

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Mariana Bandeira**

**AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM DE LODO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA**

**Santa Maria, RS  
2021**

**Mariana Bandeira**

**AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM DE LODO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA  
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito final para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Erich David Rodríguez Martínez

Santa Maria, RS  
2021

BANDIEIRA, Mariana  
AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM DE LODO DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA / Mariana  
BANDIEIRA.- 2021.  
65 p. ; 30 cm

Orientador: Erich David Rodríguez Martínez  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2021

1. Materiais de construção 2. Lodo de estação de  
tratamento de água 3. cerâmica vermelha I. Martínez, Erich  
David Rodríguez II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MARIANA BANDIEIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Mariana Bandeira**

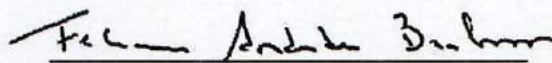
**AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM DE LODO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA  
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito final para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovada em 16 de setembro de 2021:**



**Erich David Rodríguez Martínez, Dr.  
(Presidente/Orientador)**



**Feliciane Andrade Brehm, Dra.**



**Monica Alejandra Villaquiran Caicedo, Dra.**

Santa Maria, RS  
2021

## **Dedicatória**

*À minha mãe, que esteve junto de mim em todos os momentos, com seus ensinamentos, suas palavras de apoio, sua bondade e sempre me fazendo lembrar das coisas boas que me ensinou.*

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, à Deus, pelas oportunidades a mim oferecidas, pelas pessoas que colocou em meu caminho e por ser Àquele a quem eu recorria nos momentos de alegria, de angústia, de euforia e de incertezas.

Agradeço à minha irmã, Maria Rita, ao meu pai, Sadi, e à minha mãe, Leocadia, por terem me apoiado, acreditado em mim e que apesar das circunstâncias, não mediram esforços para que eu pudesse trilhar meu caminho. Vocês souberam compreender minha ausência, lidamos juntos com a saudade e eu agradeço por ter vocês e por tudo o que fizeram por mim.

Ao meu grupo de pesquisa, em especial meu orientador Erich, agradeço pelo crescimento, pela experiência adquirida e pelo grande papel que exerceram para que eu pudesse compreender meu caminho e guiar boa parte das incertezas do futuro.

Agradeço aos meus amigos e às pessoas que conheci neste período que não fizeram com que a caminhada fosse mais leve, mas sim muito mais agradável, descontraída e engrandecedora.

Por fim, obrigada a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização da presente pesquisa.

## Epígrafe

*“De fato, o que adianta alguém ganhar o mundo inteiro, e perder ou destruir a si mesmo?”*

(Lc. 9, 25-26)

## RESUMO

### **AVALIAÇÃO DA RECICLAGEM DE LODO DE TRATAMENTOS DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CERÂMICA VERMELHA**

AUTORA: Mariana Bandeira

ORIENTADOR: Erich David Rodríguez Martínez

O tratamento de água no Brasil é feito em sua grande maioria por meio de estações de tratamento de água convencionais (ETAs). O processo busca tornar a água potável ao consumo humano, sendo imprescindível a remoção dos sólidos suspensos da água a fim de que os parâmetros de potabilidade sejam atendidos. Neste processo, é gerado um resíduo, denominado lodo, onde estima-se que uma ETA convencional gere um volume de lodo de 2,5% do volume de água tratada. A água bruta em uma estação de tratamento passa pelos processos de captação, coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração, sendo o lodo formado e acumulado nas três últimas etapas. Por ser atualmente classificado pela NBR 10004/2004 como um resíduo sólido classe II-A, não inerte e não perigoso, o lodo deve ser descartado em local adequado, obedecendo à legislação ambiental. Porém, os métodos e técnicas disponíveis para tal são onerosos e necessitam de uma logística adequada para o transporte. Neste sentido, foram conduzidos estudos buscando inserir o lodo como matéria-prima na construção civil, como para a fabricação de concreto, argamassas, dentre outros. No entanto, o beneficiamento necessário para que fosse feita a desidratação do lodo e sua inserção nestes setores produtivos inviabilizam economicamente seu uso. Neste cenário, o presente projeto tem como objetivo avaliar o efeito, assim como a viabilidade técnica da substituição de lodo de estação de tratamento de água nas propriedades físico-químicas e mecânicas em peças de cerâmica vermelha. Para isto, o procedimento experimental foi dividido em três etapas: a primeira onde foram feitos os ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos materiais utilizados, a argila e o lodo. Na segunda etapa foi avaliado o processo produtivo de extrusão dos blocos por ensaios de consistência e plasticidade. Foram correlacionados dados obtidos por meio de ensaios reológicos, com diferentes teores de lodo e umidade, ajustando os traços a fim de promover uma extrusão linear, sem defeitos superficiais nos blocos produzidos. Foram fabricados blocos cerâmicos em escala reduzida, com diferentes teores de substituição de lodo (2, 5, 10 e 20% em substituição de argila) e submetidos aos mesmos parâmetros durante o processo de moldagem, conformação, secagem e queima. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas exigidas pela NBR 15270/2017. Neste sentido a pesquisa buscou a viabilizar tecnicamente a utilização de lodo de ETA para a fabricação de produtos cerâmicos. Por meio da otimização do processo produtivo, foi possível concluir que blocos produzidos com teores de lodo inferiores a 5% apresentam significativo potencial para sua utilização, desde que haja um controle de umidade da massa argilosa, assim como no processo de secagem de queima.

**Palavras-chave:** lodo, tratamento de água, resíduo, cerâmica vermelha.



## ABSTRACT

### EVALUATION OF WATER TREATMENT SLUDGE RECYCLING IN THE PRODUCTION OF RED CERAMIC BRICKS

AUTHOR: Mariana Bandeira  
ADVISOR: Erich David Rodríguez Martínez

The most used water treatment in Brazil is through conventional water treatment plants (WTPs). The process seeks to make drinking water suitable for human consumption, and it is essential to remove suspended solids from the water to achieve potability parameters. In this process, a waste solid named sludge is generated, where it is estimated that a conventional WTP generates a sludge of 2.5% of the volume of treated water. Raw water in a treatment plant goes through the processes of capture, coagulation, flocculation, decantation or flotation and filtration, with the sludge being formed and accumulated in these last three stages. Currently, the WTPs is classified by NBR 10004/2004 as a class II-A solid waste, non-inert and non-hazardous, and must be disposed in an appropriate place, in compliance with environmental legislation. However, the methods and techniques available for this are costly and require adequate logistics for transport. In this sense, studies were conducted seeking to re-use sludge as a raw material in civil construction, such as for the manufacture of concrete, mortar, among others. However, the processing necessary for the dehydration of the sludge and its insertion in these productive sectors makes its use economically unfeasible. In this scenario, this project aims to evaluate the effect, as well as the technical feasibility of replacing sludge from a water treatment plant on the physicochemical and mechanical properties of red ceramic products. For this, the experimental procedure was developed into three stages: the first, where the physical, chemical and mineralogical characterization tests of the materials used (clay and sludge). In the second stage, the production process of extrusion of bricks was evaluated by consistency and plasticity tests. Data obtained through rheological tests were correlated, with different levels of sludge and moisture, adjusting the traces in order to promote a linear extrusion, without surface defects in the bricks produced. Ceramic bricks were manufactured on a reduced scale, with different sludge replacement contents (2, 5, 10 and 20% in clay replacement) and submitted to the same parameters during the molding, forming, drying and firing process. The physical and mechanical properties required by NBR 15270/2017 were evaluated. In this sense, the research sought to technically enable the use of WTS sludge for the manufacture of ceramic products. Through the optimization of the production process, it was possible to conclude that bricks produced with sludge contents below 5% has significant potential for its use, as long as there is a moisture control in the green clay paste, as well as in the burning drying process.

**Keywords:** sludge, water treatment, solid waste, red ceramics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do tratamento de água em ETAs convencionais.....	19
Figura 2 – Fluxograma esquemático da metodologia.....	28
Figura 3 – Bag geotêxtil utilizado para armazenagem do lodo .....	32
Figura 4 – Distribuição de tamanho de partículas pelo método de difração à laser .....	33
Figura 5 – Difração de raios-X (A) e análise termogravimétrica (B).....	34
Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura em amostras em pó de lodo a diferentes escalas (A e B).....	35
Figura 7 – Jazidas de argilas.....	36
Figura 8 – Argilas utilizadas para a fabricação de peças de cerâmica vermelha. a) Argila mais grossa (CC); b) Argila mais fina (FC); c) areia fina (FS).....	37
Figura 9 – Distribuição do tamanho de partículas das argilas .....	37
Figura 10 – Difratoogramas de raios-X das argilas utilizadas. A. Argila mais grossa (CC), B. Argila mais fina (FC), e C. Areia fina (FS).....	38
Figura 11 – Preparação de amostras para ensaios reológicos. A. Amostra prismática, B. Teste de varredura de amplitude de deformação.....	42
Figura 12 – Produtos cerâmicos fabricados em laboratório. A. Geometria e dimensões do bloco em escala reduzida. B. Bloco produzido pós-extrusão, e C. Bloco pós-calcinação. ....	43
Figura 13 – Análises reológicas de misturas em verde de diferentes teores. (A.25, B. 27, C, 39, D. 31, e E. 33 %), bem como o aspecto visual durante a extrusão, com baixo (F), desejável (G) e alto teor de umidade (H).....	46
Figura 14 – Módulo de armazenamento com diferentes e constituído de A. 2%; B. 5%; C. 10%; e D. 20% de lodo.....	47
Figura 15 – Módulo de perda das misturas com diferentes umidades e com A. 2%; B. 5%; C. 10%; e D. 20% de lodo.....	48
Figura 16 – Retração linear dos blocos pós secagem e pós calcinação.....	50
Figura 17 – Resistência à compressão dos blocos avaliada por meio da distribuição de Weibull para os diferentes traços. ....	51
Figura 18 – Absorção de água e densidade aparente dos blocos produzidos com diferentes teores de lodo.....	52
Figura 19 – Difração de raios-X em amostras de blocos calcinados.....	54
Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura para amostras queimadas de WTS-0% e WTS-20% (A e B).....	56
Figura 21 – Comparação de blocos para a determinação da efluorescência .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio de caracterização das matérias-primas e dos materiais produzidos .....	28
Tabela 2 – Composição química, lixiviação e solubilização do lodo.....	34
Tabela 3 – Composição mineralógica do lodo .....	35
Tabela 4 - Composição química e propriedades físicas das argilas .....	38
Tabela 5 – Composição mineralógica das argilas .....	39
Tabela 6 – Teores de substituição de lodo na mistura de argilas utilizados na produção de blocos.....	40
Tabela 7 – Limites de Atterberg das misturas constituídas com diferentes teores de lodo.....	44
Tabela 8 – Teor de umidade usado para a produção de peças cerâmicas com diferentes teores de WTS.....	49
Tabela 9 – Análise de variância pelo método de Tukey HSD dos valores de resistência à compressão dos blocos para os diferentes teores de lodo.....	51
Tabela 10 – Dados de ensaio de solubilização em amostras calcinadas de blocos com 0 e 10% de lodo .....	53

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ANA** – Agência Nacional de Águas  
**ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
**BET** - Brunauer, Emmett, Teller  
**CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
**DRX** – Difração de Raios-X  
**ETA** - Estação de tratamento de água  
**FRX** – Fluorescência de Raios-X  
**IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
**ICP OES** – Espetroscopia de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente  
**LMCC** – Laboratório de Materiais de Construção Civil  
**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura  
**NBR** – Norma Brasileira  
**PAC** - Cloreto de Polialumínio ou Polialumínio Cloreto  
**PNSB** - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico  
**SS** - Sólidos em suspensão  
**ST** - Sólidos totais  
**UFMS** – Universidade Federal de Santa Maria  
**UTL** – Unidade de Tratamento de Lodo  
**WTS** – Water Treatment Sludge (Lodo de tratamento de água)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRUDUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
3.1 O LODO DE ETA .....	20
<b>3.1.1 Usos do lodo.....</b>	<b>21</b>
3.2 INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA .....	23
<b>3.3.1 Matéria-prima.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.2 Produtos de cerâmica vermelha .....</b>	<b>26</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 ENSAIOS .....	28
4.2 MATERIAIS .....	30
<b>4.2.1 Lodo de estação de tratamento de água .....</b>	<b>30</b>
4.2.1.1 <i>Origem.....</i>	30
4.2.1.2 <i>Beneficiamento e caracterização .....</i>	32
<b>4.2.2 Argila .....</b>	<b>35</b>
4.2.2.1 <i>Origem.....</i>	35
4.2.2.2 <i>Beneficiamento .....</i>	36
4.2.2.3 <i>Caracterização.....</i>	37
4.2.2.4 <i>Coleta da mistura de argila .....</i>	39
4.3 PROCESSO PRODUTIVO.....	40
<b>4.3.1 Objetivo .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.3 Avaliação do processo de extrusão.....</b>	<b>40</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1 EFEITO DO LODO NA PLASTICIDADE E CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS .....	44
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>59</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2008,  $61 \times 10^6$  de metros cúbicos de água potável foram distribuídos no Brasil, onde 93% foram tratados e 70% desse volume foi proveniente de estações de tratamento convencionais (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012; IBGE, 2008). Atualmente, existem diferentes previsões onde se estima que a demanda de água potável aumentará mais de 24% até 2030 (ANA, 2019).

O tipo de tratamento mais utilizado atualmente se baseia nas etapas de captação, coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção (AHMAD (A); AHMAD; ALAM, 2016). Esses processos removem os sólidos em suspensão presentes na água, onde por consequência é gerado um resíduo sólido, que é constituído principalmente por minerais à base de argila e de grãos muito finos (incluindo hidróxidos de alumínio ou hidróxidos de ferro), bem como uma fração de matéria orgânica. A quantidade desse resíduo sólido gerado numa estação de tratamento de água (ETA) é estimada em 2,5% do volume total de água tratada (RICHTER, 2001), e assim, podem ser gerados  $1,875 \times 10^6$  metros cúbicos de resíduo nas próximas décadas, somente no Brasil.

A média na geração deste resíduo sólido, comumente chamado de lodo, em alguns países selecionados é estimada em 2,58 ton seca/ano·capita (DE CARVALHO GOMES et al., 2019). Essas grandes quantidades resultam ser um desafio ambiental para uma disposição final ambientalmente adequada. O lodo é classificado como classe II-A, resíduo inerte, não perigoso (ABNT, 2004a), e o tipo de disposição mais utilizada é em aterros sanitários devido ao baixo custo. No entanto, a aprovação de novas políticas e leis ambientais por diferentes governos, aumentou os gastos associados ao descarte tradicional e, conseqüentemente, intensificou o interesse no desenvolvimento de alternativas visando seu uso como uma nova matéria-prima.

Para a potencial valorização, se avaliou sua reciclagem na agricultura no tratamento de solos (DAYTON; BASTA, 2001; DHARMAPPA; HASIA; HAGARE, 1997; ELLIOTT; DEMPSEY, 1991), onde o alto teor de alumínio pode ser prejudicial à saúde humana, o que limita sua ampla valorização nesta indústria (DASSANAYAKE et al., 2015; KREWSKI et al., 2007). Outras alternativas estudadas estão relacionadas ao seu uso como matéria-prima na produção de materiais de construção civil (DE CARVALHO GOMES et al., 2019; TURNER et al., 2019). Após a aplicação de tratamentos térmicos controlados (em temperaturas entre 600 e 800 °C) é obtido um material cimentício suplementar com certa reatividade (ANDRADE et al., 2019; GODOY et al., 2019, 2020; HAGEMANN et al., 2019; OWAID;

HAMID; TAHA, 2014, 2019; TANTAWY, 2015). Neste sentido, pode ser produzido um cimento com menor impacto ambiental pela substituição parcial do clínquer Portland (até 15%) por lodo termicamente tratado, devido à sua reatividade pozolânica, que aumenta o desempenho desses cimentos compostos (OWAID; HAMID; TAHA, 2014). O lodo também pode ser utilizado na produção de clínquer Portland em forno rotativo (RODRÍGUEZ et al., 2011). Outra nova alternativa de valorização é através de seu uso como fonte de mineral aluminossilicato na produção de cimentos do tipo alcalino-ativado (ou geopolímero) (GERALDO; FERNANDES; CAMARINI, 2017).

No entanto, a principal barreira técnica para a potencial inclusão na indústria do cimento é o teor de água no lodo, que aumenta significativamente a demanda de energia e conseqüentemente o custo para sua reciclagem. O lodo também foi avaliado como agregado de peso leve (com densidades de partículas entre 600 e 2.000 kg/m<sup>3</sup>) quando é sinterizado em altas temperaturas (entre 500 e 1200 °C) (CHEN et al., 2012; HUANG; WANG, 2013; WEI; LIN, 2009). Também foram desenvolvidos materiais mais avançados baseados em nanopartículas (QU et al., 2020). Em outras estações de tratamento de água, onde se utiliza coagulante à base de alumínio (como sulfato férrico de alumínio, poli alumínio, cloreto de hidróxido de alumínio ou alúmen), o lodo é beneficiado por meio de seus tratamentos químicos/térmicos para recuperação de alumínio (OOI et al., 2018).

