

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

**DÉBORA NIENOV RAMOS**

**AVALIAÇÃO DO LODO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE E AREIA DE  
FUNDIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATÉRIA-PRIMA DE MATERIAL  
CERÂMICO**

FELIZ

2023

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

**DÉBORA NIENOV RAMOS**

**AVALIAÇÃO DO LODO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE E AREIA DE  
FUNDIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATÉRIA-PRIMA DE MATERIAL  
CERÂMICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de bacharelado em Engenharia  
Química.

Orientador: André Zimmer

FELIZ

2023

**DÉBORA NIENOV RAMOS**

**AVALIAÇÃO DO LODO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE E AREIA DE  
FUNDIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATÉRIA-PRIMA DE MATERIAL  
CERÂMICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Daiane Romanzini

---

Prof. Flávia Dagostim Minatto

**ORIENTADOR**

---

Prof. André Zimmer

Feliz, 03 de julho de 2023.

## RESUMO

No passado, os recursos naturais eram utilizados sem preocupação quanto a serem recursos esgotáveis, e tão pouco quanto à disposição dos resíduos produzidos nos processos industriais. Estudos foram realizados para que esses resíduos possam ser reutilizados em composições de produtos já existentes no mercado. Como o lodo de estação de tratamento de efluente e a areia descartada de fundição são resíduos gerados em grande volume e, atualmente, destinados em aterros, tem-se como objetivo deste trabalho introduzir esses resíduos nas formulações cerâmicas e avaliar as propriedades após processamento cerâmico. Para tanto, inicialmente as matérias-primas foram preparadas mediante secagem e moídas em moinhos de martelo. Assim com a composição de resíduos definida, variando em torno de 5 a 30%, misturados em um moinho de bolas pode-se obter uma massa homogênea e logo após umidificada em 6 a 8%, ficando em repouso por 24 h. Após a homogeneização, as amostras com dimensões de 76 x 36 x 6 mm foram confeccionadas por prensagem a uma pressão de 20 MPa, foram posteriormente secas a temperatura ambiente por 24 h e depois em estufa por 24 h a 110 °C. Para a queima em forno mufla, as amostras passaram por um ciclo de queima 24 h a uma taxa de aquecimento de 100 °C/h. Com as amostras queimadas e resfriadas os ensaios de resistência à flexão, perda ao fogo, retração linear, absorção de água e densidade foram realizados. Os resultados dos testes mostraram que é possível introduzir esses resíduos na composição do material cerâmico. Porém, conforme a quantidade de resíduos aumenta, o empacotamento do corpo cerâmico é dificultado ocasionando poros. Assim como, a diminuição da resistência mecânica pelo fato de ocorrer um aumento da porosidade durante a queima da matéria orgânica e conseqüentemente um aumento da absorção de água. Além de reduzir a retração linear devido à elevada quantidade de sílica presente na formulação, que na temperatura utilizada não reagiu e se manteve inerte. Conforme o estudo realizado, se torna possível a adição desses resíduos na formulação de um material cerâmico, diminuindo assim a quantidade de argila considerado um recurso natural não renovável, utilizando os resíduos em substituição em vez de destiná-los em aterros. Como algumas propriedades não obtiveram o resultado esperado, se sugere uma continuação do estudo avaliando a quantidade dos resíduos utilizados para atender as propriedades de um material cerâmico na temperatura de sinterização utilizada no processo industrial.

**Palavras-chave:** Resíduos. Lodo de estação de tratamento de esgoto. Areia de fundição. Cerâmica. Resistência mecânica.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Objetivos</i>	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	<i>Abrangência e limites do trabalho</i>	2
1.3	<i>Justificativa</i>	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1	<i>História da cerâmica</i>	4
2.2	<i>Materiais cerâmicos</i>	5
2.3	<i>Estrutura do material cerâmico</i>	6
2.4	<i>Processo produtivo de material cerâmicos</i>	6
2.4.1	Matéria-prima	6
2.4.2	Preparação da matéria-prima	7
2.4.3	Preparação da massa cerâmica	8
2.4.4	Conformação da cerâmica	9
2.4.5	Secagem da cerâmica	10
2.4.6	Queima da cerâmica	11
2.5	<i>Resíduos industriais</i>	12
2.5.1	Lodo de estação de tratamento de efluente de indústria têxtil	13
2.5.2	Areia de descarte de uma indústria de fundição	14
2.6	<i>Estudos para reutilização dos resíduos</i>	15
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>19</b>
3.1	<i>Materiais</i>	19
3.2	<i>Método</i>	19
3.2.1	Preparação dos materiais	20
3.2.2	Preparo das formulações	20
3.2.3	Conformação das amostras cerâmicas	21

3.2.4	Secagem das amostras cerâmicas	21
3.2.5	Queima das amostras cerâmicas	21
3.3	<i>Análises</i>	22
3.3.1	Retração linear e perda ao fogo	22
3.3.2	Resistência à flexão	22
3.3.3	Absorção de água	23
3.3.4	Massa específica	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>26</b>
4.1	<i>Retração linear e perda ao fogo</i>	27
4.2	<i>Absorção de água, densidade e resistência mecânica</i>	27
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO DESTE TRABALHO</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No passado, os recursos naturais eram amplamente utilizados pelo fato de serem considerados abundantes e não se tem preocupação com os resíduos gerados nos processos em que eram utilizados. Porém, essa situação começou a se agravar e impactar nos danos ao meio ambiente. Agora, a preocupação que se tem em estudos recentes, se refere à reutilização de muitos dos resíduos descartados para aterros ou, até mesmo, sem um destino correto.(BONIN, ANDRÉ LUIS; ROSSINI, ADILSON J.;ZABIM, 1995)

Tanto o lodo de estação de tratamento de esgoto como a areia de fundição são provenientes de processos industriais. A partir do ano de 2010, entrou em vigor no Brasil a lei 12.305 (“LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010.”, 2010), que criou um controle desses resíduos, destinando em um local apropriado e controlado. Com isso, indústrias de fundição estão avaliando alternativas para reutilizar esses resíduos, visto que se utiliza uma matéria-prima não renovável, como a areia em seu processo. (PALUDO, 2010)

Existem diversos estudos nas quais se avalia a incorporação destes dois resíduos em materiais cerâmicos, mostrando que é possível essa prática. Porém, estudos reutilizando lodo de estação de tratamento de efluente ou até mesmo de água (ETA) mostrou que, formulações utilizando mais de 15% em lodo não apresentam bons resultados devido à quantidade de material orgânico, conferindo um aumento na porosidade. (AREIAS et al., 2017)(TELOEKEN et al., 2011)(VIEIRA, GEOVANE; FERNANDO, 2012) Já em parâmetros industriais, incorporando 30% de areia de fundição na massa ela apresenta características inerte.(PALUDO, 2010)(SOUZA, 2021)

Contudo, busca-se desenvolver um material cerâmico utilizando em sua composição resíduos industriais, como lodo de estação de tratamento de esgoto de indústria têxtil e areia de fundição, substituindo uma porcentagem da argila, à qual é uma matéria-prima não renovável.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar os parâmetros principais do processamento e propriedades de um material cerâmico utilizando em sua composição, argila, lodo de estação de tratamento de efluente e areia de fundição.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma massa de composição adequada para o processo de fabricação da cerâmica reutilizando os resíduos;
- Analisar as propriedades das amostras após o processamento cerâmico.
- Avaliar potenciais aplicações dos resíduos de estudo como matérias-primas de produtos cerâmicos, com base nas formulações desenvolvidas.

## **1.2 Abrangência e limites do trabalho**

Neste trabalho, será dado ênfase para na análise das características do material cerâmico utilizando lodo de estação de tratamento de esgoto oriunda de indústria têxtil e areia de fundição, dessa forma, o processo será exclusivamente realizado em laboratório com parâmetros mais próximos de um processo industrial. A conformação será realizada mediante prensagem para fins de avaliar as formulações utilizando os resíduos, o que não exclui a possibilidade de realizar a conformação por outros meios, tal como através da extrusão, uma vez que neste trabalho será realizada a avaliação dos resíduos e seus efeitos na formulação cerâmica.

