

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Leonardo Marquezan de Oliveira

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DA CERÂMICA
VERMELHA: CARACTERIZAÇÃO DA PLASTICIDADE DE
TARUGOS COM ADIÇÃO DE LODO ESGOTO ATRAVÉS DE
ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO E REOLOGIA**

Santa Maria, RS
2022

Leonardo Marquezan de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Erich D. Rodríguez Martínez

Santa Maria, RS
2022

Leonardo Marquezan de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenheiro Civil**.

Aprovado em 26 de janeiro de 2022

Erich D. Rodríguez Martínez, Prof. Dr. (UFSM)
(Orientador)

Gihad Mohamad, Prof. Dr. (UFSM)

Magnos Baroni, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, todos os anjos e santos e, em especial, a minha madrinha, que me protege, abençoa e iluminam meus passos todos os dias.

Mãe (Rose) e pai (Onei), não existem palavras capazes de expressar minha gratidão aos senhores. Humildemente, posso afirmar que sou muito abençoado em ser seu filho, e que vocês são tudo para mim.

José Pedro, Ronei, Greice e Marcelo, obrigado por cada momento de cuidado, carinho, felicidade e apoio, vocês são minha base e sempre serão minhas inspirações.

Ananda, minha companheira, tua presença em minha vida tornou tudo mais fácil e leve. Obrigado por me motivar, dar forças e encorajar sempre a ir além, amo-te muito!

A todos os professores que tive a oportunidade de ser aluno e, em especial, ao meu orientador, Prof. Erich, agradeço pelos ensinamentos e conselhos transmitidos, serei eternamente grato aos senhores.

Aos colegas e amigos, Guilherme Canzian, Luiz H. Justen, Gabriela Dörr, Pedro Reis, William Viero, Jaqueline Becker, Kauana Berton, Tuani Zat, Lauren Pinheiro, Eduarda Melchior, Paloma Herter e vários outros que contribuíram nessa caminhada de mais de 5 anos, fica aqui minha lembrança e gratidão por todos os momentos e desafios compartilhados.

Por fim, às instituições, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis na Construção (GEMASC) e Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPASV), agradeço por toda estrutura e acolhimento disponibilizado ao longo da realização deste projeto e de toda minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

RESUMO

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA: CARACTERIZAÇÃO DA PLASTICIDADE DE TARUGOS COM ADIÇÃO DE LODO ESGOTO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO E REOLOGIA

AUTOR: Leonardo Markezan de Oliveira
ORIENTADOR: Erich David Rodriguez Martinez

O desenvolvimento socioeconômico e o constante crescimento populacional implicam na geração de inúmeros resíduos industriais. O lodo de esgoto, resíduo classificado como não perigoso, classe A-II (não inerte), é proveniente de estações de tratamento de águas residuais onde, após captação em larga escala, é tratado e geralmente descartado em aterros sanitários. Como alternativa ao descarte, estuda-se a reciclagem do lodo na produção de cerâmicas vermelhas, material cuja demanda e volume produtivo global são extremamente elevados e que oportuniza a reciclagem de baixos teores do resíduo produzindo elementos com alta qualidade e desempenho. O objetivo do presente trabalho é avaliar, através da produção de tijolos de cerâmica vermelha em escala reduzida, o efeito de diferentes teores de substituição de lodo de esgoto na plasticidade de misturas argilosas em verde e verificar a influência dessa no processo de conformação da cerâmica. Foram fixados teores de substituição de 0% a 10% de argila por lodo de esgoto em massa seca, com umidade de extrusão de 30%, de acordo com estudos pré-existentes. Foram avaliadas algumas propriedades físicas dos tarugos extrudados, tais como plasticidade e massa específica, através de ensaios em estado verde. A adição de lodo diminui a porção de comportamento elástico do tarugo quando comparado a referência de 0%, porém avaliando o incremento dos teores de substituição, observou-se a necessidade de uma maior deformação para que se atinja um comportamento predominantemente viscoso, demonstrando que a maior presença de lodo na mistura gera um aumento da fase viscoelástica. Com base nos resultados dos ensaios mecânicos de compressão uniaxial e varredura de deformação, constatou-se que menores teores de substituição de lodo na mistura argilosa apresentaram melhores desempenhos na conformação de blocos cerâmicos, visto que possibilitaram a produção de blocos de ótima qualidade, com boa resistência mecânica e exigiram menor consumo energético na execução do processo de extrusão.

Palavras-chave: Lodo de Esgoto. Materiais cerâmicos. Valorização de resíduos. Plasticidade.

ABSTRACT

RE-USE OF WASTE MATERIALS IN THE RED CERAMIC INDUSTRY - USE OF DEFORMATION AND RHEOLOGICAL TESTS IN THE CHARACTERIZATION OF THE PLASTICITY OF GREEN CLAYS WITH SEWAGE SLUDGE ADDITION

AUTHOR: Leonardo Markezan de Oliveira

ADVISOR: Erich David Rodriguez Martinez

Economic development and population growth generate many types of waste. Sewage sludge (SS), a non-hazardous waste classified as non-inert A-II (NBR), is produced in sewage treatment plants, after collection and treatment, and it's normally disposed in landfills. As another alternative to final disposal, researchers have been studying the possibility of recycling SS in the production of red ceramics, a material widely consumed in the global market, which offers the opportunity to recycle low levels of waste while maintaining the production of high-quality elements. The main purpose of the present research is to evaluate, through the production of red clay bricks on a reduced scale, the effect of varying the SS content on the plasticity of green samples of clay mixtures and to verify the influence of the SS content in the conformation process of clays. The moisture of the systems was fixed in 30%, according to previous studies, and the dry SS content ranged between 0% and 10%. The physical properties of the extruded green billets, such as plasticity and density, were measured through green mixture tests. The increment of SS content reduces the elastic phase of the mixture when compared to the reference system (OSS), however, evaluating the increasement of SS substitution in the systems, it was observed the necessity of a greater deformation to reach a predominantly viscous phase, which shows that the SS increment generates an increase in the viscoelastic phase. Mechanical tests as uniaxial compression and amplitude sweep showed that systems with lower SS content had better performances in the conformation of red ceramic clays, as they enabled the production of high-quality bricks, with high mechanical strengths and a required a lower energy consumption in the execution of the extrusion process.

Keywords: Sewage sludge. Ceramic materials. Waste valorization. Plasticity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.	22
Figura 2 – Parâmetros reológicos obtidos no teste de varredura de amplitude.	28
Figura 3 – Curva tensão-deformação típica de uma massa cerâmica plástica.	29
Figura 4 – Fluxograma das atividades realizadas.	30
Figura 5 – Blend de argilas coletado na empresa cerâmica.	33
Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura do lodo.	36
Figura 7 – Parte interna do malaxador onde as lâminas homogeneizam as matérias primas; (A) massa argilosa antes de ser homogeneizada; (B) massa argilosa após a homogeneização.	38
Figura 8 – Geometria dos blocos cerâmicos; (A) dimensões reais do bloco cerâmico com paredes maciças; (B) dimensões do bloco maciço logo após a extrusão e o processo de corte; (C) dimensões finais do bloco maciço após os processos de secagem e queima.	39
Figura 9 – Maromba à vácuo utilizada para a extrusão das massas argilosas.	41
Figura 10 – Extrusão dos tarugos prismáticos; (A) boquilha de extrusão; (B) tarugos prismáticos extrudados em verde.	41
Figura 11 – Corte dos tarugos prismáticos; (A) gabarito com espaços de 30 mm para o corte dos blocos; (B) gabarito para o corte e molde das barras prismáticas; (C) blocos com em verde com as dimensões de 30x30x30 mm; (D) barras prismáticas com dimensões de 40x10x5 mm.	42
Figura 12 – Amostra de um dos sistemas extrudados sendo submetida ao ensaio de compressão uniaxial para a determinação da curva tensão-deformação.	44
Figura 13 – Amostra prismática de 40x10x5 mm posicionada para a execução do teste de varredura de deformação no reômetro.	46
Figura 14 – Blocos cerâmicos, com dimensões de 30x30x30 mm, de cada um dos sistemas extrudados, avaliados nos testes de desempenho.	47
Figura 15 – Massa específica dos corpos de prova para cada um dos sistemas extrudados	48
Figura 16 – Curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de compressão uniaxial de amostras cúbicas dos sistemas em verde	50
Figura 17 – Resultados obtidos no teste de varredura de deformação para os sistemas extrudados com 30% de umidade (A) módulos de armazenamento (B) módulos de perda	51
Figura 18 – Avaliação dimensional dos sistemas cerâmicos com diferentes teores de lodo de esgoto ao final do processo produtivo	53
Figura 19 – Resistência mecânica à compressão dos blocos cerâmicos extrudados para cada sistema de mistura argilosa.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química típica do lodo bruto e lodo digerido	16
Tabela 2 - Ensaio de caracterização das matérias primas	33
Tabela 3 – Composição química do lodo	35
Tabela 4 – Teor de metais totais determinados por lixiviação e solubilização do lodo	35
Tabela 5 – Propriedades físicas da argila vermelha (AV), argila preta (AP), argila rosa (AR) e mistura das argilas	37
Tabela 6 – Composição química das argilas	37
Tabela 7 – Teores de adição de lodo e nomenclatura dos sistemas.....	38
Tabela 8 – Ensaio de desempenho para tijolos e blocos cerâmicos.....	47
Tabela 9 – Umidade dos sistemas argilosos para o processo de extrusão	49
Tabela 10 – Efeito da variação do teor de lodo de esgoto na tensão de escoamento dos sistemas argilosos.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
GEMASC	Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis na Construção
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SS	Lodo de esgoto “ <i>Sewage sludge</i> ”
kPa	Quilo Pascal
mm	Milímetros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	15
3.1.1 Tratamento de águas residuais e geração de lodo	15
3.1.2 Composição do lodo	16
3.1.3 Aproveitamento do lodo de ETE	17
3.1.4 Potencial da valorização do lodo de ETE na produção de cerâmica vermelha	17
3.2 MATERIAIS CERÂMICOS.....	20
3.2.1 Matérias primas e composição	20
3.2.2 Processo de produção da cerâmica vermelha	21
3.2.2.1 <i>Preparação da amostra</i>	22
3.2.2.2 <i>Conformação</i>	23
3.2.2.3 <i>Secagem</i>	24
3.2.2.4 <i>Queima</i>	25
3.3 PLASTICIDADE DE MASSAS ARGILOSAS.....	25
3.3.1 Efeitos da plasticidade da massa argilosa no processo de extrusão da cerâmica	26
3.3.2 Técnicas de quantificação da plasticidade de massas argilosas	27
3.3.2.1 <i>Teste de varredura de deformação (Amplitude Sweep Test)</i>	27
3.3.2.2 <i>Ensaio de Compressão uniaxial</i>	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	31
4.1.1 Origem e coleta	31
4.1.2 Valorização	32
4.2 ARGILAS.....	32
4.2.1 Origem	32
4.2.2 Beneficiamento	32
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	33
4.2.1 Caracterização do lodo	34
4.2.2 Caracterização das argilas	36
4.4 PROCESSO PRODUTIVO.....	37
4.3.1 Preparação do sistema	37
4.3.2 Definição da geometria dos blocos	38
4.3.4 Extrusão	40
4.3.5 Corte	41
4.3.6 Secagem	43
4.3.7 Queima	43
4.5 ENSAIOS.....	44
4.4.1 Ensaio de compressão uniaxial	44
4.4.2 Teste de varredura de deformação (Amplitude Sweep Test)	45
4.4.3 Outras avaliações	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 COMPOSIÇÃO E RIGIDEZ DOS SISTEMAS EM VERDE.....	48
5.1.1 Homogeneidade e teor umidade das amostras	48
5.1.2 Ensaio de compressão uniaxial	49

5.1.3 Ensaio de varredura de deformação	51
5.2 DESEMPENHO DOS SISTEMAS em estado endurecido	52
5.2.1 Avaliação dimensional dos blocos cerâmicos	52
5.2.2 Resistência mecânica à compressão	53
6. CONCLUSÕES	55
7. REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Cerâmica, termo derivado do grego que significa “argila queimada”, é o produto da técnica de produzir artefatos através da queima da matéria-prima constituinte, a argila. No Brasil, o marco inicial da aplicação desta técnica ocorreu no início do período colonial quando se passou a utilizar os engenhos, construídos para exploração da cana de açúcar, como locais para a produção de tijolos e louças de barro através da implantação de uma fornalha no local.

Atualmente, a indústria cerâmica possui um elevado volume produtivo sendo responsável pela produção e fornecimento de materiais como tijolos/blocos, cerâmicas de revestimentos, louças, telhas e outros materiais que são o “*groundbreaking*” da indústria da construção civil.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), no ano de 2017, o Brasil contava com aproximadamente 6903 fábricas de cerâmica e mais de 1,1 milhões de empregos (entre diretos e indiretos), acumulando um faturamento anual de mais de 18 bilhões de reais (ANICER, 2021).

Com a alta utilização e aplicação dos produtos cerâmicos, o volume produtivo desses materiais é proporcionalmente gigantesco a demanda por matéria-prima para a produção dos mesmos. No Brasil, estima-se que sejam produzidos cerca de 6,2 bilhões de blocos cerâmicos (cerâmica vermelhas) por mês (IBGE, 2019).

Tendo em vista a matéria-prima e o método produtivo utilizado para a fabricação de materiais cerâmicos, pode-se dizer que a indústria cerâmica tem grande potencial para a absorção de resíduos de outras indústrias (SILVA et al., 2014). Pesquisas anteriores já evidenciaram tal potencial produzindo materiais com boa qualidade e desempenho a partir de misturas formadas pela adição de resíduos como pó da indústria siderúrgica (KARAYANNIS, 2016), lodos da fabricação de ligas de ferro-manganês (COTA et al., 2018) e, especialmente, lodos de estações de tratamento de esgoto (ZAT et al., 2021).

A plasticidade da massa argilosa é um fator determinante para o sucesso do processo produtivo de materiais cerâmicos (ANGELERI, 1982), em especial para a cerâmica vermelha, visto que esses são gerados a partir de um processo denominado extrusão. Esse processo visa conformar os blocos cerâmicos a partir da passagem da massa argilosa plástica por um sistema que combina vácuo, prensagem e modelagem a fim de obter um material final “pronto”, porém ainda úmido (HANDLE, 2007).

Em geral, o principal fator influente na plasticidade da massa argilosa é porcentagem de umidade da mistura (CAMPOS et al., 1999), contudo, a adição de resíduos nas misturas

argilosas acaba produzindo mais um fator que influencia na plasticidade do sistema, tornando mais difícil a determinação de uma janela de trabalhabilidade ideal para a extrusão da mistura argilosa e, dessa forma, a produção de artefatos sem defeitos.

Atentando-se para a incorporação do lodo de esgoto, este resíduo é proveniente do tratamento do afluente que é receitado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Em 2017, no Brasil, apenas 34,6% de todo o esgoto gerado no país foi coletado e tratado, evidenciando uma enorme carência de saneamento básico em praticamente todo o território nacional (IBGE, 2017).

Tendo em vista que é necessária e eminente a ampliação da rede de saneamento básico no país, e sabendo que o tratamento do esgoto gera um resíduo que pode conter metais pesados e agentes patógenos (KONIECZKA, 2018), ou seja, que é nocivo a natureza e a saúde humana, torna-se imprescindível encontrar maneiras sustentáveis de valorizar esse resíduo em algum campo industrial que o absorva.

Na produção de materiais cerâmicos, ressalta-se que várias pesquisas já avaliaram a viabilização da adição do lodo de esgoto na mistura argilosa e investigaram os efeitos da incorporação de diferentes teores desse resíduo nas propriedades físico-mecânicas dos materiais produzidos (JORDÁN et al., 2005; MONTEIRO et al., 2008; ZAT et al., 2021)

Pesquisas anteriores, desenvolvidas no grupo de pesquisa, concluíram os intervalos de adição de lodo de esgoto que permitiram a produção de materiais cerâmicos com qualidade e desempenho (ZAT et al., 2021). Contudo, observa-se na literatura que carecem estudos que forneçam dados a respeito da plasticidade e consistência através de análises reológicas das misturas que sejam capazes de auxiliar e otimizar o processo de extrusão da massa argilosa.