Outra alternativa em que o lodo poderia ser utilizado é como matéria-prima na indústria cerâmica, para a produção de diversos produtos, entre eles blocos (BENLALLA et al., 2015; DA SILVA et al., 2015; HEGAZY; FOUAD; HASSANAIN, 2012; RAMADAN et al., 2008; RAMIREZ ZAMORA et al., 2008; RAUT; RALEGAONKAR; MANDAVGANE, 2011; TARTARI et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2006a; VICTORIA, 2013; VIEIRA et al., 2008; WENG; LIN; CHIANG, 2003; XU et al., 2014), telhas (CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018), vitrocerâmicas (TOYA et al., 2007), entre outros (KIZINIEVIČ et al., 2013). Tendo em vista que as propriedades finais e qualidade dos produtos são afetadas significativamente pelo teor de lodo, bem como suas características físico-químicas e a temperatura de calcinação, os resultados mostram que a reciclagem do lodo na produção de cerâmicas é viável do ponto de vista técnico. Mesmo quando traços de metais pesados (como Ni, Zn, Cr, Sn, Cu, Pb, Sb, entre outros) possam estar presentes no lodo (SHENG et al., 2018), o encapsulamento desses compostos após a queima durante a produção da cerâmica reduz sua lixiviação para valores inferiores aos limites recomendados pelas normas internacionais (XU et al., 2014).

As características físicas e principalmente químicas do lodo dependem do tipo de processo aplicado e do coagulante utilizado, portanto, o coagulante pode ser considerado o principal contaminante para seu desempenho como matéria-prima na produção de peças cerâmicas. A presença desses coagulantes aumenta a demanda de água para a obtenção de uma plasticidade específica durante o processo de moldagem (KIZINIEVIČ et al., 2013). Os lodos derivados de coagulantes à base de Al apresentam maior redução no desempenho mecânico dos produtos cerâmicos quando comparados aos que são gerados com coagulantes à base de Fe (TEIXEIRA et al., 2006a). A presença do contaminante Fe dos lodos, também intensifica a coloração vermelha e/ou mais escura do produto (KIZINIEVIČ et al., 2013). Por outro lado, as águas tratadas de rios ou efluentes naturais apresentam características distintas ao longo das estações do ano e os subsequentes lodos gerados apresentam também propriedades físico-químicas distintas (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2017; TEIXEIRA et al., 2011).

De acordo com fontes bibliográficas, a inclusão de lodo na mistura em verde utilizada para a produção de cerâmicas, leva a uma redução significativa do desempenho mecânico, bem como aumenta a porosidade do produto final pós-queima. Em baixos teores de lodo é identificado um reduzido efeito deletério, onde o desempenho mecânico ainda está dentro dos limites exigidos pelas normativas. Portanto, existem diferentes estudos onde os valores recomendados estão entre 10% (TEIXEIRA et al., 2011; VIEIRA et al., 2008), 15% (DA SILVA et al., 2015), 20% (TEIXEIRA et al., 2006a), ou mesmo 30% em peso (BENLALLA et al., 2015), com temperaturas de queima entre 800 e 1000 °C. De acordo com Ramadan *et al.* (RAMADAN et al., 2008), a temperatura de queima deve ser mais elevada em maiores teores de lodo devido ao menor teor de SiO<sub>2</sub> e maior teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Do ponto de vista técnico, não é totalmente compreendido como o lodo modifica a plasticidade e consistência da mistura em verde e seu desempenho durante o processo de extrusão. A maioria dos estudos utilizou a moldagem por prensagem para a produção dos produtos cerâmicos (AHMAD (B); AHMAD; ALAM, 2016; MYMRIN et al., 2017; TARTARI et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2006a, 2011; TOYA et al., 2007; VIEIRA et al., 2008; XU et al., 2014) ou mesmo a moldagem manual (VICTORIA, 2013) e poucos trabalhos avaliaram os tijolos obtidos por processo de extrusão (BENLALLA et al., 2015; CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; DA SILVA et al., 2015; TARTARI et al., 2011).

A produção de blocos e outros produtos cerâmicos são comumente produzidos por processos de extrusão devido à sua eficiência (GUILHERME; RIBEIRO; LABRINCHA, 2009). As propriedades do fluxo de extrusão dependem principalmente da reologia do



material. A mineralogia, a umidade da mistura de argila, sua distribuição granulométrica, a presença de aditivos, bem como a matéria orgânica, desempenham um papel importante no desempenho deste processo (HANDLE, 2007). A presença de lodo (em diferentes teores) pode modificar o comportamento reológico da mistura de argila e sua plasticidade (propriedade que permite que a mistura mude de forma sem falha ou ruptura). O teste mais tradicional aplicado devido a sua facilidade e baixo custo são os limites de Atterberg, que têm sido amplamente utilizados para a classificação de solos. Este teste, embora empiricamente, também foi aplicado para a correlação dentro do processo de moldagem. No entanto, a caracterização detalhada da trabalhabilidade, ou mesmo um índice de plasticidade, pode ser estimada ou prevista com mais precisão através de medidas reológicas (BARAN et al., 2001; PERROT et al., 2012).

O presente trabalho busca avaliar como o lodo pode ser potencialmente usado como matéria-prima para a produção de blocos cerâmicos estruturais. Foram avaliados diferentes teores de substituição de lodo (entre 0, 2, 5, 10 e 20% em peso) dentro da mistura, na qual foi otimizada a umidade por meio de medições reológicas, a fim de alcançar um processo de extrusão adequado para a produção de blocos em escala reduzida de alta qualidade (sem defeitos visuais). Foi determinada a retração linear dos produtos após os processos de secagem e queima. Também foram determinadas propriedades físico-mecânicas (incluindo absorção de água, densidade aparente e resistência à compressão) para os produtos finais.

Como resultados da presente pesquisa, parte dos resultados compuseram um artigo científico intitulado “*Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties*” (DOI: s11527-021-01764-0) na revista *Materials and Structures* (<https://www.springer.com/journal/11527>; IF: 3.428). O artigo foi submetido em 19 de março de 2021 e aceito no dia 27 de julho de 2021.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito, assim como a viabilidade técnica da adição de lodo de estação de tratamento de água nas propriedades físico-químicas e mecânicas em peças de cerâmica vermelha.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Correlacionar dados obtidos com diferentes teores de lodo e umidade combinados por meio de ensaios reológicos;
- Avaliar a influência de diferentes teores de lodo quanto a propriedades mecânicas dos blocos fabricados;
- Identificar um teor ótimo de lodo e de umidade para a fabricação de blocos cerâmicos estruturais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

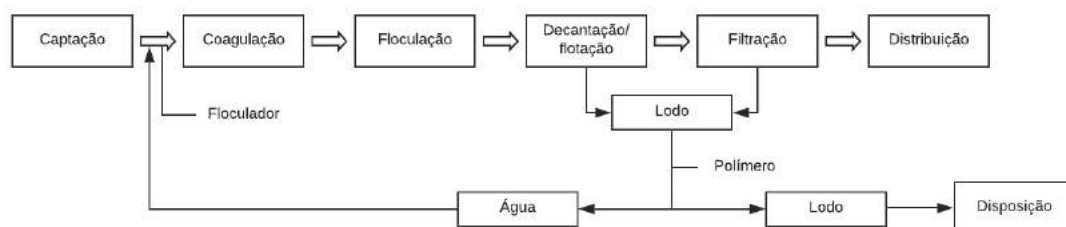
No ano de 2008, dos cerca de 61 milhões de m<sup>3</sup> de água distribuídos no Brasil, em torno de 93% deste volume possuía tratamento, sendo que aproximadamente 70% do volume tratado provinha de estações de tratamento de água convencionais, comumente chamadas de ciclo completo (IBGE, 2008). Neste âmbito, a demanda por água no Brasil é crescente, onde se prevê que até o ano de 2030 haja um aumento no consumo na ordem de 24%, podendo chegar à ordem de 75 m<sup>3</sup> de lodo (ANA, 2019).

O tratamento de água em estações de tratamento convencionais é feito na maioria das vezes utilizando o processo de coagulação química. Na etapa inicial do tratamento, logo após a chegada à estação de tratamento, é adicionado à água captada do manancial um agente coagulante, tendo por objetivo a agregação dos sólidos suspensos e partículas coloidais.

As etapas que seguem ao tratamento, a coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração, visam a remoção das partículas agregadas dando à água propriedades de potabilidade exigíveis pela resolução 357 do CONAMA (CONAMA, 2005).

Assim, a remoção dos sólidos suspensos presentes na água captada do manancial gera grandes quantidades de lodo. O método de tratamento empregado, que deveria ser de acordo com as características da água captada, no Brasil é generalizado e as estações de tratamento de água são em sua maioria do tipo convencional, sendo as etapas mostradas conforme a Figura 1.

Figura 1 – Etapas do tratamento de água em ETAs convencionais



Fonte: a Autora.

O Brasil atualmente conta com a Agência Nacional de Águas (ANA) que é uma instituição de grande importância que juntamente com o Sistema Nacional de Informações de

Saneamento (SNIS), o Ministério do Meio Ambiente e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) trazem dados quanto a tais parâmetros no Brasil.

Neste sentido, o tratamento de água convencional gera uma quantidade considerável de lodo podendo chegar a níveis de 100.000 t/ano de lodo (AHMAD (B); AHMAD; ALAM, 2016). Medidas de disposição e destinação ambientalmente corretas devem ser empregadas, minimizando possíveis danos ambientais e potencializando a reciclagem do resíduo como matéria-prima para setores como a construção civil.

### 3.1 LODO DE ETA

Durante o tratamento que visa a potabilização da água para fins de consumo, há a geração de resíduos (RETA – resíduo de estação de tratamento de água), comumente denominados lodos (LETA – Lodo de estação de tratamento de água).

A formação do lodo inicia após a adição do agente coagulante colocado na água, logo na chegada a estação de tratamento. A coagulação é a etapa onde há a desestabilização de colóides, ou partículas coloidais com diâmetro entre 0,1 e 0,001  $\mu\text{m}$ . (TEIXEIRA et al., 2006b), desta forma, o coagulante atua estabelecendo uma afinidade entre as partículas, fazendo com que as mesmas se agreguem.

A agregação dos sólidos suspensos acontece na etapa seguinte do tratamento, nos tanques floculadores. Na etapa de decantação ou flotação, dependendo da configuração da ETA, é onde há a acumulação do maior volume de lodo com uma concentração de sólidos totais na ordem de 1.000 a 40.000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . A água é então dirigida aos filtros onde as partículas ainda presentes na água ficam retidas, gerando o maior volume de lodo devido limpeza dos filtros, com uma concentração de 40 a 1.000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (RICHTER, 2001).

A disposição do lodo por parte das empresas geradoras do resíduo desencadeia custos elevados, além dos custos relativos ao transporte e aos danos ambientais ocasionados. Dentre as formas de disposição citam-se o lançamento em cursos de água, lançamento no mar, lançamento na rede de esgotos, lagoas, aplicação no solo e em aterros sanitários (RICHTER, 2001).

Justamente pelo fato de que o lodo de ETA é classificado como um resíduo sólido, é necessário que haja uma destinação ambientalmente adequada, visto que o mesmo possui componentes que quando em contato com o solo ou lançado em mananciais prejudica a vida aquática e compromete a qualidade da água do local (TEIXEIRA et al., 2006b).

### 3.1.1 Usos do lodo

A disposição do lodo gerado nas estações de tratamento de água causa elevados custos às empresas que prestam o serviço de tratamento devido às características físicas e químicas do resíduo em questão. O lodo é o resultado da aglomeração de colóides, onde são utilizados compostos químicos na água bruta, fazendo com que as partículas de unam.

Por meio da caracterização física a granulometria do lodo de ETA Ghaziabad, na Índia, que trata a água proveniente do rio Ganges, possui cerca de 60% de areia fina, 24% de silte e 16% de argila. Quimicamente, o lodo é composto de 52,78% de sílica, 14,38% de alumina, 5,20% de cal e 4,39% de óxido férrico. Considerando tais dados, os autores discorrem sobre a busca por alternativas viáveis e ambientalmente corretas para a disposição do lodo, citando trabalhos em que foram desenvolvidos produtos utilizando o lodo de ETA como matéria-prima (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016a).

Uma das alternativas para o uso do lodo é seu uso como matéria-prima para produtos da construção civil. Neste sentido foram desenvolvidos estudos para viabilizar tecnicamente tais usos e desenvolvimento de métodos para sua utilização.

Um dos estudos decorrentes deste viés é a utilização de lodo de ETA para a fabricação de peças de concreto intertravado, onde se observou que houve significativas alterações nas propriedades analisadas com o aumento da inserção de lodo sem nenhum beneficiamento. A resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a massa específica decresceram na medida que se aumentou a porcentagem de lodo adicionado, enquanto que a absorção de água aumentou. Recomenda-se que para a utilização do lodo na fabricação de peças intertravadas de concreto, a adição de lodo se limite a valores na ordem de 5%, visto que teores acima de 8% são inviáveis tecnicamente devido ao teor de umidade presente no lodo (FERNANDEZ et al., 2018).

A crescente demanda de materiais de uso na construção civil, desencadeia no setor produtivo um demanda mais acentuada por matérias-primas. Exemplo recorrente desta demanda pode ser visto na indústria da cerâmica vermelha que tem como principal matéria-prima a argila, onde são buscados materiais alternativos para a incorporação junto à matriz argilosa para a fabricação de peças (SOUZA et al., 2008).

Neste sentido, foi analisada a influência da incorporação de lodo de ETA na fabricação de blocos cerâmicos quanto ao aumento da liberação de poluentes atmosféricos, como de CO<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>. Foram analisadas as adições de lodo na ordem de 0%, 15% e 100%, onde se

observou que há um aumento de liberação dos gases analisados diretamente proporcional ao aumento da proporção de lodo inserida na mistura. Entretanto, não foi quantificado acima de qual valor não seria aconselhável à adição de lodo de ETA quanto à poluição atmosférica (SOUZA et al., 2008).

Um estudo conduzido com a incorporação de lodo de ETA juntamente à uma combinação de argilas mais e menos plásticas, mostrou que o lodo pode ser adicionado como matéria-prima para a fabricação de blocos cerâmicos até valores na ordem de 8%. Acima disso, há aumentos significativos referentes à porosidade do material, absorção de água das peças, retração e aparecimento de trincas. (TARTARI et al., 2012)

Os diferentes tipos de flocculantes utilizados durante o tratamento da água, influenciam diretamente nas características físicas e mecânicas de peças produzidas. De um modo geral, a adição de lodo acarretou numa maior absorção de água nas peças, além de diminuir a resistência à compressão das mesmas. Peças produzidas com lodos gerados a partir do uso de cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) como coagulante, é recomendada a adição abaixo de 20%. Neste viés, quando o coagulante utilizado é de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), recomenda-se a adição de no máximo 10% do lodo (TEIXEIRA et al., 2006b).

Por meio da caracterização física, química e mineralógica, o lodo pode receber determinado beneficiamento, como sua calcinação, por exemplo. Entretanto, o processo seja oneroso, sendo similar ao da produção de metacaulim, o que torna o aspecto econômico da viabilização do uso de um subproduto pouco interessante, por mais que este talvez seja a forma mais adequada e simplificada para o controle de suas propriedades (SANTOS; MELO FILHO; MANZATO, 2018).

A utilização de resíduos para a produção de peças cerâmicas já é algo pesquisado e relativamente difundido no meio acadêmico. Entretanto, apesar de estudos terem sido realizados, existe resistência por parte das empresas e dos próprios consumidores ao questionar a fabricação de produtos utilizando-se resíduos de vários setores. A falta de normativas, de incentivo às empresas que absorveriam os resíduos de outras esferas de produção e a difusão de novas práticas, dificulta a reprodução de produtos desenvolvidos em laboratórios para sua fabricação em escala industrial e comercialização (ZHANG, 2013).

Analisou-se também sob o ponto de vista químico, a influência da incorporação de lodos de ETA e de ETE para a fabricação de cerâmicas, sob o viés da composição química dos mesmos, principalmente relativo à alumina e a sílica presentes nas argilas e lodos. O estudo apontou que ambos lodos poderiam ser utilizados como matérias primas para a

fabricação de cerâmicas desde que se utilizassem proporções de sílica entre 14 e 26% e de alumina entre 22,5 e 45% (XU; ZOU; LI, 2008).