Apesar de já mencionado sobre a enorme preocupação com questões ambientais desses resíduos, não será estudado sobre esse assunto neste trabalho, sendo uma possibilidade de continuação deste estudo. O objetivo aqui é avaliar os principais efeitos dos resíduos no processamento e propriedades das cerâmicas desenvolvidas.

## **1.3 Justificativa**

Foi conduzida uma revisão bibliográfica abrangente em várias bases de dados nacionais e internacionais, utilizando palavras-chave como "areia de fundição", "lodo de estação de tratamento de esgoto de indústrias têxteis", "argila", "materiais



cerâmicos" e "reutilização de resíduos em composições cerâmicas", entre outras. Nesta revisão, não foi encontrada nenhuma referência que abordasse simultaneamente as três matérias-primas mencionadas. No entanto, foram encontrados diversos estudos que exploravam a utilização de lodos provenientes de diferentes origens, assim como combinações com casca de arroz, vidro, cinzas de lenha, areia de fundição e outros materiais.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 História da cerâmica**

A atividade com argila (barro) já vem de milênios, a qual foi o marco zero da civilização, quando o homem passou da fase nômade para a fase sedentária, deixando de buscar alimentos para criar e plantar seu próprio sustento, assim como se aglomerando fazendo uso da cerâmica e tecelagem para conviver em sociedade. (BRANCANTE, 1981)

Entre 3000 e 7000 a.C., o homem iniciou suas atividades com o barro em grandes monumentos arquitetônicos, com tijolos secos sem sofrer queima, que até hoje podem ser vistos. Somente por volta de 1100 e 700 a.C., que começaram a aparecer os primeiros tijolos queimados. A partir desse momento, essa prática se estendeu em boa parte do mundo, porém ainda utilizando os métodos manuais. (FACINCANI, 2002)(REED, 1938)

Na China, o desenvolvimento da porcelana branca foi mais notável. No ocidente, as tentativas obtiveram fracasso no método de duplicação dessa porcelana, até que o alemão Fredrich Bottger descobriu que poderiam queimar o corpo contendo argila resistente ao fogo. Posteriormente a inclusão de outros equipamentos foram melhorando o processo, como os gabaritos para facilitar a moldagem das peças, extrusão, queimas em fornos, entre outros. (REED, 1938)

Somente quando as máquinas a vapor surgiram que o processo cerâmico passou a ser mecanizado, utilizando equipamentos para a mistura da massa, prensagem dos blocos e moagem. Já no final do século XIX, que foi possível distinguir as fases em microscopia óptica, e as peças sinterizadas em fornos elétricos. Anteriormente, o processo de queima não podia ser controlado, nem sua alimentação de combustível, e nem mesmo o ar necessário para a combustão. Com o surgimento de fornos elétricos, esse processo passou a ter um controle mais assertivo. (FACINCANI, 2002)(REED, 1938)

A partir do século XX, com o avanço da tecnologia na microscopia, a composição dos blocos cerâmicos foram aprimoradas, outros elementos foram introduzidos para melhorar suas propriedades e características finais, facilitando o processamento. (REED, 1938)

## 2.2 Materiais cerâmicos

Materiais cerâmicos são geralmente compostos por elementos metálicos e não metálicos, unidos por ligações iônicas, como óxidos, nitretos e carbonetos. Logo, a este grupo pertencem às cerâmicas tradicionais (argilo-minerais), cimentos e vidros, as quais possuem um bom isolamento térmico e elétrico, alta resistência a temperaturas elevadas e a corrosão, além de serem materiais duros, mas, ao mesmo tempo, frágeis. (CALLISTER, 2016)(PADILHA, 1997)

O primeiro material utilizado pelo ser humano para adquirir novas propriedades e utilidades foi a argila, porém com o passar do tempo, com a sinterização pode-se melhorar ainda mais o processo e obter um produto mais resistente. Para tanto, as principais matérias-primas que compõe a cerâmica vermelha e a branca são os silicatos hidratados de alumínio como a caulinita, haloisita, pirofilita e montmorilonita. A cor avermelhada de algumas cerâmicas ser conferida pelo óxido de ferro. (PADILHA, 1997)

Para a preparação da massa cerâmica, deve-se escolher os equipamentos adequados para este tipo de processo, depende muito da matéria-prima oriunda da jazida, como sua dureza, granulometria e seu teor de umidade. A argila absorve muito bem a água, dividindo-se em partículas muito finas, favorecendo a plasticidade em característica úmida, uma forte coesão à seco, assim como grande reatividade na queima e faz com que se tenha um produto sólido, resistente. (FACINCANI, 2002)

Quando se possui uma matéria-prima com um alto teor de umidade, a argila estará finamente dividida e depende somente de uma boa homogeneização da massa. Porém, quando se faz uso de uma matéria-prima mais seca, a absorção de água e o tempo para se obter a plasticidade adequada, depende da moagem, devido ao tamanho de partícula menor proporcionar uma maior superfície de contato. (FACINCANI, 2002)

A argila possui uma boa conformação pela sua característica plástica após umedecida. Porém, é através da secagem e a queima em altas temperaturas que se obtém um produto rígido e com a alta dureza. Assim, dependendo de sua composição, existem inúmeras aplicações como cerâmicas tradicionais e ainda como as cerâmicas avançadas. (PADILHA, 1997)

## **2.3 Estrutura do material cerâmico**

As cerâmicas tradicionais utilizam materiais naturais na sua composição, sendo eles indefinidos e impuros, quando comparados com as cerâmicas avançadas que utilizam materiais sintéticos e puros. Dessa forma, esses materiais impuros, grande parte argilominerais, possuem estrutura cristalina em camadas que, quando misturadas com água (funciona como lubrificante entre camadas, na qual são unidas por forças eletrostáticas), se tornam plásticos com boa conformação. (PADILHA, 1997)

Após a secagem, ocorre a sinterização no forno que é o momento em que a fase vítrea mantém as partículas unidas. Dessa forma, a cerâmica tradicional possui fases cristalinas, vítreas e poros com uma porcentagem maior de 10%. Com isso, esses materiais são parcialmente cristalinos com uma abundante quantidade de poros e microestrutura bastante heterogênea. Além disso, a porosidade influencia na capacidade térmica, exigindo uma quantidade menor de calor para atingir a temperatura desejada em comparação a uma cerâmica isenta de poros. (PADILHA, 1997)

## **2.4 Processo produtivo de material cerâmicos**

### **2.4.1 Matéria-prima**

A matéria-prima retirada da jazida para a produção da cerâmica vermelha é subdividida em diferentes componentes como a argila, materiais grosseiros (considerados inertes), impurezas e substâncias químicas diversas.

