



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SAMILLE KRICIA BEZERRA DE LIMA

**REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA E ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
TECNOLÓGICAS PÓS SINTERIZAÇÃO**

RUSSAS

2021

SAMILLE KRICIA BEZERRA DE LIMA

REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA E ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
TECNOLÓGICAS PÓS SINTERIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L71r Lima, Samille Kricia Bezerra de.
Reaproveitamento de cinzas de madeira para a produção de cerâmica vermelha e estudo das propriedades mecânicas e tecnológicas pós sinterização / Samille Kricia Bezerra de Lima. – 2021.
76 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.
1. Cerâmica vermelha. 2. Resíduos de cinza. 3. Reaproveitamento. 4. Propriedades físicas e mecânicas. I.
Título.

CDD 620.1

SAMILLE KRICIA BEZERRA DE LIMA

REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DE
CERÂMICA VERMELHA E ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
TECNOLÓGICAS PÓS SINTERIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 30/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Ramon Rudá Brito Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Suely e Eli por sempre acreditarem em mim e serem meus maiores apoiadores nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e principalmente, agradeço a Deus por tudo que tem proporcionado até aqui em minha vida pessoal e profissional, e por ter me guiado e consolado nos momentos difíceis dessa trajetória.

Agradeço aos meus pais Eli e Suely, que nunca mediram esforços para me ajudarem a chegar até aqui, por me darem suporte psicológico, financeiro e estrutural em cada momento que precisei e por acreditarem em cada sonho meu.

Ao meu orientador, Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo, pela sua compreensão, incentivo e ajuda, o que tornou possível a concretização deste projeto.

Aos professores Me. Ramon Rudá, Dr. Pedro Helton e Dr. Edvan Miranda pelas boas dicas e conversas, e pelo auxílio e colaboração na realização deste trabalho.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, cada um teve uma contribuição essencial para que hoje eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos e colegas de formação, Matheus Alencar e Ari Lucas, que estiveram presentes em muitos momentos durante realização deste projeto e tornaram essa jornada mais leve.

Ao Dr. Jorge Luiz do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC pela disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios desta pesquisa no Laboratório de Caracterização de Materiais.

Aos técnicos de engenharia mecânica da UFC de Russas, Marcos Ridiley, Orismildes Neto e Bruno de Oliveira pelo auxílio na realização dos ensaios no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Campus de Russas.

Aos meus colegas de graduação em Engenharia Mecânica, pela convivência e compartilhamento de experiências vividos até aqui.

RESUMO

Grande parte dos processos industriais são fontes geradoras de resíduos, provocando, quase sempre, a degradação do meio ambiente. Um desses resíduos são os provenientes da queima da madeira, necessária para a geração de calor nos fornos das indústrias de cerâmica vermelha. O Brasil é um dos maiores exploradores deste tipo de fonte de energia, sendo que acaba por gerar uma quantidade significativa de cinzas. A maior parte dessas cinzas é descartada sem cuidados especiais, podendo causar danos ao meio ambiente e gerar riscos de contaminação no ar na forma de material particulado. A reciclagem dos resíduos é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de poluição em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, da redução das despesas. A indústria de cerâmica vermelha se apresenta como um potencial absorvedor de resíduos de cinza, tendo em vista que podem ser incorporados à massa argilosa de forma que não prejudique as suas propriedades físicas e mecânicas, e ainda apresentam-se como uma boa alternativa para redução do impacto ambiental causado. Sabendo disso, este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade da utilização de cinzas de lenha de madeira de cajueiro coletadas no forno de uma indústria de cerâmica vermelha, visando o seu reaproveitamento nas massas argilosas por meio de prensagem a seco dos pós peneirados e sinterização nas temperaturas de 850°C, 950°C e 1100°C. Para isso, foram realizados ensaios para determinação das propriedades físicas (retração linear, absorção de água, massa específica, perda de massa ao fogo e microscopia óptica) e para determinação das propriedades mecânicas (dureza Rockwell B, resistência a compressão axial e resistência a tração por compressão diametral). Os resultados mostraram que a adição de até 20% em peso de cinzas a matriz argilosa melhoraram a resistência mecânica na compressão diametral, e por meio dos testes de retração linear e absorção de água, verificou-se que houve redução da porosidade devido a vitrificação completa, gerando melhor empacotamento das partículas. Portanto, através desse trabalho comprovou-se que é possível a adição dos percentuais analisados desse subproduto à argila, podendo assim se tornar um destino ambientalmente correto para este resíduo.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha. Resíduos de cinzas. Reaproveitamento. Propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

Many industrial processes are sources of waste, causing almost always the degradation of the environment. One of these residues comes from the burning of wood, necessary for the generation of heat in the furnaces of the red ceramic industries. Brazil is one of the biggest explorers of this type of energy source, and it ends up generating a significant amount of ashes. Most of these ashes are disposed of without special care, which can cause damage to the environment and generate risks of contamination in the air in the form of particulate material. Waste recycling is an opportunity to transform an important source of pollution into a source of revenue or, at least, to reduce expenses. The red ceramic industry presents itself as a potential absorber of ash residues, since they can be incorporated into the clay mass in a way that does not harm its physical and mechanical properties, and yet it presents itself as a good alternative for reducing the environmental impact caused. Knowing this, this work aims to study the feasibility of using ashes of cashew wood firewood collected in the oven of a red ceramic industry, aiming at its reuse in the clay masses by means of dry pressing of the sieved powders and sintering in the temperatures of 850 ° C, 950 ° C and 1100 ° C. For this, tests were performed to determine the physical properties (linear shrinkage, water absorption, specific mass, loss of mass on fire and optical microscopy) and to determine the mechanical properties (Rockwell B hardness, axial compression strength and tensile strength diametrical compression). The results showed that the addition of up to 20% by weight of ash to the clay matrix improved the mechanical strength in the diametrical compression, and through the linear shrinkage and water absorption tests, it was found that there was a reduction in porosity due to complete vitrification, generating better packaging of the particles. Therefore, through this work it was proved that it is possible to add to the clay the analyzed percentages of this by-product, thus being able to become an environmentally correct destination for this residue.

Keywords: Red ceramics. Ash waste. Reuse. Physical and mechanical properties.

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por isso tão poucos se dedicam a ele.”

Henry Ford

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema básico do processo de sinterização.....	28
Figura 2 – Tamanho das partículas que passam pelo processo de peneiramento.....	29
Figura 3 – Esquema das etapas do processo de sinterização.....	31
Figura 4 – Estufa de secagem.....	41
Figura 5 – Peneiras usadas na determinação da granulometria. (a) Peneira 600 μm . (b) Peneira 75 μm	41
Figura 6 – Balança de precisão.....	43
Figura 7 – Matriz metálica para prensagem das peças cerâmicas.....	43
Figura 8 – Peças a verde compactadas nas respectivas composições de 0%, 5%, 10%, 20% e 100% de cinza.....	44
Figura 9 – Máquina de ensaio universal EMIC: 300 kN.....	44
Figura 10 - Forno EDG modelo 3000 10P.....	45
Figura 11 – Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2.....	48
Figura 12 – Durômetro Rockwell SUSSEN WOLPERT.....	49
Figura 13 – Corpos de prova sinterizados a 1100°C: (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 20% e (e) 100 % de cinza.....	52
Figura 14 – Amostras sinterizadas: (a) e (b) a 850°C, (c) a 950°C e (d) e (e) a 1100°C.....	53
Figura 15 – Microscopia óptica da superfície da mistura com 0% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado.....	59
Figura 16 – Microscopia óptica da superfície da mistura com 5% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado.....	59
Figura 17 – Microscopia óptica da superfície da mistura com 10% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado.....	60
Figura 18 – Microscopia óptica da superfície da mistura com 20% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado.....	60
Figura 19 – Microscopia óptica da superfície da mistura com 100% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado.....	60
Figura 20 – Amostra fraturada após a compressão axial.....	64
Figura 21 – Amostra fraturada após a compressão diametral.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da produção brasileira por região em 2008 (mil milhares/mês).....	19
Tabela 2 – Classificação e definição dos revestimentos cerâmicos em relação aos grupos de absorção de água.....	36
Tabela 3 – Composição dos corpos de prova (% em peso).....	42
Tabela 4 – Resultado da retração linear (%).....	54
Tabela 5 – Resultado da Absorção de Água (%).....	55
Tabela 6 – Resultado da Massa Específica Bulk (g/cm^3).....	56
Tabela 7 – Resultado da Perda de Massa (%)	57
Tabela 8 – Resultado da Dureza Rockwell B	61
Tabela 9 – Resultado da Resistência à Compressão Axial (MPa).....	62
Tabela 10 – Resultado da Resistência à compressão Diametral (MPa)	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise da retração linear (%).....	54
Gráfico 2 – Análise da absorção de água (%)	55
Gráfico 3 – Análise da massa específica Bulk (g/cm^3)	57
Gráfico 4 – Análise da perda de massa (%).....	58
Gráfico 5 – Análise da dureza Rockwell B	62
Gráfico 6 – Análise da resistência à compressão axial (MPa)	63
Gráfico 7 – Análise da resistência à compressão axial (MPa)	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	Justificativa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Características dos materiais cerâmicos	17
2.1.1	Argilas	18
2.1.2	Indústria da cerâmica vermelha.....	19
2.2	Cinzas de biomassa vegetal	21
2.2.1	Lenha de cajueiro.....	22
2.2.2	Reaproveitamento de resíduos sólidos	23
2.2.3	Cinzas de lenha de madeira	25
2.3	Processamento da matéria-prima.....	27
2.3.1	Granulometria.....	28
2.3.2	Secagem.....	29
2.3.3	Compactação	29
2.3.4	Sinterização	30
2.3.5	Vitrificação	32
2.4	Caracterização do material	33
2.4.1	Caracterização microestrutural	33
2.5	Propriedades tecnológicas e físicas	34
2.5.1	Retração linear (RL)	34
2.5.2	Massa específica aparente (MEA).....	34
2.5.3	Perda de massa (PM)	35
2.5.4	Absorção de água (AA)	35
2.6	Comportamento mecânico dos materiais cerâmicos	36
2.6.1	Fratura frágil.....	36
2.6.2	Dureza.....	37
2.6.3	Compressão	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	Matérias-primas	40
3.2	Preparação do material na forma de matéria-prima.....	40
3.2.1	Coleta das cinzas e argila.....	40