Sendo assim, com bases em duas teses de mestrado desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e em pesquisas desenvolvidas no Grupo de Estudos em Materiais Sustentáveis na Construção (GEMASC), o presente trabalho utilizará duas metodologias de ensaios de deformação em verde para identificar e quantificar os efeitos que a adição do lodo de ETE promove na plasticidade e consistência de misturas formadas pela base argilosa comumente utilizadas para a fabricação produtos de cerâmica vermelha e a substituição dessa pelo do resíduo de esgoto em porcentagens que variam de 0% a 10%.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar, a partir de um intervalo de substituição de lodo de esgoto previamente determinado, o efeito dessa substituição na plasticidade de massas argilosas formadas pelo resíduo e pela argila comumente utilizada na fabricação de blocos cerâmicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar corpos de prova em verde que apresentem as mesmas características de compactação e umidade das massas cerâmicas dos sistemas extrudados;
- Correlacionar duas diferentes metodologias de ensaio de rigidez a fim de retratar o comportamento plástico das misturas;
- Identificar os teores de substituição mais apropriados em termos plasticidade da mistura com base na energia de conformação e na qualidade dos produtos cerâmicos em estado endurecido de cada sistema.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os subprodutos do tratamento do esgoto são denominados “lodo”. Esse resíduo é altamente heterogêneo e suas características físico-químicas dependem de múltiplos parâmetros, como o tipo de tratamento aplicado, a origem do esgoto coletado (urbano, industrial, rural) e o clima (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2012).

O lodo é produzido através dos tratamentos primário e secundário nas ETEs (CHANG et al., 2020) e não apresenta, necessariamente, características comuns entre lodos oriundos de diferentes locais, visto que essas dependem do tipo de esgoto tratado, do modelo de tratamento empregado e a eficiência desse sistema operacional (BATISTA, 2015).

3.1.1 Tratamento de águas residuais e geração de lodo

Os métodos de tratamento do esgoto envolvem operações unitárias e processos unitários. A aplicação de força física para a remoção dos contaminantes caracteriza as operações unitárias, já a aplicação de reações químicas e biológicas, com o mesmo objetivo, define os processos. Em uma planta, ambos os métodos são utilizados para fornecer níveis de tratamento denominados preliminar, primário, secundário e terciário (avançado) (METCALF; EDDY, 2003) que são especificados a seguir:

- Tratamento preliminar: consiste na retirada de materiais com grandes volumes e que prejudicam o funcionamento da planta;
- Tratamento primário: remove sólidos menores, sedimentáveis ou flutuantes como plásticos, latas, pedras, entre outros. Pode não estar presente em todas as estações;
- Tratamento secundário: responsável pela retirada da matéria orgânica e redução da DBO através de mecanismos biológicos;
- Avançado: ação conjunta de mecanismos físicos, químicos e biológicos para a remoção da DBO, sólidos e nutrientes, contudo também não está presente em todas as estações de tratamento.

Ao final das etapas de tratamento ocorre a desinfecção, para que se remova micro-organismos patogênicos, reduzindo riscos à saúde humana, e o tratamento do lodo gerado no processo que visa a estabilização dos sólidos removidos durante o processo e a redução do volume de água constituinte (SPELLMAN, 2003)

3.1.2 Composição do lodo

O conhecimento acerca dos constituintes químicos e dos nutrientes presentes no lodo é fundamental para a definição do descarte final e as possibilidades de valorização desse resíduo. A composição química típica do lodo bruto e lodo digerido são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química típica do lodo bruto e lodo digerido

Item	Lodo bruto		Lodo digerido	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Sólidos totais (ST)	5-9	6	2-5	4
Sólidos voláteis (% de ST)	60-80	65	30-60	40
Graxa e gorduras solúveis em éter (%ST)	6-30	-	5-20	18
Proteína (%ST)	20-30	25	15-20	18
Nitrogênio (N, %ST)	1,5-4,0	2,5	1,6-3,0	3,0
Fósforo (P₂O₅, %ST)	0,8-2,8	6	1,5-4,0	2,5
Potássio (P₂O, %ST)	0-1,0	0,4	0-3,0	1,0
Celulose (%ST)	8-15	10	8-15	10
Ferro (exceto na forma de sulfeto)	2,0-4,0	2,5	3,0-8,0	4,0
Sílica (SiO ₂ , %ST)	15-20	-	10-20	-
pH	5-8	6	6,5-7,5	7
Alcalinidade (mg/L em CaCO ₃)	500-1500	600	2500-3500	3000
Ácidos orgânicos (mg/L em HAc)	200-2000	500	100-600	200
Conteúdo de energia (kJ·TS/kg)	23000-29000	25000	9000-14000	12000

Fonte: adaptado de (METCALF; EDDY, 2003)

Como o lodo é genericamente formado por partículas orgânicas, inorgânicas, microrganismos e um teor de água de 94-97% (GUANGYIN, ZHEN; YOUCAI, 2016), é necessário que esse passe por um processo de desidratação através de filtros-prensa de câmara, centrífugas ou decantadores (SCHNELL; HORST; QUICKER, 2020) para que se possa dar sequência com o processo de disposição desse material.

Os destinos mais usuais para esse resíduo são a incineração, a utilização na agricultura, devido à grande presença de nutrientes (N, P e micronutrientes) e matéria orgânica, além de outras aplicações que variam de acordo a regulamentação legislativa de cada país. No Brasil, a

disposição final mais praticada para esse material é o descarte em lixões a céu aberto ou em aterros sanitários (AREIAS et al., 2017).

3.1.3 Aproveitamento do lodo de ETE

A simples disposição do lodo em aterros sanitários, prática comum em países subdesenvolvidos e/ou em desenvolvimento, além de não inibir os futuros problemas ambientais (GUANGYIN, ZHEN; YOUCAI, 2016), representa também o desperdício de um material com grande potencial de valorização e aplicação nas áreas da agricultura e da indústria da construção civil como mostram várias pesquisas.

Devido a sua composição com elevado teor de matéria orgânica e nutrientes, o lodo tratado pode ser utilizado como bio sólido, fertilizante, sem causar impactos negativos ao meio ambiente, no cultivo e na produção de fumo e de aveia (ZOMER et al., 2018). Essa prática é comum em vários lugares, contudo, ressalta-se que é regida por critérios de proteção a saúde pública e ao meio ambiente de cada país, como a Resolução 375 de agosto de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente no Brasil (BRASIL, 2006).

Quando a utilização como fertilizante não é viável, surgem alternativas como a fabricação de biofloculantes à base de lodo, o uso como fonte de energia para tratamentos térmicos (SHI, 2018) e a promissora incorporação desse material na fabricação de materiais de construção civil, na qual destacam-se a utilização do lodo na produção de clínquer (LIN et al., 2012), na produção de argila expandida (CUSIDÓ; SORIANO, 2011) e na produção de blocos cerâmicos (ZAT et al., 2021) sinalizando possibilidades promissoras no sentido de encontrar disposições finais mais ecológicas para esse resíduo.

3.1.4 Potencial da valorização do lodo de ETE na produção de cerâmica vermelha

A indústria cerâmica destaca-se nos últimos anos como uma alternativa muito promissora para a destinação e valorização de grandes quantidades de resíduos poluentes dos mais diversos tipos e origens (DA SILVA; CHINELATTO; CHINELATTO, 2015). De forma geral, as características físico-químicas das matérias-primas comumente utilizada pela indústria cerâmica, bem como seu processamento, favorecem a incorporação de resíduos na massa cerâmica.

Em termos de produtividade, a incorporação de valores pode ser muito vantajosa, visto que, reduz o consumo de matérias-primas e de energia e, conseqüentemente, os custos de

produção (MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002). Ambientalmente, o uso de resíduos como lodo de esgoto, e outros, como matéria-prima para o setor cerâmico, demonstra-se uma destinação ambientalmente amigável e correta, visto que recicla resíduos, evitando a disposição incorreta, a degradação de áreas e reduz o consumo de matérias-primas finitas, uma vez que a argila é o precursor principal da indústria da cerâmica (DA SILVA; CHINELATTO; CHINELATTO, 2015).

Resultados da incorporação do lodo de ETE à cerâmica vermelha vêm apontando ser uma alternativa eficiente e definitiva (AREIAS et al., 2017; CUSIDÓ; CREMADES, 2012; WENG; LIN; CHIANG, 2003), visto que o processo de vitrificação aplicado ao longo do processo produtivo da cerâmica inertiza elementos contaminantes presentes no resíduos, evitando a disposição destes no meio ambiente (TELOEKEN; VILLANOVA; BERGMANN, 2011).

A incorporação de lodo de esgoto a matéria-prima argilosa convencionalmente aplicada para a fabricação de cerâmica vermelha tem sido pesquisada desde 1980, quando se propôs a produção de tijolos em escala reduzida com adição de lodo (ALLEMAN, 1984). Os chamados "biobricks" foram produzidos com adições volumétricas de lodo inferiores a 30% e tinham aparência, toque e cheiro de um tijolo comum, bem como conformidade com os critérios exigidos pela ASTM para tijolos de severo grau de intemperismo

Ainda na década de 80, outras pesquisas avaliaram a incorporação do resíduo de ETE na produção de cerâmica vermelha, contudo relatou-se receio do mercado consumidor daquela época em adquirir estes produtos com valorização de resíduo (TAY, 1987).

Atualmente, com a necessidade de valorizar resíduos e produzir materiais mais ecológicos, várias pesquisas se encarregaram de avaliar o desempenho, a produtividade e a segurança de incorporar lodo de esgoto na mistura argilosa utilizada para fabricação de cerâmica vermelha (AREIAS et al., 2017; CUSIDÓ; CREMADES, 2012; ZAT, 2021).

Devido à preocupação pública com a segurança sanitária das edificações construídas com materiais gerados a partir da valorização do lodo, visto que se sugeria uma possível deposição resíduos tóxicos e perigosos diretamente nas residências, foram realizados estudos de lixiviação e toxicidade de materiais cerâmicos com a inserção de 0 a 25% de diferentes tipos de lodo de esgoto municipal e lodo de indústria de papel, a fim de evidenciar a inocuidade desses materiais durante seu ciclo de vida. O resíduo foi inertizado em todas os percentuais de adição, evidenciando a segurança do processo produtivo e da utilização dos materiais gerados (CUSIDÓ; CREMADES, 2012).

O comportamento físico-mecânico da cerâmica vermelha valorizada com lodo de ETE também foi avaliada através de ensaios de retração linear, absorção de água e resistência à compressão. Com sistemas apresentando 0, 2,5, 10 e 15% de substituição em massa de argila pelo resíduo de esgoto, foram moldados corpos de prova por prensagem uniaxial a 20 MPa, com 8% de umidade e calcinação de 950 °C. Os resultados inferiram que pequenas porcentagens de incorporação, até 2,5%, são mais indicadas, pois percentuais maiores de substituição acabam prejudicando as propriedades físicas e mecânicas da cerâmica (AREIAS et al., 2017).

Na produção de cerâmica vermelha extrudada de alta qualidade com adição de lodo, analisou-se também a influência das condições de umidade da mistura no processo de extrusão da massa argilosa. Através da execução de testes de varredura de amplitude de deformação de cisalhamento (torção) em amostras prismáticas verdes (úmidas) produzidas com diferentes teores de umidade e lodo, concluiu-se que para proporções de lodo de esgoto de até 10% em peso, o teor de umidade ideal para extrusão ficou no intervalo de 29 a 33% em peso. A retração linear total após secagem e queima, bem como a absorção de água, e a resistência mecânica a compressão estiveram dentro dos limites exigidos para tijolos cerâmicos para os teores de lodo inferiores a 15% de substituição (ZAT et al., 2021).

De modo geral, a utilização de lodo de ETE na produção de materiais de cerâmica vermelha já foi consolidada por vários resultados positivos obtidos por pesquisas. Em termos de ambientais como a lixiviação, consolidou-se que adições de até 25% de lodo apresentam resultados positivos e são completamente inertizadas pelo processo produtivo da cerâmica (CUSIDÓ; CREMADES, 2012). Na produção de cerâmicas prensadas, os valores de substituição inferiores a 2,5% são mais indicados visto que superiores a esse não são capazes de manter um desempenho igual ao da mistura de referência (AREIAS et al., 2017). Por fim, na produção de cerâmicas vermelhas extrudadas, denota-se a capacidade de gerar produtos de qualidade e desempenho, com controle de retração, absorção de água e resistência mecânica, aplicando substituição de lodo de até 15%, caso a umidade do sistema esteja no intervalo de 29-33% para que se mantenha uma plasticidade adequada da massa argilosa (ZAT et al., 2021).

3.2 MATERIAIS CERÂMICOS

Devido à alta disponibilidade e baixo custo dos minerais de silicato e silicato de alumínio, principais constituintes dos produtos cerâmicos (CARTER, C. B.; NORTON, 2007), artefatos como tijolos, telhas, pisos entre outros, são globalmente difundidos e utilizados há milhares de anos.

Em geral, trata-se de um material com elevada dureza, resistência ao desgaste e, devido a sua baixa condutividade térmica, apresentam boa resistência a choques térmicos e a altas temperaturas (refratárias). Ademais, caracterizados por interações iônicas e covalentes, em sua grande maioria, os materiais cerâmicos não possuem boa condutividade elétrica e térmica, atuando por vezes como isolantes e, em relação ao comportamento mecânico, apresentam baixa tenacidade ao mesmo tempo que têm ruptura do tipo frágil, o que dificulta sua aplicação como elemento estrutural na engenharia (ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE JR., 1991)

O processo de produção das cerâmicas evoluiu muito ao longo da história e, atualmente, consiste em 3 etapas: moldagem, secagem e queima das argilas. Nesta última etapa, a queima, o corpo argiloso aglutina-se formando pequenas quantidades de vidro que surgem devido a altíssima aplicação de calor sobre o material (BAUER, 2008), essa etapa também pode ser chamada de vitrificação e, além de conferir algumas das características já mencionadas anteriormente, é responsável por conferir bom acabamento a superfície do material.

3.2.1 Matérias primas e composição

A argila, matéria-prima da cerâmica é um material terroso, com diâmetro de partícula inferior a 0,2 μm segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), ou seja, possui granulometria muito fina, que permite com que a massa argilosa seja facilmente modelada quando essa entra em contato com certa quantidade de água, assumindo assim um comportamento denominado plástico. Após um tratamento térmico de queima, essa mesma massa argilosa que fora modelada quando plástica adquire elevada resistência mecânica e térmica (WOLFF, 2008).

Ao focar na cerâmica vermelha, as argilas provenientes da extração em jazidas naturais, são formadas pela ação do processo de intemperismo físico e químico do feldspato em rochas ígneas e metamórficas, formando assim a base das demais argilas, o caulim (CARTER, C. B.; NORTON, 2013). As argilas são formadas por argilominerais, partículas cristalinas muito pequenas que são silicatos hidráulicos de alumínio e ferro que podem conter outros elementos

alcalinos e alcalinos-terrosos (SANTOS, 1989). Os principais exemplos de argilominerais são a caulinita, a illita e a montmorilinita NBR 6502 (ABNT, 1995).

O comportamento da massa e as propriedades dos produtos fabricados com argila, tais como resistência mecânica e textura e distribuição de poros são resultado da distribuição granulométrica e o formato das partículas formadoras das argilas (KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, 1976).

De modo geral, existem grupos de argilominerais que são mais adequados e utilizados na fabricação de produtos de cerâmica vermelha, dentre esses destacam-se os grupos da caulinita, esmectita e illita (JUNIOR et al., 2008). Destaca-se também que, como forma de controlar a plasticidade e retração dos compostos de argila, essas são utilizadas de forma combinada, formando, assim, um “blend” argiloso para a produção dos artefatos cerâmicos (KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, 1976).