### 3.2 INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

A indústria de cerâmica é considerada a mais antiga atividade desenvolvida pelo homem com fins industriais e todos os produtos de cerâmica possuem uma relevante significância no desenvolvimento do homem moderno (KONTA, 1995). Historicamente, datam-se cerâmicas usadas como artefatos domésticos de 12000 à 4000 a.C., sendo objeto de estudo de muitos pesquisadores e fornecendo dados acerca da evolução do homem e domínio de técnicas (KAZMIERCZAK, 2007). A base para a fabricação de peças de cerâmica provém da utilização da argila como matéria-prima principal, submetendo a peça fabricada a um tratamento térmico onde o material adquire propriedades mecânicas de resistência, devido às transformações químicas e físicas que ocorrem com a argila (VERÇOSA, 2008).

A argila é tida como protagonista no desenvolvimento da humanidade e seu uso não se limita somente à concepção de utensílios domésticos e se estende a diversos setores econômicos como agricultura, engenharia e em estudos ambientais (KONTA, 1995).

Os tijolos estão entre os materiais mais utilizados dentro da construção civil. Eles podem ser fabricados a partir da extrusão, secagem e queima da argila ou produzidos mediante o uso cimento Portland. Entretanto, a demanda de tais materiais exigidos pela construção civil não acompanha a lógica do desenvolvimento sustentável, onde países já restringem a sua fabricação devido a poluição atmosférica do processo de queima, no caso dos tijolos de cerâmica vermelha, e no caso dos blocos de concreto, devido aos poluentes emitidos na fabricação do cimento. Neste sentido, buscam-se alternativas quanto à fabricação de produtos tecnologicamente sustentáveis (ZHANG, 2013).

#### 3.3.1 Matéria-prima

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire quando umedecido com água, certa plasticidade. As argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (SANTOS, 1989). Pode ser entendida como o solo fruto da ação do intemperismo atuante sobre as rochas ao longo dos anos e classificadas de acordo com o processo que as originou, sendo residuárias quando permanecem em locais próximos à rocha-mãe e sedimentares quando por meio da ação dos

ventos e da água são transportadas a lugares distantes da rocha-mãe, formando depósitos (VERÇOSA, 2008).

Os processos de intemperismo em rochas podem se dar de duas formas: o intemperismo químico, onde a degradação da rocha em partículas de tamanho menores devido a transformações químicas que acontecem no material ocasionadas por algum agente externo, como por exemplo a ação da água. O intemperismo físico é também a degradação da rocha-mãe em fragmentos menores, porém sob a ação de algum fenômeno físico, como a ação dos ventos ou a variação térmica (FLORIANO, 2016).

Os constituintes básicos das argilas são os argilominerais. Estes são tidos como silicatos hidratados de alumínio, arranjados na forma mais abundante como lamelas (sheet) hexagonais e em estruturas fibrosas bem menos recorrentes. A forma como são arranjados os átomos na estrutura dos argilominerais confere à argila propriedades que definem seu comportamento na presença de água (SANTOS, 1989).

Pesquisadores, ao longo dos anos, elaboraram uma lista com os argilominerais mais recorrentes na superfície terrestre. A sua influência perante o comportamento das argilas como matéria-prima para indústrias de diversos setores e como solo enquanto material de construção civil pôde ser corroborada e hoje o conhecimento de quais são os constituintes básicos da argila ou do solo são tidos como fundamentais perante o uso sobre o qual se deseja empregar.

Neste cenário, existem três argilominerais que se destacam enquanto grupo e enquanto representantes principais de um grupo, que são o grupo das caulinitas, montmorillonita (pertencente ao grupo das esmectitas) e a illita (SANTOS, 1989). A seguir, são trazidas as principais informações quanto à cada argilomineral destacado.

- Caulinitas: Estruturalmente a caulinita é formada por folhas octaédricas de alumina e folhas tetraédricas de sílica dispostas alternadamente e que possuem teoricamente a fórmula  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$  (MURRAY, 1991; PRASAD; REID; MURRAY, 1991; SANTOS, 1989). A sua composição se aproxima dos valores de 46% de  $SiO_2$ , 40% de  $Al_2O_3$  e 14% de  $H_2O$  (MURRAY, 1991; PRASAD; REID; MURRAY, 1991).

Um tipo de argila rico no argilomineral caulinita é o caulim, que é principalmente empregado nas indústrias de papel, cerâmica branca, pintura e plástica. O caulim entra em fusão em temperaturas em torno de 1850 °C, adquirindo cor branca, parâmetros importantes para seu uso na indústria cerâmica como matéria-prima.

- Esmectitas: Esmectita é o nome dado ao grupo de alumino silicatos de sódio, cálcio magnésio, ferro e lítio, de estrutura trifórmica ou 2:1, onde duas camadas tetraédricas de sílica



são unidas por uma camada octaédrica de alumina (MURRAY, 1991; SANTOS, 1989). Geralmente possuem flocos finos e granulação fina, que dão ao material uma elevada superfície específica, apresentam características físicas e químicas bem diferentes dos demais. Por possuírem partículas de tamanho extremamente pequeno e grande área superficial, quando recebem a adição de água, possuem alta plasticidade (MURRAY, 1991).

Na presença de água se expandem podendo aumentar em até 10 vezes o seu tamanho (SANTOS, 1989), por isso são chamadas de argilas expansivas. Argilas que possuem argilominerais do grupo das esmectitas são muito porosas. A alta capacidade de adsorção é caracterizada pela grande área específica e não somente pelas moléculas de água, mas também pelos vários íons ocorrendo na água (KONTA, 1995).

Em altas temperaturas, geralmente acima de 1000 °C, são formadas novas fases cristalinas, que são importantes para as cerâmicas. Junto à formação de novas fases, ocorre a vitrificação. As novas fases e a composição da porção vitrificada podem ser previstas se são conhecidas as composições química e física (KONTA, 1995).

Os principais usos das esmectitas são em fluídos para perfuração, como selante em diversas aplicações na engenharia e produtos químicos para a agricultura (MURRAY, 1991).

A fração de argila é geralmente associada aos argilominerais, principais responsáveis pela plasticidade em materiais argilosos (VIEIRA; SÁNCHEZ; MONTEIRO, 2008). As lamelas hexagonais dos argilominerais se empilham de maneira a formar estruturas mais complexas que possuem maior ou menor afinidade com a água, garantindo uma maior facilidade de expulsar a água de seu interior. A água que se acumula entra as lamelas dos argilominerais lubrifica a interação entre os grãos e faz com que o material adquira plasticidade.

A plasticidade, no caso das argilas, é a capacidade de ser moldada e trabalhada, sendo comumente associada à trabalhabilidade, ductilidade e extrudabilidade (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011). Neste sentido, a plasticidade em argilas é entendida também como a capacidade de o material úmido se deformar, sem romper, quando submetido à determinada aplicação de força, e quando esta é cessada, o material permanece deformado (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011; SANTOS, 1989). A plasticidade depende do formato, tamanho e comportamento dos grãos, presença de outros materiais além dos argilominerais (VERÇOSA, 2008).

Em argilas e solos, a plasticidade é determinada pelos limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, conhecidos como limites de Atterberg ou limites de consistência do solo (SANTOS, 1989). O limite de liquidez é tido como a quantidade de água

acima do qual a argila flui, se comportando como um líquido (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011).

O limite de plasticidade corresponde a quantidade de água necessária para que a argila possua uma consistência plástica, sendo possível moldá-la (VIEIRA; SÁNCHEZ; MONTEIRO, 2008). O índice de plasticidade é associado à faixa na qual o material fica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011; VIEIRA; SÁNCHEZ; MONTEIRO, 2008).

Argilas que apresentam índice de plasticidade abaixo de 10% não são indicadas a servirem de matéria prima para a produção de produtos para a construção civil devido ao risco de apresentarem problemas durante o processo de extrusão (VIEIRA; SÁNCHEZ; MONTEIRO, 2008). Dentre as principais características relativas à aplicação de argilominerías estão a granulometria, composição química, forma dos grãos, área superficial e outras características físicas e químicas que variam de acordo com a aplicação, como plasticidade, cor, resistência pós-secagem e pós-queima. (MURRAY, 1991).

### **3.3.2 Produtos de cerâmica vermelha**

No início do século 20 se iniciou a fabricação de tijolos e outros produtos de cerâmica vermelha, onde a produção de peças passa pelos processos de extração da argila, beneficiamento, extrusão, secagem, queima, seleção e embalagem (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2009).

O processo se inicia com a escolhas das matérias-primas, visto que as etapas que procedem na produção dependem fortemente das características da matéria-prima. Na sequência é necessário dispor de uma infraestrutura adequada para a maturação das matérias-primas e que ao mesmo tempo não interfira negativamente na logística do transporte e do beneficiamento.

A mistura, moagem, destorroamento e laminação são as etapas onde há a homogeneização das matérias-primas e onde há a diminuição do tamanho das partículas, preparando a matriz cerâmica. A extrusão é a passagem forçada e contínua do material por um molde que dá a forma específica à peça, sendo cortada na sequência, do comprimento desejado.

A secagem é definida como uma etapa da fabricação que envolve simultaneamente, transferência de calor, de massa e variações volumétricas. Quanto maior o teor de umidade

inicial das peças, maior a retração observada nas mesmas (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2009).

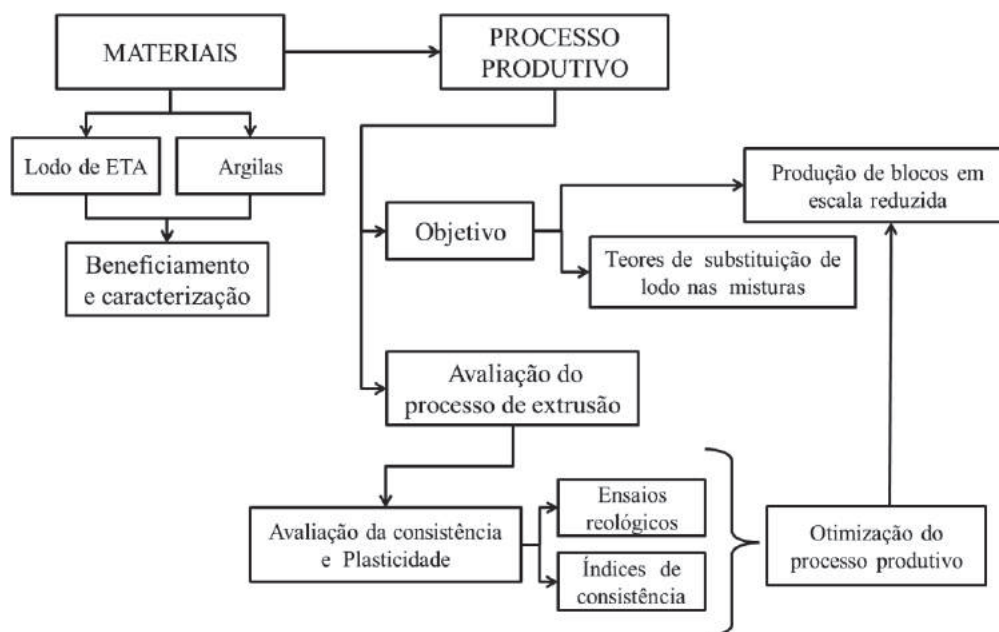
O processo de secagem possui vital importância frente as etapas subsequentes para os produtos de cerâmica vermelha, visto que é nesta etapa há a redução do teor de umidade das peças e onde o que se deseja retirar a água apresenta logo após a conformação das peças. Neste sentido, os espaços ocupados no interior das peças pela água, com a expulsão da mesma, se tornam vazios e tendem à contração, causando a retração volumétrica das peças. Devido à isto tal etapa se torna primordial durante o processo de fabricação, visto que se a secagem não for realizada de forma lenta, gradual e com o controle da temperatura, poderá acarretar na formação de trincas nas peças e causando a perda do lote produzido (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2009).

A queima de peças de argila produz uma série de mudanças mineralógicas, estruturais e físicas, que dependem de fatores como porosidade, granulometria, variações de composição concentração de fases minerais (CULTRONE et al., 2004). Em argilas ricas em matéria orgânica em que se usaram duas técnicas de queima, uma mais rudimentar (pit firing) e outra mais tecnológica (kiln firing) observou-se que como as matérias primas foram submetidas a diferentes processos de aquecimento, houveram significativas mudanças no núcleo cerâmico (MARITAN et al., 2006).

As argilas com carbonatos promovem a formação de fissuras e poros na ordem de 1  $\mu\text{m}$  de tamanho quando os tijolos são queimados numa temperatura entre 800 e 1000  $^{\circ}\text{C}$ . A ausência de carbonatos resulta numa contínua redução da porosidade e num significativo aumento na fração de poros com raio  $> 1 \mu\text{m}$  à medida que a temperatura de queima aumenta os pequenos poros se unem. Em resumo o estudo mostrou que em argila com carbonatos há um aumento da formação de microporos e fissuras e uma queda na resistência aos sais e ao gelo e degelo, devido à fundição parcial dos componentes. Em argilas sem carbonatos há um aumento dos macroporos, uma diminuição da porosidade com o aumento da temperatura, menor interconecção entre os poros, resultando em uma durabilidade maior devido à elevada fundição do componentes (CULTRONE et al., 2004).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 2 – Fluxograma esquemático da metodologia



Fonte: a Autora.

### 4.1 ENSAIOS

Os ensaios utilizados ao longo da caracterização dos materiais e amostras estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização das matérias-primas e dos materiais produzidos

Ensaio	Objetivo	Equipamento	Laboratório	Parâmetros ou normas
Granulometria por difração à laser	Determinar a distribuição de tamanho de partículas	PSA 1090 L Anton-Paar	Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (LINCE-UFRGS)	Meio líquido água destilada. Dispersão por ultrassom durante 120 segundos. Método de medição através da teoria Fraunhofer (CYR; TAGNIT-HAMOU, 2001)
Fluorescência de raios X (FRX)	Determinar a composição química quantitativa dos materiais	Espectrômetro de fluorescência de raios-X com energia dispersiva marca Bruker, modelo S2 Ranger	LACAMI - Laboratório de Caracterização Microestrutural)	Screaming de Na a U com contagem percentual dos fótons do elemento em amostras em pó.
Termogravimetria (ATG/DTA)	Avaliar a perda de massa com o aumento da temperatura em função do tempo.	Analizador térmico simultâneo STA (TGA/DTA) Netzsch STA 449 F3 Jupiter	Instituto de Materiais Cerâmicos (IMC - UCS)	Velocidade de aquecimento de 10 °C por minuto, até 1000 °C, cadinho de alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), gás de purga Nitrogênio (50 mL/min).

Ensaio	Objetivo	Equipamento	Laboratório	Parâmetros ou normas
Difração de raios X (DRX)	Identificar a presença dos principais minerais cristalinos.	Difratômetro de raios-X Bruker modelo D8 Advance	Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM – UFSM)	Tipo de radiação de Cu K $\alpha$ , com filtro de Ni, passo de 0,020° num intervalo 2 $\theta$ entre 5°-65° e uma velocidade de 1,7 s/passos, com a amostra girando a 30 rpm. O <i>divergent slit</i> de 0,2 foi utilizado depois do tubo e uma fenda Soller 2,5 antes do detector.
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Investigar a superfície do material à nível microestrutural através de imagens.	Microscópio eletrônico de varredura marca Jeol, modelo JSM 6360, equipado com modelo QUEST da fabricante ThermoSystem	Laboratório de Microscopia (MEV)	Análise elementar espectroscópica de raios-X por energia dispersiva (EDS)
Massa específica	Determinar o volume ocupado por certa quantidade de massa.	Frasco volumétrico de Le Chatelier	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)	NBR 16605 (ABNT, 2017a)
Matéria Orgânica	Determinar a quantidade de matéria orgânica presente nos materiais.	Forno mufla	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)	NBR 13600 (ABNT, 1996)
Obtenção de extrato lixiviado de resíduo sólido	Determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator		LAQUA – Laboratório de Análises Químicas e Ambientais	NBR 10005 (ABNT, 2004b)
Limite de liquidez	Determinar o teor de umidade onde o solo passa do estado plástico para o estado líquido.	Aparelho Casagrande, cápsulas de porcelana, balança, estufa, espátulas	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)	NBR 6459 (ABNT, 2016a)
Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade	Determinar o teor de umidade no qual o solo passa do estado sólido ao regime plástico.	Cápsulas de porcelana, balança, estufa, espátulas, gabarito e placa de vidro esmerilhada	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)	NBR 7180 (ABNT, 2016b)
Teor de umidade	Determinar a quantidade de água presente nos materiais	Cápsulas e estufa	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)	NBR 6457 (ABNT, 2016c)
Superfície específica através da técnica da teoria de Brunauer-Emmett-Teller (BET)	Importante teoria para o cálculo da área específica superficial dos materiais.	Equipamento Quantachrome, da marca Quadrasorb evo, utilizando o software QuadraWin	LACAMI - Laboratório de Caracterização Microestrutural	Adsorção de Nitrogênio a 77 K.
Retração linear	Verificar a variação nas dimensões do material após processo de secagem e queima.	Paquímetro	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC - UFSM)	NBR 15270-2 (ABNT, 2017b)

Ensaio	Objetivo	Equipamento	Laboratório	Parâmetros ou normas
Índice de absorção de água	Quantificar a água absorvida pelo material em determinado tempo.	Recipientes impermeáveis, sala climatizada e estufa	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC - UFSM)	NBR 15270-2 (ABNT, 2017b)
Índice de absorção de água inicial	Quantificar a água absorvida pelo material em determinado tempo.	Balança, termômetro, estufa, reservatório de água, régua, apoios e ganchos	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC - UFSM)	NBR 15270-2 (ABNT, 2017b)
Resistência à compressão	Determinar a resistência à compressão.	Instron 1500HDX	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC - UFSM)	NBR 15270-2 (ABNT, 2017b)

Fonte: a Autora

## 4.2 MATERIAIS

### 4.2.1 Lodo de estação de tratamento de água

#### 4.2.1.1 Origem

Coletado em uma estação de tratamento de água, Rio Grande do Sul, Brasil, com uma capacidade de tratamento de 220 L/s, o lodo de estação de tratamento de água é proveniente de um sistema convencional de tratamento.