3.2.2	Análise Granulométrica.....	41
3.2.3	Formulação das massas	42
3.2.4	Prensagem dos corpos de prova.....	43
3.2.5	Sinterização dos corpos de prova	45
3.3	Caracterização Física.....	46
3.3.1	Retração linear.....	46
3.3.2	Absorção de água.....	46
3.3.3	Massa específica Bulk	47
3.3.4	Perda de massa	47
3.3.5	Microscopia	48
3.4	Determinação das propriedades mecânicas	49
3.4.1	Dureza.....	49
3.4.2	Resistência à compressão axial.....	50
3.4.3	Resistência à tração por compressão diametral	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Análise da Sinterização	52
4.2	Análise das Propriedades Físicas.....	53
4.2.1	Retração Linear.....	53
4.2.2	Absorção de Água	54
4.2.3	Massa Específica Bulk.....	56
4.2.4	Perda de Massa	57
4.2.5	Microscopia	58
4.3	Análise das Propriedades Mecânicas.....	61
4.3.1	Dureza.....	61
4.3.2	Compressão Axial	62
4.3.3	Compressão Diametral	64
5	CONCLUSÕES.....	67
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do setor industrial no Brasil traz como consequência o acúmulo de subprodutos, surgindo a constante preocupação com o seu descarte. A geração de resíduos representa um consumo desnecessário dos recursos naturais e muitas vezes requer a ocupação do solo para sua disposição. A adequada destinação destes resíduos continua sendo um dos maiores desafios da humanidade. O aproveitamento dos rejeitos industriais como matéria-prima destinada a construção civil vem se tornando uma alternativa viável do ponto de vista econômico, técnico e ambiental.

Dentre as indústrias de transformação, o segmento de produção de cerâmica vermelha produz um volume considerável de resíduos resultantes das diversas etapas do processo de fabricação, como por exemplo as cinzas provenientes da queima necessária para geração de calor nos fornos. Apesar disso, estudos anteriores indicam a possibilidade de inserção de diferentes subprodutos na cerâmica vermelha, que visam reduzir os malefícios causados ao meio ambiente, além de diminuir o consumo de matéria-prima, reduzindo os custos e evitando a exploração de recursos naturais (ROCHA, 2017).

O combustível utilizado para a queima do corpo cerâmico interfere diretamente na composição química das cinzas. A lenha é um dos principais combustíveis utilizado em diversos setores da economia nacional. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEM - 2012) do Ministério de Minas e Energia, observou-se que entre 1970 a 2011 o consumo anual médio de lenha no Brasil foi em torno de 91 milhões de toneladas, o que mostra a existência da dependência de um mercado para uso energético de madeira (VASKE, 2012). O uso desta para queima nos fornos representa mais da metade da biomassa florestal consumida mundialmente só na atividade industrial cerâmica, sendo que a produção de cinzas corresponde em média a 5 kg por milheiro produzido (FEAM, 2012). Dessa forma, torna-se responsável por gerar grande quantidade de cinza, onde a maior parte é descartada sem cuidados especiais, podendo causar danos ao meio ambiente e gerar risco de contaminação no lençol freático, no solo e no ar na forma de material particulado.

De acordo com os dados da BEN 2012, a produção de cinzas foi da ordem de 3%, resultando em mais de 2,5 milhões de toneladas destas, o que representa uma quantidade considerável de resíduo (VASKE, 2012). Na maior parte das indústrias cerâmicas não se aplicam técnicas de reciclagem das cinzas produzidas na cogeração de energia. Desta forma, uma grande quantidade de resíduos acaba sendo despejada em aterros ou terrenos vazios, onde este despejo acaba ocorrendo de forma incorreta, podendo causar danos ambientais e na

natureza. Cinzas podem também conter metais que causam poluição do ar, sendo responsável por graves problemas respiratórios na população local atingida.

Apesar disso, Córdova (2007) afirma que as cinzas resultantes da queima de biomassa são classificadas como resíduo não perigoso e inerte, pois seus constituintes solubilizados em água acarretam apenas em mudança de cor, turbidez, sabor e aspecto. Portanto podem ser depositadas diretamente sobre o solo, porém deve-se ter o cuidado para que não se dispersem durante o manuseio devido a ação dos ventos.

A aplicação de uma logística interna em relação aos rejeitos possibilitaria uma disposição mais adequada e eficiente dos resíduos, causando conseqüente diminuição de sua geração e simplificação no destino final, de maneira que as cinzas de origem vegetal pudessem voltar ao ciclo como matéria-prima. Segundo Peterson (2016) a cinza pode atuar como fundente e também contribuir para melhorar as propriedades da queima, como a redução da porosidade, redução da absorção de água e o aumento da resistência mecânica.

Desta forma, o trabalho buscou desenvolver um produto obtido por meio de compactação e sinterização a partir de cinzas resultantes da queima da madeira, o qual procurou avaliar se as características tecnológicas e mecânicas dos produtos obtidos eram adequadas para reaproveitamento na construção civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade da utilização de cinzas coletadas no forno de uma indústria de cerâmica vermelha geradas pela combustão de lenha de madeira de cajueiro, visando seu reaproveitamento nos materiais cerâmicos argilosos por meio da prensagem e sinterização em forno de elevada temperatura.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o propósito acima, são descritos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física e microestrutural das cinzas por meio de ensaios tecnológicos e microscopia óptica;

- Determinar por meio de ensaios mecânicos as propriedades dos corpos de prova, tais como: resistência à ruptura, dureza e resistência à compressão;
- Comparar os resultados dos diferentes parâmetros, tais como composição química e temperatura, selecionados em cada teste;
- A partir das propriedades obtidas do material resultante propor uma aplicação para o mesmo.

1.2 Justificativa

As indústrias cerâmicas da região do Vale do Jaguaribe no estado do Ceará utilizam principalmente lenha de madeira como fonte de energia para a realização do processo da queima do material cerâmico. Tal processo resulta na geração de grande quantidade de cinzas que, como já mencionado, pode resultar em malefícios para o meio ambiente. Portanto se faz necessário investigar alternativas tecnológicas viáveis para reciclagem ou reutilização desses resíduos sólidos.

A reutilização de certos materiais considerados como resíduos permite que estes retornem ao ciclo de processamento para uso posterior. Porém é necessário que os materiais obtidos sejam comparáveis aos materiais convencionais em aparência, propriedades e qualidade de serviço, sem que haja custo adicional. (ESTRELA, 1996). A consideração importante é que uma determinada propriedade depende das proporções dos componentes que constituem um material. Os materiais cerâmicos têm suas propriedades definidas pela composição química e microestrutura que apresentam.

Os produtos cerâmicos para construção civil permitem grande variabilidade de sua composição química e mineralógica, logo a incorporação de resíduos sólidos poluentes na massa cerâmica não provoca grandes modificações, já que geralmente ficam inertizados na estrutura do material cerâmico (PINHEIRO, 2009).