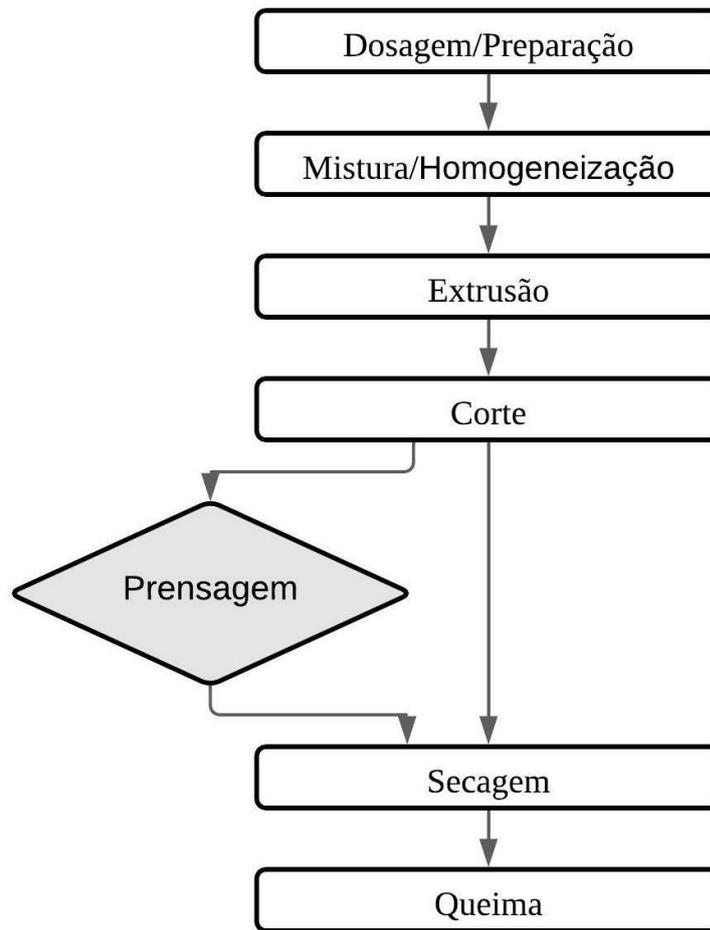
Pode-se concluir então que a escolha das argilas e o correto beneficiamento são cruciais para a qualidade do produto desenvolvido. A dosagem, homogeneização e mistura do material, podem ou não permitir que se alcance o desempenho esperado em termos de qualidade, contudo, para que isso ocorra, faz-se necessário o estudo profundo acerca de cada uma dessas variáveis de produção (ZAT, 2021).

3.2.2 Processo de produção da cerâmica vermelha

O processo de fabricação de produtos de cerâmica vermelha possui várias etapas de processamento como preparo da matéria-prima, homogeneização, conformação, secagem e queima (MAIA, 2012). Estas etapas são ilustradas no fluxograma da Figura 1.

De forma geral, o processamento para produção de cerâmica vermelha é composto por uma etapas sequenciais integradas, que vão desde a escolha da matéria-prima até a queima da peça. As quatro as etapas principais são: a preparação da massa, a conformação, a secagem e a queima. Todos esses estágios devem ser avaliados e otimizados de forma global, a fim de se obter um bom produto final e, conseqüentemente, as boas propriedades características (DOS SANTOS et al., 2017).

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.



Fonte: adaptado de (MAIA, 2012)

Observando o fluxograma, fica claro que a diferença entre os principais processos produtivos de cerâmica vermelha está na maneira de promover a conformação da massa argilosa, a fim de modelar a mistura argilosa conforme o material que se objetiva produzir (BAUER, 2008). A seguir, serão abordadas as etapas de preparação e conformação, secagem e queima.

3.2.2.1 Preparação da amostra

Essa etapa inclui a escolha das matérias-primas, a mistura e a laminação da massa argilosa. As cerâmicas são normalmente compostas de duas ou mais argilas e uma fonte de sílica, normalmente sendo uma areia quartzosa. Os materiais são dosados e misturados e, dependendo dos materiais utilizados, pode ocorrer uma variação do tempo mínimo de mistura das matérias-primas a fim de garantir uma homogeneização completa (ZAT, 2021).

A laminação é um processo de beneficiamento de argilas que objetiva homogeneizar o tamanho das partículas antes que a mistura passe para o processo de conformação. A granulometria e finura dos materiais é de suma importância para a modelagem na conformação e para o processo de vitrificação proporcionado pela queima (CARTER, C. B; NORTON, 2013).

3.2.2.2 Conformação

Existem dois principais métodos de promover a conformação da massa argilosa, e a interação entre as características granulométricas, mineralógicas e químicas da mistura argilosa dependem diretamente do tipo de processo de conformação utilizado (DOS SANTOS et al., 2017).

A extrusão é um processo de conformação plástica, por vezes limitada à fabricação de objetos de seção constante, muito utilizada na indústria da cerâmica para conformação de tarugos argilosos (RIBEIRO et al., 2003). Essa é a forma mais comum de efetivar o processo de conformação de tijolos e é a mais aplicada em toda a indústria da cerâmica vermelha. O processo consiste na passagem da massa argilosa plástica por um sistema que combina vácuo e prensagem através de um equipamento de extrusão horizontal denominado “*maromba*”. Dessa forma, geram-se produtos uniformes com boa qualidade de acabamento superficial (HANDLE, 2007).

Existem vários fatores que afetam o rendimento do processo e a qualidade dos produtos gerados pela conformação por extrusão. Dentre eles, destacam-se a composição e a preparação das massas cerâmicas, a plasticidade das massas argilosas, os moldes usados (boquilhas utilizadas no equipamento de extrusão), o tipo de extrusora e a qualidade do vácuo (RIBEIRO et al., 2003).

A prensagem é um método de conformação baseado na compactação de um pó granulado com baixa umidade através da aplicação de pressão. Esse método compreende três fases (MAIA, 2012):

1. Preenchimento da cavidade do molde;
2. Compactação da massa;
3. Extração da peça.

A compactação pode ser feita em baixa pressão fazendo com que as partículas se arranjem no interior das cavidades da matriz. O aumento da pressão gera a deformação plástica

dos grãos, diminuindo a porosidade intergranular do corpo. Porém, essa deformação ocorre somente sobre pressões extremamente elevadas (Albajo, 2000 apudi MAIA, 2012).

Quando materiais de cerâmica vermelha são conformados a partir da prensagem, a etapa produtiva elimina grande parte das perdas se comparadas ao processo de extrusão, pois a massa argilosa possui baixa umidade, dispensando a etapa seguinte de secagem. Nos canteiros de obra, a grande vantagem dos produtos prensados se deve a maior precisão dimensional das peças, promovendo melhor encaixe, evitando desperdícios e necessidades de correção superficial (PEDROTI et al., 2011).

De modo geral, o processo de conformação por extrusão se sobrepõe quando comparado com o processo de prensagem, uma vez que a extrusão proporciona resistências superiores. Além disso, quando se aumenta o tempo de permanência na temperatura máxima na queima dos artefatos, ocorre um melhor balanceamento entre as reações químicas e físicas, impactando na fabricação de peças com melhores propriedades mecânicas (DOS SANTOS et al., 2017).

Por fim, ressalta-se que para atingir bons resultados na conformação de artefatos cerâmicos, independentemente do método escolhido, é necessário que a massa argilosa apresente as menores variações possíveis em termos de composição, grau de moagem e teor de umidade (CARTY, W. M.; LEE, 1996).

3.3.2.3 Secagem

A secagem dos produtos cerâmicos visa retirar a água presente na mistura argilosa, a fim de propiciar uma etapa de queima sem a ocorrência de fissuras. Após o processo de conformação, as peças produzidas apresentam elevado teor de umidade e o gerenciamento dessa retirada de umidade deve ser feito de forma lenta e gradual, pois é decisivo para o controle das tensões produzidas pela pressão da expulsão da água interna e/ou retração diferencial da peça (REED, 1995).

Essa etapa pode ser efetivada de maneira natural, simplesmente através da estocagem dos artefatos em prateleiras exposta ao ar ambiente, ou de maneira artificial, utilizando estufas ou câmaras climáticas. Também, pode-se optar por um modelo de secagem combinado natural e artificial (LINDNER, 2001).

3.3.2.4 *Queima*

A segunda etapa do processo de tratamento térmico é a queima dos artefatos, considerada por alguns como a etapa mais importante do processo de produção de materiais cerâmicos. Nesse processo os produtos desenvolvem sua microestrutura e adquirem propriedades importantes como resistência e durabilidade através de um processo de três fases: aquecimento, queima e resfriamento (REED, 1995).

A fase de aquecimento e resfriamento são importantes, pois a cerâmica não suporta mudanças abruptas de temperatura. Sendo assim, ao ser exposto ao alto calor de aproximadamente 1000 °C, acontecem uma série de reações químicas entre os minerais, formando um corpo cerâmico forte e denso (BARSOUM, 2019).

Há, durante esse processo, uma retração do corpo cerâmico gerado pela aproximação das partículas, bem como a saída da água, o aumento dos grãos pelo processo de vitrificação e a perda de massa orgânica. Tudo isso contribui para o aumento da densidade do material e exige um alto controle do processo para que não se gere trincas e falhas microestruturais no material (ZAT, 2021).

3.3 PLASTICIDADE DE MASSAS ARGILOSAS

Plasticidade é a capacidade que uma massa úmida tem de se deformar irreversivelmente, quando sofre a aplicação de uma força (tensão), sem se romper (SANTOS, 1989). Considerando a massa cerâmica como um sistema granular composto por pó, água e ar, a plasticidade dessa massa resulta da coesão gerada pela tensão superficial atuante na interface água-ar. Conclui-se assim que materiais granulares secos não podem ser plásticos, visto que não possuem água interna para gerar coesão entre as partículas (MITARAI; NORI, 2006).

Essa propriedade de massas argilosas úmidas é, essencialmente, resultante das forças de atração entre as partículas lamelares de argilominerais carregadas eletricamente e da ação lubrificante da água que existe entre as partículas. Pode-se admitir que a plasticidade se desenvolve quando o sistema argila-água tem água suficiente para cobrir a superfície acessível dos argilominerais com uma película de água rígida, agindo como um meio lubrificante que facilita o deslizamento das partículas umas sobre as outras, em estado verde, quando uma tensão tangencial é aplicada (RAWET, J.; SANTOS, 1980).

De um modo geral, o mecanismo de plasticidade das argilas tem sido muito estudado e discutido desde os anos 80 (AMARANTE, 1981), visto que a plasticidade das massas argilosas

é a propriedade que interessa toda indústria cerâmica. Sistemas de argila-água com alta plasticidade requerem a aplicação de maiores tensões para se deformarem e deformam-se em maior extensão, sem rachaduras ou rompimento. Sistemas de baixa plasticidade deformam-se e se rompem mais facilmente (BROWNELL, 1977)

As exigências relativas a essa propriedade variam entre os diferentes ramos industriais (ANGELERI, 1982). Se o sistema argila-água-ar não fosse adequadamente plástico, não seria possível moldagem de produtos de cerâmica vermelha por extrusão (RAWET, J.; SANTOS, 1980). Os principais fatores influentes na plasticidade de massas argilosas são (BAUER, 2008; RIBEIRO et al., 2003):

- O teor de umidade da massa;
- A composição mineralógica dos materiais formadores da massa;
- Presença de diferentes materiais;
- A granulometria das partículas.

3.3.1 Efeitos da plasticidade da massa argilosa no processo de extrusão da cerâmica

Para avaliar o desempenho de uma massa argilosa no processo de conformação, o termo “trabalhabilidade” é frequentemente utilizado como sinônimo de plasticidade. De modo prático, podem-se definir dois tipos diferentes de plasticidade: a “boa” e a “ruim”. Se a massa se adapta perfeitamente ao processo de conformação, define-se a plasticidade como “boa”. Se a massa conformada apresenta defeitos ou gera dificuldades no processo de conformação, a plasticidade é considerada como “ruim” (CARTY, W. M.; LEE, 1996).

A plasticidade das massas argilosas influencia diretamente o processo de extrusão de materiais cerâmicos (ZAT, 2021). Sendo uma propriedade facilmente influenciada por múltiplos aspectos, a quantificação da trabalhabilidade de uma massa cerâmica, bem como a correlação dessa medição com o processo de conformação da cerâmica, apresenta vários desafios (SCHIAVO et al., 2018).

A trabalhabilidade da massa argilosa pode ser alterada variando a umidade do sistema e, no processo de extrusão, essa é a maneira mais simples de se variar e alcançar a plasticidade “boa” necessária para o êxito do processo. Contudo, outros fatores também podem promover alterações na plasticidade do sistema e, dentre esses, destaca-se a adição de resíduos valorizados (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011).

3.3.2 Técnicas de quantificação da plasticidade de massas argilosas

A plasticidade é uma propriedade difícil de ser quantificada e, apesar do avanço no conhecimento acerca dessa propriedade e nos métodos de medição, não há um procedimento padrão comum a todos os tipos de materiais. Sendo assim, os métodos mais importantes são aqueles capazes de simular condições reais de processamento e produção (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011; RIBEIRO et al., 2003).

Para a influência da umidade na trabalhabilidade da massa argilosa, estudos anteriores avaliaram a existência de um intervalo de umidade no qual a plasticidade da massa facilita a conformação dos tarugos por extrusão. Esse intervalo, a “janela de trabalhabilidade” é normalmente identificada através dos limites de plasticidade e liquidez (SCHIAVO et al., 2018).

Interpretando os conceitos, denota-se que a janela de trabalhabilidade tem relação direta com a rigidez da massa cerâmica no momento da extrusão e, sendo assim, é possível identificar e quantificar o comportamento plástico dos sistemas argilosos através de metodologias que avaliem a deformação dos tarugos argilosos extrudados em verde (SCHIAVO et al., 2018)

Ao submeter corpos de prova em verde, extraídos diretamente do tarugo extrudado, a ensaios como o teste de compressão uniaxial e o teste de varredura de deformação (Amplitude Sweep Test), é possível gerar curvas de tensão-deformação, bem como mensurar os módulos de armazenamento e perda de deformação, a fim de quantificar o comportamento plástico de cada sistema argiloso. Através da correlação dos resultados, é possível identificar as composições argilosas que plasticamente sejam mais adequadas para utilização no processo de conformação da massa cerâmica (SCHIAVO et al., 2018; ZAT, 2021).

3.3.2.1 Teste de varredura de deformação (*Amplitude Sweep Test*)

O teste de varredura de deformações permite observar a rigidez e o mecanismo de deformação dos materiais através do comportamento reológico das massas argilosas quando submetidas a diferentes níveis de deformações induzidas (ZAT, 2021).

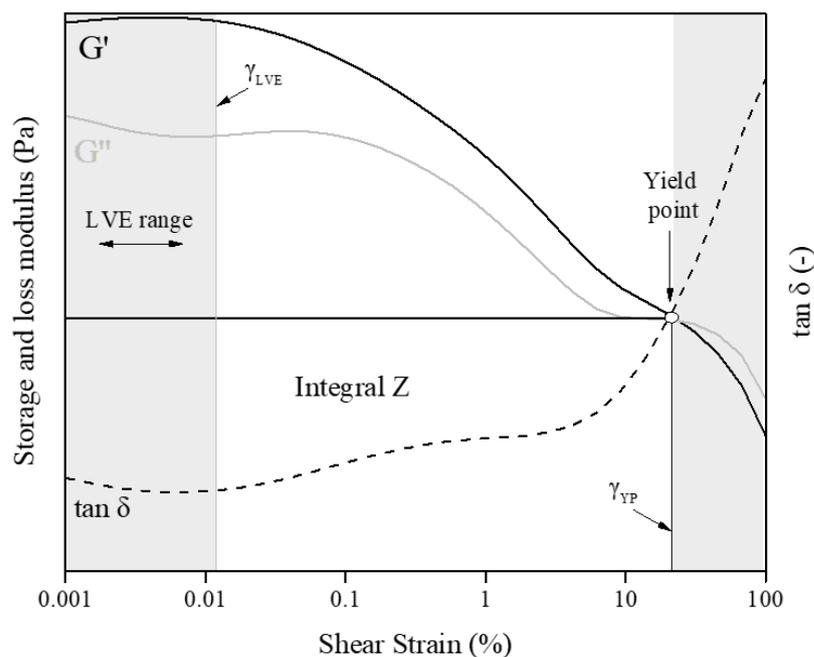
O módulo dinâmico $|G^*|$ e o ângulo de fase (ϕ) são variáveis quantificadas através do ensaio e permitem o cálculo do módulo de armazenamento (G') (porção de deformação elástica independente do tempo) (Equação 1), o módulo de perda (G'') (porção de deformação viscosa defasada no tempo) (Equação 2), e outros parâmetros (Figura 2). Quanto maiores são os valores

dos módulos G' e G'' , mais rígido é o material que se está analisando (MEZGER, 2014; PÉRTILE et al., 2018).