A argila é composta primordialmente por silicatos de alumínio hidratado. É o principal material que irá conferir as características como coesão, plasticidade, na qual pode ser trabalhada com facilidade e há resistências mecânicas a seco e a queimado. Para tanto, existem inúmeros tipos de argilas e o que vai conferir uma boa ligação entre a argila e a água são os elementos químicos presentes e a granulometria do material. Com isso, a argila utilizada na cerâmica vermelha é constituída por uma mistura de diferentes tipos de argilas, na qual a quantidade utilizada nas composições variam entre 15% a 45% em massa, dependendo da propriedade desejada. (FACINCANI, 2002)

A água possui afinidade com a argila, pois envolve partículas de argila promovendo o seu deslocamento para uma boa trabalhabilidade. Esse fenômeno é interessante no processo cerâmico, que com o aumento do volume faz com que ocorra

a absorção da água e por consequência a plasticidade para conformação, necessitando da secagem para ocorrer a perda de água.(FACINCANI, 2002)

A argila, por sua vez, é constituída por quartzo, carbonato, de cálcio e magnésio, óxidos metálicos, feldspatos e micas. O quartzo é utilizado em uma porcentagem de 15% a 30% em peso na produção da cerâmica vermelha, sua granulometria pode variar de 20 a 200  $\mu\text{m}$ , sendo ainda um dos materiais de maior dureza.(FACINCANI, 2002) Além disso, é o componente que confere a estrutura da cerâmica. Já os feldspatos são considerados fundentes, devido à formação da fase líquida por ter um ponto de fusão menor do que os demais componentes.(USP, 2013) Os óxidos mais comuns são os óxidos férricos com uma porcentagem de aproximadamente 10%, já os de sódio e potássio estão em menores quantidades, em torno de 5%.(FACINCANI, 2002)

Como a argila é retirada de jazidas naturais, existe grande possibilidade de encontrar inúmeros materiais não interessantes no processo de produção da cerâmica vermelha como madeira, pedras, fósseis, entre muitos outros elementos que podem até mesmo danificar os equipamentos. (FACINCANI, 2002) Importante ressaltar que, como o material cerâmico é composto por mais de uma matéria-prima, cada um dos componentes exemplificados varia conforme a procedência de cada uma das matérias-primas. Dessa forma, algumas características como absorção de água, porosidade e dureza podem sofrer alterações.(USP, 2013)

Podem ser encontrados sulfatos e sulfetos (piritas) que são facilmente solúveis. Essas piritas durante a queima provocam o surgimento de sulfatos. Os cloretos e fluoretos são dificilmente encontrados. Já os compostos orgânicos estão presentes em abundantemente na superfície das jazidas e não devem ser usadas na cerâmica, pelo fato de causar uma maior porosidade nas peças. (FACINCANI, 2002)

#### **2.4.2 Preparação da matéria-prima**

A preparação da matéria-prima vai depender muito das características dos materiais, na qual se faz uso de maquinários adequados com um bom funcionamento. Para tanto, chamamos de barbotina a suspensão homogênea com uma quantidade adequada entre os sólidos e água, que para isso, necessita de um processo de moagem das matérias-primas, podendo ser realizadas tanto em moagem via seca

como via úmida(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

As matérias-primas que possuem um teor de umidade, em torno de 15 a 30%, são mais plásticas, e denominada como uma preparação a úmido, podendo ser trabalhadas por destorroamento, corte e extrusão. Já as matérias-primas mais duras, necessitam de outro processo, na qual a moagem é a etapa principal para conferir uma granulometria fina, assim como a umidade pode inferir que ocorra aglomerações nos materiais dificultando a trabalhabilidade do material, nesse sentido pode-se denominar esse processo como preparação à seco. (FACINCANI, 2002)

Todavia, na preparação a úmido, uma mistura de vários materiais tem como único objetivo uma mistura que seja homogênea, logo a etapa de moagem é fundamental para esse processo conferindo um tamanho de partícula apropriado. Ainda, durante o processo a umidade dessa massa cerâmica precisa ser controlada introduzindo mais água. Porém, é interessante que a massa antes de passar pelas próximas etapas, permaneça um certo tempo em repouso, caso contrário, massas muito úmidas podem sofrer deformação no momento da conformação. (FACINCANI, 2002)

Na preparação a seco, o controle da umidade das partículas é inevitável, pois somente pelas etapas do processo perde-se produção pelo fato de as partículas se aglomerarem com o excesso de umidade. Por mais que possa se introduzir peneiras vibratórias no processo para minimizar essa aglomeração, ocorrendo o entupimento da malha, com isso pode-se ter uma perda de 55% do processo produtivo. (FACINCANI, 2002)

### **2.4.3 Preparação da massa cerâmica**

A composição de uma massa cerâmica depende das características da cerâmica que se deseja obter e de qual processo será utilizado. Logo, a qualidade da cerâmica vai depender da mistura das matérias-primas e do processo escolhido.(BARBA et al., 2002)

Dessa forma é necessário que se leve em consideração a utilização de materiais fortes e fracos (ou não plásticos), ou seja, a massa cerâmica precisa conter materiais plásticos, como as argilas, que possuem alta plasticidade, mas que tendem

a deformação, e os não plásticos, que tendem a formar corpos frágeis e porosos. (BRANCANTE, 1981)

Quando a amostra for preparada por via úmida, deve ter facilidade em formar uma massa cerâmica, e ainda se precisa de uma composição química e mineralógica adequada devido às transformações físico-químicas durante a queima para conferir as propriedades desejadas na cerâmica como porosidade, resistência mecânica e dilatação, levando em consideração que a massa não deve ser sensível à variação de temperatura. (BARBA et al., 2002)

Para uma baixa retração linear e como consequência a alta porosidade é conseguida pela introdução de carbonato de cálcio e magnésio em 10 a 15% na composição juntamente com materiais não plásticos melhorando a compactação das amostras e aumentando a velocidade de sinterização. (SANCHEZ; GARCÍA; NEGRE, 1996)

Com a introdução de óxidos como o  $K_2O$  e  $CaO$ , que são considerados os fundentes, promove-se a formação da fase vítrea que, conseqüentemente, diminui a porosidade da peça, melhorando assim a sua resistência mecânica em temperaturas superiores à  $1100\text{ }^{\circ}C$ . Já matérias-primas com uma quantidade muito elevada de quartzo (sílica) tende a uma diminuição drástica na resistência mecânica. (SOUZA, 2021) Pelo fato da sílica possuir uma granulometria maior e uma menor atração pela água, conseqüentemente a sua plasticidade e retração diminui, além de uma redução no tempo de secagem. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

Além disso, quando a sílica se dissolve aumenta a viscosidade na fase líquida, o que aumenta a tenacidade. Como a viscosidade decresce conforme aumenta a temperatura, esse acréscimo de sílica dissolvida compensa nessa perda na viscosidade. Analisando a resistência mecânica, grãos com uma granulometria superior a  $30\mu m$  formam trincas, enfraquecendo a peça. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

#### **2.4.4 Conformação da cerâmica**

Para a etapa de conformação de um material cerâmico existem alguns sistemas diferentes de conformação dependendo da característica da matéria-prima. Conforme se adiciona o líquido na mistura seca, as partículas da água com a argila vão se

aderindo formando aglomerados, dessa forma, essa quantidade de líquido na mistura é que vai direcionar o processo ideal de conformação.(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

A extrusão é utilizada quando se faz uso de materiais com uma plasticidade adequada para conseguir atravessar a boquilha da extrusora que fornece a forma final do produto. Para tanto, pode-se utilizar massas que sejam úmidas que contém uma umidade que fica em torno de 18 a 25%, na qual se optem os tijolos maciços, furados, blocos, lajotas, telhas extrudadas, entre outros produtos. Já as massas semi-úmida são trabalhadas com uma umidade que fica entre 13 e 16%, utilizando argilas com um teor de água muito baixo, desde que o material a ser produzido seja tijolos maciços ou furados com uma furação de no máximo 20 a 25%. (FACINCANI, 2002)

Porém, quanto maior a quantidade de líquido na massa cerâmica, mais se diminui o empacotamento, perdendo o comportamento plástico, impossibilitando a conformação por extrusão devido a massa estar pastosa, característico do concreto.(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

Ainda existe o método de prensagem, na qual pode-se utilizar material úmido, produzindo mais comumente telhas e cumeeiras. A produção de tijolos por esse método é rara. Tem-se ainda a prensagem com materiais secos com granulometria fina, de umidade 3 a 5%. Esse método utiliza pressões elevadas que irão dar forma ao produto e fornecer uma resistência mecânica para ocorrer a superposição de camadas. Porém, esse método só conforma tijolos maciços com uma porcentagem de furação de 10%, se necessitar blocos com uma dimensão maior precisa utilizar prensas com pressões elevadíssimas, nas casas de toneladas. (FACINCANI, 2002)