O estudo em questão visa a transformação das cinzas de madeira como matéria-prima de baixo custo em um material de alto valor agregado para utilização industrial, adaptável aos processos de fabricação, colaborando com a redução de sua acumulação no meio ambiente. Será analisado o seu desempenho e suas falhas a partir do comportamento estrutural que apresentar quando solicitados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para tornar-se viável, todo projeto de engenharia necessita de um conhecimento amplo das características, propriedades e comportamento dos materiais de engenharia (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000). O comportamento mecânico de qualquer material usado depende de sua estrutura interna, dos processos de conformação da matéria-prima e de sua aplicação em projeto, as quais devem ser compreendidas e estudadas através de ensaios mecânicos e tecnológicos referentes ao material em questão.

Nesta sessão serão abordados os principais tópicos referentes aos temas deste trabalho. Além dos ensaios citados anteriormente para maior compreensão do estudo do material e sua caracterização, deve-se investigar a origem e as formas de disposição de alguns resíduos ou subprodutos industriais, em busca da compreensão e da importância das técnicas de reciclagem, e da gama de possibilidades para sua reutilização como matéria-prima.

2.1 Características dos materiais cerâmicos

A palavra cerâmica é originária do grego “keramikos” e quer dizer coisa queimada, o que indica que as propriedades desejadas desses materiais são mais comumente encontradas por meio de processos de tratamento térmico em altas temperaturas, denominado queima (NASCIMENTO, 2007). Pesquisas mostram que a indústria cerâmica é a mais antiga registrada, sendo o material artificial mais antigo produzido pelo homem, com sua origem a partir do momento em que passou a utilizar o barro endurecido pelo fogo (ANFACER, 2011).

Os materiais cerâmicos são compostos sólidos constituídos ao menos por um metal e um sólido elementar não metálico, ou um não metal; dois sólidos elementar não metálico, ou ainda um sólido elementar não metálico e um não metal. A indústria cerâmica se mantém basicamente da tecnologia da queima desse material. As peças à base de argila umedecida, após moldadas são submetidas a uma secagem para retirar a maior parte da água. Em seguida são condicionadas a altas temperaturas em fornos, os quais lhes atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa.

Para se obter um produto, deve-se levar em consideração fatores materiais e não materiais, como por exemplo as tolerâncias dimensionais, a qualidade aparente, a produtividade, os aspectos econômicos do mercado e a resposta dos consumidores. Uma complexa interação entre processos tecnológicos, matérias-primas, pessoas e investimentos constitui a fabricação dos produtos cerâmicos (FONSECA, 2000).

Uma massa cerâmica pode ser considerada adequada quando a relação entre as matérias-primas plásticas e não plásticas é adequada, de forma que confira à peça conformada uma suficiente resistência a verde e a seco. A massa cerâmica deve possuir uma composição química e mineralógica adequada, de maneira que as transformações físico-químicas que ocorrem durante o processo de queima confirmam ao produto acabado as propriedades desejadas (KNISS, 2005).

Esses materiais são compostos formados por ligações interatômicas ou totalmente iônicas ou parcialmente iônicas com natureza covalente. Suas estruturas cristalinas são, em geral, mais complexas que as dos metais. Os materiais cerâmicos podem ter diversos tipos de estruturas e comportamentos, o que depende da sua composição base, como por exemplo, cerâmicas à base de silicato, de carbono, os refratários, vidros, cimentos, cerâmicas avançadas e aquelas à base de argila, que são as mais comuns (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Sabendo que existe uma disparidade significativa entre as características desses materiais, a indústria da cerâmica apresenta uma gama de variedades de produtos e processos produtivos. A cadeia produtiva é constituída de diferentes tipos de estabelecimentos, podendo ser divididos nos seguintes seguimentos: cerâmica vermelha ou estrutural, materiais de revestimento, materiais refratários, louças sanitárias, isoladores elétricos de porcelana, cerâmica artística, isolantes térmicos e louças e porcelanas de mesa.

2.1.1 Argilas

Conforme definição apresentada por Santos (1989), argila é uma rocha finalmente dividida, material natural, de textura terrosa e granulometria fina. É constituída essencialmente por argilominerais (calcita, quartzo, alumina, pirita, gipsita, dentre outros), matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais característicos das argilas são silicatos lamelares de magnésio e de alumínio ou magnésio hidratados, podendo conter outros tipos de elementos como ferro, potássio e lítio. As argilas possuem uma série de propriedades, tais como: resistência mecânica, plasticidade, retração linear, compactação e viscosidade de suspensões aquosas, que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas (TEIXEIRA, 2006).

O mineral básico das argilas é a caulinita, composto por alumina (óxido de alumínio), sílica (óxido de silício) e água. A estrutura da argila é formada por uma molécula de alumina (Al_2O_3), duas moléculas de sílica $2(\text{SiO}_2)$ e duas moléculas de água $2(\text{H}_2\text{O})$, podendo ser representado por $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]_2$ (PORTO ROSSI, 2013 *apud* WIEMES, 2013).

A argila é responsável pela cor vermelha da cerâmica, sendo essa cor o principal aspecto que a caracteriza. Sua composição apresenta compostos com características metálicas e não metálicas, tais como oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, os quais se arranjam em estruturas tridimensionais no estado iônico e cujo interesse se encontra no peso, resistência mecânica, resistência ao desgaste, absorção de água e duração (NASCIMENTO, 2007). Os elementos estruturais fabricados por esse produto são, em sua maioria, tijolos maciços, blocos, elementos vazados, lajotas, revestimentos, telhas e tubos.

2.1.2 Indústria da cerâmica vermelha

Segundo dados da Associação Brasileira de Cerâmica, a indústria de cerâmica vermelha no Brasil é responsável por 4,8% do setor de construção civil e apresenta faturamento anual de 18 bilhões de reais, gerando 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos. Sua produção é distribuída em 7431 empresas, possuindo um consumo de $10,3 \cdot 10^6$ toneladas ao mês de argila, o que permite que essa indústria seja considerada um setor de grande importância econômica e social (PRADO, 2016).

Segundo o Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE, 2010), a produção regional de cerâmica vermelha no Brasil encontra-se distribuída da seguinte forma:

Tabela 1 – Distribuição da produção brasileira por região em 2008 (mil milhares/mês)

Região	Produção	%
Sudeste	3.332,94	44,4
Sul	1.602,63	21,34
Nordeste	1.595,88	21,25
Centro-Oeste	652,62	8,69
Norte	325,93	4,34
Total	7.510,00	100,00

Fonte: ETENE (2010).

A indústria da cerâmica vermelha é uma atividade econômica diretamente relacionada à construção civil, sendo este um setor que apresentou ritmo de crescimento acelerado nos últimos anos representando uma parcela importante do Produto Interno Bruto (PIB). Os aspectos socioeconômicos positivos dessa indústria contrapõem-se, no entanto, aos impactos negativos sobre o meio ambiente devido a extração de argila e madeira. O processo de fabricação envolve também a secagem dos produtos cerâmicos em fornos alimentados por grande quantidade de lenha. A queima da madeira representa um dos maiores problemas na

indústria de cerâmica, uma vez que o consumo dessa matéria-prima está diretamente ligado ao desmatamento, a poluição atmosférica e a geração de resíduos sólidos, como as cinzas (NETO, 2016).

De acordo com Neto (2016), a economia no estado do Ceará é fortemente influenciada pela indústria da cerâmica vermelha. O município de Russas concentra 40% de toda a produção de cerâmica do Ceará, possuindo 155 indústrias cerâmicas de pequeno, médio e grande porte, e mais de 1200 empresas, sendo a maioria classificadas como indústria de transformação. Este setor gera cerca de 13 mil empregos diretos e 40 mil empregos indiretos. Em 2012, as indústrias de cerâmica no Ceará movimentaram um volume de negócios acima de 170 milhões de reais.

Em relação à arrecadação tributária, as indústrias de cerâmica de Russas proporcionaram às finanças públicas local aproximadamente R\$ 72 milhões, valor que equivale a 11,5% do PIB do município (NETO, 2016). Por outro lado, o setor é composto em grande parte, por empresas informais que desconhecem a normalização de produto final, falta de planejamento e estrutura organizacional, reduzida automação, elevado índice de desperdício de energia, matérias-primas e insumos.

O processo de fabricação de materiais cerâmicos argilosos de maneira geral, é dividido nas seguintes etapas: preparação da matéria-prima e da massa (extração e mistura), conformação das peças (laminação, extrusão, corte e prensagem), tratamento térmico (secagem e queima) e acabamento (inspeção, estocagem e expedição) (FEAM, 2012). O processo de queima merece uma atenção especial, pois é a etapa mais delicada do processo. É durante esta fase que os produtos cerâmicos submetidos ao tratamento térmico sofrem transformações físico-químicas, ocorrendo alterações nas propriedades mecânicas e conferindo-lhes as características inerentes ao produto. A técnica é crítica pois no decorrer do processo podem surgir falhas que tornam a peça defeituosa (empenamento, distorção e trincas). Esses defeitos resultam normalmente de tensões que são geradas a partir de contrações não uniformes. Os fornos em geral queimam lenha e são principalmente de dois tipos: caipira (aberto) ou abóboda.