Equação I:
$$G' = |G^*| * \cos\left(\varphi * \frac{\pi}{180}\right)$$

Equação II:
$$G'' = |G^*| * \sin\left(\varphi * \frac{\pi}{180}\right)$$

Figura 2 – Parâmetros reológicos obtidos no teste de varredura de amplitude.



Fonte: (ZAT, 2021)

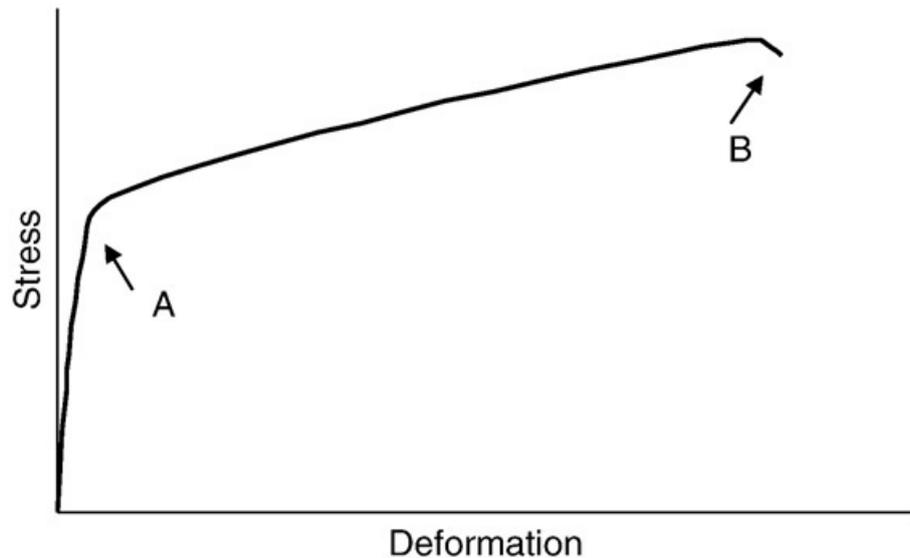
3.3.2.2 Ensaio de Compressão uniaxial

Assim como para outros tipos de materiais, o ensaio de compressão uniaxial pode ser aplicado para avaliar a plasticidade das argilas. As curva tensão-deformação características geradas por esse ensaio são capazes de fornecer informações acerca de vários parâmetros de cada tipo de material como o módulo de elasticidade, resistência ao escoamento, deformação máxima e resistência à ruptura (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011).

A Figura 3 mostra a curva tensão-deformação típica de um material genérico. Ao analisar a curvatura, percebe-se que o material apresenta comportamento elástico até o ponto A, depois passa para um comportamento plástico até atingir o ponto B, no qual começam a

aparecer fissuras. Devido à pequena área efetiva, a tensão aumenta rapidamente até que ocorre o colapso do corpo de prova (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2005).

Figura 3 – Curva tensão-deformação típica de uma massa cerâmica plástica.



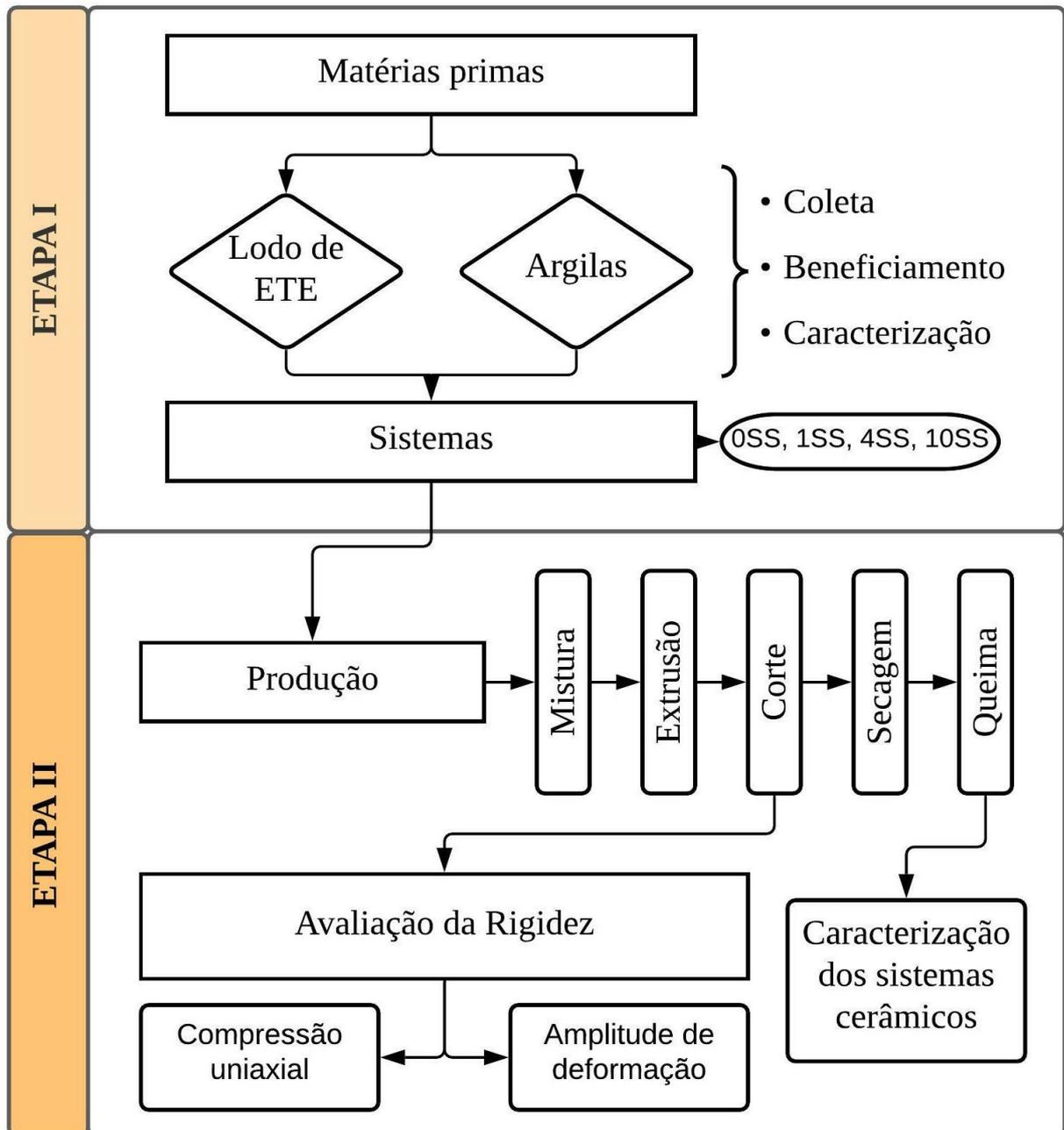
Fonte: (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2005)

Este método avaliativo apresenta grande potencial para ser utilizado na avaliação da plasticidade de misturas argilosas utilizadas na extrusão de artefatos cerâmicos, pois a precisão e reprodutibilidade do teste permitem avaliar e comparar diferentes sistemas argila-água com rapidez e confiabilidade (sem depender de fatores humanos como o que ocorre com os limites de Atterberg), determinados parâmetros que são capazes de otimizar o processo de conformação da cerâmica (ANDRADE; AL-QURESHI; HOTZA, 2011; RIBEIRO et al., 2003; SCHIAVO et al., 2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 4 apresenta por etapas as atividades realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 4 – Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Autor

A *Etapa I* abrange a coleta, o beneficiamento e a caracterização das matérias primas, e a determinação dos valores de substituição de lodo em cada um dos sistemas a serem produzidos

na etapa seguinte. A *Etapa II* consiste na produção dos tarugos cerâmicos, compreendendo os processos de mistura, extrusão e corte destes, e a sequente avaliação da rigidez desses tarugos em verde através de ensaios reológicos para se inferir a respeito de suas plasticidades.

4.1 LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

4.1.1 Origem e coleta

O lodo é oriundo de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) localizada na cidade de São Gabriel/RS. A administração desta ETE está sob responsabilidade de uma empresa local, a qual também é responsável pelo abastecimento de água do município. Atualmente, aproximadamente 12 mil habitantes, 19% da população total do município, são abrangidos pela rede de coleta de esgoto a qual não tem participação de dejetos gerados em indústrias o que classifica o material gerado como Classe II-A não inerte, de acordo com a NBR 10004 (ABNT 2004).

O processo de tratamento de esgoto efetuado tem influência direta na quantidade de lodo gerada e nas características finais do resíduo (TYTŁA, 2019). Como principais pontos influentes nesses fatores, destacam-se a eficiência dos sistemas de tratamento (qualidade e quantidade do lodo gerado), a estabilização, a desidratabilidade e a composição do esgoto (concentração de matéria orgânica e metais pesados).

Na ETE, o processo primário, primeira etapa de tratamento do esgoto, ocorre através de um gradeamento que tem como finalidade reter resíduos sólidos depositos incorretamente na rede de coleta. Após, o esgoto passa por um desarenador, onde ficam retidos detritos sólidos menores que se sedimentam no fundo do tanque, e tanques Imhoff onde, além da sedimentação, ocorre digestão anaeróbica também.

Em conjunto desses tanques, atuam um filtro biológico promovendo a fixação de microrganismos aeróbicos que visa converter e oxidar matéria orgânica e nutrientes, e um dispersor sob leito de pedra. Após o armazenamento do lodo em tanques, este é levado para leitos de secagem onde permanece disposto até que ocorra a retirada da umidade (cerca de 3 meses). Depois disso, é removido e conduzido a aterros sanitários.

As amostras desse lodo foram coletadas do tanque de secagem, onde ocorre a desidratação do lodo por processo natural e, devido a heterogeneidade do resíduo, a coleta do material utilizou uma caneca amostrada, conforme indicado na NBR 10007 (ABNT, 2004) a fim de retirar amostras representativas de todo lodo disposto.

4.1.2 Valorização

Em laboratório, a primeira atividade foi a determinação da umidade do lodo coletado, encontrando-se um valor de aproximadamente de 5%. Após, utilizando uma peneira de malha 4,8 mm, peneirou-se o material para que se retirasse folhas e raízes presentes na amostra. Em seguida, foi utilizado um britador de mandíbula com abertura de saída de 2 mm onde todo o lodo foi destorroado para ser seco em estufa por 48 h a uma temperatura 105 °C. Com a conclusão das etapas de beneficiamento, o material foi armazenado em recipientes plásticos herméticos até que fossem utilizados na produção dos blocos cerâmicos.

4.2 ARGILAS

4.2.1 Origem

O blend de argilas utilizadas neste trabalho é proveniente de uma indústria de materiais cerâmicos localizada no município de Santa Maria/RS, a qual produz blocos cerâmicos estruturais e de vedação. O blend foi coletado na empresa, retirado diretamente do lugar de maturação e é formado por 3 tipos de argila, argila vermelha (AV) e argila preta (AP), oriundas de jazidas naturais locais, e argila rosa (AR) proveniente e uma jazida localizada na cidade de São Pedro do Sul/RS.

4.2.2 Beneficiamento

A maturação da argila, também conhecida como apodrecimento da argila, é o processo deposição dessa ao ar livre por um período que varia de 6 a 12 meses, com o objetivo promover o melhoramento das características plásticas e da trabalhabilidade do material. (BAUER, 2008).

As argilas AV e AP, cujas jazidas distanciam-se 500 m entre si, são maturadas em conjunto em uma área de 10.000 m² onde são armazenadas em camadas alternadas de aproximadamente 0,30 m e, após, são transportadas para a empresa onde ficam estocadas em local coberto até sua utilização. A AR é extraída e transportada diretamente para fábrica.

A mistura de AV e AP passa pelo processo de moagem e destorroamento a fim de desagregar e diminuir o tamanho das partículas do solo e, após, é adicionada a AR a mistura formando assim o blend de argilas. Destaca-se que as argilas são misturadas com base nos materiais secos em peso, nas proporções de 38,37% AP, 38,37% AV e 23,26% AR. Efetuada a

mistura e homogeneização das três argilas, o material retorna ao estoque da empresa, onde fica novamente em processo de maturação até que seja utilizado (Figura 5).

Figura 5 – Blend de argilas coletado na empresa cerâmica.



Fonte: Autor

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Os ensaios de caracterização das matérias-primas do presente trabalho fazem parte de um projeto macro que inclui diferentes dissertações de mestrado. Na Tabela 2, são especificados os ensaios realizados, bem como os objetivos e as respectivas normativas utilizadas de cada um desses. Este TCC não tem por objetivo apresentar o resultado de todos os ensaios de caracterização, contudo todos esses podem ser encontradas na dissertação de Zat (2021) (ZAT, 2021).

Tabela 2 - Ensaio de caracterização das matérias primas

Ensaio	Objetivo	Parâmetros/Normas	Equipamento	Local
Massa específica	Determinar a relação entre a massa e o volume do material.	ABNT NBR 16605 (2017)	Frasco volumétrico de Le Chatelier	Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSM)
Limite de liquidez	Determinar o teor de umidade limite entre os estados líquido e plástico do solo.	ABNT NBR 6459 (2016)	Aparelho de casa grande	LMCC – UFSM
Limite de plasticidade e	Determinar o teor de umidade limite entre	ABNT NBR 7180 (2016)	Cápsula de porcelana, espátula, estufa, gabarito, balança,	LMCC – UFSM

Índice de plasticidade	os estados plástico e semi-sólido do solo.		cilindro e placa de vidro esmerilhada	
Granulometria por difração à laser	Determinar a distribuição do tamanho de partícula.		PSA 1090 L Anton Paar Faixa granulométrica: (40 nm - 500µm)	Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (LINCE)
Fluorescência de raios X (FRX)	Identificar os elementos químicos presentes nos materiais.		Espectrômetro de fluorescência de raio X dispersivo de energia (EDX-7000-Shimadzu)	Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI - SATC)
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Investigar através de imagens a superfície do material à nível microestrutural.	Equipamento com análise elementar espectroscópica de raios-X por energia dispersiva (EDS) modelo QUEST da fabricante ThermoSystem	Microscópio da fabricante Jeol, modelo JSM 6360	Laboratório de Microscopia Eletrônica- Departamento de Engenharia Mecânica (UFSM)
Difração de raios X (DRX)	Identificar os minerais cristalinos presentes nos materiais.	Tipo de radiação de Cu K, com filtro de Ni, passo de 0,020° em um intervalo 2 theta entre 5-65 graus e uma velocidade de 1,7 s/passos, com a amostra girando a 30 rpm. Foi utilizado um slit divergente de 0,2 depois do tubo e uma fenda de Soller antes do detector	Difratômetro de raios-X Bruker modelo D8 Advance	Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM) - UFSM
Superfície específica (BET)	Análise da medição da superfície específica através da adsorção de um gás sobre a superfície sólida.	Técnica de adsorção de nitrogênio em baixas temperaturas	Equipamento da marca Quantachrome, modelo Quadrasorb evo, com o software de processamento QuadraWin	Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI – LABSATC)
Análise termogravimétrica (TODA/DTA)	Identificar a variação da massa de uma amostra em função da variação da temperatura em um meio controlado.	Velocidade de aquecimento de 10 °C por minuto, cadinho de alumina (Al ₂ O ₃), gás de purga Nitrogênio (50 mL/min) Faixa de temperatura: (25 – 1000 °C)	Equipamento: Mettler Toledo	LINCE

Fonte: Adaptado de (ZAT, 2021)

4.2.1 Caracterização do lodo

A composição química do lodo, apresentada na Tabela 3, foi analisada através do ensaio de fluorescência de raios-X e, a partir dos dados, é possível observar predominância de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização, a concentração dos metais presentes no lodo também foi quantificada e os resultados são apresentados na Tabela 4. Este lodo é classificado como não-perigoso classe II-A (não inerte) com base na NBR 10004

(ABNT, 2004). A amostra apresentou tamanho de partícula médio em volume $D_V[4,3]$ de 29,57 μm , densidade de 2.239 kg/m^3 e área de superfície específica de 4.998 m^2/g . Através da imagem fornecida pelo MEV (Figura 6), é possível identificar que o lodo possui forma heterogênea e irregular.