A captação da água é feita em um ponto do Rio Vacacaí, distante em torno de 20 km da ETA. Ao chegar na estação de tratamento e passar pela calha Parshall, onde também é medida a vazão de entrada, é feita a pré-cloração da água bruta a partir da adição de Cloreto de Polialumínio (PAC), coagulante empregado pela empresa. A coagulação é a etapa na qual acontece desestabilização dos colóides, estabelecendo afinidade entre as partículas e promovendo o agrupamento das mesmas.

Na etapa seguinte, acontece a floculação, por meio de 6 tanques floculadores, onde o agrupamento entre as partículas ocorre efetivamente. Posteriormente a água é encaminhada aos dois decantadores com um volume total de 1855 L, onde por ação da gravidade, os flocos precipitam e se acumulam no fundo dos mesmos. A água é coletada por meio de calhas e é então dirigida aos filtros de areia de fluxo descendente, finalizando o tratamento e sendo conduzida aos reservatórios para posterior distribuição à população atendida. A sedimentação das partículas presentes na água é feita em dois tanques (sendo usado o coagulante cloreto de polialumínio, PAC).

O lodo, portanto, é o resíduo proveniente da sedimentação das partículas presentes na água bruta, que se agrupam e, pela ação da gravidade, se depositam nos decantadores. A remoção final das partículas que não ficaram depositadas nesta fase é efetivada nos filtros descendentes.

No ano de 2016 a empresa instalou uma unidade de tratamento de lodo (UTL) junto à ETA, que é composta basicamente por etapas que visam a retirada da água que compõe o lodo, e diminuir o volume do mesmo. O conjunto envolve o tanque de equalização de aproximadamente 600 m<sup>3</sup> para onde o lodo é encaminhado após a lavagem dos decantadores, que ocorrem a cada ~60 dias, e limpeza dos filtros. Após a passagem pelo tanque de equalização, é adicionado ao lodo o copolímero de acrilamida catiônico Rapfloc 30, fazendo com o sobrenadante seja separado em duas fases.

Posteriormente, o lodo é direcionado à bags geossintéticos, para a separação da fase sólida da líquida, onde o material coletado é desidratado no interior dos bags, com a aplicação de uma pressão por meio de uma bomba de 20 cv com altura manométrica de 2,5 m, e a água excedente retorna ao início do processo por um sistema de recirculação. Ressalta-se que o lodo obtido desta etapa é chamado de “*lodo desidratado*”, o qual apresenta uma alta concentração de sólidos totais, porém com um teor de umidade em torno de 220%. O lodo é estocado por um período aproximado de ~70 dias, sendo posteriormente disposto em aterros sanitários por uma empresa terceirizada.

A amostra coletada passou por este mesmo processo, sendo estocada em um bag geotêxtil de 1000 L de capacidade. Portanto, a amostra coletada para este estudo provém do resíduo depositado nos decantadores por dois meses (entre setembro e novembro de 2019) aproximadamente. Deste montante, uma amostra homogeneizada de 500 L foi coletada e armazenada em recipientes plásticos lacrados.

Figura 3 – Bag geotêxtil utilizado para armazenagem do lodo



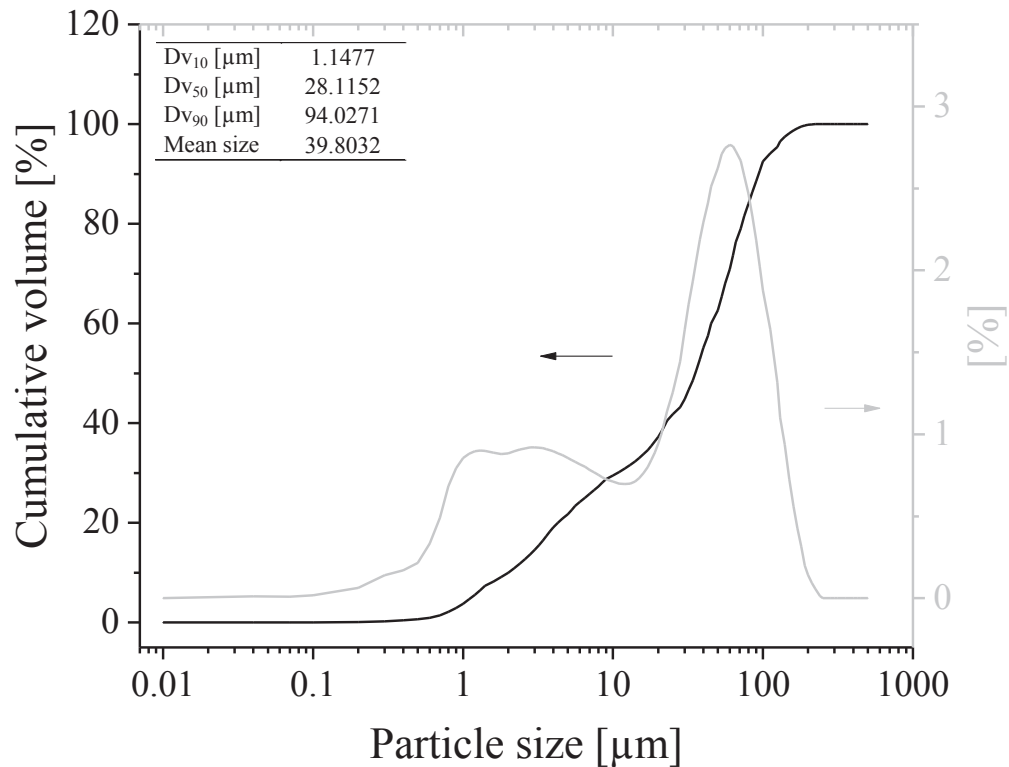
Fonte: a Autora.

#### *4.2.1.2 Beneficiamento e caracterização*

A amostra estava inicialmente com uma umidade de 220% em peso (ABNT, 2016c). O lodo foi seco naturalmente em condições ambientais (amostra espalhada a  $27 \pm 2$  °C e umidade relativa de 60% por um período de 72 h). Em seguida, foi seco a 60 °C por 24 h e moído manualmente em almofariz de ágata. Foi realizado ensaio de microscopia eletrônica de varredura na amostra preparada (Figura 6), onde se observa uma amostra de partículas heterogêneas e com elevada superfície específica. O material seco obtido exibiu um tamanho médio de partícula de 39,80  $\mu\text{m}$ ;  $dV(90)$  de 94,02  $\mu\text{m}$  (determinado por difração de laser como é mostrado na Figura 4) e um B.E.T. área de superfície (obtida pelo método Brunauer-Emmett-Teller em Micromeritics ASAP2020N Área de Superfície, usando  $\text{N}_2$  e 77 K durante aproximadamente 6 h para desgaseificação) de 50.93  $\text{L m}^2 / \text{g}$ .



Figura 4 – Distribuição de tamanho de partículas pelo método de difração à laser



Fonte: a Autora

Com base na composição química e lixiviação dos metais tóxicos (Tabela 2), o lodo é classificado como resíduo classe II, não inerte, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a). A fração mineral é constituída por quartzo, caulinita, olivina e anatase como é mostrado no difractograma de raios-X (Figura 5A) e como constam os resultados na Tabela 3. Esses resultados estão alinhados a outros trabalhos (HAGEMANN et al., 2019; OOI et al., 2018; OWAID; HAMID; TAHA, 2014; TURNER et al., 2019). O lodo exibiu uma perda de massa total até 1000 °C de 57,47% (Figura 5B) devido à presença de água livre e desidroxilação da caulinita como é identificado pelos picos a 92 e 452 °C no DTG, respectivamente.

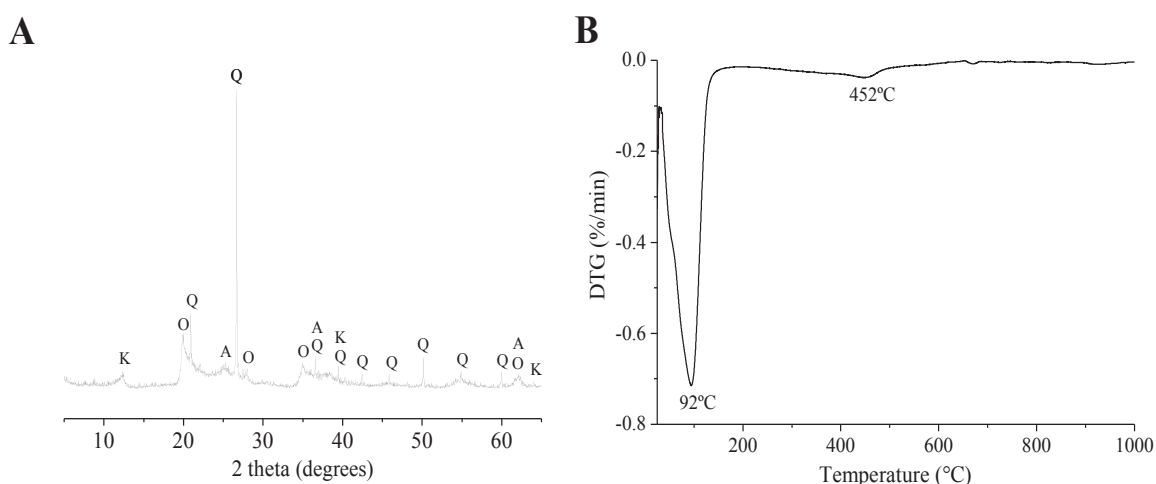
Tabela 2 – Composição química, lixiviação e solubilização do lodo

Composição química (%)	Teor (mg/L)					
	Lixiviação		Solubilização		Valores limites da NBR para lixiviação (ABNT, 2004b)	Valores limites da NBR para solubilização (ABNT, 2004c)
SiO <sub>2</sub>	42.36	Ag	<0.010	0.1	--	--
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.70	Al	--	--	0.602	0.200
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.64	As	<0.010	1.0	<0.010	0.010
SO <sub>3</sub>	0.58	Ba	0.585	70.0	0.510	0.700
CaO	0.57	Cd	<0.010	0.5	<0.005	0.005
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.29	Cl	--	--	24.43	250.0
K <sub>2</sub> O	1.40	Cu	--	--	<0.010	2.000
TiO <sub>2</sub>	1.07	F <sup>-</sup>	0.740	150.0	--	1.500
MgO	0.36	Fe	--	--	0,526	0,300
ZrO <sub>2</sub>	0.04	Mn	--	--	2,961	0,100
ZnO	0.03	Pb	<0.010	1.0	<0.010	0.010
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	--	--	--	--	--
MnO	0.11	--	--	--	--	--
Outros*	0.11	--	--	--	--	--
L.O.I.**	19.69	--	--	--	--	--

\*Correspondente à Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag<sub>2</sub>O, SrO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, Br, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO e ThO<sub>2</sub>.

\*\*Perda de massa até 950 °C.

Figura 5 – Difração de raios-X (A) e análise termogravimétrica (B)



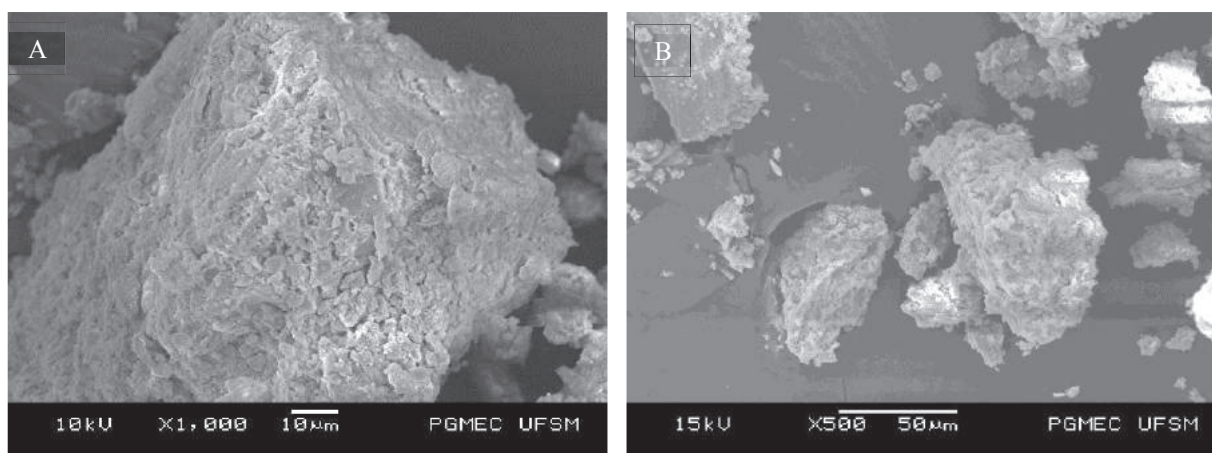
Fonte: a Autora

Tabela 3 – Composição mineralógica do lodo

Mineral	Símbolo	Fórmula	PDF
Quartzo	Q	SiO <sub>2</sub>	01-085-0794
Caulinita	K	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	96-901-5000
Olivina	O	(Fe, Mg) 2SiO <sub>4</sub>	00-003-0195
Anatase	A	TiO <sub>2</sub>	96-900-8216

Fonte: a Autora

Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura em amostras em pó de lodo a diferentes escalas (A e B)



Fonte: a Autora

## 4.2.2 Argila

### 4.2.2.1 Origem

Foram utilizadas três diferentes tipos de argilas e fornecidas pela empresa de cerâmicas, duas são extraídas no município de Santa Maria - RS (uma argila mais avermelhada e outra argila mais escura), distante da empresa cerca de 15 km, e a outra proveniente de uma jazida localizada no município de São Pedro do Sul – RS, com características mais arenosas. As jazidas de extração das argilas de Santa Maria são próximas cerca de 500 metros e por este motivo o processo de maturação de ambas é feito no mesmo local.

Figura 7 – Jazidas de argilas



Fonte: Google Maps.

No lado esquerdo da imagem observa-se a área de onde é extraída a argila mais avermelhada e no lado direito da imagem pode-se observar a área onde é extraída a argila mais escura.

#### 4.2.2.2 *Beneficiamento*

As argilas provenientes do município de Santa Maria são extraídas no verão, num período de 3 a 4 meses, onde é feito também o processo de maturação das mesmas. São montadas camadas alternadas de cada um dos tipos de argila. Os materiais são distribuídos em uma área de 10.000 m<sup>2</sup> à céu aberto e na medida em que a indústria necessita de matéria-prima para a produção, o material é transportado de onde está sendo maturado e estocado em um local coberto até a sua utilização.

A mistura de argila resultante da composição de três diferentes tipos de materiais argilosos passa por um processo de moagem e destorroamento. O material então, após a devida mistura, retorna por meio de esteiras para o estoque e permanece num processo de maturação até que seja utilizado.

#### 4.2.2.3 Caracterização

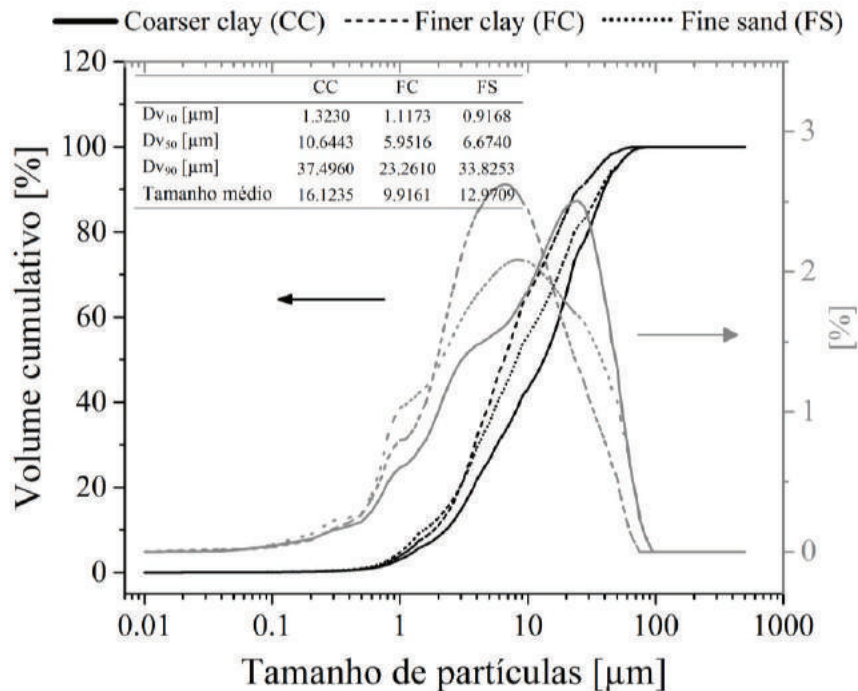
As argilas foram denominadas de acordo com sua distribuição granulométrica (Figura 9), argila mais grossa (CC – coarser clay), argila mais fina (FC – finer clay) e areia fina (FS – finer sand), cuja composição química e algumas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 4). Suas massas específicas são de 2.840, 2.756 e 2.724 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Figura 8 – Argilas utilizadas para a fabricação de peças de cerâmica vermelha. a) Argila mais grossa (CC); b) Argila mais fina (FC); c) areia fina (FS)



Fonte: a Autora.