#### **2.4.5 Secagem da cerâmica**

Após a conformação, a cerâmica exhibe uma alta fragilidade, requerendo cuidados específicos. Quando um corpo cerâmico apresenta uma distribuição heterogênea de água durante o processo de secagem não uniforme, surgem tensões de retração. Caso essas tensões sejam superiores à resistência do corpo cerâmico, podem ocorrer trincas. Portanto, a etapa de secagem assume grande importância, uma vez que visa a eliminação da água adicionada durante o processo de conformação.(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)



Assim, a secagem da cerâmica é considerada completa quando não há mais variação de peso a uma temperatura de 75 °C. Entretanto, expor uma cerâmica com um teor significativo de umidade a uma temperatura acima de 100 °C resulta em pressão interna, o que pode levar à formação de trincas indesejáveis durante o processo. (FACINCANI, 2002)

Durante a etapa de secagem, ocorrem três fases distintas em relação à retração e evaporação da água. Na primeira fase, em que há um excesso de água na massa, observa-se um aumento significativo na retração linear à medida que a água é evaporada. Na segunda fase, a quantidade de água na massa diminui consideravelmente, resultando em uma diminuição na taxa de retração. Por fim, na terceira fase, a quantidade de água restante é muito baixa, mas ainda pode ser eliminada sem causar retração adicional. (FACINCANI, 2002)

#### **2.4.6 Queima da cerâmica**

A etapa seguinte da secagem é a queima, a qual com altas temperaturas torna a cerâmica um material com uma resistência mecânica o suficiente definida na norma para ser comercializada.(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021) Mas além de fornecer essa resistência precisa-se manter alguns procedimentos importantes, como a colocação da cerâmica no momento do empilhamento para que a queima seja uniforme em toda a pilha, capacidades do forno quanto a temperatura e dimensões, entre outros pontos. (FACINCANI, 2002)

No processo de queima da cerâmica, várias etapas ocorrem à medida que a temperatura aumenta. Antes da sinterização, ocorre a eliminação da água higroscópica, ocorrendo até 120 °C. Entre 350 e 650 °C, os compostos orgânicos presentes na cerâmica se decompõem. Entre 450 e 650 °C, há a eliminação da água de constituição da cerâmica. Entre 700 e 950 °C, os carbonatos presentes na cerâmica se decompõem. Somente acima de 950 °C ocorre o início da sinterização do material, na qual ocorre a consolidação das partículas cerâmicas. Por fim, o processo de resfriamento também é importante e precisa ser controlado para evitar danos ao material.(CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

O forno, por sua vez possui três zonas diferentes com temperaturas distintas, sendo elas a zona central, a qual é a zona de queima contendo as maiores temperaturas. A zona de pré-aquecimento é a entrada do forno antes de chegar na

zona de queima, na qual a temperatura parte da temperatura ambiente até aproximadamente 700 °C. Por fim, a zona de resfriamento, na qual a cerâmica é direcionada até a saída do forno perdendo gradativamente a temperatura chegando a aproximadamente 100 °C.(FACINCANI, 2002)

Contudo, as vagonetas que saem do processo de secagem entram uma a uma no forno de queima, assim, conforme a velocidade de deslocamento dentro do forno, define-se o tempo predestinado em que a cerâmica permanecerá dentro do forno para queima. Então conforme um carrinho entra no forno já existe um na saída que está pronto para ser comercializado, para tanto o tempo em que ele leva para percorrer todo o forno é o tempo de ciclo total. (FACINCANI, 2002)

## **2.5 Resíduos industriais**

Grande parte das indústrias geram resíduos, algumas em grande volume, que precisam seguir a legislação para a destinação correta. Dando ênfase ao lodo de estação de tratamento de efluente têxtil e a areia descartada de fundição a pode-se observar a composição química de cada um dos resíduos citados.

Que se observa em maior quantidade os óxidos refratários que necessitam de uma muito elevada para reagir e difundir durante a sinterização, caso contrário, permanecerão inertes. Já o óxido de ferro é o que está presente em maior quantidade e irá reagir, demais óxidos está em menor quantidade e que não reagem tanto quanto o óxido de ferro.

Além disso, tem-se a perda ao fogo que possui uma diferença significativa entre o lodo têxtil e a areia de fundição, isso devido a quantidade de matéria orgânica presente na composição do lodo têxtil, que no momento da sinterização se decompõe ocasionando porosidade.

Tabela 1: Composição química dos resíduos

Óxidos	Areia (%)	Lodo (%)
$SiO_2$	87 a 97	10 a 50
$Al_2O_3$	0,8 a 5	0,3 a 4
$Fe_2O_3$	0,4 a 1,5	0,2 a 1,5
$SO_3$	0,05 a 1	2 a 5
$CaO$	0,05 a 0,5	1 a 30
$TiO_2$	0,1 a 0,2	0,01 a 0,1
$K_2O$	0,05 a 0,3	0,05 a 0,5
$MgO$	0,1 a 0,5	1 a 25
<i>Perda ao Fogo</i>	5 a 10	60 a 70

Fonte: Estudos anteriores, areia de fundição (SOUZA, 2021)(PALUDO, 2010)(SILVA, 2010)(PALUDO, 2020); lodo têxtil (AREIAS et al., 2017)(TARTARI et al., 2011)(MEDEIROS et al., 2010)

### 2.5.1 Lodo de estação de tratamento de efluente de indústria têxtil

Uma indústria têxtil é composta por várias áreas como tecelagem, tinturaria, lavanderia e o beneficiamento. A área que mais se destaca sendo o poluidor é a tinturaria e lavagem, pelo fato de necessitar de elevadas quantidades de água e utilizar diversos produtos químicos. Com isso, descartam uma grande quantidade de efluente e semi-sólidos (lodo) contendo elevada carga orgânica e compostos tóxicos.(FERREIRA, 2018)

A água tratada do efluente e o lodo são provenientes de uma estação de tratamento de efluente, onde o sistema ideal vai depender muito da necessidade de cada indústria. Logo, em uma lavanderia, geralmente se utiliza um sistema de tratamento possuindo primeiramente gradeamento para retirada de grandes resíduos como restos de tecidos. Na sequência o fluido passa por tanques para homogeneizar a mistura. Logo após, ocorre a coagulação, floculação e decantação, na qual é introduzido no fluido agentes coagulantes para decantar o resíduo semi-sólido.(MOURA, 2009)

Por mais que a água devolvida para os recursos hídricos ou reutilizada no processo esteja com os padrões adequados conforme legislações, ou seja, não estão

contaminadas, tem-se o lodo que é uma das grandes preocupações quanto ao seu descarte.(MOURA, 2009)

A quantidade de lodo gerado vai depender do volume, da eficiência e de qual método que será utilizado no sistema de tratamento. Dessa forma, considerando uma lavanderia de médio porte processando 100 mil peças, gera cerca de 6 toneladas de lodo seco ou 120 toneladas de lodo com 95% de umidade por ano.(FERREIRA, 2018)

Para utilização desses resíduos na composição de massas cerâmicas, é importante que se faça a secagem desse lodo devido à elevada quantidade de umidade e a água ainda é o veículo para espalhamento desses poluidores. Dessa forma, a secagem além de diminuir a umidade, remove compostos e matéria orgânica voláteis e combustíveis.(COGO, 2011)

### **2.5.2 Areia de descarte de uma indústria de fundição**

A indústria de fundição teve um aumento consecutivo nos seus indicadores no ano de 2022, sendo que no Brasil, no mês de julho, produziu-se 240,5 mil toneladas de fundidos, uma alta de 8,3% para o mesmo mês e um acúmulo de 10,8% no primeiro semestre em comparação ao ano anterior. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO, 2022)

Em um processo de fundição, são produzidas peças metálicas para diversos setores, porém, predomina peças produzidas para a indústria automobilística. Para produzir essas peças, basicamente se utiliza moldes denominados machos e fêmeas, na qual a macharia (macho) é a parte mais rígida que será introduzida nos moldes (fêmea) para conferir cavidades nas peças quando necessário. Para esses moldes são utilizados uma quantidade muito elevada de areia, que para 1 kg de metal é necessário em torno de 0,8 a 1 kg de areia. Para tanto, essa areia poderá ser reaproveitada algumas vezes no processo até que as suas propriedades mecânicas, refratárias e permeabilidade são perdidas, e então ela acaba sendo rejeitada. (SOUZA, 2021)