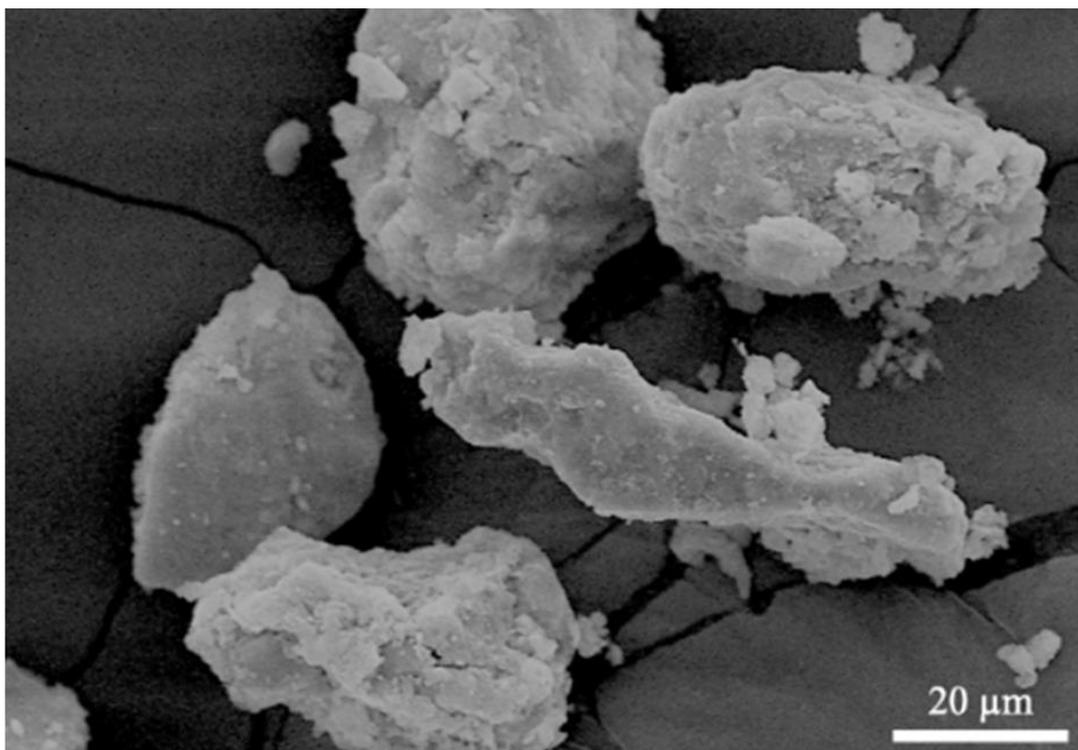
Tabela 3 – Composição química do lodo

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	SO₃	CaO	P₂O₅	K₂O	TiO₂	MgO	ZrO₂
48,43	8,92	6,86	2,21	2,10	1,67	1,50	1,22	0,32	0,17
ZnO	CuO	V₂O₅	MnO	SrO	PbO	Outros óxidos		Perda ao fogo (PF)	
0,15	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03		26,23	

Tabela 4 – Teor de metais totais determinados por lixiviação e solubilização do lodo

Parâmetros analisados	Resultado lixiviação	NBR 10.004 Limite máximo de lixiviação (mg/L)	Resultado solubilização	NBR 10.004 Limite máximo na solubilização (mg/L)
Ag	<0,010	5	0,012	0,05
Al	-	-	2,367	0,2
As	0,016	1	0,02	0,01
Ba	0,156	70	0,096	0,7
Cd	<0,010	0,5	0,005	0,005
Cl	-	-	0	250
Cr	<0,050	5	<0,050	0,05
Cu	-	-	0,177	2
F⁻	5,7	150	10,3	1,5
Fe	-	-	14,56	0,3
Mn	-	-	0,58	0,1
NO₃⁻	-	-	67,59	10
Na	-	-	47,94	200
Pb	<0,010	1	<0,010	0,01
SO₄²⁻	-	-	1123,1	250
Se	<0,010	5	<0,010	0,01
Zn	-	-	8,48	5

Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura do lodo



4.2.2 Caracterização das argilas

Os limites de Atterberg, bem como as informações acerca do conteúdo orgânico e a distribuição granulométrica das argilas, encontram-se na Tabela 5. A argila preta (AP) apresentou um índice de plasticidade maior que o da argila vermelha (AV). A realização dos ensaios dos limites de Atterberg com a argila rosa (AR) não foi possível, portanto, ela foi classificada como não líquido (NL) e não plástico (NP) conforme, NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

A composição química das argilas vermelhas (AV), preta (AP) e rosa (AR) foram analisadas através do ensaio de fluorescência de raios-X. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 6. Assim como para o lodo, nas três argilas, observa-se uma predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Tabela 5 – Propriedades físicas da argila vermelha (AV), argila preta (AP), argila rosa (AR) e mistura das argilas

	AV	AP	AR	Mistura das argilas
Massa específica (kg/m ³)	2840,5	2756,0	2724,5	2591
Limite de liquidez (LL)	45	59	-	45
Limite de plasticidade (LP)	19	25	-	25
Índice de plasticidade (IP)	24	34	-	19
Teor orgânico (%)	2,06	3,15	0,33	-
Tamanho médio de partícula D_v[4, 3] (μm)	32,2	40,55	24,44	-

Tabela 6 – Composição química das argilas

Argila	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	ZrO ₂	MnO	MgO	PF
AV	55,93	10,76	5,86	5,44	3,47	3,90	1,16	0,93	0,74	0,44	0,24	0,08	2,29	8,75
AP	61,91	14,83	-	6,26	3,23	1,45	1,12	0,84	0,58	0,46	0,13	0,07	-	9,11
AR	67,41	17,58	-	4,36	2,96	0,50	0,87	1,28	0,79	0,55	0,10	0,07	-	3,54

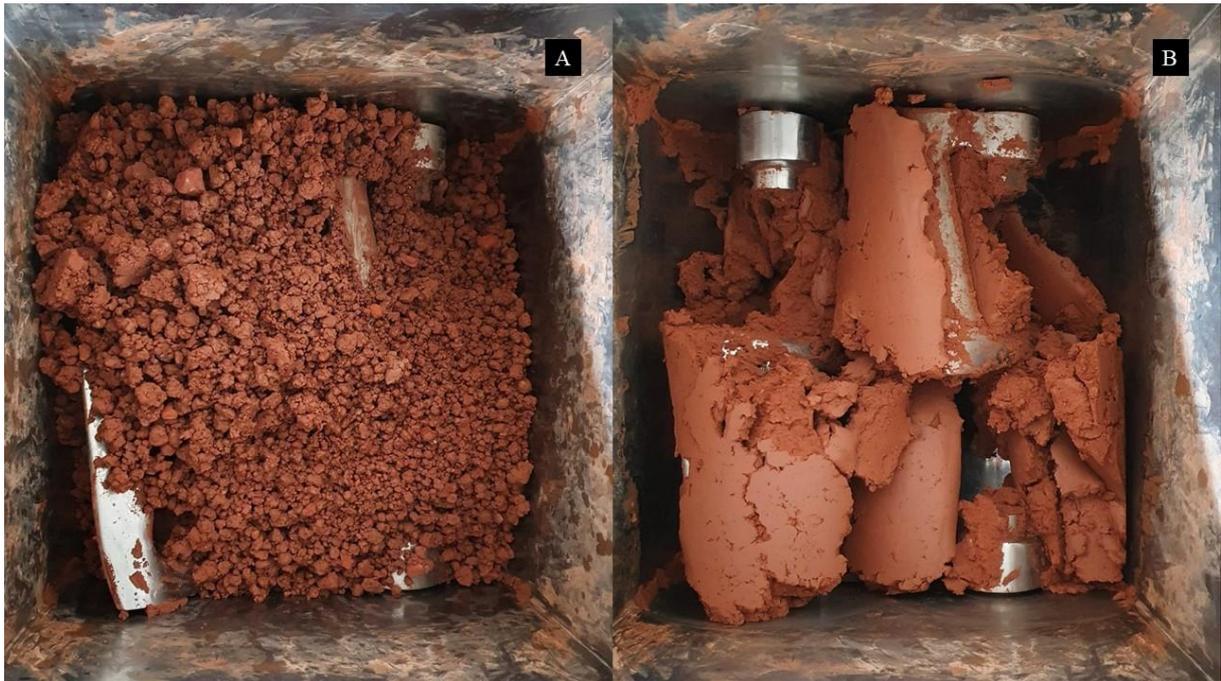
4.4 PROCESSO PRODUTIVO

4.3.1 Preparação do sistema

O processo de produção dos blocos cerâmicos se inicia com a mistura das matérias primas (blend de argilas, lodo de ETE e água). Por um período de 10 minutos, um malaxador com capacidade de 15 kg de carga, aproximadamente 40 L, e velocidade de 35 rpm por lâmina, efetua esse processo de mistura até que se tenha uma massa homogênea (Figura 7).

Os sistemas produzidos têm adição de lodo de ETE em percentuais que variam de 0 a 10% (massa seca) em relação ao peso da argila utilizada para produção dos blocos. Os teores de adição foram escolhidos baseados em pesquisas anteriores que identificaram que a quantidade de lodo utilizado em substituição deveria ser limitada a valores iguais ou inferiores a 10% a fim de garantir aplicabilidade e propriedades satisfatórias na produção de blocos cerâmicos (KADIR et al., 2017; ZAT et al., 2021). A Tabela 7 apresenta os teores de substituição de lodo definidos para a produção, bem como a nomenclatura adotada para cada sistema.

Figura 7 – Parte interna do malaxador onde as lâminas homogeneízam as matérias primas; (A) massa argilosa antes de ser homogeneizada; (B) massa argilosa após a homogeneização.



Fonte: Autor

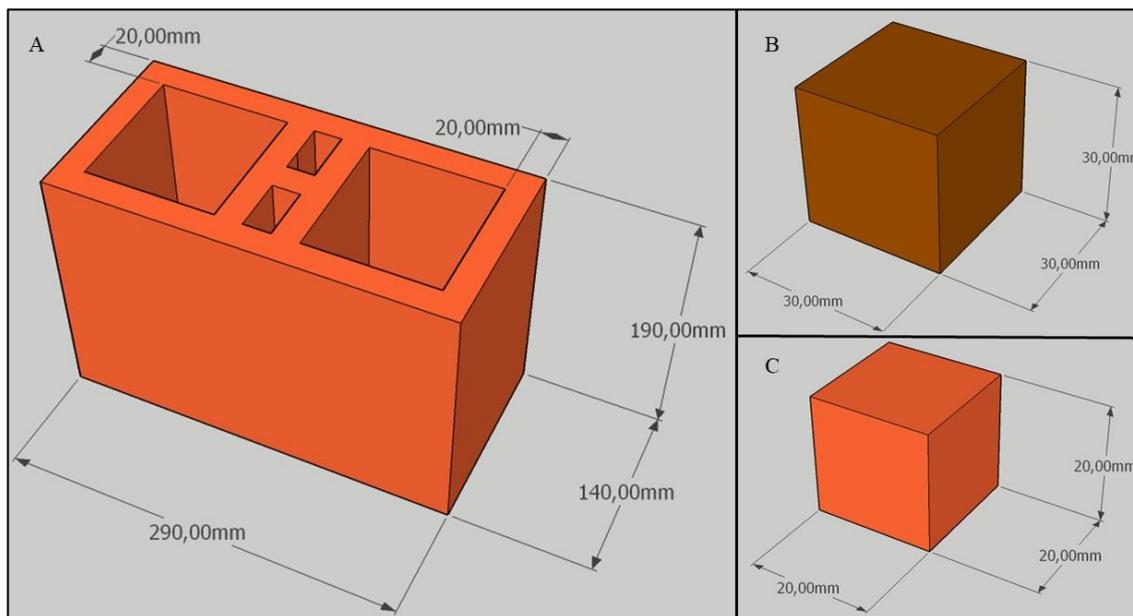
Tabela 7 – Teores de adição de lodo e nomenclatura dos sistemas

% em massa de substituição por lodo	0	1	4	10
Nomenclatura do sistema	0SS	1SS	4SS	10SS

4.3.2 Definição da geometria dos blocos

A espessura das paredes do bloco cerâmico com paredes externas maciças (Figura 8A), conforme NBR 15270-1 (ABNT, 2017), deve apresentar valor de aproximadamente 20 mm, sendo assim, determinou-se a produção de um bloco de formato cúbico com arestas de 30 mm (Figura 8B) em verde. A definição dessa dimensão 10 mm maior que a espessura da parede do bloco é intencional, visto que considera futura a retração gerada pelos processos de secagem e queima, que ocasionam uma redução das dimensões, tornado as medidas finais de aresta do bloco próximas à 20 mm (Figura 8C).

Figura 8 – Geometria dos blocos cerâmicos; (A) dimensões reais do bloco cerâmico com paredes maciças; (B) dimensões do bloco maciço logo após a extrusão e o processo de corte; (C) dimensões finais do bloco maciço após os processos de secagem e queima.



Fonte: Autor

Ressalta-se que, além da relação com a espessura da parede do bloco estrutural comercializado, a opção por produzir blocos cerâmicos maciços teve como base pesquisas anteriores do GEMASC, as quais avaliaram a relação da geométrica de extrusão nas propriedades das cerâmicas produzidas. As conclusões de cada estudo evidenciam que cerâmicas em escala reduzida com núcleo maciço e geometria cúbica apresentam valores de resistência mecânica com menor desvio padrão e maior módulo de Weibull e, portanto, maior controle de qualidade na produção.

4.3.3 Umidade de extrusão

O teor de umidade tem interferência direta na plasticidade da massa a ser extrudada e, além disso, é o fator de maior influência no controle da retração da cerâmica durante o processo de secagem das peças (MELCHIADES et al., 2001). Sendo assim, esse é um parâmetro de extrema importância para o processo de extrusão dos blocos.

Uma massa argilosa com elevado teor de umidade apresenta uma consistência mais fluída com maior facilidade de escoamento pelo centro da fileira de extrusão, contudo, essa acaba se aderindo mais ao helicóide e as paredes do equipamento o que acaba dificultando o

processo. Uma massa com menor teor de umidade apresenta menor plasticidade, isso dificulta a passagem do material pela seção de extrusão devido ao forte atrito com as paredes e gera desgaste dos componentes metálicos devido à alta taxa de compressão necessária (RIBEIRO et al., 2003).

A umidade de extrusão foi definida com base na dissertação de mestrado de Zat, 2021 (ZAT, 2021) que avaliou, através de parâmetros reológicos, a janela de trabalhabilidade (SCHIAVO et al., 2018) para extrusão de misturas com substituição de 0, 2, 5 10 e 15% de lodo de ETE com teores de umidade que variaram de 25 a 33%.

Zat (2021) (ZAT, 2021) concluiu que sistemas com até 10% de substituição de lodo de ETE sempre apresentaram boa plasticidade e consistência suficiente para serem extrudadas dentro dos parâmetros do equipamento utilizado para esse trabalho quando continham teores de umidade na faixa de 29 a 31%.

Sendo assim, através desse estudo e de outras pesquisas executadas pelo GEMASC, definiu-se que o teor de umidade da massa argilosa praticado em todos os sistemas extrudados no presente trabalho deveria estar de acordo com o intervalo de $30\% \pm 1$.