Figura 9 – Distribuição do tamanho de partículas das argilas



Fonte: a Autora

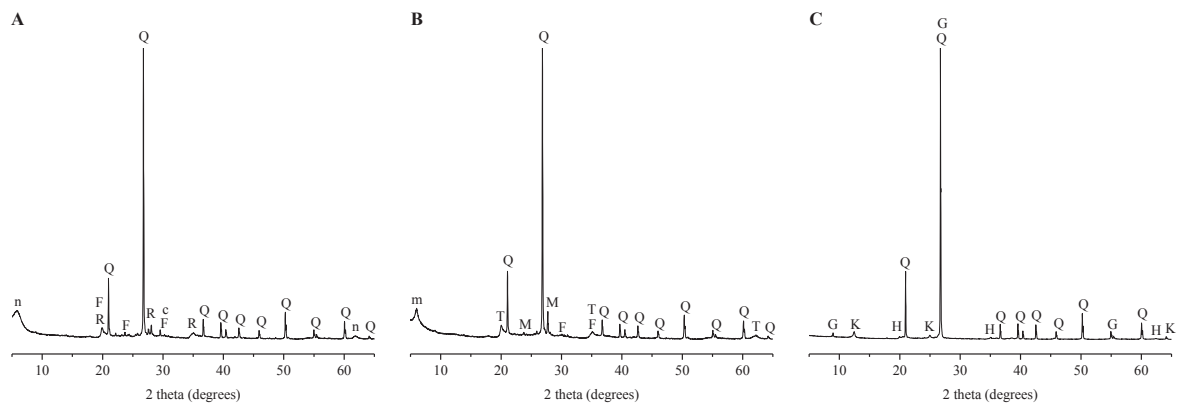
Tabela 4 - Composição química e propriedades físicas das argilas

		Coarser clay (CC)	Finer clay (FC)	Fine sand (FS)
Composição química (%)	SiO <sub>2</sub>	55.93	61.91	67.41
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.76	14.83	17.58
	Na <sub>2</sub> O	5.86	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.44	6.26	4.36
	K <sub>2</sub> O	3.47	3.23	2.96
	CaO	3.90	1.45	0.50
	TiO <sub>2</sub>	1.16	1.12	0.87
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.93	0.84	1.28
	SO <sub>3</sub>	0.74	0.58	0.79
	Cl	0.44	0.46	0.55
	ZrO <sub>2</sub>	0.24	0.13	0.10
	MnO	0.08	0.07	0.07
	MgO	2.29	-	-
	L.O.I.*	8.75	9.11	3.54
Propriedades físicas	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2840.5	2756,0	2724.5
	Limite de liquidez (%)	43	56	--
	Limite de plasticidade (%)	24	24	--
	Índice de plasticidade (%)	19	32	--
	Matéria orgânica (%)	2.06	3.15	0.33

Fonte: a Autora

De acordo com a difratometria de raios-X (Figura 10 e Tabela 5), as argilas são constituídas por quartzo, Montmorilonita, tosudita, cálcio mica e magnetita são identificados no CC. FC é constituído por Na-montmorilonita, rectorita, magnetita e rede do tipo calcita. Por outro lado, caulinita, glauconita e aloisita são identificados na FS.

Figura 10 – Difratoogramas de raios-X das argilas utilizadas. A. Argila mais grossa (CC), B. Argila mais fina (FC), e C. Areia fina (FS).



Fonte: a Autora.

Tabela 5 – Composição mineralógica das argilas

Mineral	Símbolo	Fórmula	PDF
Quartzo	Q	SiO <sub>2</sub>	01-085-1054
Montmorilonita	m	Al <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>24</sub> Ca	96-900-2780
Tosudita	T	(Ca,Ca) <sub>0.8</sub> Al <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>10</sub> ·4H <sub>2</sub> O	00-046-1463
Cálcio mica	M	Al <sub>3</sub> Ca <sub>0.5</sub> O <sub>11</sub> Si <sub>3</sub>	00-046-1463
Magnetita	F	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	01-089-0951
Na-montmorilonita	n	Na <sub>0.3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O	00-003-0015
Rectorita	R	K <sub>1.2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	00-029-1495
Calcita	c	CCa <sub>0.97</sub> Mg <sub>0.03</sub> O <sub>3</sub>	01-089-1304
Caulinita	K	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	96-900-9231
Glauconita	G	Fe <sub>2</sub> H <sub>2</sub> KO <sub>12</sub> Si <sub>4</sub>	00-002-0466
Aloisita	H	Al <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>9</sub> S	00-009-0453

Fonte: a Autora.

As argilas são misturadas, homogeneizadas e posteriormente passam por um processo de amassamento, destorroamento, laminação e por meio de esteiras encaminhadas à extrusora.

#### 4.2.2.4. Coleta da mistura de argila

Após submetida a etapa de caracterização, as argilas são misturadas para a fabricação dos blocos em escala reduzida. A mistura de argila plástica usada para as extrusões dos blocos é constituída por 38,37% em peso de uma argila mais grossa (CC), 38,37% em peso de argila mais fina (FC) e 23,26% em peso de areia fina (FS) com base em materiais secos. Portanto, a matéria-prima provem de uma mistura pronta, utilizada pela empresa de cerâmicas para a fabricação de blocos cerâmicos estruturais.

As amostras dos materiais foram estocadas em recipientes plásticos hermeticamente fechados, garantindo a manutenção do teor de umidade e características físicas da matéria-prima em questão.

## 4.3 PROCESSO PRODUTIVO

### 4.3.1 Objetivo

O objetivo principal desta etapa é aproximar rigorosamente a produção de blocos em laboratório da produção realizada em escala industrial. A manutenção das propriedades das peças produzidas, principalmente quanto às físicas e mecânicas é essencial para que seja assegurada a viabilidade técnica da utilização do lodo de ETA para fabricação de blocos e tijolos.

O início do processo produtivo dos blocos na etapa laboratorial deu-se com a definição dos teores de adição de lodo. Baseados em estudos anteriores que utilizaram o lodo como adição na fabricação de peças cerâmicas, na demanda e capacidade que a empresa possui, foram estabelecidos os teores de adição do lodo, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teores de substituição de lodo na mistura de argilas utilizados na produção de blocos

<b>Denominação</b>	<b>Quantidade de lodo adicionado (% em massa)</b>
<i>WTS-0</i>	0,0
<i>WTS-2</i>	2,0
<i>WTS-5</i>	5,0
<i>WTS-10</i>	10,0
<i>WTS-20</i>	20,0

### 4.3.3 Avaliação do processo de extrusão

Uma amostra do lodo coletado, que possuía uma umidade inicial de 220%, passou por um processo de secagem que visava a perda de uma parcela da água presente, ficando a amostra com umidade inferior a 70%. Este processo foi definido baseado no objetivo de que o lodo tivesse nenhum ou o mínimo possível de beneficiamento, visando sua possível utilização em um nível industrial no futuro.

Assim sendo, o lodo foi incluído na mistura de argila plástica por substituição em valores de 0, 2, 5, 10 e 20% em peso. Portanto, a mistura de referência é representada como 0% de incorporação de lodo. A umidade desta mistura de referência foi ajustada em  $29 \pm 0,5\%$  em peso e é representada neste estudo como 0-WTPS-29 (ABNT, 2016). Este valor permitiu moldar amostras com densidade aparente de  $\sim 1800 \text{ kg/m}^3$ , sem imperfeições



superficiais, distorções de volume e um fluxo homogêneo de extrusão.

Levando em consideração que a presença de lodo afeta a consistência e a plasticidade da mistura plástico-argila, foram ajustadas as umidades dessas misturas constituídas com lodo de acordo com a capacidade de uma produção de blocos sem qualquer defeito superficial e dimensional, também denominada extrudabilidade. As misturas foram inicialmente caracterizadas pelos limites de Atterberg (NBR 6459 (ABNT, 2017c) e NBR 7180 (ABNT, 2016b)). Complementarmente, o teste de varredura de amplitude de deformação foi realizado para um conjunto de 21 sistemas constituídos com diferentes teores de lodo e umidade. A identificação de sistemas aqui adotado, é constituído com a porcentagem de lodo em massa incluída na mistura, bem como a umidade ajustada. Por exemplo, 2WTS-25 corresponde à mistura com 2% em peso de lodo com uma umidade de 25%. Da mesma forma, 0WTS corresponde ao sistema de referência sem lodo. Foram produzidas amostras prismáticas moldadas em um molde de aço inoxidável com 40×10×5 mm (Figura 11A) aplicando uma carga uniaxial de 3 N/mm<sup>2</sup>. Este método de moldagem permitiu obter amostras prismáticas com uma densidade aparente entre 1750-1950 kg/m<sup>3</sup>, assemelhando-se à amostra de referência pós-extrusão.

O teste de torção foi realizado em um reômetro MCR502 Anton-Paar, onde as amostras foram fixadas ao reômetro por meio de acessório sólido retangular com aplicação de carga de contato axial inferior a 1 N e altura livre de 40 mm (Figura 11B) Os testes de varredura de amplitude foram realizados com aumento das amplitudes de deformação em um crescimento linear de 0,001% a 25%, a uma frequência constante de 10 Hz ou 62,3 rad/s [58]. A redução da umidade da amostra após cada teste foi determinada e a perda de massa como consequência da evaporação da água livre foi desprezível (<1% em peso). O módulo de armazenamento e perda, G' e G'' respectivamente, foram medidos e calculados durante o teste. Portanto, o conteúdo de água nos sistemas com a inclusão de lodo foi ajustado de acordo com medições reológicas a fim de atingir plasticidade e consistência semelhantes quando comparada à mistura de referência (0-WTS).

Figura 11 – Preparação de amostras para ensaios reológicos. A . Amostra prismática, B. Teste de varredura de amplitude de deformação



A



B

Fonte: a Autora.

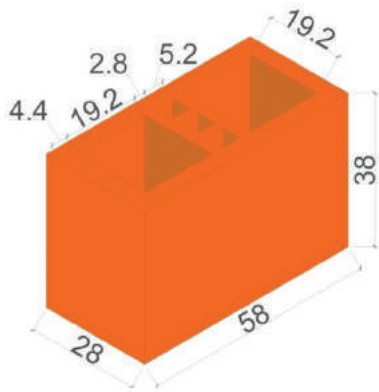
A homogeneização das misturas constituídas por argilas, lodo e água deu-se por meio de uma amassadeira com capacidade de 40 l, com duas lâminas com uma velocidade de 35 rpm com aproximadamente 15 kg de material.

As peças foram extrudadas em uma extrusora à vácuo da marca Varlali, modelo N°1, constituída por um único eixo de rotação de 35 rpm. O vácuo opera em pressão negativa de 150 mm/Hg e velocidade de extrusão para produzir blocos sem defeitos visuais é de 22 a 39 mm/s. Foi escolhido um bloco padrão de produção industrial, cujas medidas constam na NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), onde foi reproduzida uma boquilha para a extrusora, com um fator de escala de 1:5, visto na Figura 12A (blocos em escala reduzida serão em todas as suas dimensões 5 vezes menores que o bloco normal), visualizado pela Figura 12C, com as medidas em milímetros. Foram produzidos em torno de 100 blocos em escala reduzida para cada traço, destinados a realização de ensaios pertinentes.

O fluxo da mistura na matriz de saída foi controlado entre 22 e 39 mm/s para produzir elementos sem defeito. Os blocos recém extrudados inicialmente (Figura 12B) foram secos em condições ambientais (25-30 °C e umidade relativa entre 50-60%) durante aproximadamente 40 h, submetidas a 12 h em estufa a 60 °C e mais 12 h em estufa a 100 °C. As amostras secas foram sinterizadas com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até 500 °C,

depois 2,5 °C/min entre 500 e 600 °C e 10 °C/min até o patamar de 930 °C por 3 h para a calcinação. O processo de resfriamento foi realizado naturalmente dentro do forno (com taxa de resfriamento de -5 °C/min).

Figura 12 – Produtos cerâmicos fabricados em laboratório. A. Geometria e dimensões do bloco em escala reduzida. B. Bloco produzido pós-extrusão, e C. Bloco pós-calcinação.



A.



B.



C.

Fonte: a Autora.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 EFEITOS DO LODO NA PLASTICIDADE E CONSISTÊNCIA DAS MISTURAS

Misturas de argila com índice de plasticidade (IP) superior a 10% podem ser utilizadas para a produção de tijolos por processo de extrusão. Nesse sentido, a mistura de argila de referência (0% em peso de lodo) exibiu um IP ideal para moldagem de produtos de cerâmica vermelha (Tabela 7). A presença de lodo afeta a consistência plástica, onde o IP diminui até aproximadamente 33% quando comparado à mistura de referência. Essa redução pode estar associada ao teor de compostos orgânicos do lodo, que são adsorvidos nas partículas de argila. Tais conclusões estão consoantes com outros estudos, onde o IP é inversamente proporcional ao conteúdo de lodo (VICTORIA, 2013). Os lodos constituídos com coagulante de cloreto de polialumínio (PAC) apresentam maior efeito negativo na plasticidade da mistura, onde a inclusão de mais de 20% em peso do lodo não é viável para a produção de tijolos extrudados (DA SILVA et al., 2015). No entanto, há controvérsias sobre essa redução, onde Wolff e Schwabe (WOLFF; SCHWABE; VIEIRA, 2015) não identificaram diferenças significativas nas propriedades de plasticidade entre a mistura com e sem lodo (WOLFF; SCHWABE; VIEIRA, 2015). De acordo com Monteiro et al. (VIEIRA et al., 2008), a condição inicial de umidade do lodo gera um aumento ou redução no índice de plasticidade. Os lodos pré-secos incluídos nas argilas de mistura diminuem significativamente o IP, quando comparados aos lodos úmidos (VIEIRA et al., 2008).