Existem dois tipos de areia utilizada no processo, para os moldes se faz uso da areia chamada verde, a qual consiste basicamente em areia (que está no fim da vida útil) quando já está em processo de reutilização, areia nova, água e pó de carvão.(TORRE, 2011) O carvão evita a penetração do metal na areia, facilitando o desmolde das peças e conseqüentemente melhora o acabamento. A areia verde

confere plasticidade, quando úmida adequadamente pode ser facilmente moldada apresentando boa resistência, permeabilidade, reusibilidade e resistência a colapsibilidade. (SOUZA, 2021)

Para tanto, as macharias devem ser peças diferenciadas dos moldes por necessitarem de alta resistência a colapsibilidade para se manterem integras até a remoção após resfriamento. Contudo, é uma peça que utiliza a areia quimicamente ligada, na qual as resinas fenólicas fazem parte de sua composição além da sílica e bentonita. Essas resinas são consideradas ligantes para fornecer plasticidade, coesão e resistência, sendo elas epóxi, uretanos fenólicos, entre outros. (SOUZA, 2021) (TORRE, 2011)

Ao final do processo de fundição, obtém-se a areia descartada de fundição, classificada como resíduo sólido não perigoso e não inerte (Classe II-A). (BRASILEIRA, 2004) Como já mencionado, a areia possui um limite de reutilização no processo, pelo fato de seus grãos perderem o seu formato original, que é um fator importante, logo quando não se consegue mais reutilizá-la, esta acaba indo para o descarte. (SOUZA, 2021)

## **2.6 Estudos para reutilização dos resíduos**

Conforme foi visto nos tópicos anteriores, há uma preocupação muito elevada na disposição final desses resíduos mesmo que de forma legal. Entretanto, com o passar dos anos, muitos estudos e pesquisas são realizados para tentar reutilizar os resíduos derivados de indústria de fundição e estação de tratamento de esgoto em composições de produtos já existentes no mercado, como principalmente materiais cerâmicos.

Pelos estudos anteriores, que pode-se observar no Quadro 1 e 2 os diferentes métodos utilizados em estudos para se obter resultados positivos na reutilização desses resíduos. Que empregaram procedimentos semelhantes, como secagem, mistura, homogeneização, conformação, secagem e queima, com variações apenas em alguns parâmetros do processo e nas quantidades de cada material utilizado. A maioria dos estudos utilizou resíduos em uma faixa de 5 a 20%, tanto para areia como para o lodo, enquanto apenas alguns estudos adotaram composições superiores, entre 30 e 50% de resíduos.

Quanto aos parâmetros do processo, a maior diferenciação ocorreu em relação à temperatura de queima, com temperaturas variando de 800 a 1200 °C. Assim esses estudos mostraram ser possível introduzir esses resíduos nas formulações com resultados satisfatórios.

Quadro 1: Estudos anteriores sobre a preparação e composição da massa cerâmica

Estudo	Mistura	Conformação	Secagem	Queima
(OLIVEIRA; HOLANDA, 2008)	Misturador cilíndrico por 15 min/ umidificação em 7% em peso	Prensa com 24 MPa	Estufa 110 °C por 24h	Forno mufla em 850, 950, 1050 °C queima lenta 24 h
(TEIXEIRA et al., 2006a)		7 toneladas em prensa manual		900, 950, 1000 e 1200 °C
(MEDEIROS et al., 2010)	Moinho de bolas	Prensa de 27 MPa	Estufa 100°C por 24h	Forno mufla com 800, 900 e 1000 °C taxa de 2 °C/min ciclos de 8 h com patamar de 2h
(AREIAS et al., 2017)	Mistura com 8% de umidade	Prensa com 20MPa	Estufa a 110°C	Forno em 950 °C taxa em 2 °C/min até patamar mantida por 120 min
(TARTARI et al., 2011)	Homogeneização manual com 10% de umidade/ repouso de 24h	Prensagem 250 Kgf/cm <sup>2</sup>	Secagem 110°C por 24h	Forno em 950 e 1050 °C com taxa de 10 °C/min e patamar de 2 h
(TELOEKEN et al., 2011)		Prensagem a 40MPa		Queima de 2 h em uma taxa de aquecimento de 150 °C/h
(VIEIRA, GEOVANE; FERNANDO, 2012)		Prensagem a 19 MPa		Queima a 800, 900, 950 e 1050 °C por 2 h em uma taxa de 5 °C/min
(PALUDO, 2020)	Homogeneização em moinho parafina por 5 min/ umidificação de 10%	Prensagem a 40MPa	Secagem a T. ambiente por 24h/ estufa a 110 °C por 24h	Forno a 850, 900, e 1000 °C com taxa de aquecimento de 180 °C/h por 2 h
(PALUDO, 2010)	Moinho periquito por 5 min/ umidificação em 7%	Prensagem 250 Kgf/cm <sup>2</sup>	Secagem em T. ambiente por 24 h/ estufa a 110 °C por 24 h	Queima a 850, 900 e 950 °C com taxa de aquecimento de 180°C/h por 1h
(SOUZA, 2021)	Homogeneização mantida em recipiente fechado por 24h/ umidificação em 10%	Prensagem com 6 toneladas para 3 corpos simultâneos	Estufa a 110 °C por 24 h	Queima a 800, 900, 1000 e 1100 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de 1 h

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Quadro 2: Estudos anteriores sobre o processamento da cerâmica

<b>Estudo</b>	<b>Preparação resíduo</b>	<b>Composição</b>
(OLIVEIRA; HOLANDA, 2008)	Secagem a 110°C por 24h/ destorroamento e peneiramento 425µm	0, 5, 10, 15% lodo
(TEIXEIRA et al., 2006b)	Lodo seco em estufa/ destorroadas em moinhos de facas e peneiradas	0, 10, 20, 30% de lodo
(MEDEIROS et al., 2010)	Moinho de bolas e peneira ABNT 200	Argila entre 50 a 100% e resíduos 0 a 50%
(AREIAS et al., 2017)	Inertização do lodo/ secagem a 110°C até massa constante	0, 2,5, 10, 15% de lodo em massa
(TARTARI et al., 2011)	Secagem a 110°C/ moinho de martelo para obter partículas menores	4, 8, 12 e 16% de lodo
(TELOEKEN et al., 2011)	Secagem a 110°C/ triturar no moinho planetário até 100% passar pela peneira 180 µm	Resíduos adicionados em formulações contendo 0 a 15%
(VIEIRA, GEOVANE; FERNANDO, 2012)	Caracterização dos resíduos	10, 15 e 20% de lodo
(PALUDO, 2020)	Moinho de bolas por 12h/ peneiramento com malha ABNT 270	0, 20, 30, 40 e 50% de areia
(PALUDO, 2010)		0, 10 e 20% de areia
(SOUZA, 2021)	Argila seca em T. ambiente por 24/ moinho de facas e peneirado em 0,59 mm	0, 5, 10, 15 e 20% de areia

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Esses estudos mostraram que uma composição de 20 a 30% de areia de fundição na formulação do material cerâmico, levou a resultados bem satisfatórios em temperaturas de queima entre 900 e 1100 °C, devido os óxidos presentes nos materiais se difundir, fazendo com que tenha uma diminuição na porosidade em temperaturas elevadas.(PALUDO, 2020)(SOUZA, 2021)(PALUDO, 2010)

Utilizando formulações contendo 2,5 a 10% de lodo têxtil na formulação cerâmica, mostrou ser viável em temperaturas de queima de 900 a 1000 °C. Mas

indiferente a temperatura de queima, conforme se aumenta a quantidade de lodo tem-se um aumento na porosidade. Contudo, conforme aumenta a temperatura, a retração linear aumenta com a diminuição da absorção de água e conseqüentemente melhora a resistência, devido o mecanismo de sinterização aproximando as partículas na fase líquida.(FERREIRA, 2018)