Durante o processo de queima, o combustível utilizado (gás natural, carvão, lenha, óleo, etc.) é queimado em fornalhas e o calor gerado realiza a sinterização das peças cerâmicas. A temperatura de queima para a fabricação varia conforme o tipo de forno, natureza da argila e produto cerâmico, com temperaturas variando de 800°C a 1400°C (FEAM, 2012). Nesse processo, é de fundamental importância o controle do tempo de ciclo de aquecimento, queima e resfriamento, sendo o ciclo de queima de aproximadamente 120 horas.

Como consequência da queima surgiu outro resíduo, as cinzas, cujo volume anual é estimado em 4 milhões de toneladas (VASCONCELOS, 2010). Com isso, vários estudos estão propondo uma destinação econômica e ambientalmente viável para esse produto.

2.2 Cinzas de biomassa vegetal

As fontes orgânicas de origem vegetal usadas para produzir eletricidade, combustível ou calor transformando a energia química resultante do processo da fotossíntese são chamadas de biomassa. As vantagens do uso da biomassa para a produção de energia são o baixo custo, o fato de ser renovável, ser bem menos poluente que outras fontes de energia e permitir o reaproveitamento de resíduos (VASKE, 2012).

O termo biomassa refere-se a todo material biológico originário de seres vivos capazes de produzir energia. Os materiais mais utilizados para a produção de energia pela sua combustão, gerando grande quantidade de cinzas são: bagaço de cana de açúcar, madeira, palha, cascas de arroz, de milho, carvão vegetal de diversos tipos de árvores, algas e capim, além de resíduos biodegradáveis de origem industrial e urbano. (RIBEIRO, 2017).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2010, aproximadamente 47% da energia interna do Brasil era proveniente de fontes renováveis, dos quais 30% correspondiam à energia proveniente de biomassa (PROTÁSIO *et al.*, 2011). A utilização de biomassa é mais benéfica ao meio ambiente devido a menor emissão de gases poluentes causadores do efeito estufa, se comparado aos combustíveis fósseis, além de ser a única fonte de carbono renovável. Devido sua ampla aplicabilidade, pode ser empregada no setor agroindustrial, zootécnico e produção de energia alternativa complementar ou substituta ao petróleo.

A bioenergia é a quarta maior fonte depois do petróleo, carvão e gás natural, sendo a única forma de energia renovável que pode ser recolhida armazenada e transportada. É também a mais semelhante às fontes de energia de combustível “convencionais” fósseis (WANG, 2013).

A biomassa florestal se destaca entre outras fontes de energia devido apresentar algumas características importantes, tais como: a variedade de sua origem, balanço energético neutro em relação a geração e emissão de CO₂, tecnologia avançada de conversão de energia com eficiência e proporciona grande potencial de criação de empregos no meio rural (RIBEIRO, 2017 *apud* LOPES, 2012).

O uso da lenha como fonte de combustível para obtenção de fogo é uma prática comum do homem desde os tempos mais antigos. Na indústria cerâmica, a madeira é um dos

principais combustíveis utilizados na queima dos produtos, principalmente devido a sua abundância e devido ao custo da lenha ser inferior aos outros tipos de combustíveis existentes. Porém, 20 a 30% de toda a matéria-prima utilizada nas indústrias de transformação da madeira são convertidos em resíduos, o que torna necessário o desenvolvimento de estudos que buscam o aproveitamento dessa biomassa residual (PROTÁSIO *et al.*, 2011).

No Brasil cerca de 10% da produção de energia primária é proveniente da lenha, sendo ela de origem nativa ou reflorestamento (CRUZ, 2012). Estima-se que 96,4% das empresas do setor de produção de cerâmica no país fazem uso de lenhas e resíduos de madeira, onde o consumo de lenha nativa corresponde a 89 m³/ano, aproximadamente 4% da área florestada no país (MARCOLIN, 2006).

2.2.1 Lenha de cajueiro

O uso da madeira com fins energéticos no Brasil deve ser encarada como opção muito importante de abastecimento energético e deve levar em conta alguns fatores. O uso da madeira não traz os problemas costumeiros de poluição dos combustíveis fósseis devido ao seu baixo teor de enxofre, a energia gerada é renovável e é um material versátil que pode se adequar com a necessidade, sendo usado como matéria-prima industrial, como combustível sintético e sólido, em pó ou em raspas. A participação da madeira como combustível no país é em torno de 21,5% comparável apenas à energia hidroelétrica e ao petróleo (BRITO, 1979).

Uma das propriedades importantes do combustível é o seu poder calorífico. O poder calorífico inferior (PCI) da lenha encontra-se na faixa de 3000 a 5400 kcal/kg, o qual em média equivale a cerca de 0,61 e 0,47 vezes o poder calorífico do carvão mineral e óleo cru respectivamente (CEMIG, 2009). O valor energético perdido na carbonização é de 4,2 kg de madeira para obtenção de 1 kg de carvão, o que representa uma perda de 71% do calor disponível na lenha. Isso mostra que, em termos energéticos, não há vantagem de substituição da lenha por carvão vegetal quando puder utilizar a queima direta da lenha (FEAM, 2012). A densidade da madeira também é um fator importante a ser analisado. De um modo geral, a densidade está correlacionada ao seu valor combustível.

A cultura do caju ocupava uma área estimada em 700.000 hectares, onde mais de 90% dessa área encontrava-se na região Nordeste, principalmente nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba (MACEDO, 2010). Ocorre uma considerável oferta de lenha proveniente do corte dos cajueiros adultos e das podas anuais, isto devido a substituição

necessária da copa e do controle integrado de pragas e doenças. Estas lenhas são normalmente destinadas a padarias, olarias e cerâmicas.

A cadeia produtiva do cajueiro movimentava a economia mesmo quando não produz mais o caju. Segundo o Diário do Nordeste (2012) desde o ano de 2005 o uso da madeira dos cajueiros foi certificado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) com o apoio dos órgãos governamentais, e vem sendo usada como lenha para a imensa maioria das olarias nos municípios do Vale do Jaguaribe, responsável pela maior parte do abastecimento de telha colonial no Nordeste.

Desta forma o produtor pode obter uma renda extra com os resíduos da poda e no período após a produção. A substituição das copas das plantas já improdutivas possibilita que a madeira seja encaminhada para o setor de cerâmicas. A região abastece cerca de 70% do mercado de telha colonial do Nordeste, gerando mais de 4 mil empregos.

Da queima da lenha de madeira nos fornos para fins de geração de energia nas indústrias cerâmicas, são produzidas cinzas como material residual.

2.2.2 Reaproveitamento de resíduos sólidos

O aumento da demanda por produtos e serviços devido ao crescimento populacional, diversificação do consumo de bens e serviços e o advento de novas tecnologias, trouxeram como consequência o aumento da atividade industrial e a geração de maior quantidade de resíduos e poluentes. Tal fato tem forçado o desenvolvimento de novas soluções para os processos produtivos, juntamente com a necessidade de desenvolver novas técnicas administrativas voltadas ao gerenciamento dos resíduos e atreladas a preocupação ambiental (CASAGRANDE, 2002).

De acordo com a resolução 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, a poluição pode ser definida como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que, direta ou indiretamente, criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota e as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; exerçam atividades que empreguem o lançamento de matéria ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos de forma a prejudicar a saúde, a segurança e o bem estar da população (CONAMA, 1986).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduo sólido é o material no estado sólido ou semi-sólido resultante das áreas das indústrias, de comércios, de hospitais e outros estabelecimentos. Acrescentam-se também a esta classificação alguns

líquidos específicos que não podem ser lançados em esgotos ou corpos de água (NBR 10004, 2004). Para estes materiais exigem-se sistemas especiais de acondicionamento, coleta, armazenamento, transporte, tratamento e destinação final, buscando evitar danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Os resíduos podem ser agrupados quanto ao local de sua produção, ao grau de biodegradabilidade, a combustibilidade, à sua fonte de geração, aos aspectos econômicos, de incineração, dentre outras características (SILVA, 2013). De acordo com a norma ABNT NBR 10004 (2004) os resíduos classificam-se da seguinte maneira: Resíduos perigosos ou Classe I e Resíduos não-perigosos ou Classe II, onde subdividem-se em Classe II A (não-inertes) e Classe II B (inertes). Estas classificações servem para orientar os cuidados especiais que se deve ter no gerenciamento do resíduo sólido, os quais podem inviabilizar sua utilização quando não se pode garantir segurança ao trabalhador, ao consumidor final e ao meio ambiente.