Tabela 7 – Limites de Atterberg das misturas constituídas com diferentes teores de lodo

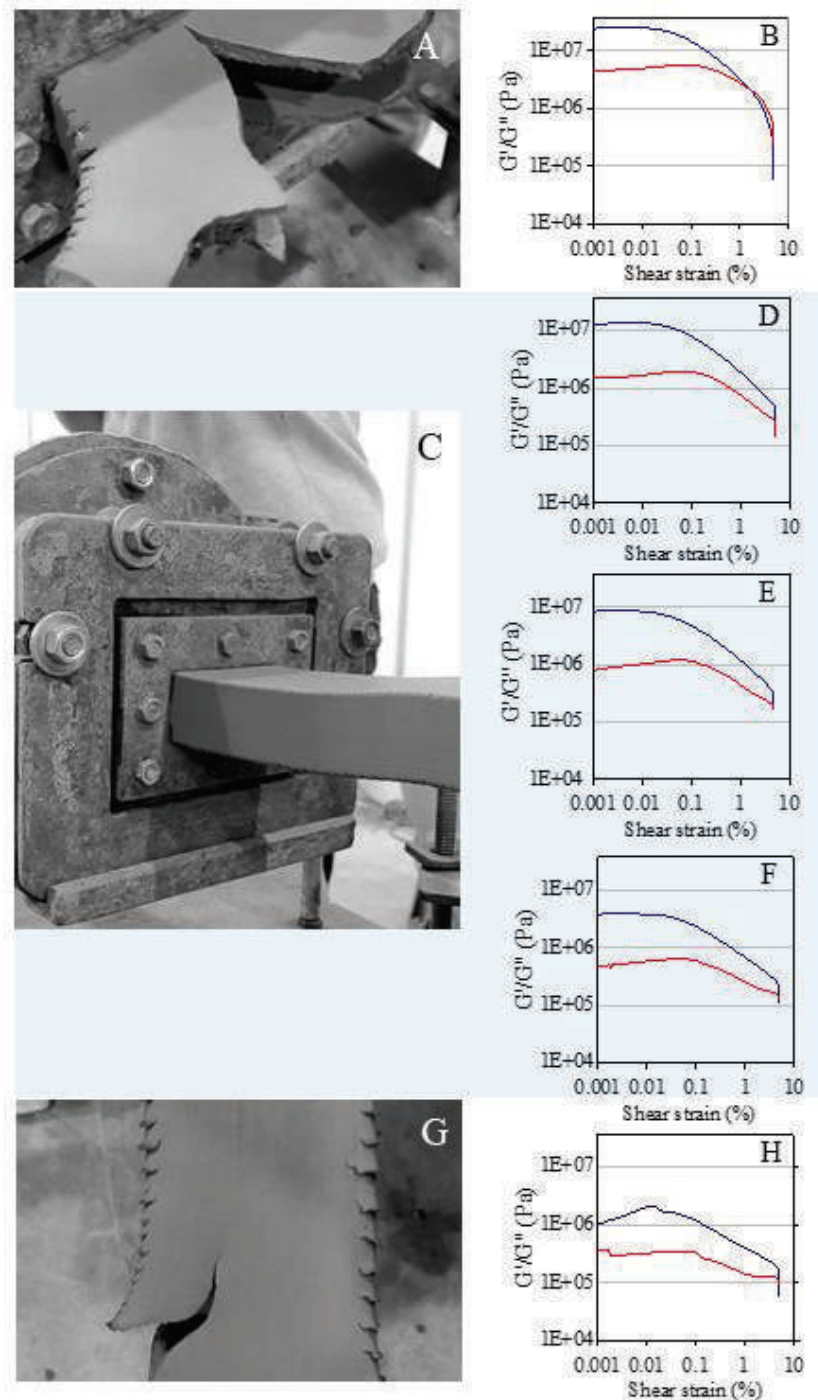
	Teor de lodo (em massa.%)				
	0	2	5	10	20
Limite de liquidez (LL) em %	35	36	35	37	37
Limite de Plasticidade (PL) em %	23	23	24	26	29
Índice de Plasticidade (IP)	12	13	11	11	8

Fonte: a Autora

A qualidade dos blocos extrudados constituídos pela mistura de referência é fortemente dependente da umidade sobre a qual também modificou suas propriedades

reológicas. A medição de parâmetros reológicos, como o módulo de armazenamento ( $G'$ ) e módulo de perda ( $G''$ ), pode ser usada para identificar como a umidade afeta a plasticidade e a capacidade de extrusão subsequente da mistura.  $G'$  e  $G''$  representam a energia de deformação armazenada ou perdida pela mistura durante os processos de cisalhamento mediante rearranjos de partículas e perdas de calor, respectivamente. O aumento de  $G'$  permite a recuperação da deformação após a remoção da carga. Portanto, a mistura é classificada como um material viscoelástico, onde a umidade afeta o comportamento e a magnitude dos módulos  $G'$  e  $G''$ . Altos valores de  $G'$ , bem como alta diferença para  $G''$  (o que significa uma maior área entre as curvas obtidas) indicam um maior armazenamento de energia, assim, uma maior tensão é necessária para que a mistura seja deformada e conseqüentemente extrudada. No teor de umidade mais baixo, de 25% a argila extrudada exibia um fluxo não homogêneo através da matriz e a tensão desenvolvida na argila do tarugo levava à ruptura do produto (Figura 13A). Este comportamento está relacionado à alta rigidez identificada na amostra com valores de  $G'$  e  $G''$  até  $2,50 \times 10^7$  e  $3,40 \times 10^6$  Pa, respectivamente em baixas tensões (de 0,001 a 0,1%), conforme mostrado na Figura 13B. Nesse sentido, a moldabilidade da mistura pode estar associada ao  $G'$  e  $G''$ , bem como à proximidade de suas curvas, que também pode ser obtida através da razão entre os módulos ( $G''/G'$ ), que é expressa pelo  $\tan \delta$ . A inclusão de mais água (maior umidade na mistura) reduz a rigidez (como esperado) da mistura com valores  $G'$  e  $G''$  inferiores a 35%, quando comparada à mistura com 25% de umidade. As energias de deformação ( $G'$  e  $G''$ ) progressivamente são reduzidas em umidade mais alta (Figura 13D - F), o que melhora a plasticidade das misturas e o desempenho ideal do processo de extrusão é identificado. Energias de deformação elástica ( $G'$ ) entre  $1,90 \times 10^6$  e  $1,36 \times 10^7$  Pa, bem como energias de deformação viscosa ( $G''$ ) entre  $6,34 \times 10^5$  e  $4,02 \times 10^6$  Pa em baixas deformações (de 0,001 a 0,1%) permitem atingir um processo de produção ideal com um fluxo homogêneo, bem como a produção de amostras sem defeitos superficiais e volumétricos (Figura 13C). A redução excessiva dos valores  $G''$  para a mistura com 33% de umidade (Figura 13H) também gera rachaduras na superfície da amostra extrudada (Figura 13G). Portanto, o processo de extrusão foi otimizado através do teor de umidade e das propriedades reológicas, onde tijolos com defeitos livres foram produzidos com umidades entre 27% e 31%.

Figura 13 – Análises reológicas de misturas em verde de diferentes teores. (A.25, B. 27, C, 39, D. 31, e E. 33 %), bem como o aspecto visual durante a extrusão, com baixo (F), desejável (G) e alto teor de umidade (H).

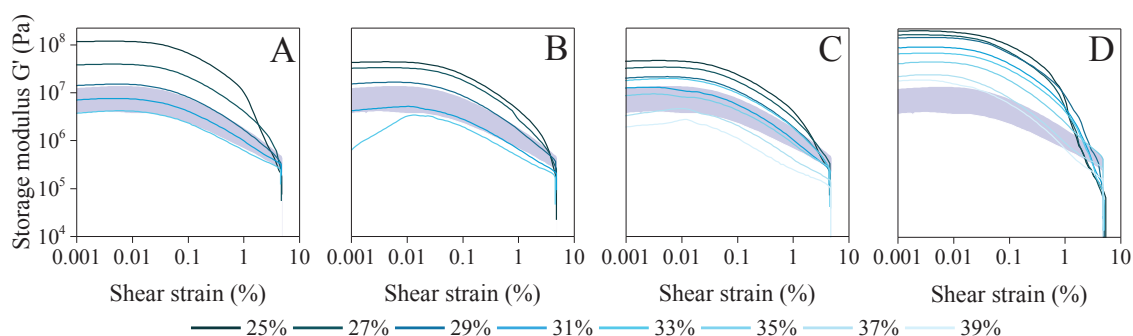


Fonte: a Autora.

As Figura 14 e Figura 15 mostram o armazenamento ( $G'$ ) e o módulo de perda ( $G''$ ) de misturas de diferentes teores de lodo e umidade. A área azul mostrada na Figura 8 corresponde às curvas  $G'$  da amostra de referência (0% em peso de lodo) com uma umidade

de 27% e 31%. Nesse sentido, essa área pode ser definida como “janela de extrusão” de acordo com os resultados obtidos anteriormente (Figura 13). Da mesma forma, a Figura 15 mostra esta janela de extrudabilidade em vermelho através das curvas  $G''$ . Como esperado, a presença de lodo modificou o comportamento da plasticidade da mistura devido às diferentes características físico-químicas existentes entre as argilas e o lodo. A mistura com 2% em peso de lodo e 27% de umidade (2WTS-27) exibiu um módulo de armazenamento de  $1,64 \times 10^8$  Pa em baixas tensões (de 0,001 a 0,1%), que é até 12,6 vezes mais rígido (Figura 14A), quando comparado ao sistema de referência correspondente (0WTS-27). A inclusão de mais água na mistura com 2% em peso de lodo deslocou as curvas  $G'$  progressivamente para valores mais baixos, onde as energias de deformação ( $G'$  e  $G''$ ) de 2WTS com umidade de 29%, 31% e 33% seguiu um comportamento reológico dentro da janela de extrusão identificada anteriormente pelo sistema de referência (0WTS). Um comportamento semelhante é também identificado em altos teores de lodo. A mistura com 5% em peso de lodo exibiu uma maior demanda de água para atingir este comportamento reológico ideal, onde as curvas  $G'$  e  $G''$  seguem o mesmo comportamento dentro da janela de extrusão. Nesse sentido, a mistura 5WTS mostrou que a condição de umidade ideal é 31% devido à sua curva  $G'$  estar dentro da região azul (Figura 14B). Comportamento semelhante é identificado para a curva  $G''$ , onde 5WTS-31 está dentro da janela de extrusão (denotada em vermelho na Figura 15B).

Figura 14 – Módulo de armazenamento com diferentes e constituído de A. 2%; B. 5%; C. 10%; e D. 20% de lodo.

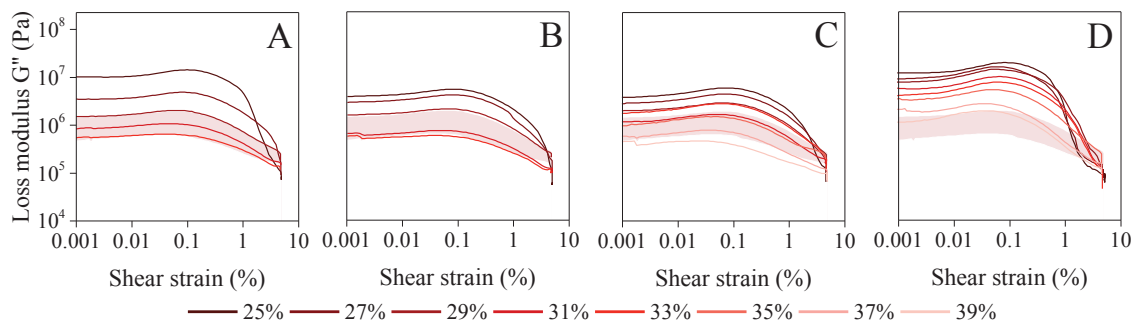


Fonte: a Autora.

Com teores mais elevados de lodo, a demanda de água é ainda maior e a mistura requer mais umidade para atingir uma plasticidade e consistência ideais. As misturas 20WTS com umidade inferior a 37% exibem um alto módulo de perda ( $> 2,74 \times 10^6$  Pa). As curvas  $G''$  para a mistura 20WTS com 39% de umidade estão dentro da janela de extrusão (área

vermelha na Figura 15D) e  $G'$  segue parcialmente o comportamento principalmente em graus de deformações mais elevados (de 0,1% - 1% na Figura 14D). A água disponível entre as partículas de argila define a capacidade da mistura verde de ser deformada e moldada. Segundo Schiavo *et al* (SCHIAVO *et al.*, 2018), a mistura pode ser extrudada quando o teor de água fornece um sistema próximo ao funicular. Quando a mistura está sob deformação, sua plasticidade é altamente dependente do movimento da água através das partículas, reduzindo o atrito entre eles e deslocando o ar entre os vazios. Este movimento também afeta a ligação entre as partículas de argila através de pontes líquidas (coesão da matriz) derivadas da tensão superficial na interface ar-água. O lodo exibe uma adsorção de água como consequência da presença do coagulante (PAC) e menos água livre está disponível na mistura para melhorar sua plasticidade.

Figura 15 – Módulo de perda das misturas com diferentes umidades e com A. 2%; B. 5%; C. 10%; e D. 20% de lodo.



Fonte: a Autora.

Com base na avaliação reológica das misturas em diferentes teores de lodo e umidade, o teor de água da matriz argilosa foi ajustado a fim de se obter uma mistura extrusável para a produção de blocos de alta qualidade. A Tabela 8 mostra o teor de umidade utilizado para a produção dos blocos com diferentes teores de lodo. A produção de blocos sem defeitos devido à extrusão foi definida a partir dos resultados apresentados anteriormente, onde as misturas com maiores teores de lodo requerem mais água para serem extrusadas com sucesso. A mistura com 20% em peso de lodo foi extrusada com 39% de umidade, valor 35% superior quando comparado ao sistema de referência (0% de lodo).



Tabela 8 – Teor de umidade usado para a produção de peças cerâmicas com diferentes teores de WTS

Teor de lodo (wt.%)	Teor de umidade (wt.%)
0	29
2	31
5	31
10	38
20	39

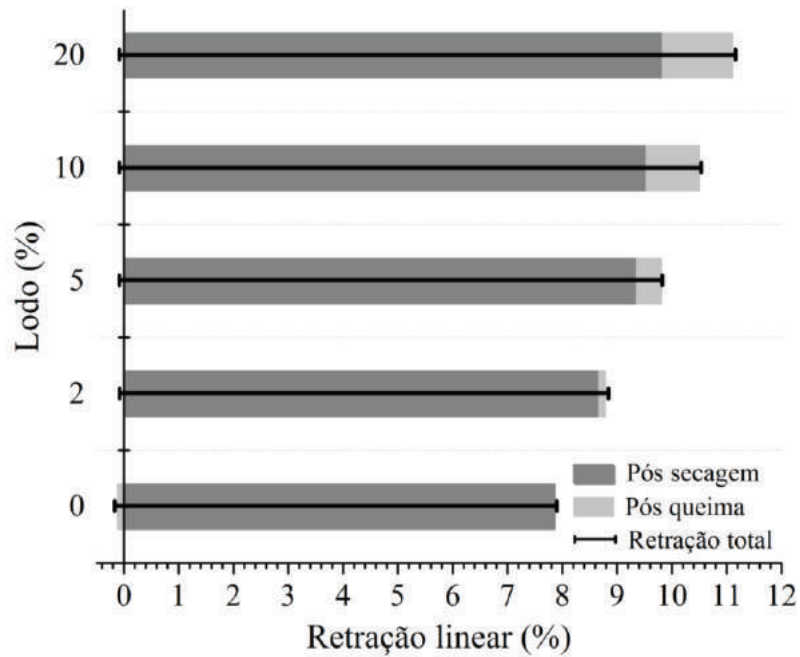
Fonte: a Autora.

Quando as misturas com 0% e 20% de lodo são comparadas a contração linear total aumentou de 7,74% para 11,10%, (Figura 16). A maior retração após o processo de secagem é coerente com a maior demanda de água nas misturas constituídas com maiores teores de lodo, onde a inclusão de 5 e 10% em peso de lodo aumenta a retração de secagem em até 35%. A retração após o processo de calcinação também aumenta com a presença de lodo, principalmente em teores mais elevados (> 5% em peso).

Nesse sentido, há controvérsias sobre como a retração é afetada pela presença de lodo durante o processo de secagem e calcinação. Misturas com teores de lodo maiores ou iguais a 20% em peso apresentaram maior retração linear após o processo de calcinação (RAMIREZ ZAMORA et al., 2008). De acordo com Kizinievič et al. (KIZINIEVIČ et al., 2013), a retração de secagem é maior na presença de lodo na mistura, mas não foi identificada alguma diferença quando a temperatura de calcinação é de 1000 °C. No entanto, a retração linear aumenta quando a temperatura de sinterização é aumentada para 1050 °C (KIZINIEVIČ et al., 2013). Outros estudos não mostraram diferenças na retração linear com baixo teor de lodo durante o processo de secagem, exceto quando a substituição da argila é superior à 20%, e foi observada baixa retração após a calcinação (CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018). De Oliveira *et al.* (DE OLIVEIRA et al., 2014), não identificou diferenças na retração em relação ao conteúdo de lodo.

Por outro lado, a mesma expansão foi relatada quando o lodo é incorporado (XU et al., 2014), como consequência da matéria orgânica. Portanto, a heterogeneidade nas propriedades químicas e físicas dos lodos avaliados, bem como as temperaturas do processo de calcinação desempenham um papel importante na magnitude da retração durante o processo de produção das cerâmicas.

Figura 16 – Retração linear dos blocos pós secagem e pós calcinação

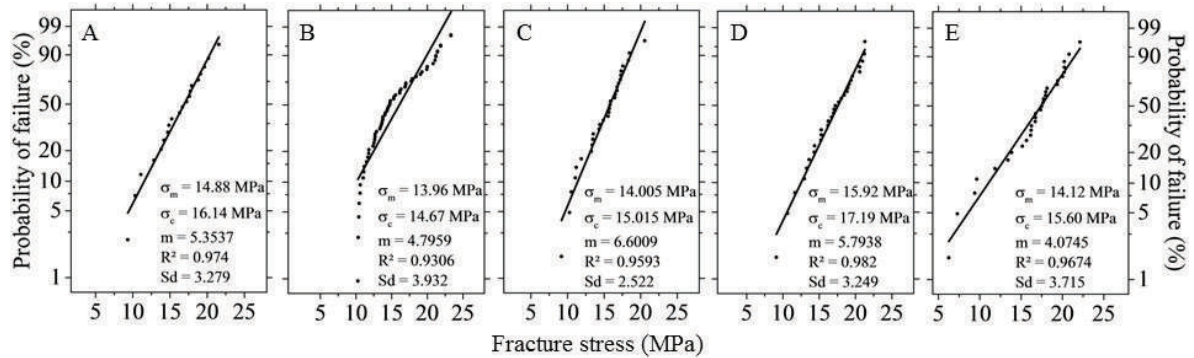


Fonte: a Autora.