Com o aumento do lodo na formulação aumenta a porosidade ocasionado também pela granulometria dos materiais. Como o lodo possui uma granulometria mais grosseira possui uma diferença grande entre o tamanho das partículas, com isso dificulta o empacotamento ocasionando espaços abertos.(SOUZA, 2021) Além da redução na viscosidade, prejudica também a molhabilidade e consolidação das partículas na queima. (FERREIRA, 2018)

A baixa molhabilidade está relacionado com os materiais não plásticos, a qual o lodo se encaixa, assim necessitou-se de uma quantidade mais elevada de água para melhorar a trabalhabilidade da massa cerâmica, este comportamento está diretamente relacionado com a plasticidade, dificultando a compactação.(MOURA, 2009)

Utilizando a areia de fundição ocorre uma diminuição na retração linear devido ao quartzo não difundir (permanece inerte na composição) em temperaturas inferiores a 1100 °C de queima melhorando a resistência a trincas, porém aumenta o tamanho dos grãos de hematita responsável pela porosidade.(PALUDO, 2020)

Em uma temperatura de sinterização superior a 1100 °C mostra uma considerável diminuição na porosidade. Essa diminuição ocorre devido a formação de uma fase líquida durante o aquecimento formando a fase mulita, liberando íons e/ou elementos que possam se difundir entre as partículas empacotadas preenchendo esses espaços vazios, ocorrendo assim a diminuição da porosidade e aumentando a resistência mecânica.(SOUZA, 2021)



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

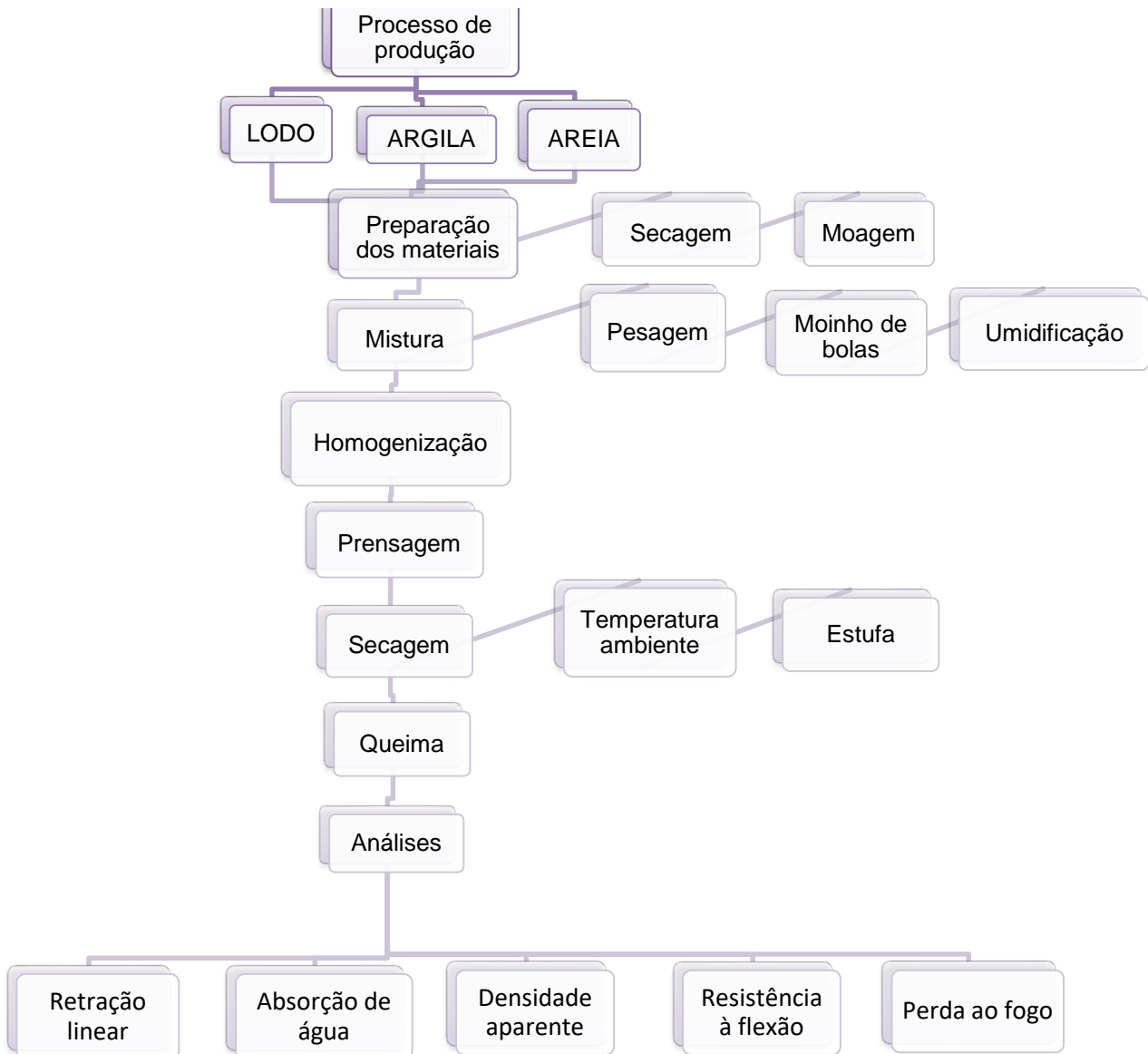
#### 3.1 Materiais

Foi empregada a argila utilizada para produção de blocos cerâmicos, extraída de uma jazida localizada na região do Vale do Caí, que foi fornecida por uma olaria situada na cidade de Feliz, RS. Além disso, foram utilizados o lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto da indústria têxtil e a areia descartada pela fundição, gerados no segmento industrial sediado no município de Caxias do Sul, RS.

#### 3.2 Método

A metodologia realizada neste trabalho está disposta na Figura 1.

Figura 1: Metodologia de processamento e análises.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.2.1 Preparação dos materiais

Iniciando pela preparação dos materiais, o lodo foi submetido à secagem a 25 °C por, pelo menos, cinco dias para reduzir parte do teor de água, tendo em vista que o lodo apresenta, em média, 80-85% de umidade. Em seguida, tanto o lodo quanto a areia de fundição foram submetidos a um processo de secagem em estufa, com temperatura de 105 °C, por no mínimo dois dias, visando a retirada do restante de água presente nos materiais.

### 3.2.2 Preparo das formulações

Com as matérias-primas devidamente secas, as pesagens das formulações foram realizadas segundo a Tabela 2, que apresenta as diferentes misturas efetuadas com as distintas proporções entre os resíduos. Vale ressaltar que uma das formulações é composta apenas pela argila, que serviu como referência para comparação dos resultados obtidos.

Tabela 2: Composição das formulações

Formulação	Argila %	Lodo %	Areia %
100A0L0Ar	100	0	0
65A05L30Ar	65	05	30
60A10L30Ar	60	10	30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essas quantidades de matérias-primas de cada formulação foram selecionadas com base nos estudos anteriores encontrados nos Quadro 1 e 2, buscando-se maximizar a quantidade dos resíduos nas formulações.

Após as formulações serem devidamente pesadas, as mesmas foram introduzidas em um moinho de bolas durante um período de 20 min, visando desfazer eventuais aglomerados e obter uma mistura homogênea. Em seguida, a mistura resultante foi pesada novamente, adicionando-se entre 6 a 8% de água em massa, a fim de proporcionar a fluidez necessária ao processo. A mistura foi então transferida para um recipiente hermeticamente fechado e mantida em repouso por um período de dois dias, a fim de garantir a homogeneização adequada da mistura.

### 3.2.3 Conformação das amostras cerâmicas

As amostras apresentaram dimensões de 76 x 36 x 6 (mm), foram submetidas ao processo de prensagem em uma prensa hidráulica com pressão de 20 MPa, tendo sido confeccionadas quatro amostras por formulação. Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, as prensagens foram realizadas em duplicatas. A Figura 2 ilustra o procedimento executado na prensa hidráulica durante a confecção das amostras.