As exigências cada vez mais crescentes quanto ao controle dos resíduos e a necessidade de manter a competitividade em uma economia globalizada têm obrigado as indústrias a enxergar os resíduos como uma forma de desperdício e assim, a utilizar de forma mais racional os insumos de seus processos, contribuindo para a sustentabilidade de seus negócios (MOREIRA, 2006). Nessa perspectiva a reutilização surge como uma ferramenta indispensável para viabilizar a disposição destes materiais.

O ato ou efeito de se recuperar parte de um subproduto ou resíduo, reintroduzindo-os no ciclo de produção do qual eles provêm é denominado reciclagem. Na maior parte dos processos o produto final reciclado é diferente do produto inicial.

A reciclagem de resíduos é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesas em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, da redução das despesas com a deposição. A incorporação de resíduos nos processos produtivos reduz custos e gera novas oportunidades de negócio, além de reduzir o volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados (KNISS, 2005).

A indústria de cerâmicas se apresenta como um potencial absorvedor de resíduos sólidos, tendo em vista que podem ser incorporados à massa cerâmica de forma que não prejudique as suas propriedades, já que é um material de composição química heterogênea (CRUZ, 2012). Kniess (2005) afirma que a reciclagem de resíduos industriais como matéria-prima no desenvolvimento de produtos do setor cerâmico envolve: identificação e quantificação dos resíduos disponíveis; caracterização físico-química e microestrutural do resíduo; identificação do seu risco ambiental; análise de custos associados ao resíduo; busca de possíveis aplicações dentro do setor cerâmico, considerando as características do resíduo e incluindo o

seu processo de produção; análise de desempenho frente às diferentes necessidades para cada aplicação específica; análise do impacto ambiental do novo produto envolvendo também a avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e usuários.

2.2.3 Cinzas de lenha de madeira

Pode-se denominar as cinzas como sendo a resultante do processo de combustão de um resíduo sólido. O Brasil é um dos maiores exploradores deste tipo de fonte de energia, sendo que acaba por gerar uma quantidade significativa de cinzas. Elas são geralmente constituídas de elevado teor de sílica e de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos (SALES, 2013). As cinzas obtidas pela combustão da lenha são especialmente ricas em cálcio, compostas por carbonato de cálcio e apresentam aglomerados de partículas esféricas e porosas com tamanho médio de 0,15 mm (BORLINI, 2005).

As cinzas de biomassa vegetal enquadram-se na Classe II B, como resíduos não perigosos e inertes, que segundo a norma ABNT NBR 10004 (2004) são definidos como: resíduos que não apresentam constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto alterando aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor quando submetidos a um contato com água à temperatura ambiente. Quando depositados em aterros não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas importantes. Porém, dependendo de sua composição pode causar poluição atmosférica, gerando sérios problemas à saúde da população humana e também contaminação da água subterrânea e dos solos.

Segundo Song (2011), cinzas em seu estado natural tem forma morfológica predominantemente esférica, tendo tamanho granulométrico entre 10 e 150 μm com uma densidade aparente baixa (de 0,5 a 2 g/cm^3). A composição química apresenta basicamente SiO_2 e Al_2O_3 , apresentando também certa quantidade de carbono. Com base nessas propriedades, pode-se estudar a possibilidade de utilização dessas cinzas para a preparação de produtos sinterizados.

Com o intuito de reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte indiscriminado das cinzas, têm-se estudado a incorporação destas em cerâmicas como uma tecnologia alternativa de reaproveitamento. A utilização das cinzas favorece a diminuição da extração e matéria-prima para a fabricação de cerâmica, reduz a disposição inadequada, além possibilitar possível melhoria na qualidade dos produtos (SALES, 2013). A quantidade de resíduos incorporados às matrizes cerâmicas podem variar entre 5 a 60%, provocando ligeiras mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água (FEAM, 2012). Para a incorporação

de resíduos na massa cerâmica deve-se observar a proporção utilizada de modo a evitar a perda de resistência mecânica.

Quando incorporadas, as cinzas tendem a elevar a densidade aparente a verde do corpo cerâmico por proporcionar melhor empacotamento das partículas da massa, na maioria das vezes, em função da diferença entre as distribuições de tamanho da cinza e da massa referencial (ETIÉGNI; CAMPBELL, 1991). Em alguns casos, observa-se uma elevação na absorção de água pelo fato de algumas cinzas serem refratárias devido serem compostas basicamente de alumina e sílica, o que reduz o grau de sinterização da massa de referência, gerando maior porosidade (BARBIERI *et al.*, 2002). A cinza é um produto calcinado, não apresentando variação na perda ao fogo (para cinzas da mesma fonte), isso favorece a manutenção da estabilidade dimensional do material prensado, reduzindo a retração após a queima (LUCENA, 2007).

O físico Silva Rainho Teixeira (FCT/Unesp) desenvolveu pelo menos três aplicações para o produto: a produção de briquetes, feito do pó da cinza que é prensado e serve como alternativa ao carvão vegetal comum; de fritas, insumo utilizado para dar acabamento final a peças cerâmicas; e de vitro-cerâmicas, material produzido à partir da cristalização controlada de materiais vítreos. Outro uso mais comum das cinzas é a aplicação desse material como um adubo complementar. Testes também mostraram bons resultados na incorporação do material na fabricação do concreto (VASCONCELOS, 2010).

Estudos mostram que as propriedades físicas e químicas das cinzas de lenha de madeira se modificam de acordo com o tipo de madeira utilizada como matéria-prima, com as condições de queima, com as impurezas presentes no local da queima, dentre outros fatores. Os principais íons minerais frequentemente encontrados em cinzas de madeira são potássio, magnésio, cálcio, manganês, ferro, alumínio, sódio e radicais como carbonatos, silicatos, cloretos e sulfatos. Existem ainda traços de elementos como zinco, cobre e cromo (CARDOSO *et al.*, 2001). A quantidade desses elementos varia principalmente com a composição química do solo e a espécie da madeira.

As cinzas de madeira se apresentam na forma sólida, em formatos e dimensões irregulares, normalmente na forma de um material particulado e finalmente dividido. As madeiras, no geral, produzem cinzas relativamente alcalinas, com pH que varia de 8 a 13, de comportamento químico e físico oscilantes em função da temperatura de combustão (SANTOS, 2014). O seu volume produzido raramente é inferior a 0,2% ou superior a 1% do peso seco da madeira. A principal vantagem do uso das cinzas é que além de reaproveitar um resíduo passivo ambiental, ou seja, que não teria mais utilidade, favorece o cumprimento, por parte das

empresas, das legislações vigentes que estão cada vez mais exigentes. Alternativamente, estas podem ser vistas como um recurso inexplorado com grande potencial. Há portanto interesse na expansão de outras vias para sua exploração comercial, particularmente como um substituto de outros recursos.

John, Cincotto e Silva (2003) afirmam que a princípio qualquer cinza vegetal com predominância de sílica, que possa ser produzida no estado amorfo e com granulometria adequada, pode ser utilizada como adição mineral quimicamente ativa. Deve-se salientar que o tipo de equipamento usado na queima (a céu aberto, fornalhas com grelhas, etc.) o tempo de queima, a temperatura em que se dá a queima na geração das cinzas relacionadas diretamente com a sua morfologia, cristalina ou amorfa, assim como a distribuição granulométrica adequada, por meio de moagem ou não, são aspectos muito importantes para se obter o máximo de benefícios, seja em termos de resistência mecânica ou durabilidade (VASKE, 2012).

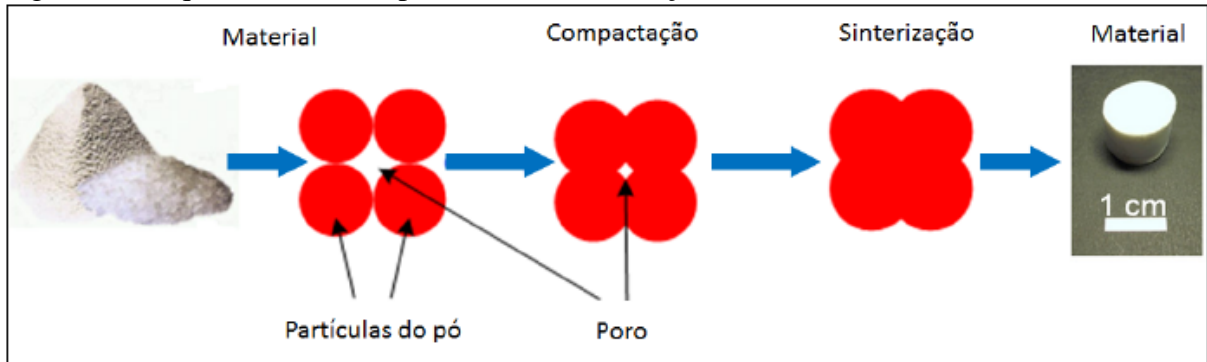
Borlini (2005) observou que nos últimos anos têm ocorrido um crescimento a nível mundial de trabalhos sobre materiais obtidos com adição ou reutilização de resíduos sólidos, como as cinzas. Algumas classes de tecnologias têm sido estudadas, como a obtenção de vitrocerâmicas à partir de cinzas puras e a adição de qualquer resíduo na composição da massa cerâmica tradicional. Em alguns casos o objetivo não é necessariamente obter produtos de maior valor agregado, mas simplesmente estabilizar os poluentes contidos nas cinzas.

