay Science**, v. 27, n. 3–4, p. 151–157, 2004.

TORRES, P.; HERNÁNDEZ, D.; PAREDES, D. Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 27, n. 3, p. 145–154, 2012.

TOYA, T. et al. Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. **Ceramics International** 33, v. 33, p. 573–577, 2007.

UKWATTA, A. et al. Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 76–85, 2016.

UKWATTA, A. et al. A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids. **Waste Management**, p. 1–14, 2018.

U.S. Environmental Protection Agency (1988). Test Methods for Evaluating Solid Waste. Volume J C: Laboratory Manual Physical, Chemical Methods. 3rd Ed., PB88 239223. Solid Waste Emerg. Resp. Washington, D.C, U.S.A.

VELASCO, P. M. et al. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable

construction material – A review. **Construction and Building Materials journal**, v. 63, p. 97–107, 2014.

VELASCO, P. M. et al. 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, 2016.

VICTORIA, A. N. Characterisation and Performance Evaluation of Water Works Sludge As Bricks Material. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 69–79, 2013.

VIEIRA, C. M. F. et al. Applied Clay Science Clay bricks added with effluent sludge from paper industry : Technical , economical and environmental benefits. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 753–759, 2016.

WASSERMAN, G. A. et al. Water Manganese Exposure and Children’ s Intellectual Function in Araihasar, Bangladesh. **Environmental Health Perspectives**, v. 114, n. 1, p. 124–130, 2006.

WEBB, D. J. T. STABILISED SOIL AND THE BUILT ENVIRONMENT. **Renewable Energy**, v. 5, n. II, p. 1066–1080, 1994.

WENG, C.; LIN, D.; CHIANG, P. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, v. 7, p. 679–685, 2003.

WOLFF, E.; SCHWAB, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 96, p. 282–289, 2015.

YANG, L. et al. Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. **Applied Surface Science**, v. 305, p. 337–346, 2014.

YATAGANBABA, A.; KURTBAŞ, I. A scientific approach with bibliometric analysis related to brick and tile drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 206–224, 2016.

ZEMENOVÁ, P. et al. Investigation of the first and second dehydroxylation of kaolinite. **J Therm Anal Calorim**, v. 116, p. 633–639, 2014.

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 643–655, 2013.

ZHANG, M. et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 27–36, 2018.

ZHANG, Y. M. et al. Fabrication , microstructure and properties of bricks fired from lake sediment , cinder and sewage sludge. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 154–160, 2016.