Figura 2: procedimento executado na prensa. a) Molde posicionado com a formulação introduzida no seu interior b) sistema de prensagem em funcionamento c) amostra prensada retirada do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.2.4 Secagem das amostras cerâmicas

Com as amostras confeccionadas, foram deixadas secando por um período de um dia a temperatura ambiente para eliminação de boa parte da umidade. Posteriormente, as amostras foram introduzidas em uma estufa com temperatura aproximada de 100 °C, onde permaneceram por um período de 24 h para retirada da umidade até atingir massa constante.

### 3.2.5 Queima das amostras cerâmicas

Após o processo de secagem, garantindo eliminação de boa parte da água presente na amostra para que se evite defeitos no momento da queima, as peças cerâmicas foram submetidas à queima em um forno até 950 °C, com uma taxa de aquecimento de 100 °C/h e um patamar de 5 min na temperatura máxima e um resfriamento lento evitando defeitos.

### 3.3 Análises

Após o processamento cerâmico, todas as amostras foram submetidas a testes para análises do processo e produto como segue nos próximos tópicos.

#### 3.3.1 Retração linear e perda ao fogo

Para essa análise, foi utilizado um paquímetro e a balança analítica para medir e pesar, verificando assim a perda de massa em cada uma das amostras em cada uma das etapas do processo, após a conformação, secagem e queima das peças cerâmicas.

A retração linear é uma medida da variação dimensional que ocorre nas amostras durante o processo de queima. Essa variação é decorrente da expulsão de água e da eliminação dos gases que estão presentes nas matérias-primas. A perda ao fogo, por sua vez, é a medida da quantidade de matéria orgânica presente nas amostras que é eliminada durante o processo de queima. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

#### 3.3.2 Resistência à flexão

Foi realizado o ensaio de resistência à flexão após a queima, em que as amostras foram introduzidas no equipamento e apoiadas nas extremidades, recebendo no centro uma carga de 4,4 Kgf/s até que ocorreu a ruptura do material cerâmico. Esse procedimento foi realizado conforme a norma ASTM C674-13. A Figura 3 ilustra o procedimento executado durante o teste de flexão. (ASTM INTERNATIONAL, 1999)

Figura 3: execução do teste de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.3.3 Absorção de água

Para ensaio de absorção de água, as amostras submetidas ao teste de resistência à flexão foram inseridas em um recipiente contendo água, mantendo-as em repouso por um período de 24 h. Em seguida, as amostras foram retiradas do recipiente e pesadas após a remoção do excesso de água da superfície das peças. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021) A Figura 4 dispõe de uma imagem das amostras submersas em um recipiente de água antes de realizar a pesagem das peças úmidas.

A absorção de água é definida como a quantidade de água que uma determinada amostra é capaz de absorver em relação ao seu peso seco original. Esse ensaio é comumente utilizado em materiais porosos, como cerâmicas e concretos, para avaliar a sua permeabilidade à água e, conseqüentemente, sua resistência à degradação. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

Figura 4: teste de absorção de água



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O cálculo da absorção de água é realizado a partir da diferença entre a massa da amostra após o ensaio e a massa seca original, dividido pela massa seca original, expresso em porcentagem. A fórmula matemática para o cálculo da absorção de água é dada por (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021):

$$\text{Absorção de água (\%)} = [(M_f - M_i)/M_i] \times 100$$

Onde:

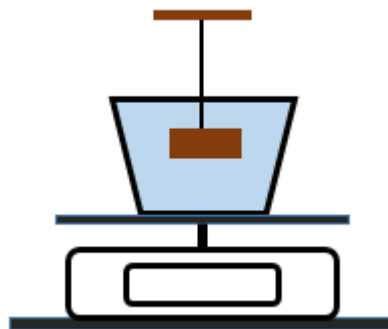
M<sub>f</sub>: massa final da amostra após o ensaio;

M<sub>i</sub>: massa inicial da amostra seca.

### 3.3.4 Massa específica

Para a análise da massa específica aparente de um material, foi utilizado o método de Arquimedes. Esse método é baseado no princípio de que um objeto submerso em um fluido sofre uma força ascendente igual ao peso do fluido deslocado pelo objeto. Na Figura 5 ilustra o sistema montado para realizar o método de Arquimedes. (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

Figura 5: sistema do método de Arquimedes



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As amostras, por sua vez, foram submersas em água destilada, dessa forma, pode-se medir a diferença de peso entre a amostra em ar e a amostra submersa. A partir disso, a massa específica aparente do material foi calculada.

O cálculo da massa específica aparente é realizado pela seguinte fórmula:

Massa específica aparente = (Peso em ar / (Peso em ar - Peso submerso)) x Massa do líquido (CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, 2021)

Onde:

Peso em ar: peso da amostra em ar;

Peso submerso: peso da amostra submersa no líquido;

Massa do líquido: massa específica do líquido utilizado.

É importante ressaltar que a amostra deve estar completamente submersa no líquido e livre de bolhas de ar. O método de Arquimedes é amplamente utilizado em análises de materiais, permitindo a determinação da massa específica aparente de forma precisa e confiável.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o processamento cerâmico, pode-se observar na Figura 7 a imagem das três formulações desenvolvidas após a etapa de mistura, utilizando o lodo têxtil e a areia descartada de fundição.

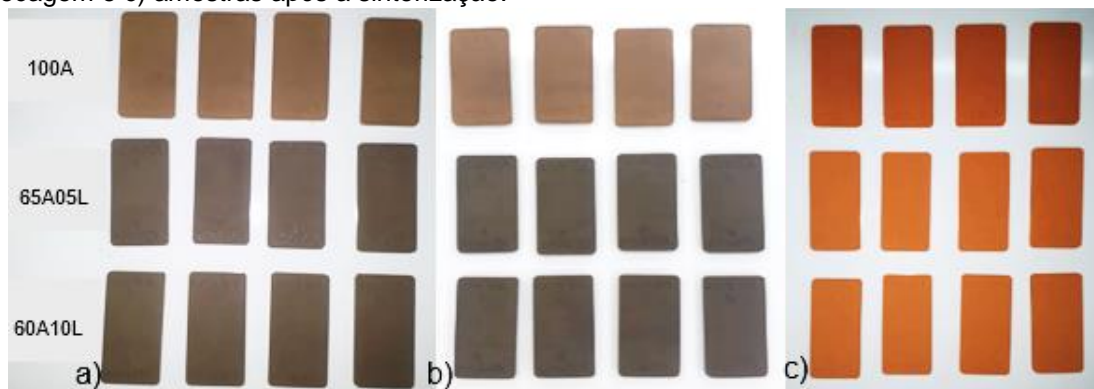
Figura 7: Formulações desenvolvidas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Já na Figura 8 estão dispostas as amostras após a etapa de conformação, secagem e sinterização, que pode-se observar as diferentes características das amostras em cada uma dessas etapas do processo. Antes da sinterização fica evidente a coloração mais escura, característica da presença do material orgânico do resíduo. Após a sinterização a coloração mais avermelhada fica evidente, sendo característico do óxido de ferro III que é o óxido mais presente nos resíduos que reage no momento da sinterização.

Figura 8: Amostras em diferentes etapas: a) amostras após a prensagem, b) amostras após secagem e c) amostras após a sinterização.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



#### 4.1 Retração linear e perda ao fogo

Conforme foi se adicionando o lodo têxtil na composição e mantendo a quantidade de areia de fundição constante segundo a Tabela 2, a porcentagem de retração linear foi diminuindo em comparação com a amostra referência contendo somente argila. Com isso a Tabela 3 dispõe dos resultados dos testes de retração linear e perda ao fogo realizados.