2.3 Processamento da matéria-prima

Os parâmetros de processo de fabricação selecionados afetam significativamente as propriedades tecnológicas do produto final. Além da composição química e mineralógica, é importante o controle das variáveis nas etapas de sinterização.

O processo usado na preparação do material para a pesquisa em questão baseou-se na tecnologia da metalurgia do pó, o qual é composto pelas etapas básicas de prensagem dos pós em moldes metálicos e consolidação da peça por aquecimento controlado. O que resulta é uma peça com a forma desejada, bom acabamento superficial, propriedades e composição química controladas. O processo consiste nas seguintes etapas fundamentais: produção e obtenção do pó, mistura caso se queira obter composições químicas específicas, compactação, sinterização e operações de acabamento.

Figura 1 – Esquema básico do processo de sinterização



Fonte: Souza (2014).

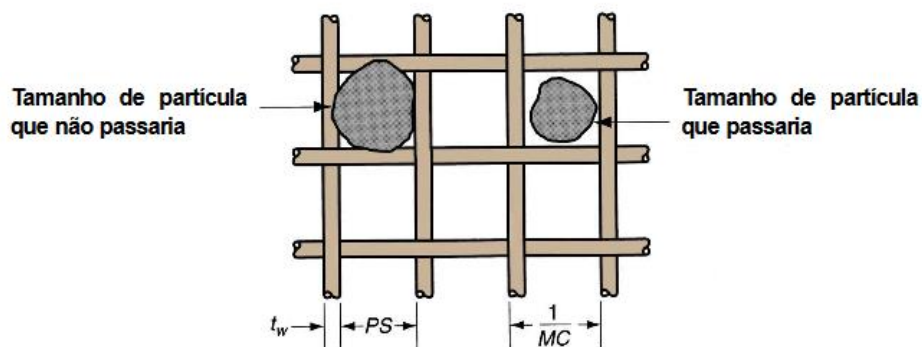
2.3.1 Granulometria

Uma amostra na forma de pó é composta por uma numerosa quantidade de partículas individuais e aglomerados que tendem a possuir uma distribuição de tamanhos compreendidos entre um intervalo de dimensões. O controle da distribuição de tamanho das partículas de um material particulado, associado a características como forma e estado de agregação do material particulado são essenciais para se obter um produto acabado de qualidade (KNISS, 2005).

A uniformidade, homogeneidade e distribuição dos grãos permite que a sinterização ou densificação ocorra a uma temperatura mais baixa e de maneira uniforme através do compacto. Essa uniformidade depende inicialmente da qualidade do pó original utilizado, tais como composição química, presença de partículas finas e distribuição homogênea dos tamanhos das partículas (KIMINAMI, 1994). Pós com partículas muito pequenas sinterizam mais rapidamente do que aquelas mais grosseiras, uma vez que a energia de superfície destas é muito alta e produz uma força motriz grande à favor da sinterização. A forma da partícula também é importante, pois se há uma diminuição da esfericidade e aumento da rugosidade da partícula, a sinterização é facilitada, já que está relacionada com as mudanças na área da superfície (NOGUEIRA, 1992).

A distribuição granulométrica do material cerâmico interfere na estabilidade dimensional à medida que o tamanho, o formato, a rugosidade e a homogeneização do pó determinam o preenchimento do molde de prensagem e, posteriormente, determinam os pontos de contato entre as partículas, pontos estes onde ocorrem a sinterização (PRADO, 2008).

Figura 2 – Tamanho das partículas que passam pelo processo de peneiramento



Fonte: Introdução ao projeto e a manufatura, USP (2018).

A granulometria é responsável por determinar as dimensões das partículas e de suas respectivas porcentagens de ocorrência. O tamanho da partícula tem uma forte influência após a compactação na densidade, plasticidade, porosidade e resistência mecânica. O método mais comum de determinação é através do peneiramento, por meio de peneiras com determinada abertura de malha, constituindo uma série padrão, como mostrado na figura anterior.

2.3.2 Secagem

A operação de secagem é realizada com o objetivo de eliminar a água de processamento presente no pó ou nas peças compactadas, com o intuito de aumentar a resistência mecânica dos produtos crus, de modo a suportarem as operações de acabamento, e prepará-los para a operação de sinterização.

2.3.3 Compactação

A prensagem de pós, que é o análogo cerâmico à metalurgia do pó, é usado para fabricar produtos cerâmicos tanto argilosos quanto não argilosos. Diferentemente dos pós metálicos, não existe deformação plástica de partículas durante a compactação. O processo pode incluir um aglutinante ou não, o qual tem a função de lubrificar as partículas pulverizadas conforme elas se movem umas em relação às outras (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

A prensagem é uma operação simultânea de conformação e compactação de uma quantidade predeterminada de pó, o qual é colocado na cavidade de uma matriz rígida montada em uma prensa de compressão. A compactação ocorre pelo deslocamento de uma punção à temperatura ambiente. O aumento da pressão gera o empacotamento e agregação das partículas.

As partes mais finas de cada partícula sofrem deformação ou quebra. Isso favorece o vínculo entre os grãos, produzindo uma espécie de solda fria. Quanto maior a pressão ou umidade de compactação, maior será a densidade aparente a seco, ou seja, melhor o empacotamento, originando também maior retração linear e menores valores de absorção de água no produto (KNISS, 2005).

Na prensagem seca (umidade entre 0 e 10%), a maior parte do trabalho realizado pelas forças de prensagem é o trabalho de densificação (eliminação da porosidade intragranular), por deformação plástica, rearranjo e fratura dos agregados, dos aglomerados e das partículas. O corpo conformado possui massa final aproximadamente igual à massa do pó ou granulado inicial (FONSECA, 2000). Após a compactação, a peça é chamada de “compactado verde”, pois sua consistência ainda é muito frágil, e deve ser manuseado com cuidado para não quebrar. Duas características importantes nessa fase são a densidade e a resistência, pois influenciam nas propriedades mecânicas da peça final.

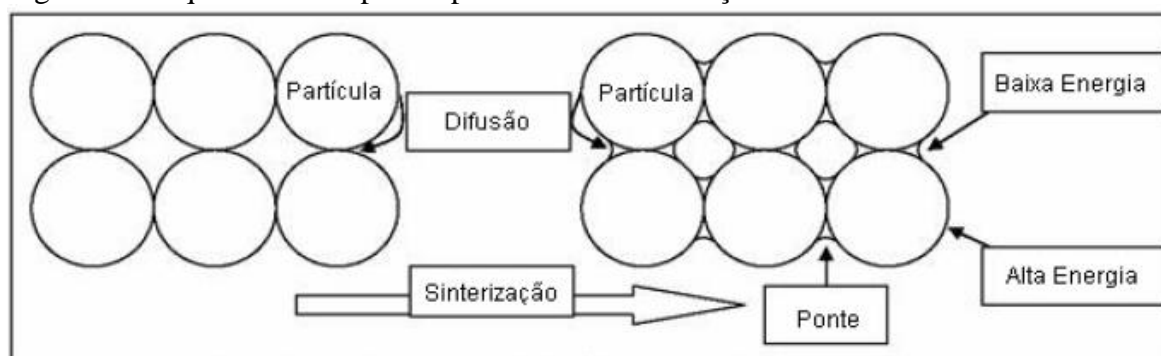
Após o processo de prensagem é necessário uma operação de cozimento, onde a peça conformada se contrai, reduzindo a porosidade e melhorando sua integridade mecânica. Essas alterações ocorrem pela coalescência das partículas de pó em uma massa mais densa, sendo o processo chamado de sinterização (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

2.3.4 Sinterização

Sinterização pode ser definida como um processo físico e termodinâmico de não equilíbrio, sob ação de elevada temperatura, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material (agregado de pó), inicialmente em contato mútuo, se transforme em um corpo íntegro de maior resistência mecânica, podendo inclusive se tornar total ou parcialmente denso.