4.3.4 Extrusão

Com a homogeneização das matérias primas, deu-se sequência ao processo com a extrusão dos blocos cerâmicos utilizando uma maromba de laboratório à vácuo (Figura 9), marca Varlali, modelo Nº 1, com helicóide único de diâmetro 115 mm e frequência de 35 rpm. A extrusora conta com um cilindro de 0,9 m de comprimento, com uma entrada circular de diâmetro de 150 mm e com saída retangular de 990 mm².

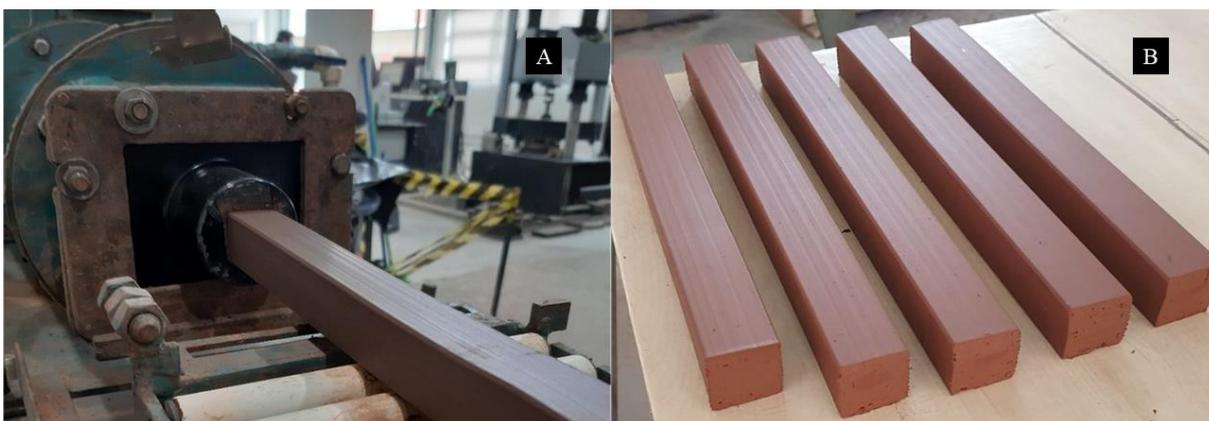
O processo de extrusão ocorre sob vácuo com pressão de 150 mm/Hg e uma velocidade que varia entre 22 e 39 mm/s. A massa argilosa de cada sistema fora extrudada através de uma boquilha com formato de saída cúbica (Figura 10A), produzindo assim barras prismáticas com dimensões de 300×30×30 mm (Figura 10B).

Figura 9 – Maromba à vácuo utilizada para a extrusão das massas argilosas.



Fonte: Autor

Figura 10 – Extrusão dos tarugos prismáticos; (A) boquilha de extrusão; (B) tarugos prismáticos extrudados em verde.



Fonte: Autor

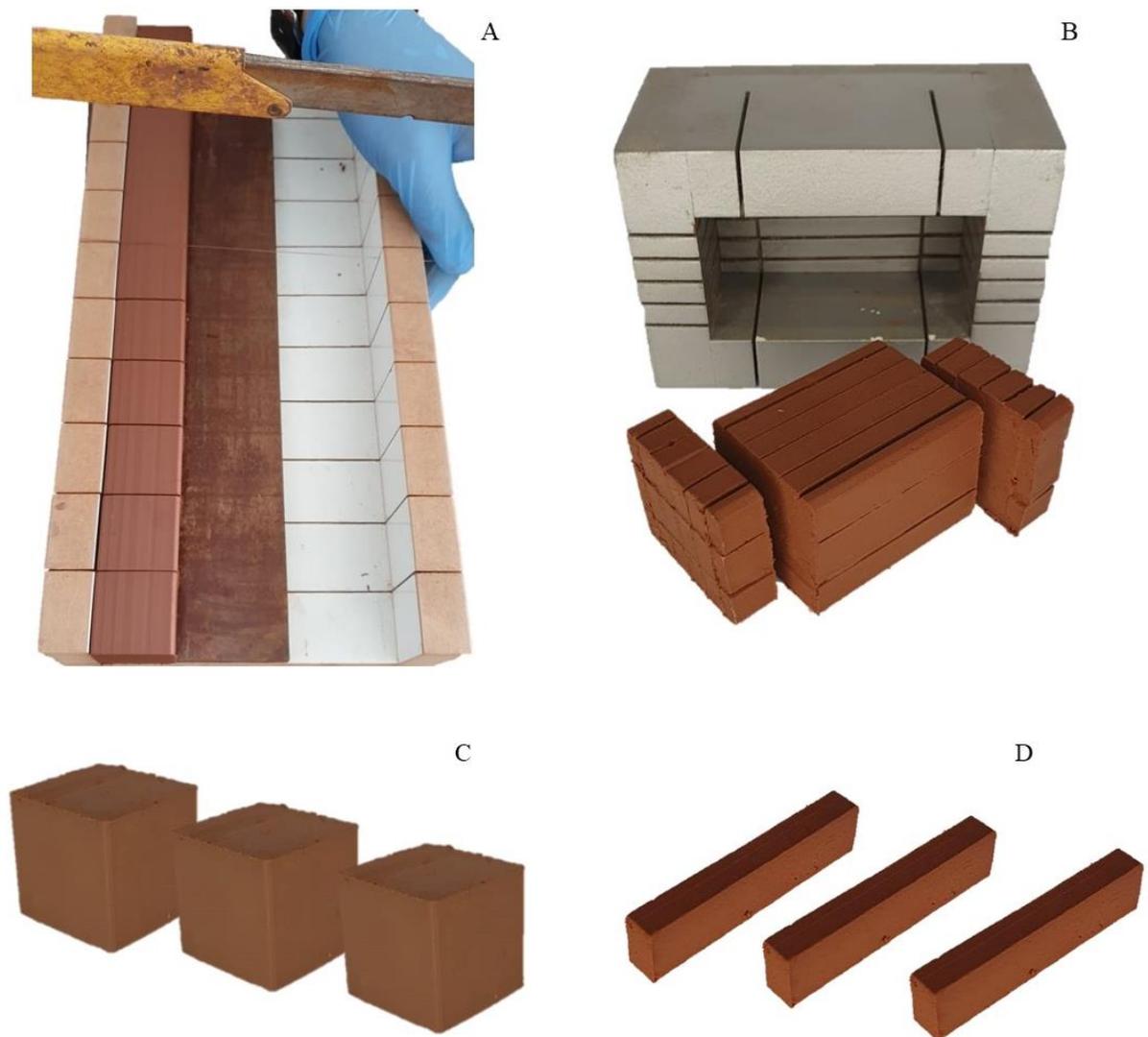
4.3.5 Corte

Após o processo de extrusão, as barras prismáticas extrudadas em verde foram submetidas ao processo de corte. Esse processo foi efetivado através do uso de gabaritos (Figura 11A e Figura 11B) e uma serra, e transformava os prismas extrudados em cubos maciços (tijolos) com dimensões pré-definidas de 30×30×30 mm (Figura 11C) e em barras

prismáticas com geometria de $40 \times 10 \times 5$ mm (Figura 11D) (geometrias necessárias para a realização dos ensaios de compressão uniaxial e varredura de deformação, respectivamente).

Logo após o corte, os corpos de prova produzidos para os dois ensaios de deformação eram medidos e pesados a fim de calcular a massa específica em verde a partir da média das relações entre a massa e o volume de cada uma das amostras.

Figura 11 – Corte dos tarugos prismáticos; (A) gabarito com espaços de 30 mm para o corte dos blocos; (B) gabarito para o corte e molde das barras prismáticas; (C) blocos com em verde com as dimensões de $30 \times 30 \times 30$ mm; (D) barras prismáticas com dimensões de $40 \times 10 \times 5$ mm.



Fonte: Autor

4.3.6 Secagem

Essa etapa produtiva é de suma importância, visto que se deve evitar uma rápida perda de umidade para não ocasionar o fissuramento dos blocos, ocasionado pela saída da água do corpo. Sendo assim, o processo de secagem utilizado foi baseado na metodologia aplicada por Lindner (2021) (LINDNER, 2001) e consistiu em duas etapas.

A primeira etapa, logo após o processo de corte dos blocos, consistia no armazenamento das amostras prateleiras ao ar por um período de 48 h para que ocorresse uma pré-secagem e homogeneização da umidade da massa argilosa. Posteriormente, na segunda etapa, os blocos eram transferidos para uma estufa elétrica a uma temperatura de 60 °C durante 12 h e, depois, para 100 °C por mais um período de 12 h.

Após o processo de secagem, os blocos eram pesados e a diferença de massa entre os processos de corte e de secagem era utilizado para quantificar a umidade de extrusão dos sistemas argilosos.

4.3.7 Queima

O processo de queima dos materiais cerâmicos visa possibilitar a ocorrência de reações físico-químicas que fundem parcialmente os componentes misturados, obtendo-se, assim, um material sólido e resistente (PINHEIRO; HOLANDA, 2010). Sendo assim, para a etapa de queima dos blocos foi aplicada a curva de aquecimento proposta por Lindner (2001) (LINDNER, 2001).

Para o início da queima, o forno foi programado com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até atingir a temperatura de 500 °C. Após, a taxa foi reduzida para 2,5 °C/min até atingir 600°C e, logo em seguida, a taxa era elevada novamente a 10 °C/min até que se atingisse a temperatura de 900 °C na qual o forno permanecia por 3 h.

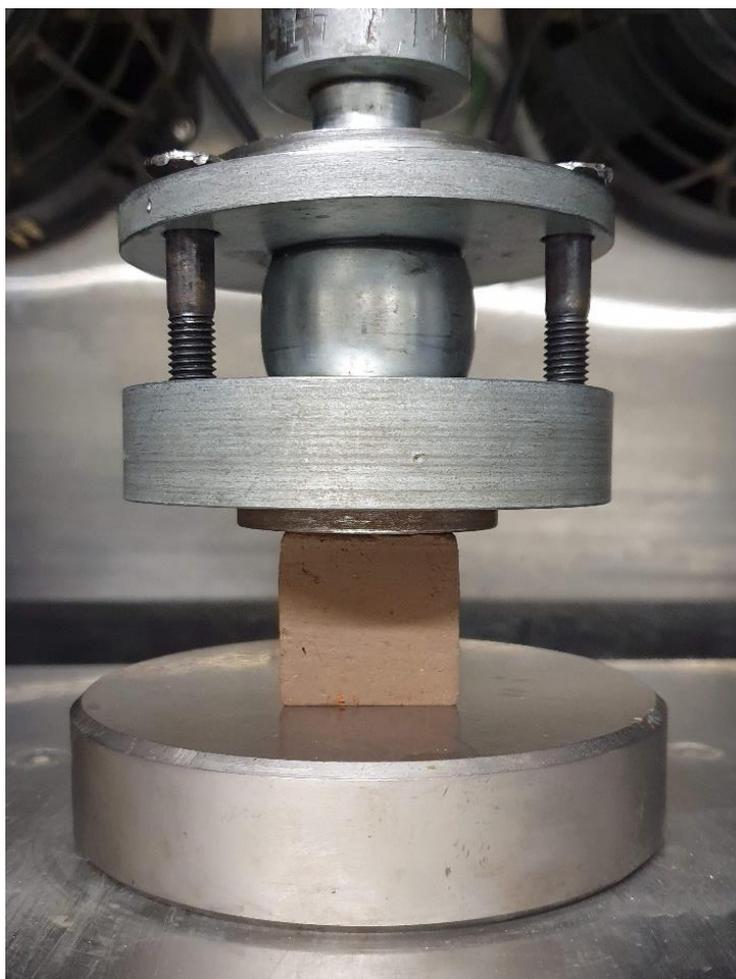
Ao término, os blocos ficavam condicionados dentro do forno até que ocorresse um resfriamento natural de forma gradual e, logo em seguida, eram medidos e pesados a fim de quantificar a retração linear e a perda de massa promovida pela queima.

4.5 ENSAIOS

4.4.1 Ensaio de compressão uniaxial

Para avaliar o comportamento plástico dos sistemas compostos por argila e lodo, os blocos em verde foram submetidos a um ensaio de compressão uniaxial (Figura 12) com a finalidade de se determinar as curvas tensão-deformação de cada um dos sistemas extrudados.

Figura 12 – Amostra de um dos sistemas extrudados sendo submetida ao ensaio de compressão uniaxial para a determinação da curva tensão-deformação.



Fonte: Autor

Para executar este ensaio, utilizou-se uma prensa hidráulica Universal Testing Machine (UTM - 25) da IPC Global com célula de carga de ± 25 kN, com cabine com controle de temperatura e com sistema de controle e aquisição de dados IMACS (Integrated Multi-Axis Control System) conectado a um microcomputador.

As amostras submetidas ao ensaio possuíam geometria cúbica com 30 mm e todos os parâmetros de ensaio foram adotados de acordo com a metodologia utilizada por Schiavo (2018) (SCHIAVO et al., 2018).

A taxa de carregamento determinada foi de 0,5 mm/min e o ensaio ocorreu até que as amostras tivessem uma deformação relativa de 12% em relação as dimensões originais. A tensão de escoamento $\sigma_{(0,2)}$ foi considerada como a tensão necessária para se promover uma deformação permanente de 0,2% no material (BARAN et al., 2001). As curvas tensão-deformação determinadas para cada um dos sistemas foram calculadas a partir da média das curvas obtidas no ensaio de seis amostras de cada um dos mesmos.

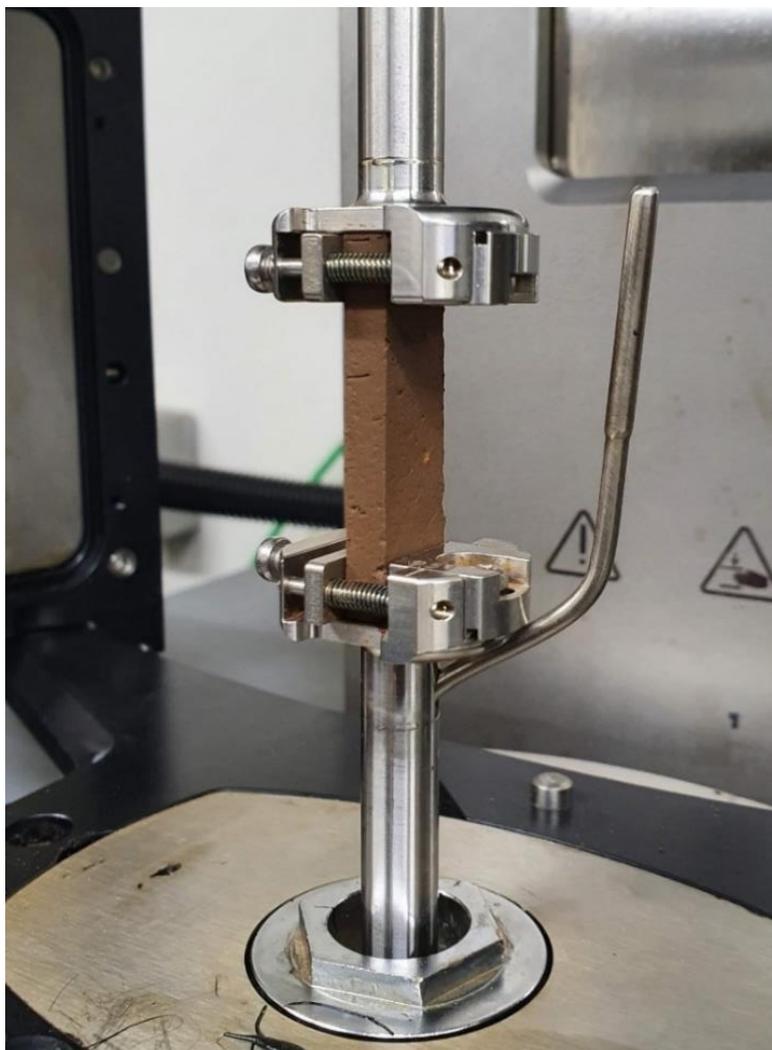
4.4.2 Teste de varredura de deformação (*Amplitude Sweep Test*)

A fim de quantificar os parâmetros reológicos de cada um dos sistemas, as amostras em verde com dimensões prismáticas de 40×10×5 mm extraídas diretamente dos tarugos prismáticos extrudados preparadas na etapa de corte através do uso do gabarito da Figura 11, foram submetidas ao ensaio de varredura de deformação (*amplitude sweep test*), utilizando um reômetro Anton-Paar MCR502.