Tabela 3: Resultados do testes realizados

Formulação	Perda ao Fogo	Retração linear
100A0L0Ar	8,85%	2,90%
65A05L30Ar	11,80%	1,40%
60A10L30Ar	14,44%	1,33%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para os resultados encontrados, são coerentes com os estudos anteriores descritos nos Quadro 1 e 2. Que conforme aumenta a quantidade de resíduos, a quantidade de sílica presente na formulação aumenta ocasionando uma diminuição da retração linear, pelo fato desse óxido se manter inerte (não reage) na temperatura estudada e reduzindo o tempo de secagem.

Além disso, a perda ao fogo é aumentada, devido a quantidade de matéria orgânica presente no lodo têxtil, que se decompõe no momento da sinterização causando um aumento da porosidade da amostra.

#### 4.2 Absorção de água, densidade e resistência mecânica

Através dos resultados discutidos anteriormente, influenciam diretamente na absorção de água, densidade e resistência mecânica que estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos testes realizados

Formulação	Absorção de água	Densidade aparente g/cm <sup>3</sup>	Tensão a ruptura MPa
100A0L0Ar	23,64%	2,73	2,81
65A05L30Ar	30,05%	2,66	1,13
60A10L30Ar	32,58%	2,64	0,89

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O material cerâmico que contém lodo têxtil em sua formulação, mostrou um aumento na porosidade devido à decomposição da matéria orgânica. Com isso, conseqüentemente aumenta a absorção de água devido esses poros presentes. Como se possui um material cerâmico com alta porosidade a densidade do material também se torna prejudicada, diminuindo essa propriedade.

Já a resistência mecânica também diminui significativamente com essa porosidade, como é possível observar nos resultados encontrados, na qual a amostra com 100% de argila possui uma densidade maior com menos porosidade tendo uma resistência muito maior.

## 5 CONCLUSÃO

A utilização combinada de lodo de estação de tratamento de efluente de indústria têxtil e areia descartada de fundição na composição da massa cerâmica, em proporções variando de 5-10% e 30%, respectivamente, com temperatura de queima de 950 °C, resultou em descobertas que contribuem e são consistentes com a literatura existente, na qual esses estudos foram conduzidos separadamente para cada tipo de resíduo.

À medida que a quantidade de resíduos aumenta na composição da massa cerâmica, observou-se uma redução na retração linear. Ou seja, a adição dos resíduos com alta quantidade de sílica presente, resultou em uma redução na retração linear, isso pelo fato da areia de fundição na temperatura utilizada se mostrar inerte não difundido as partículas.

No entanto, outras propriedades importantes do produto final, como absorção de água e resistência mecânica, apresentaram desvios em relação aos requisitos do material cerâmico utilizando somente argila em sua composição. Esse fato ocorreu devido o lodo têxtil conter uma perda ao fogo elevada, que era o esperado devido à matéria orgânica presente se decompor.

Com todos resultados apresentados, mostra ser possível utilizar esses resíduos na composição da massa cerâmica, visto que, reduzindo a quantidade de argila, pensando na preservação dessas jazidas, devido ser um recurso não renovável. Além de contribuir com uma destinação desses resíduos em produtos comercializáveis ao em vez de aterros sanitários que demandam vários cuidados e que não impedem um impacto ambiental.

Para tanto conclui-se que, essas formulações desenvolvidas não atende as propriedades definidas nas normas técnicas para um material cerâmico convencional comercializável, através da temperatura de sinterização utilizada em processos industriais.

## **6 SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO DESTE TRABALHO**

Sendo características importantes, que precisam ser levadas em consideração, como a absorção a água, densidade e resistência mecânica para que o material cerâmico tenha as condições mínimas para serem comercializados.

Tendo como sugestão, avaliar a quantidade mais apropriada de cada um dos resíduos para a temperatura de sinterização utilizada na fabricação de tijolos no processo industrial para melhorar as propriedades do material cerâmico.

Além de avaliar parâmetros ambientais no momento do processamento cerâmico e armazenamento adequado desses resíduos quanto a legislação caso seja utilizado em algum processo industrial.

## REFERÊNCIAS

AREIAS, I. O. R. et al. **Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha**. *Ceramica*, v. 63, n. 367, p. 343–349, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Indústria brasileira de fundição acumula altas consecutivas em 2022**. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/industria-brasileira-de-fundicao-acumula-altas-consecutivas-em-2022/>>.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials**. *Test*, v. 88, n. Reapproved, p. 1–4, 1999.

BARBA, A. et al. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. [s.l: s.n.].

BONIN, ANDRÉ LUIS; ROSSINI, ADILSON J.; ZABIM, A. F. P. **Reutilização da Areia Preta de Fundição na Construção Civil**.pdf. Conaf 95. Congresso de fundição, 1995.

BRANCANTE, E. DA F. **O Brasil e a cerâmica antiga**. São Paulo: [s.n.].

BRASILEIRA, N. **Abnt nbr 10004**. 2004.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

COGO, M. DA C. **Estudo de Caracterização e Disposição dos Resíduos de uma Indústria Têxtil do Estado do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grand do Sul, p. 1–42, 2011.

CRUZ, RICARDO THOMÉ DA; PEDRAMASSI, JAIME; BRAGANÇA, S. R. **Fianças, grês e porcelanas: matéria-primas, moagem, conformação, secagem, queima, esmaltação, decoração, defeitos e propriedades gerais**. Porto Alegre: [s.n.].

FACINCANI, E. **Coletânea de Tecnologia Cerâmica: Cerâmica estrutural**. 3ª edição ed. Rio Claro, SP: Faenza Editrice do Brasil LTDA, 2002.

FERREIRA, M. N. **Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de Lavanderia Industrial em Cerâmica Vermelha**. p. 93, 2018.

**LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010.** Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>.

MEDEIROS, E. N. M. DE et al. **Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica: utilização da técnica de planejamento.** Cerâmica, v. 56, n. 340, p. 399–404, 2010.

MOURA, L. S. DE; ET AL. **Caracterização de lodo produzido nas lavanderias têxteis da região Agreste de Pernambuco para uso em materiais de construção alternativos.** Research, Society and Development, p. 102–103, 2009.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Influence of the addition of water treatment sludge on the properties and microstructure of red ceramic.** Ceramica, v. 54, n. 330, p. 167–173, 2008.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia - Microestrutura e propriedades.** Curitiba, PR: Hemus SA, 1997.

PALUDO, H. L. **Areia de fundição fenólica na produção de tijolos queimados.** n. 2009, 2010.

PALUDO, H. L. **Metallurgy and materials the use of casting sand.** v. 73, n. 3, p. 337–343, 2020.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing.** 2ª edição ed. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc, 1938.

SANCHEZ, E.; GARCÍA, J.; NEGRE, F. G. F. **Aspectos a Serem Melhorados nas Características e Homogeneidade de Argilas Vermelhas Empregadas na Fabricação de Placas Cerâmicas Características Técnicas das.** v. 01, n. 03, p. 13–22, 1996.

SILVA, K. D. DA. **Reutilização do resíduo de areia de fundição no Brasil e no mundo: O contexto do estado de Minas Gerais.** p. 58, 2010.

SOUZA, A. F. **Reaproveitamento da areia descartada de fundição na produção de blocos cerâmicos.** Presidente Prudente: [s.n.].

TARTARI, R. et al. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá,**

**Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** Cerâmica, v. 57, n. 344, p. 387–394, 2011.

TEIXEIRA, S. R. et al. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural.** Cerâmica, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006a.

TEIXEIRA, S. R. et al. **Effect of the addition of sludge from water treatment plants on the properties of structural ceramic material.** Ceramica, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006b.

TELOEKEN, A. C. et al. **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. 1–6, 2011.

TORRE, J. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão.** [s.l.] Hemus livraria, distribuidora e editora, 2011.

USP, U. DE S. P. **Formulação de materiais cerâmicos.** 2013.

VIEIRA, GEOVANE; FERNANDO, D. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE LODO GERADO PELA INDÚSTRIA METAL.** Tecnologias para competitividade industrial, p. 69–91, 2012.