Este processo cria uma alteração na estrutura microscópica do elemento base. Pós com preparação cristalina ou não, após a compactação, são tratados termicamente para promover a ligação química entre as partículas, no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a temperatura de fusão do material. Sua finalidade é obter uma peça sólida coerente. A força motora é a redução da energia superficial livre do conjunto de partículas, que ocorre por consequência do desaparecimento da interface material/poro, resultando na diminuição da superfície total do sistema (SILVA, 1998), como indicado na Figura 3:

Figura 3 – Esquema das etapas do processo de sinterização



Fonte: Simões (2012).

Durante a sinterização, a porosidade presente na estrutura é fechada, desta forma, o material se desloca, normalmente por processos difusionais atômicos ativados termicamente, para preencher os espaços vazios presentes, ocorrendo então a formação dos contornos de grãos e o crescimento dos pescoços interpartículas, preenchendo a região de contato (poros). O modo como esse material se desloca indica o tipo de sinterização. Existem dois tipos básicos denominados sinterização por fase sólida e sinterização por fase líquida. Na fase sólida há o deslocamento de partículas inteiras por diversas formas de transporte, sem que haja qualquer tipo de líquido na estrutura. A fase líquida ocorre devido a formação de líquido na estrutura, que pode surgir pela fusão ou pelo resultado de uma reação entre os componentes do sistema. Este tipo de sinterização é mais rápido e fecha a estrutura mais facilmente (SILVA, 1998).

O estudo do processo consiste em relacionar o aspecto estrutural da peça sinterizada, o qual inclui porosidade residual, tamanho médio de grão e distribuição de tamanho de grão, homogeneidade estrutural e fases presentes; as características do pó utilizado, como tamanho médio e distribuição do tamanho das partículas; e também as condições da sinterização, tais como temperatura, atmosfera e tempo de sinterização.

Este processo possui algumas vantagens e desvantagens, as quais são destacadas a seguir:

Vantagens: reduz ao mínimo as perdas de matéria prima; facilita o controle exato da composição química desejada; elimina ou reduz operações de usinagem; possibilita bom acabamento superficial; o processo produtivo é de fácil automação; os produtos obtidos apresentam alta pureza; permite a utilização de características de resistência exatamente como requeridos pelo projeto.

Desvantagens: limita a forma geométrica da peça, a qual deve ser extraída de uma matriz; obriga a execução de grandes lotes de produção, devido ao custo elevado do

ferramental; limita o tamanho da peça, já que a potência requerida na compactação é proporcional a área da seção transversal.

Os fornos de sinterização podem ser a gás ou elétricos, por resistência ou indução. O processo pode ser realizado em diferentes atmosferas como ar ambiente ou atmosfera inerte (nitrogênio ou argônio). A sinterização normalmente trabalha com atmosfera protetora com o objetivo de evitar a oxidação das peças e reduzir os eventuais óxidos presentes nos pós que poderiam prejudicar o grau de sinterização.

Esta é a etapa mais complexa do processo, pois para se alcançar as propriedades desejadas é necessário um conhecimento prévio do material e do processo utilizado (DUTRA, 2007). À partir de 700°C a resistência atinge um mínimo tolerável, e dependendo da composição da matéria-prima, uma queima acima de 900°C provoca retração linear e o bloco pode resistir de 6 a 10 MPa, o que é considerado alta resistência. Quando a temperatura é elevada acima de 1000°C, ocorre uma reorganização dos cristais, provocando o fechamento dos poros, diminuição da absorção de água, formação de uma nova estrutura cristalina e aumento da resistência mecânica, caracterizado como vitrificação (MONTEIRO, 2018).

2.3.5 Vitrificação

A vitrificação consiste na contração e fechamento dos poros pela queima e é um fenômeno que ocorre geralmente em materiais que contêm em sua composição pelo menos um elemento que possui uma fase vítrea, como é o caso das cinzas provenientes da queima da lenha, as quais possuem uma quantidade significativa de silício em sua composição. Durante o processo de aquecimento, parte do material chega ao ponto de fusão, onde no resfriamento, o restante da fase líquida presente preenche os poros, o qual influencia diretamente as propriedades do material resultante. Esse processo de resfriamento e preenchimento dos poros com material fundido é chamado de vitrificação (SOUZA, 2014).

O processo se divide em duas partes: retração linear, que ocorre como consequência da redução da porosidade superficial ou aberta; e diminuição da porosidade, que ocorre em função da retração linear devido a diminuição da porosidade volumétrica (fechada), sem que haja variação na porosidade aberta (SOUZA, 2014). O grau de vitrificação controla as propriedades da peça cerâmica à temperatura ambiente, tais como resistência, durabilidade e massa específica, as quais são todas melhoradas conforme a vitrificação aumenta (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Quando o processo de arrefecimento se dá em um curto período de tempo, as moléculas não são capazes de formar estruturas cristalinas. Em vez disso, elas permanecem em estruturas desordenadas como em líquidos, formando materiais vítreos (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007). Do ponto de vista estequiométrico, os produtos vitrificados podem absorver em sua estrutura várias concentrações de uma ampla variedade de diversos elementos estranhos. Tais características tornam a vitrificação de materiais um processo eficaz no tratamento de resíduos.

2.4 Caracterização do material

Caracterizar um material é conhecer a variabilidade de suas propriedades, utilizando técnicas comuns para medir propriedades tecnológicas, físicas e mecânicas, ou técnicas mais sofisticadas como difração de raios-X, fluorescência de raios-X e espectroscopia (CRUZ, 2012). Cada uma é mais indicada para determinado fim e muitas podem ser usadas para complementar as conclusões obtidas pela outra técnica.

A caracterização de um material foca em alguns parâmetros próprios da matéria-prima, como natureza, quantidade de minérios ou compostos químicos presentes. Para isso são utilizadas algumas técnicas de caracterização, tais como: caracterização microestrutural, tecnológicas e mecânicas.

2.4.1 Caracterização microestrutural

A microestrutura é um dos fatores mais importantes dos materiais utilizados na engenharia. Três pontos influenciam decisivamente nas propriedades e conseqüentemente, no desempenho dos materiais, sendo estes a composição química, a história térmica e o processamento ao qual foi submetido. A análise microestrutural é uma das técnicas mais simples e eficazes na caracterização de materiais, realizada normalmente através da microscopia óptica ou microscopia eletrônica de varredura (CRUZ, 2012). Dessa maneira, ao realizar a análise microestrutural de um material, são coletadas informações essenciais que podem ser associadas a composição e ao método de conformação mecânica, permitindo prever seu comportamento e características durante a aplicação.

De acordo com Martins *et al.* (2008), “as características microestruturais mais consideradas são: tamanho de grão, quantidade de impurezas, fases secundárias, porosidades e segregações.” Tais características são quantificadas ou medidas e comparadas em relação a um

critério de aceitação ou rejeição. A análise de um componente que sofreu avarias pode identificar se houve erros durante o processo de fabricação, ou se houve alterações na microestrutura provocadas pelas condições de trabalho.

No âmbito das pesquisas científicas, onde existe a busca constante de solução de problemas, as análises microestruturais são usadas para verificar se as microestruturas projetadas ocorreram de fato na prática, ou se as alterações no processamento e tratamento térmico provocaram mudanças na estrutura interna (MARTINS *et al.*, 2008).

2.5 Propriedades tecnológicas e físicas

As propriedades dos materiais cerâmicos são influenciadas pelas características atômicas e microestruturais dos materiais que o compõem. Por sua vez, as características são determinadas pela seleção das matérias-primas e pelo processo de fabricação (REED, 1995).

Para determinar a qualidade do produto utilizado destacam-se as principais propriedades tecnológicas, sendo: Retração Linear, Massa Específica Aparente, Perda de Massa, Absorção de Água, Porosidade Aparente. À seguir é dada uma breve descrição destas.

2.5.1 Retração linear (RL)

A retração linear é usada para realizar o controle dimensional dos corpos de prova, assim é possível identificar o quanto eles retraem após a sinterização, o que permite visualizar a densificação sofrida pelo material. Isso ocorre como consequência da eliminação da água presente na matéria-prima e adicionando na formulação da massa. A perda de água provoca porosidade do material, a qual tende a reduzir em decorrência do coalescimento das partículas devido às forças de atração eletrostáticas, e da formação de fase líquida durante a sinterização, provocando o que se chama de aglomeração. A retração linear é dada em porcentagem, sendo seu valor positivo quando houver retração, e negativo quando houver expansão.

2.5.2 Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente indica a densidade do material após a sinterização. Ela é encontrada por meio da razão entre o peso dos corpos de prova seco P_s (gramas) e o volume aparente dos corpos de prova V_a (cm^3). Um corpo normalmente é composto por fases líquida,

gasosa e sólida, sendo a MEA referente ao sistema completo. Já quando o material é seco, tendo sua água removida, tem-se a Massa Específica Aparente Seca. E quando são eliminados os poros do sistema, expulsando o ar, tem-se a Massa Específica Real, correspondente a massa dos grãos sólidos.