Não foram identificadas diferenças significativas na resistência à compressão dos blocos, independentemente do teor de lodo (Figura 17), onde o valor médio obtido ( $\sigma_m$ ) foi de  $16 \pm 2$  MPa. De acordo com a análise de variância (ANOVA) pelo método de Tukey (Tabela 9), não há diferenças significativas entre as misturas avaliadas, visto que o *p value* é maior que 0,05. Com base na análise da distribuição de Weibull, a probabilidade de falha de 63,2% (representada por  $\sigma_c$ , (ASTM, 2018)) da amostra de referência foi de 16,1 MPa (Figura 17A). Os sistemas com lodo apresentaram um  $\sigma_c$  até 6% maior. O módulo de Weibull (*m*) representa a confiabilidade do produto cerâmico do ponto de vista mecânico, onde uma grande dispersão (valores baixos identificados para *m*) indica uma maior probabilidade de falha em resistências abaixo de  $\sigma_c$ . O módulo de Weibull para a mistura com 20% de lodo foi 24% menor, quando comparado ao sistema de referência, assim, uma confiabilidade menor é identificada em maiores teores de lodo. Diferentes trabalhos mostram que a heterogeneidade dos lodos gerados em diferentes estações de tratamento de água, também apresentam comportamento distinto quando utilizados como matéria-prima para a produção de peças cerâmicas. Foi identificada uma redução nítida e significativa no comportamento mecânico com maior teor de lodo (BENLALLA et al., 2015; DE OLIVEIRA et al., 2014; XU et al., 2014). No entanto, foram relatados melhorias no desempenho mecânico em baixos teores de lodo (KIZINIEVIČ et al., 2013). Os resultados obtidos elucidam que, para uma possível

utilização do lodo aqui avaliado para a indústria cerâmica, a inclusão de lodo (<10% em peso) apresenta uma possível viabilidade.

Figura 17 – Resistência à compressão dos blocos avaliada por meio da distribuição de Weibull para os diferentes traços.



Sendo:  $\sigma_m$ : resistência média à compressão;  $\sigma_c$ : resistência à compressão característica determinada pela análise de Weibull; m: módulo de Weibull;  $R^2$ : coeficiente de determinação; e Sd: desvio padrão).

Tabela 9 – Análise de variância pelo método de Tukey HSD dos valores de resistência à compressão dos blocos para os diferentes teores de lodo

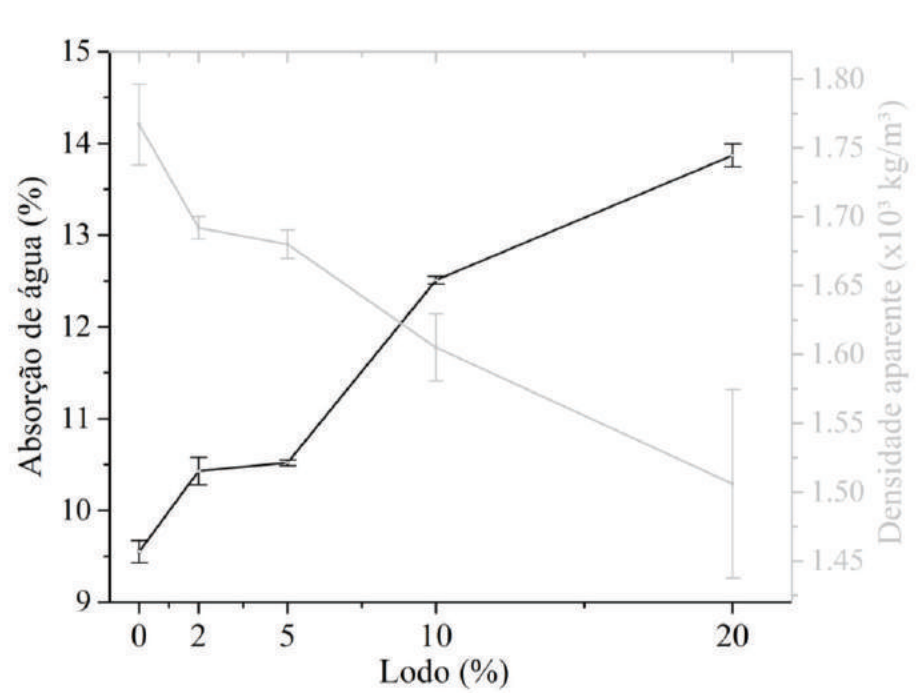
% Lodo	0%	2%	5%	10%	20%
0%	--	0.896	0.953	0.907	0.975
2%	0.896	--	1.000	0.107	1.000
5%	0.953	1.000	--	0.272	1.000
10%	0.907	0.107	0.272	--	0.343
20%	0.975	1.000	1.000	0.343	--

Fonte: a Autora.

Por outro lado, a inclusão de lodo aumenta proporcionalmente a absorção de água e reduz a densidade aparente (Figura 18). A mistura com o maior teor de lodo apresentou uma absorção de água em torno de 45% maior quando comparado ao sistema de referência (0% WTS). Isso é consistente com outros trabalhos, onde na presença de lodo, são identificados valores mais altos de absorção (BENLALLA et al., 2015; CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; DE OLIVEIRA et al., 2014; KIZINIEVIC, 2013; XU et al., 2014). Tal comportamento pode ser atribuído à presença de matéria orgânica, bem como à perda de massa na calcinação (Tabela 2) identificada para o lodo, onde a emissão de gases durante a calcinação dos blocos aumenta a porosidade. Embora o lodo aumente significativamente a

absorção de água, os valores obtidos estão dentro dos limites exigidos pelas normas brasileiras (<17%, (ASTM, 2019)).

Figura 18 – Absorção de água e densidade aparente dos blocos produzidos com diferentes teores de lodo.



Fonte: a Autora

A solubilização dos produtos cerâmicos pós-queima também foi analisada com base nos dados de ensaios físico-mecânicos dos blocos, apresentados anteriormente (Tabela 10). As amostras avaliadas incluíram o traço referência (0-WTS) e os blocos produzidos com 10% em peso de lodo (10-WTS), levando em consideração seus resultados favoráveis a uma possível utilização na indústria, condizente com conclusões de outros trabalhos (CUSIDÓ; CREMADES, 2012; TARTARI et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2011).

Os resultados mostram valores superiores aos limites da norma para Al, Mn e Fe (ABNT, 2004a). O 10-WTS exibiu a maior solubilização de Al, em torno de 10 vezes superior aos limites sugeridos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). A concentração de Fe para 0-WTS foi 14,6% superior ao limite, e a inclusão de lodo aumentou esta diferença na ordem de 2,4 vezes. Tal comportamento pode estar relacionado à transformação incompleta do Fe durante a queima, que ocorre em temperaturas superiores a 1050 C. O 0-WTS também excedeu os limites de Mn da NBR 10.004 (aproximadamente 28% maior), e isso reduziu significativamente (67%) com a inclusão de 10% de lodo, que pode ser atribuído às diferentes composições químicas do lodo, contribuindo para a formação de fases vítreas e o

encapsulamento subsequente ou fases mais estáveis. Esses resultados indicam que, embora a inclusão de lodo em baixos teores leva a produção de peças cerâmicas de qualidade avançada, ensaios de cunho ambiental devem ser realizados. A fim de ajustar o encapsulamento dos metais pesados, visando a redução de sua concentração, um ajuste na temperatura de queima deve ser considerado.

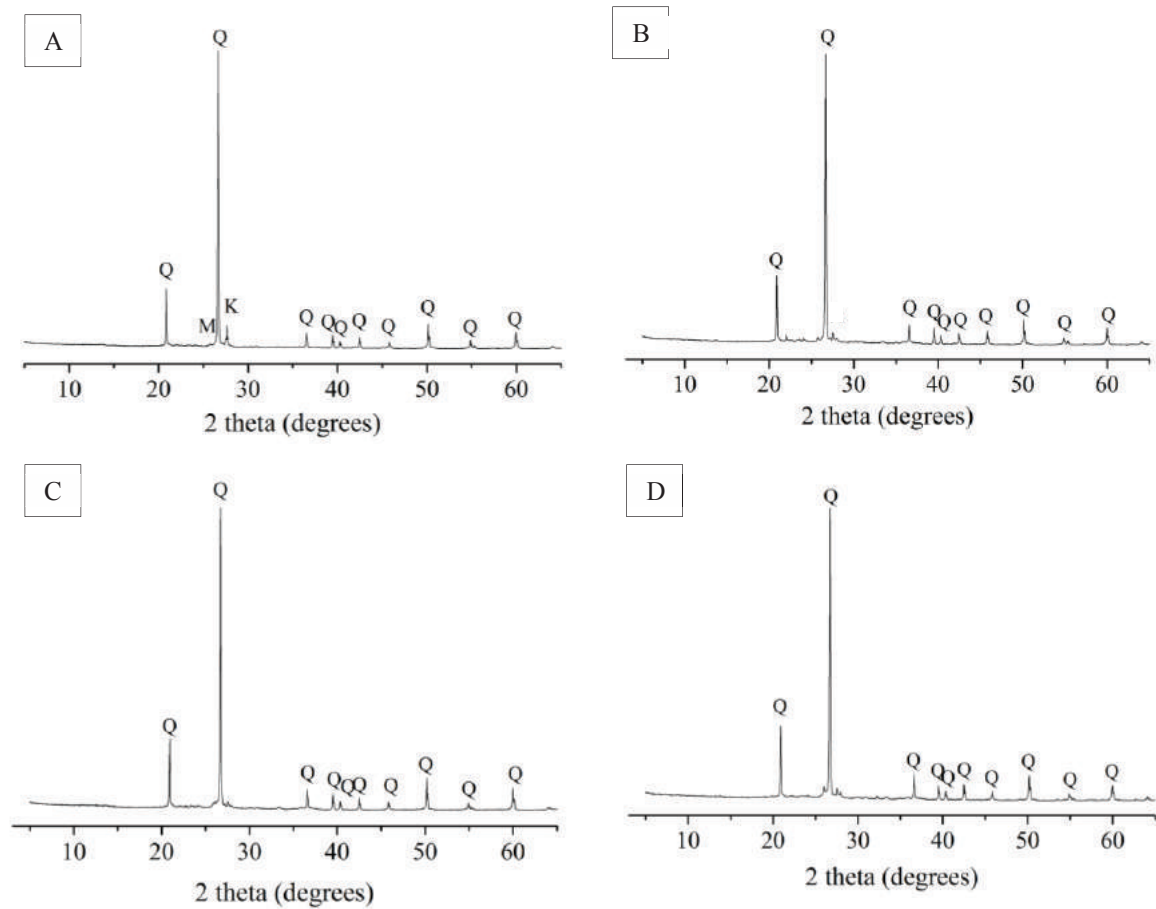
Tabela 10 – Dados de ensaio de solubilização em amostras calcinadas de blocos com 0 e 10% de lodo

	0- WTS	10-WTS	Valores limites da NBR para solubilização (ABNT, 2004c)
Al	0.564	2.135	0.200
Ar	<0.010	<0.010	0.010
Ba	0.081	0.087	0.700
Cd	<0.005	<0.005	0.005
Pb	<0.010	<0.010	0.010
Cl	1.04	1.04	250.0
Cu	<0.010	<0.010	2.000
Cr	<0.050	<0.050	0.050
Fe	0.344	0.8225	0.300
F <sup>-</sup>	0.47	0.84	1.500
Mn	0.128	0.042	0.100
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.583	1.019	10.00
Hg	<0.010	<0.010	0.050
Se	<0.010	<0.010	0.010
Na	2.096	4.072	200.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	45.39	83.60	250.0
Zn	<0.010	0.030	5.000
Surfactante	0.006	0.014	0.500

Fonte: a Autora.

Amostras dos traços WTS-0%, WTS-5%, WTS-10% e WTS-20% pós-calcinação foram trituradas, moídas e o material passante na peneira 200 foi submetido ao ensaio de difração de raios-X. Com base nos resultados dos ensaios de difração de raios-X (Figura 19), a amostra WTS-0% apresentou quartzo (SiO<sub>2</sub>, #PDF 01-086-1560) e Mulita (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>, #PDF 00-015-0776). Já a amostra WTS-5% apresentou quartzo (SiO<sub>2</sub>, #PDF01-085-0794) e as amostras WTS-10% e WTS-20% também apresentaram quartzo (SiO<sub>2</sub>, #PDF 01-086-1629) em sua composição.

Figura 19 – Difração de raios-X em amostras de blocos calcinados



Sendo: Q: quartzo e M: mulita

Fonte: a Autora.

Blocos pós queima dos traços WTS-0% e WTS-20% foram lixados, polidos e uma pequena parcela sólida de 1 cm<sup>3</sup> de volume foi preparada para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Por meio da realização de ensaio de microscopia eletrônica de varredura se pôde observar pequenos grãos densos de lodo no interior da amostra calcinada de WTS-20%. Tal característica está ausente da amostra WTS-0% (Figura 20).

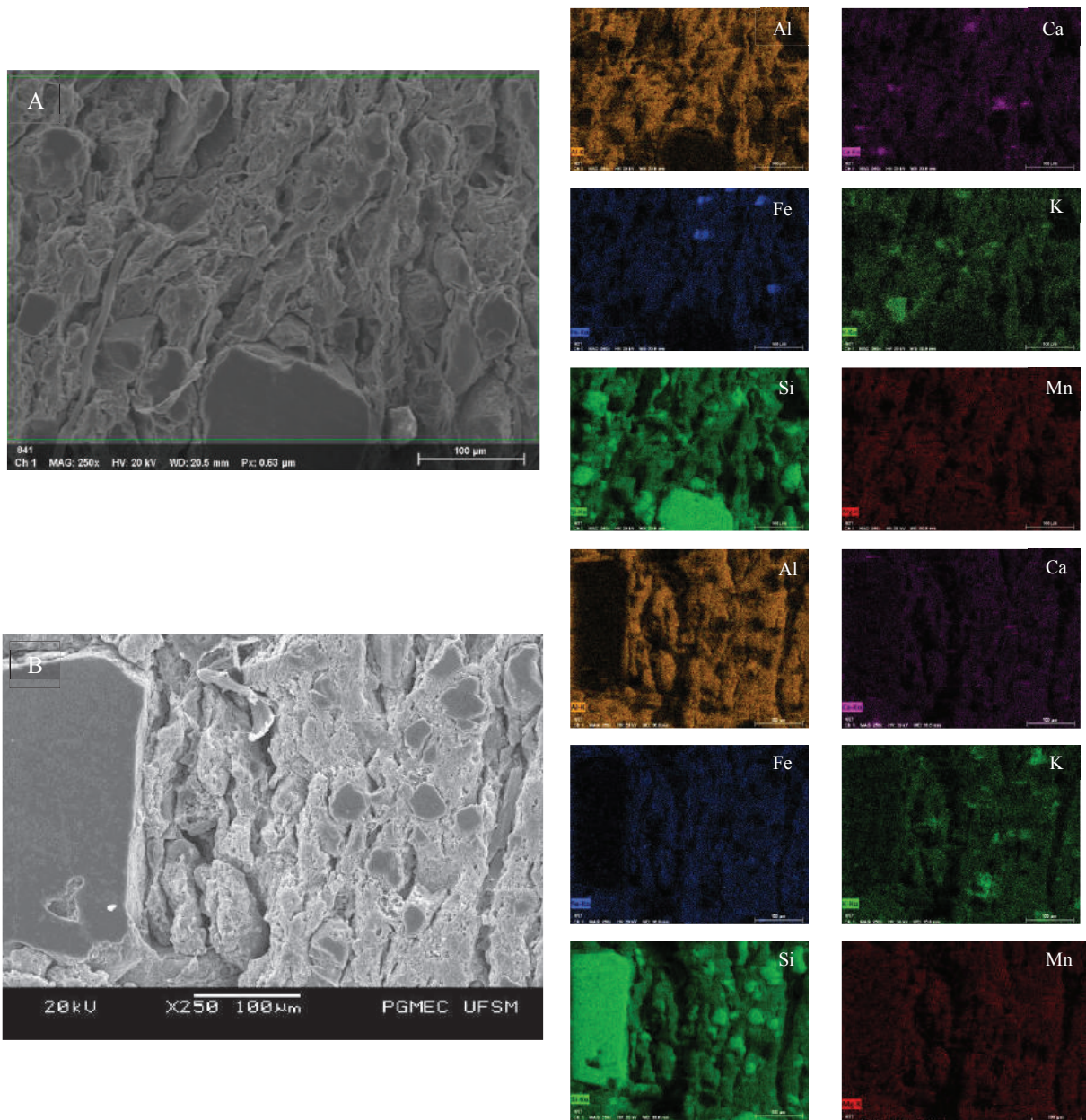
Neste sentido, outra característica observada é a união das partículas em WTS-0%. O conglomerado de colóides é muito mais denso do que ao se observar a amostra WTS-20%, onde há um menor conteúdo da fase vítrea em função da porosidade do material. Há também uma dificuldade em se haver uma real unificação dos componentes da mistura, ou seja, do lodo em grande quantidade com as argilas. A interação existente entre os colóides no ato da floculação faz com que as partículas ganhem um potencial iônico considerável, dificultando sua interação com partículas estáveis como dos componentes argilosos. A característica

hidrofílica do lodo, também faz com que na presença de água não haja uma solidarização entre as partículas de colóides e lodo, ocorrendo assim uma heterogeneização das mesmas.