Para executar o ensaio de torção, as amostras prismáticas foram presas através de dois pontos de fixação, superior e inferior, no eixo de menor inércia (Figura 13). Aplicando um carregamento vertical < 1 N, onde o ponto superior de fixação iniciou o teste com movimentos torcionais a uma frequência de 10 Hz, ao mesmo tempo que gerava uma deformação com amplitude crescente de 0,001% a 25% (ASTM, D5279-13)

Foram avaliadas 2 amostras prismáticas para cada um dos sistemas extrudados. A perda de umidade das amostras durante o ensaio foi desprezível (< 1%) e, através desse, foi possível mensurar os módulos reológicos médios de armazenamento e de perda (G' e G'' , respectivamente) para cada um dos sistemas.

Figura 13 – Amostra prismática de 40x10x5 mm posicionada para a execução do teste de varredura de deformação no reômetro.



Fonte: Autor

4.4.3 Outras avaliações

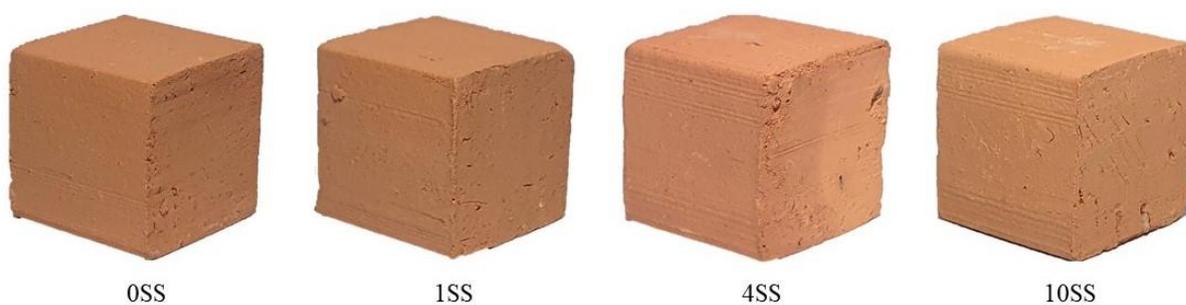
Para produtos como blocos cerâmicos, grandes alterações dimensionais geram consequências imediatas no desempenho devido a possibilidade de gerar rachaduras e deformações. Ademais, valores como a de resistência mecânica à compressão de um bloco são propriedades importantes para o material.

A fim de avaliar o desempenho dos sistemas argilosos extrudados também em estado endurecido, alguns blocos cerâmicos de cada sistema (Figura 14) foram moldados e submetidos a ensaios usuais de desempenho de acordo com as normas especificadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaios de desempenho para tijolos e blocos cerâmicos

Determinações (ensaios)	Normativas (parâmetros)
Características geométricas	NBR 15270-2 (ABNT, 2017)
Resistência à compressão	C67M (ASTM, 2021)

Figura 14 – Blocos cerâmicos, com dimensões de 30x30x30 mm, de cada um dos sistemas extrudados, avaliados nos testes de desempenho.



Fonte: Autor

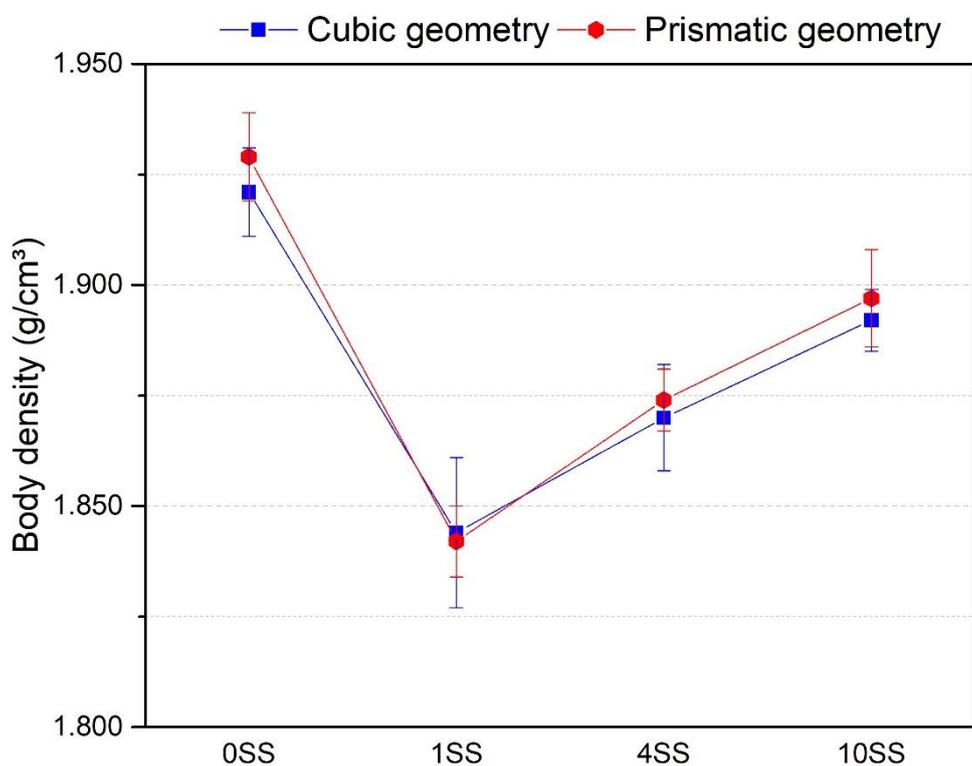
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 COMPOSIÇÃO E RIGIDEZ DOS SISTEMAS EM VERDE

5.1.1 Homogeneidade e teor umidade das amostras

A Figura 15 apresenta as massas específicas dos corpos de prova prismáticos, moldados para o teste de varredura de deformação, e cúbicos, moldados para o teste de compressão uniaxial, medidas e calculadas logo após o processo de corte das amostras.

Figura 15 – Massa específica dos corpos de prova para cada um dos sistemas extrudados



Todos os sistemas apresentaram massa específica entre 1.840 e 1.950 g/cm^3 . A inserção de água e a incorporação de ar no processo de mistura fez com que esses valores de massa específica fossem inferiores aos observados na caracterização das matérias-primas.

O sistema referência, sem substituição de lodo, apresentou a maior massa específica dentre os sistemas extrudados. Denota-se que o aumento da substituição de lodo de esgoto promoveu também um aumento gradativo da densidade dos sistemas e isso pode sugerir que a

maior presença de lodo de esgoto promoveu uma melhora no empacotamento granulométrico das partículas, gerando sistemas mais densos.

Os dados de massa específica corroboram a homogeneidade do processo de produção dos corpos de prova para o ensaio de varredura de deformação a partir do corte dos tarugos em verde, visto que as duas geometrias de amostras apresentaram massa específica muito próximas e com baixo desvio padrão.

Os teores de umidade de cada sistema foram quantificados logo após o processo de secagem dos sistemas e são apresentados na Tabela 9. Como era de esperar, as porcentagens de umidade para cada sistemas variaram entre $30 \pm 1\%$, demonstrando o correto processo de mistura e reduzida perda de umidade durante a produção.

Tabela 9 – Umidade dos sistemas argilosos para o processo de extrusão

Sistema extrudado	0SS	1SS	4SS	10SS
Teor de umidade (%)	29,09	30,21	29,54	30,00

5.1.2 Ensaio de compressão uniaxial

As curvas médias de tensão-deformação são mostradas na Figura 16. Os sistemas argilosos em verde apresentaram curvas típicas de deformação plástica semelhantes, demonstrando sempre um estágio inicial elástico e linear, seguido de uma zona plástica de extensão que é praticamente idêntica para todos os sistemas.

Os chamados “platôs newtonianos”, observados na Figura 16, apresentam longas extensões e comprimentos muito próximos entre os diferentes teores de substituição de lodo. Isso pode indicar que todos os sistemas apresentavam umidade de mistura dentro da janela de trabalhabilidade ideal de cada um dos sistemas argilosos como proposto por Zat, 2021 (ZAT, 2021).

Os valores das tensões de escoamento ($r_{0,2}$), que marcam a transição da zona elástica para a zona plástica, são mostrados na Tabela 10. Nota-se que, por não haver variação de umidade dos sistemas, os valores são muito próximos. Contudo, percebe-se que os sistemas com lodo apresentam tensões de escoamento ligeiramente menores que o sistema referência, indicando que a substituição de lodo reduz a tensão necessária para se atingir uma deformação permanente dos sistemas (SCHIAVO et al., 2018).

Figura 16 – Curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de compressão uniaxial de amostras cúbicas dos sistemas em verde

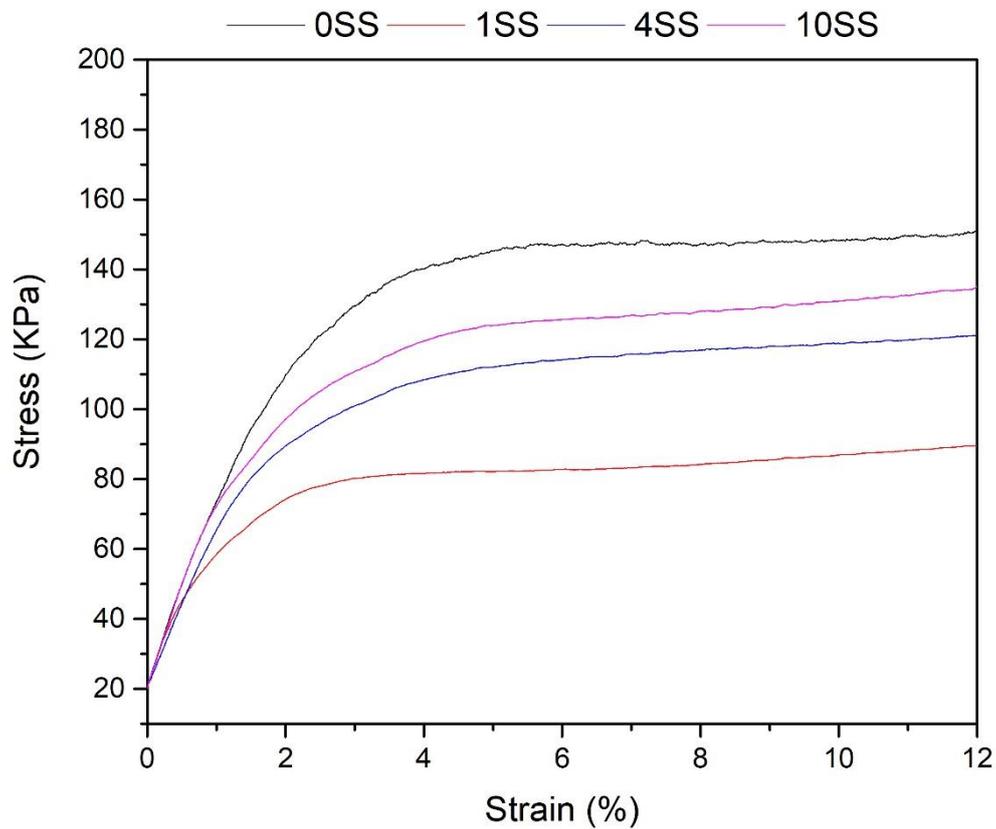


Tabela 10 – Efeito da variação do teor de lodo de esgoto na tensão de escoamento dos sistemas argilosos

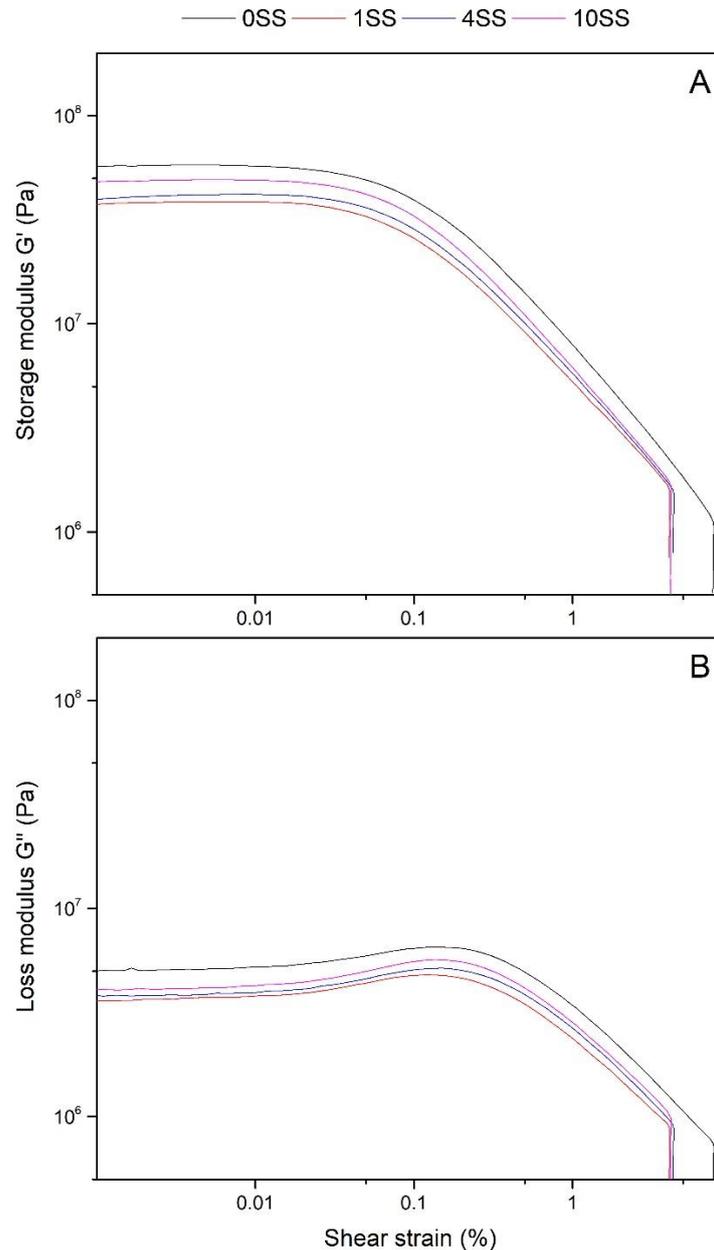
Sistema	0SS	1SS	4SS	10SS
$r_{0,2}$ (kPa)	32,9	32,6	30,1	32,4

Analisando as curvas tensão-deformação (Figura 16), denota-se que os sistemas argilosos com substituição de lodo de esgoto tornam-se mais rígidos à medida que os teores de resíduo aumentam. Sistemas com substituição de lodo entre 1% e 4% (1SS e 4SS) necessitaram de menores taxas de carregamentos para alcançar as mesmas deformações que outros sistemas analisados. Isto infere que sistemas com menor teor do resíduo, requerem menor aplicação de carga para se deformar e, sendo assim, podem ser deformados (conformados) com menor consumo energético.

5.1.3 Ensaio de varredura de deformação

O comportamento reológico das misturas argilosas é apresentado na Figura 17 através dos módulos de armazenamento (G') (Figura 17A) e de perda (G'') (Figura 17B). Os módulos, obtidos através do teste oscilatório “*amplitude sweep test*” para cada um dos sistemas argilosos extrudados, estão plotados em escala logarítmica e são uma relação entre tensão aplicada (Pa) os módulos de deformação induzidos (%).

Figura 17 – Resultados obtidos no teste de varredura de deformação para os sistemas extrudados com 30% de umidade (A) módulos de armazenamento (B) módulos de perda



A relação entre as curvas G''/G' de cada sistemas revela que todos apresentaram um comportamento viscoelástico. Analisando os gráficos observa-se que o sistema referência (OSS) apresentou os maiores módulos G' e G'' e, dessa forma, é o sistema extrudado com maior rigidez. Além disso, o aumento no teor de lodo nas misturas argilosas gerou um aumento gradativo dos módulos de armazenamento e de perda de cada sistema. Esse comportamento está de acordo com outros estudos da literatura que também identificaram essa relação proporcional (ZAT et al., 2021).