Na Figura 20A e Figura 20B são apresentadas as imagens obtidas por meio do ensaio de MEV das duas amostras ensaiadas, WTS-0% e WTS-20%, respectivamente. Ao lado de cada figura, estão alguns dos compostos identificados, como na Figura 20A onde se destaca a sílica, presente no ensaio de DRX e evidenciada em pontos mais densos da amostra. Em contrapartida, o alumínio se mostra presente de maneira mais distribuída pela superfície do material, assim com o Mn. Já Ca, K e Fe também se mostram bem distribuídos, apresentando alguns pontos de maior concentração.

Na Figura 20B, correspondente ao traço WTS-20%, há uma coerência com o que é observada na amostra do traço WTS-20%, reiterando a presença de alumínio por quase toda a superfície, com exceção dos pontos densos onde a sílica está presente de forma mais enfática. Mn e Fe também aparecem de forma significativa na superfície do material, assim como fora observado sua presença por meio de ensaio de fluorescência de raios-X.

Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura para amostras queimadas de WTS-0% e WTS-20% (A e B)



Fonte: a Autora.

Foram separados cinco pares de blocos de cada traço para a determinação da susceptibilidade no desenvolvimento de eflorescências, onde uma amostra de cada par foi inserida em um recipiente com uma lâmina d'água de 5 mm e a outra permaneceu seca. Os blocos permaneceram em uma sala com temperatura de  $24 \pm 5$  °C e UR entre  $60 \pm 10\%$ , conforme os requisitos da NBR 15270-2.

O fenômeno da eflorescência é proveniente da presença de sais na composição química do material, de um agente de transporte desses sais e de um meio que seja propícia a

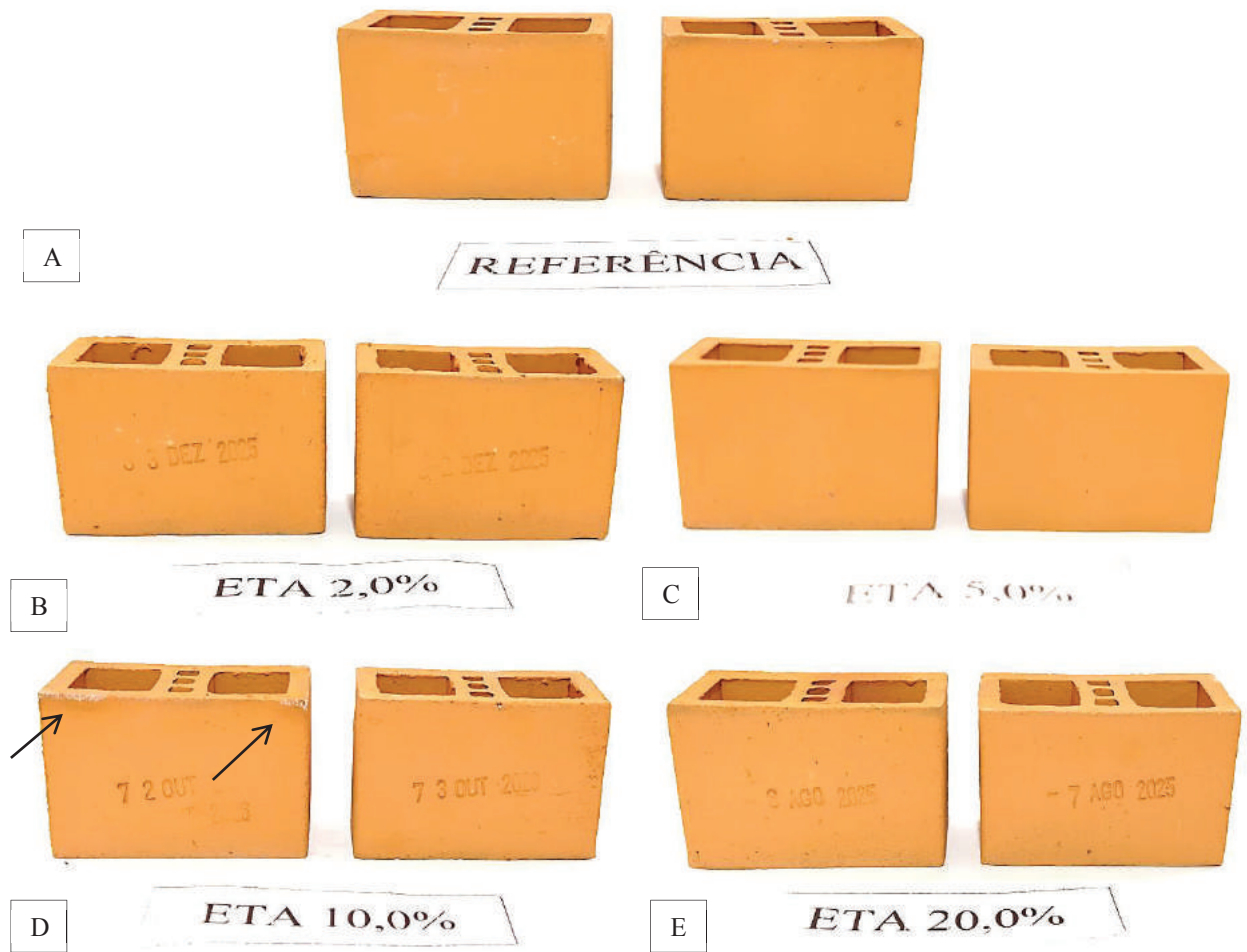


evaporação (CARLOS; CARLOS, 2006; FERREIRA; BERGMANN; ALEGRE, 2011). Neste sentido, devido a presença de sais no material, como cátions de sódio, cálcio e magnésio, e ânions cloretos e sulfatos, na presença de umidade, acontece o depósito do mesmo na superfície do material. Com a evaporação da umidade, permanece somente o resíduo esbranquiçado.

Com base nas imagens de mapeamento na análise de energias dispersivas, a presença de compostos de cálcio, magnésio e sulfatos, indica a possível formação de sais, junto a presença de umidade. O material também apresentou uma absorção de água considerável (~9 a 14%), com a diminuição da densidade do mesmo com o aumento no teor de lodo, sendo assim, a porosidade do material é maior. Unindo tais fatores, forma-se o meio necessário para a ocorrência da eflorescência.

A avaliação da determinação da eflorescência foi feita de forma visual, seguindo os requisitos da norma. Foi observado no traço WTS-10% a ocorrência de eflorescência nos vértices de três das cinco amostras, enquanto nos demais traços, inclusive no WTS-20%, não houve o aparecimento do resíduo esbranquiçado característico de tal fenômeno (Figura 21).

Figura 21 – Comparação de blocos para a determinação da eflorescência



Fonte: a Autora.

## 6 CONCLUSÕES

O teste de varredura de amplitude aplicado em barras de torção foi utilizado com sucesso para quantificar a plasticidade e consistência das misturas com diferentes teores de lodo e umidade. Nesse sentido, o desempenho do processo de extrusão foi ajustado através da avaliação das propriedades reológicas de misturas com diferentes umidades. Portanto, foi claramente identificado que o teor de lodo aumenta a rigidez da mistura verde e maiores teores de umidade são necessários para obter blocos sem defeitos superficiais no momento da extrusão. Este maior teor de água nas misturas com lodo aumenta a retração linear após o processo de secagem. A maior retração também foi identificada após o processo de calcinação, que foi proporcional ao teor de lodo.

O bloco estrutural em escala reduzida produzido com lodo, exibiu uma resistência à compressão semelhante, quando comparado com os blocos de referência, com valores entre 14 e 16 MPa. A análise de Weibull mostrou que o alto teor de lodo (20% em peso) reduz a confiabilidade dos produtos cerâmicos, onde a probabilidade de falha abaixo da resistência característica é ligeiramente maior. Por outro lado, mesmo com desempenho mecânico semelhante, a presença de lodo aumenta a porosidade, com uma maior absorção de água identificada. Entretanto, embora a absorção de água tenha sido mais elevada com 20% de lodo, o valor identificado está dentro dos limites estabelecidos pelas normas.

Do ponto de vista ambiental, o lodo avaliado no presente trabalho foi classificado como resíduo não perigoso (Classe II-A, inerte) e o risco de lixiviação de metais tóxicos dos blocos produzidos pode ser considerado desprezível.

Em linhas gerais, o lodo de tratamento de água aqui avaliado mostrou que sua utilização como matéria-prima na produção de blocos cerâmicos é potencialmente viável. Do ponto de vista técnico e ambiental, o lodo pode ser incluído na mistura em valores abaixo de 5% em peso.

Em trabalhos futuros, seria de grande relevância que fossem avaliados outras variáveis que podem interferir no processo de fabricação dos blocos bem como no seu desempenho. Questões quanto a época do ano em que lodo foi coletado, a temperatura de queima utilizada e a geometria do bloco utilizado devem ser consideradas e analisadas.

## 7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019.
- AHMAD (A), T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 950–955, 2016.
- AHMAD (B), T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 ' R ' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1–13, 2016.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 9, 2017.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics. **Astm**, n. January, p. 1–17, 2018.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C216-19: Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale)**. [s.l.: s.n.].
- ANDRADE, F. A.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Measuring the plasticity of clays: A review. **Applied Clay Science**, v. 51, n. 1–2, p. 1–7, 2011.
- ANDRADE, J. J. DE O. et al. Feasibility of using calcined water treatment sludge in rendering mortars: A technical and sustainable approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 13, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C**. Rio de Janeiro: 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, Brasil: 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro: 2017b.
- BARAN, B. et al. Workability test method for metals applied to examine a workability measure (plastic limit) for clays. **Applied Clay Science**, v. 20, n. 1–2, p. 53–63, 2001.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. DE. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Revista Materia**, v. 14, n. 4, p. 1088–1100, 2009.

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

BRASIL: CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de março de 2005., , 2005.

CARLOS, U. F. D. S.; CARLOS, S. Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão. **Cerâmica**, v. 52, p. 37–49, 2006.

CHEN, H. J. et al. Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 387–394, 2012.

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, 10 nov. 2018.

CULTRONE, G. et al. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 3, p. 547–564, 2004.

CUSIDÓ, J. A.; CREMADES, L. V. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1202–1208, 2012.

CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Particle size distribution of fine powders by LASER diffraction spectrometry. Case of cementitious materials. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 34, n. 240, p. 342–350, 2001.

DA SILVA, E. M. et al. Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 11, p. 1638–1645, 2015.

DASSANAYAKE, K. B. et al. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 321–335, 2015.

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

DE CARVALHO GOMES, S. et al. **Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review** *Resources, Conservation and Recycling* Elsevier B.V., , 1 jun. 2019.

DE OLIVEIRA, C. N. et al. Characterization of a water clearing treatment residue and its application as clay ceramic addition. **Materials Science Forum**, v. 775–776, p. 642–647, 2014.

DHARMAPPA, H. B.; HASIA, A.; HAGARE, P. Water treatment plant residuals management. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 8, p. 45–56, 1997.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** 1 ed. ed. São Carlos: LDiBe, 2012.

- ELLIOTT, H. A.; DEMPSEY, B. A. Agronomic effects of land application of water treatment sludges. **Journal AWWA**, v. 83, n. 4, p. 126–131, 1991.
- FERNANDEZ, L. P. et al. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 2018.
- FERREIRA, C. C.; BERGMANN, C. P.; ALEGRE, P. Formação da eflorescência em cerâmica vermelha: fatores de influência no transporte dos íons  $SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$ . **Cerâmica**, v. 57, p. 356–363, 2011.
- FLORIANO, C. **Mecânica dos Solos**. Porto Alegre: SAGAH, 2016.
- GERALDO, R. H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 146–155, 2017.
- GODOY, L. G. G. DE et al. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 939–950, 2019.
- GODOY, L. G. G. DE et al. Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00329, 2020.
- GUILHERME, P.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A. Behaviour of different industrial ceramic pastes in extrusion process. **Advances in Applied Ceramics**, v. 108, n. 6, p. 347–351, 2009.
- HAGEMANN, S. E. et al. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 916–926, 2019.
- HANDLE, F. (ED.). **Extrusion in Ceramics**. New York: Springer, 2007.
- 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, mar. 2012.
- HUANG, C. H.; WANG, S. Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174–183, 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA e ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. In: MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO DESENVOLVIMENTO E GESTÃO (Ed.). . Rio de Janeiro: [s.n.].
- KAZMIERCZAK, C. DE S. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: ISAIA, G. C. (Ed.). . **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. 1 ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 563–585.
- KIZINIEVIČ, O. et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464–473, 2013.
- KONTA, J. V. I. Clay and man: clay raw materials in the service of man. **Applied Clay Science**, v. 10, n. 4, p. 275–335, 1995.
- KREWSKI, D. et al. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. **Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews**, v. 10, n. SUPPL. 1, p. 1–269, 2007.
- MARITAN, L. et al. Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study

- on clay rich in organic matter. **Applied Clay Science**, v. 31, n. 1–2, p. 1–15, 2006.
- MURRAY, H. H. Overview - clay mineral applications. **Applied Clay Science**, v. 5, p. 379–395, 1991.
- 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.
- OOI, T. Y. et al. Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using Response Surface Methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 228, n. August, p. 13–19, 2018.
- OWAID, H. M.; HAMID, R.; TAHA, M. R. Influence of thermally activated alum sludge ash on the engineering properties of multiple-blended binders concretes. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 216–229, 2014.
- OWAID, H. M.; HAMID, R.; TAHA, M. R. Durability properties of multiple-blended binder concretes incorporating thermally activated alum sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 591–603, 2019.
- PERROT, A. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. **Rheologica Acta**, v. 51, n. 8, p. 743–754, 2012.
- PRASAD, M. S.; REID, K. J.; MURRAY, H. H. Kaolin: Processing, properties and applications. **Applied Clay Science**, v. 6, p. 87–119, 1991.
- QU, Z. et al. Recycling of groundwater treatment sludge to prepare nano-rod erdite particles for tetracycline adsorption. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120, 2020.
- RAMADAN, M. A. et al. Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 4, n. 10, p. 1223–1229, 2008.
- RAMIREZ ZAMORA, R. M. et al. Optimization of the preparation conditions of ceramic products using drinking water treatment sludges. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 43, n. 13 SPEC. ISS., p. 1562–1568, 2008.
- RAUT, S. P.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-crete bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 4037–4042, 2011.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1 ed. ed. São Paulo: Bluncher, 2001.
- RODRÍGUEZ, N. H. et al. Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 267–275, 2011.
- SANTOS, G. Z. B. DOS; MELO FILHO, J. DE A.; MANZATO, L. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.
- SANTOS, P. DE S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2 ed. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1989.
- SCHIAVO, L. S. A. et al. From dry pressing to plastic forming of ceramics: Assessing the workability window. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 594–600, 2018.
- SHENG, Q. et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal of the

sludge in treatment plants in Beijing. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 186, n. 3, 2018.

SOUZA, V. P. et al. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Cerâmica**, v. 54, p. 351–355, 2008.

TANTAWY, M. A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. **Materials Research Bulletin**, v. 61, p. 415–421, 2015.

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, 2011.

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, 2012.

TEIXEIRA, S. R. et al. Effect of the addition of sludge from water treatment plants on the properties of structural ceramic material (Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural). **Cerâmica**, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006a.

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

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, n. 4, p. 561–565, 2011.

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

TURNER, T. et al. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: remaining barriers and questions—a review. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 230, n. 9, 2019.

VERÇOSA, E. J. Materiais Cerâmicos. In: FALCÃO BAUER, L. A. (Ed.). **Materiais de Construção**. 5 ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 526–570.

VICTORIA, A. N. Characterisation and performance evaluation of Water works sludge as bricks material. **International Journal of Engineering**, v. 3, n. 3, p. 8269, 2013.

VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1281–1287, 2008.

VIEIRA, C. M. F.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 781–787, 2008.

WEI, Y. L.; LIN, Y. Y. Role of Fe compounds in light aggregate formation from a reservoir sediment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, n. 1–3, p. 111–115, 2009.

WENG, C. H.; LIN, D. F.; CHIANG, P. C. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 679–685, 2003.

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



XU, G.; ZOU, J.; LI, G. Ceramsite made with water and wastewater sludge and its characteristics affected by SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 19, p. 7417–7423, 2008.

XU, Y. et al. The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick. **Ceramics International**, v. 40, n. 6, p. 8833–8840, 2014.

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