Medições reológicas do teste de varredura de deformação também são capazes de fornecer informações a respeito do trabalho necessário para se gerar uma deformação específica. Nesse sentido, a quantificação dos módulos G' e G'' é capaz de inferir a respeito da demanda energética de um material para que se deforme.

As misturas argilosas com menor substituição de resíduo (1SS e 4SS) apresentaram módulos G' e G'' menores que os demais, evidenciando que esses possuem menor rigidez que os outros sistemas (OSS e 10SS). Desse modo, é possível inferir que os sistemas com menor teor de lodo de esgoto necessitam menores quantidades de energia para que se deformem (ou conformem).

5.2 DESEMPENHO DOS SISTEMAS EM ESTADO ENDURECIDO

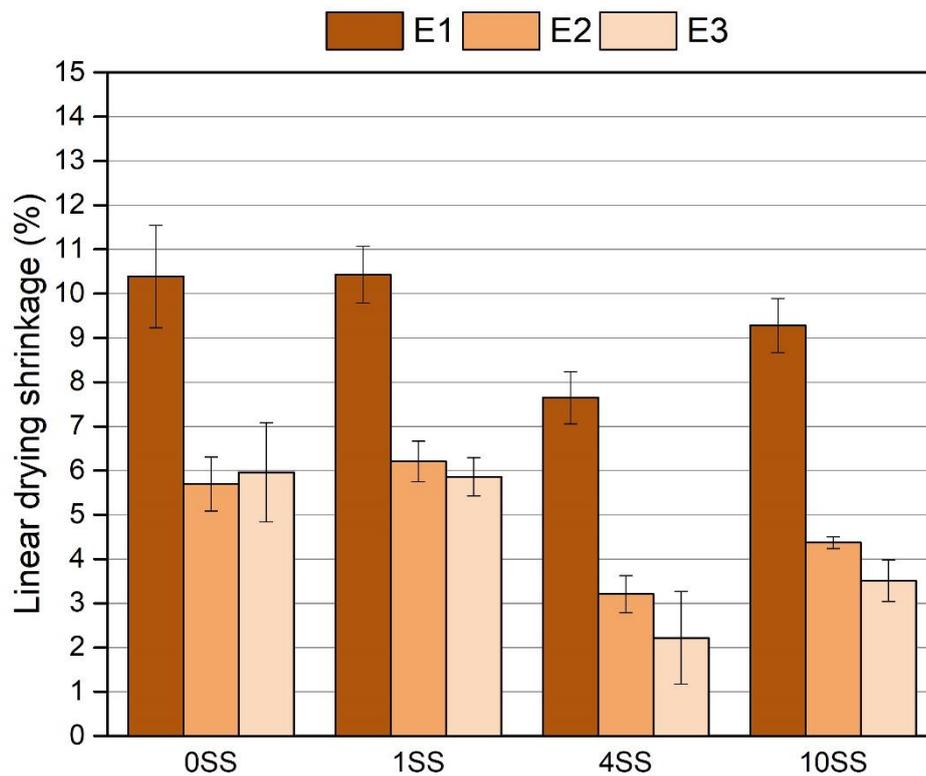
5.2.1 Avaliação dimensional dos blocos cerâmicos

A Figura 18 mostra as médias das variações dimensionais das arestas dos blocos cerâmicos (E1, E2 e E3) para cada sistema produzido. A medida E1 é referente a distância entre as faces de corte, já a E2 e a E3 são referentes as distâncias entre as faces não cortadas.

As faces de corte apresentam poros mais abertos que as demais faces em virtude do processo de corte, por isso permitem uma maior saída de umidade. Tal fenômeno justifica os maiores valores de retração nas distâncias E1. Por serem provenientes de faces “fechadas” as medidas E2 e E3 sofrem menores perdas de umidade e, por esse motivo, apresentaram valores de retração menores que E1 e praticamente iguais entre si.

Avaliando os valores de retração, nota-se que a variação da presença de lodo de esgoto nos sistemas não gerou diferenças significativas na retração das peças cerâmicas. Pode-se identificar uma leve queda dos valores relativos de retração dos sistemas com o aumento da concentração de lodo na mistura, contudo não é possível se identificar uma tendência.

Figura 18 – Avaliação dimensional dos sistemas cerâmicos com diferentes teores de lodo de esgoto ao final do processo produtivo

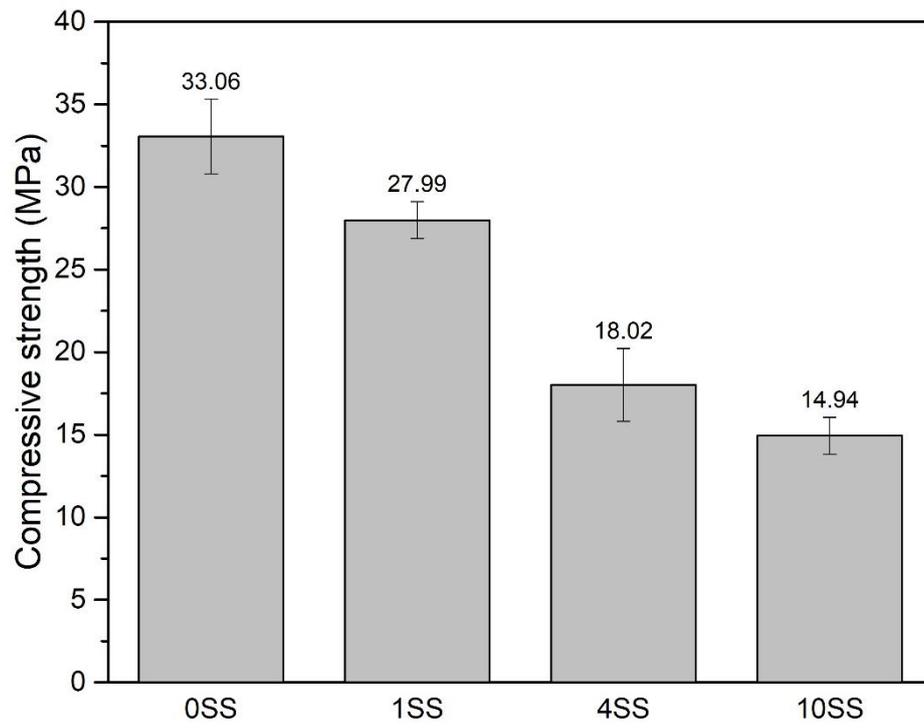


5.2.2 Resistência mecânica à compressão

Os resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão para cada um dos sistemas extrudados são apresentados na Figura 19. Fica evidente que o aumento da presença de lodo na mistura gera um decréscimo da resistência mecânica final das peças cerâmicas. Contudo, mesmo com valores mais baixos que o do sistema referência, os sistemas com maior teor de resíduo obtiveram bons valores de resistência, permitindo até sua aplicação estrutural, de acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

Esses resultados estão de acordo com outros estudos da literatura que identificaram reduções significativas na resistência à compressão de massas argilosas com o aumento gradativo da substituição do resíduo de esgoto (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2012) e outros que também ratificaram a viabilidade da aplicação estrutural de blocos cerâmicos com adição de lodo de ETE (AREIAS et al., 2017; ZAT, 2021).

Figura 19 – Resistência mecânica à compressão dos blocos cerâmicos extrudados para cada sistema de mistura argilosa



6. CONCLUSÕES

Todo o processo produtivo, em especial a produção dos corpos de prova para os ensaios em estado verde, permitiu a moldagem de amostras homogêneas que mantiveram as características da massa argilosa de cada um dos sistemas analisados e a execução dos ensaios de deformação com confiabilidade e precisão.

Ambos os ensaios de deformação em verde apresentaram a mesma tendência de comportamento para os 4 sistemas analisados. As curvas tensão-deformação, geradas pelo ensaio de compressão uniaxial, e os módulos de armazenamento (G') e de perda (G'') demonstraram a maior rigidez do sistema de referência, bem como o aumento gradativo da rigidez dos sistemas extrudados em proporção ao aumento da porcentagem de substituição do resíduo de esgoto.

Os ensaios dos elementos cerâmicos em estado endurecido comprovaram o bom desempenho dos produtos cerâmicos compostos por argila e lodo.

Dentre os sistemas extrudados, comprovou-se que as misturas argilosas com menores teores de substituição de lodo, entre 1 e 4%, necessitaram da aplicação de menores esforços para se deformar. A determinação de tal comportamento é de extrema importância para a aplicação industrial, visto que sinaliza a possibilidade de extrudar misturas argilosas com um menor gasto energético, sugerindo um modo de produção mais econômico e sustentável.

Por fim, mesmo sabendo que todos os sistemas estudados possuem plasticidade adequada para o processo produtivo de cerâmica vermelha, conclui-se que sistemas com menores teores de substituição de lodo de esgoto apresentam plasticidade mais adequada a produção de materiais cerâmicos, pois possibilitam a produção de materiais de ótima qualidade ao mesmo tempo que propiciam a conformação das massas argilosas com um menor consumo energético.

7. REFERÊNCIAS

- ALLEMAN, B. J. E. Constructive sludge management: biobrick. **Journal of Environmental Engineering**, v. 110, n. 2, p. 301–311, 1984.
- AMARANTE, A. Comparative study on the physicochemical and technical characteristics of the light coloured, red and gray phillites, situated in the Itapeva region of São Paulo State. **Cerâmica**, v. 27, n. 133, p. 5, 1981.
- 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.
- ANGELERI, F. B. Considerações sobre a indústria dos materiais refratários ao calor no Brasil. **Cerâmica**, v. 28, n. 151, p. 245–252, 1982.
- AREIAS, I. O. R. et al. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 343–349, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004 – Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-1 - Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-2 - Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria - Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. **D5279 – Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: In Torsion**. Annual Book of ASTM Standards, p. 1–4, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. **C67M – Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile**. Annual Book of ASTM Standards, p. 1–17, 2021.
- 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.

BARSOUM, M. W. **Fundamentals of Ceramics**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal : Um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília, 2015.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 2**. 5th ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

BRASIL. Resolução CONAMA No 375, de 29 de Agosto De 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Publicação - Diário Oficial da União 30 de agosto 2006**, p. 1-32, 2006.

BROWNELL, W. **Structural clay products**. vol. 9. New York: Springer, 1977.

CAMPOS, L. F. A. et al. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. **Cerâmica**, v. 45, n. 295, p. 140–145, 1999.

CARTER, C. B; NORTON, M. G. **Ceramic Materials Science and Engineering**. 2nd. ed. London: Springer, 2013.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials: Science and Engineering**. 1st ed. New York: Springer, 2007.

CARTY, W. M.; LEE, C. The characterization of plasticity. **America Ceramic Society**, p. 89–101, 1996.

CHANG, Z. et al. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, 2020.

COTA, T. G. et al. Applied Clay Science Incorporation of waste from ferromanganese alloy manufacture and soapstone powder in red ceramic production. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 274–281, 2018.

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

CUSIDÓ, J. A.; SORIANO, C. Valorization of pellets from municipal WWTP sludge in lightweight clay ceramics. **Waste Management**, v. 31, n. 6, p. 1372–1380, 2011.

DA SILVA, C. R. L.; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, v. 61, n. 357, p. 31–40, 2015.

DADOS DO SETOR. **Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER)**, 2021. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>>. Acesso em: 20 de nov. de 2021.

DOS SANTOS, R. C. et al. Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 361–368, 2017.

GUANGYIN, ZHEN; YOUCAI, Z. **Pollution control and resource recovery: sewage sludge**. 1st. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2016.

HANDLE, F. **Extrusion in Ceramics**. New York: Springer, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Rio de Janeiro: Ministério da Economia, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos – Prodlis 2019**. Disponível em: < <https://cnae.ibge.gov.br/estrutura/produtos-estrutura/prodlis-industria.html>>. Acesso em: 20 de nov. de 2021.

JORDÁN, M. M. et al. Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**, v. 30, p. 219–224, 2005.

JUNIOR, M. C. et al. Argila para Cerâmica Vermelha. **Rochas e Minerais Industriais**, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 583–605.

KADIR, A. A. et al. Properties of fired clay brick incorporating with sewage sludge waste. **AIP Conference Proceedings**, v. 1885, p. 2021, 2017.

KARAYANNIS, V. G. Development of extruded and fired bricks with steel industry byproduct towards circular economy. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 382–387, 2016.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. 1st. ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 1976.

KONIECZKA, P. The potential of raw sewage sludge in construction industry e A review. **Journal of cleaner production**, v. 200, p. 342–356, 2018.

LIN, Y. et al. Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. 213–214, p. 457–465, 2012.

LINDNER, G. **Uso de modelo reduzido para pesquisa e desenvolvimento de blocos cerâmicos estruturais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MAIA, F. S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do polo cerâmico de Campos do Goytacazes**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

- MARTÍNEZ-GARCÍA, C. et al. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. SUPPL., p. S343–S348, 2012.
- MELCHIADES, F. G. et al. Controle dimensional e do formato de revestimentos cerâmicos. Parte I: Dimensões. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 5, p. 27–33, 2001.
- MENEZES, R. R.; NEVES, G. D. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 303-313, 2002.
- METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th. ed. Boston: McGraw Hill Companies, Inc, 2003.
- MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. 4th. ed. Hanover, Germany: Vicentz Network, 2014.
- MITARAI, N.; NORI, F. Wet granular materials. **Advances in Physics**, v. 55, n. 1–2, p. 1–45, 2006.
- MONTEIRO, S. N. et al. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 6, p. 1281-1287, 2008.
- PEDROTI, L. G. et al. Desenvolvimento de Massa Cerâmica para Blocos Queimados e Prensados. **Cerâmica Industrial**, v. 16, p. 25–30, 2011.
- PÉRTILE, P. et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: Properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 154–162, 2018.
- PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, n. 339, p. 237–243, 2010.
- RAWET, J.; SANTOS, P. S. Estudo sobre a variação do limite de plasticidade de três argilas do estado de São Paulo pelo efeito de alguns aditivos. **Cerâmica**, v. 26, p. 128–193, 1980.
- REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2nd. ed. New York: Ohn Wiley & Sons, Inc., 1995.
- RIBEIRO, M. J. et al. Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelhas. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 1, p. 37–42, 2003.
- RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, J. M.; LABRINCHA, J. A. Plastic behaviour of different ceramic pastes processed by extrusion. **Ceramics International**, v. 31, n. 4, p. 515–519, 2005.
- SANTOS, P. D. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2nd. ed. São Paulo: Editora Blucher, 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, nov. 2018.

SCHNELL, M.; HORST, T.; QUICKER, P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110367, 2020.

SHI, S. ET AL. Strategies of valorization of sludge from wastewater treatment. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 93, n. 4, p. 936–944, 2018.

SILVA, F. L. et al. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**, v. 40, n. 10, p. 16085–16089, 2014.

SPELLMAN, F. R. **Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations**. 1st. ed. New York: CRC Press LLC, 2003.

TAY, J. H. Bricks manufactured from sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 2, p. 278–284, 1987.

TELOEKEN, A.; VILLANOVA, D. L.; BERGMANN, C. P. Utilização de lodo galvânico como matéria-prima em cerâmica vermelha e caracterização dos corpos cerâmicos obtidos quanto a propriedades tecnológicas e a imobilização de metais. **Cerâmica Industrial**, v. 16, n. 2, p. 14-19, 2011.

TYTŁA, M. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk in sewage sludge from municipal wastewater treatment plant located in the most industrialized region in Poland - case study. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 13, p. 2021, 2019.

WENG, C.; LIN, D.; CHIANG, P. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in environmental research**, v. 7, n. 3, p. 679-685, 2003.

WOLFF, E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE JR., A. R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos. **Cerâmica**, v. 37, n. 247, p. 7–16, 1991.

ZAT, T. et al. Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 297, 2021.

ZAT, T. **Potencial valorização do lodo de estação de tratamento de esgoto como matéria prima para produção de blocos cerâmicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

ZOMER, J. A. et al. Sewerage sludge from a treatment plant as fertilizer in tobacco and oats plantations. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 185–201, 2018.