A densidade aparente do corpo compactado interfere diretamente nos resultados do módulo de ruptura à flexão (MRF) a seco, e após a sinterização, na retração linear e absorção de água. O ensaio de densidade dos corpos de prova a seco tem a finalidade de avaliar o estado de compactação obtido. A massa específica aparente após a secagem aumenta linearmente com o aumento da pressão de compactação, e a densificação depende da facilidade com que os grânulos se deformam plasticamente.

2.5.3 Perda de massa (PM)

A perda de massa é um cálculo que permite a determinação de quanto material foi perdido durante o processo térmico realizado, sendo o valor dado pela diminuição percentual de massa durante o processo da queima do corpo de prova em relação à massa do corpo de prova seco.

2.5.4 Absorção de água (AA)

A absorção de água é a propriedade que representa a capacidade de um material absorver a água que o envolve após ser sinterizado, aumentando assim a sua massa. Esse parâmetro é responsável por avaliar a fundência e a porosidade do material. É definida como o ganho em massa, expresso em porcentagem, que as peças apresentam quando introduzidas em água fervente durante um período determinado.

De acordo com Chih-Huang *et al.* (2003), a absorção de água é um fator fundamental no efeito da durabilidade do produto estrutural. Quanto menor a infiltração de água, maior a durabilidade e resistência do material ao ambiente natural ao qual é exposto. Observa-se ainda que a absorção de água é influenciada pela temperatura de queima e pela presença ou incorporação de cinzas da queima de madeira.

A Tabela 2 apresenta a classificação de alguns materiais cerâmicos de acordo com sua capacidade de absorção, para materiais prensados:

Tabela 2 – Classificação e definição dos revestimentos cerâmicos em relação aos grupos de absorção de água.

Grupos	MFR (MPa)	Tipo de produto
BIa	$0 < AA < 0,5$	Porcelanato
BIb	$0,5 < AA < 3$	Grês
BIIa	$3 < AA < 6$	Semi-grês
BIIb	$6 < AA < 10$	Semi-poroso
BIII	$AA > 10$	Poroso

Fonte: Adaptado ISO 13006 (2020).

2.6 Comportamento mecânico dos materiais cerâmicos

Ao longo da história, os materiais cerâmicos ficaram limitados em termos de sua aplicabilidade devido à sua natureza frágil. Sua principal desvantagem é a tendência à fratura catastrófica de maneira frágil e com pouca absorção de energia (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

As propriedades mecânicas são determinadas através de ensaios mecânicos, que reproduzem o comportamento do material quando submetidos a esforços em função de tensões ou deformações. Deve-se lembrar que há duas finalidades básicas para a realização de ensaios mecânicos: permitir a obtenção de informações rotineiras do produto e desenvolver novas informações sobre os materiais. Entre as principais propriedades dos materiais, pode-se citar as resistências à tração, compressão e flexão, elasticidade, dureza, etc. (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000).

Os ensaios dos materiais podem ser classificados quanto a integridade geométrica e dimensional da peça ou componente, podendo ser de dois tipos:

- **Destrutivos:** quando após executados provocam a inutilização parcial ou total da peça, tais como tração, compressão, flexão, dureza, etc.
- **Não destrutivos:** quando após executados não comprometem a integridade da peça, sendo usados na inspeção de materiais nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. A maioria dos ensaios tecnológicos (absorção de água, porosidade, etc.) e de caracterização de materiais (EDS, difração e fluorescência de raios-X) fazem parte desse grupo.

2.6.1 Fratura frágil

Os materiais frágeis apresentam comportamento de rompimento brusco sem aviso prévio. O processo de fratura frágil consiste na formação e na propagação de trincas através da

seção transversal de um material, em uma direção perpendicular à da carga aplicada, produzindo uma superfície de fratura relativamente plana (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). A fragilidade das cerâmicas em baixas temperaturas é uma consequência da forte ligação covalente que existe em muitas delas, ou da falta de um número suficiente de sistemas de deslizamento independentes para o movimento de discordâncias (QUINN, 1991). Esse comportamento faz com que os materiais fracturem antes que qualquer deformação plástica possa ocorrer em resposta à aplicação de uma carga.

A determinação da habilidade de um material cerâmico em resistir à fratura quando há uma trinca presente pode ser medida em termos da tenacidade à fratura em deformação plana, definido pela expressão:

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Onde K_{Ic} representa a tenacidade à fratura, σ é a deformação aplicada, a é a metade do comprimento de uma trinca interna, e Y é um parâmetro que depende do tamanho e geometria da trinca (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Nesse fenômeno existe a dependência da existência de uma trinca, cuja presença é consequência da técnica de fabricação e de qualquer tratamento subsequente.

Devido as aplicações mais frequentes para os materiais cerâmicos, é preferível a realização de ensaios estáticos, onde a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio, caracterizando um processo quase estático. Nessa categoria estão incluídos os ensaios de tração, compressão, flexão e dureza.

2.6.2 Dureza

Uma das características fundamentais mais desejável nos materiais cerâmicos é a sua dureza. Os materiais mais duros conhecidos pertencem a esse grupo. É por meio da dureza de um material que se pode identificar a sua resistência à ruptura, assim como a capacidade de deformar-se sob a ação de uma carga de tração ou compressão ou de outro esforço qualquer.

De um modo geral, pode-se dizer que a dureza é a resistência à deformação permanente. Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas quantitativas de dureza baseadas em deformação plástica localizada, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e de taxa de aplicação (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Os resultados obtidos são dados em função das

características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado.

Medições precisas de dureza em materiais cerâmicos são altamente difíceis de se realizar, pois estes materiais frágeis são altamente suscetíveis ao trincamento quando penetradores são forçados contra suas superfícies, e a formação de muitas trincas leva a leituras imprecisas. Os tipos de ensaios mais adequados para materiais cerâmicos são: microdureza Vickers e Knoop, já que ambos empregam penetradores com formas piramidais. As impressões Vickers são muito mais prováveis de causar trincas em cerâmicas do que as impressões Knoop. Por isso, para cerâmicas muito frágeis é preferível a técnica da dureza Knoop.

2.6.3 Compressão

O ensaio de compressão é a aplicação de uma carga compressiva uniaxial em um corpo de prova. A compressão é mais usada para observar o comportamento dos materiais frágeis, basicamente nas indústrias de construção civil e de materiais cerâmicos. Nestes a ruptura ocorre pelo efeito do cisalhamento provocado pela tensão de compressão, não ocorrendo deformações laterais significativas como as verificadas nos materiais dúcteis. A resistência de materiais cerâmicos medida por compressão é muito maior que a medida por tração, e por esse motivo, a resistência à tração é geralmente utilizada como parâmetro crítico para projeto (GALDINO, 2003).

Os resultados são influenciados pela velocidade de deformação, anisotropia do material, temperatura, percentagem de impurezas, tamanho de grão e condições ambientais. A alta resistência a compressão das cerâmicas é consequência da resistência do material ao fluxo plástico e à intensidade de defeitos sob tensão de compressão (GALDINO, 2003). Já a falha por compressão envolve a união de defeitos na forma de microvazios e microtrincas que se propagam por mecanismos ora de crescimento, ora de interrupção. As cerâmicas falham como um todo sob compressão como resultado da distorção do campo de tensão na vizinhança imediata à extremidade de um defeito, sendo que esta distorção gera concentração de tensão de tração. Estudos anteriores mostram que a resistência de ruptura à compressão é inversamente proporcional a quantidade de poros, ou seja, quanto mais porosa a mostra, menor a resistência de ruptura à compressão.

É extremamente difícil medir a resistência à compressão com precisão porque leves desalinhamentos podem criar tensões de flexão, e efeitos de carregamento final podem gerar tensões de tração que causam fratura. Esses erros podem ser gerados por meio do

desalinhamento entre o bloco de carga e o tamanho do corpo de prova, irregularidades do corpo de prova e carregamento excêntrico (GALDINO, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

À seguir serão apresentados os materiais e métodos empregados na realização deste trabalho, os quais envolvem diversas etapas relacionadas às matérias-primas, ao processamento e aos ensaios que foram utilizados.

3.1 Matérias-primas

Os materiais que serviram como base para a realização deste estudo foram cinzas de lenha de cajueiro, coletadas na indústria de cerâmica vermelha Cerâmica Chorozinho LTDA. do município de Chorozinho – CE, e argila, obtida na Cerâmica A.M. Telhas do município de Russas – CE.

Os resíduos de cinzas foram provenientes do processo de queima da madeira utilizada como combustível no forno industrial dos produtos cerâmicos, queimados à temperaturas que variam de 800 a 950°C. A argila utilizada foi uma mistura de argila amarela 30% e preta 70%, típicas dos materiais cerâmicos estruturais.

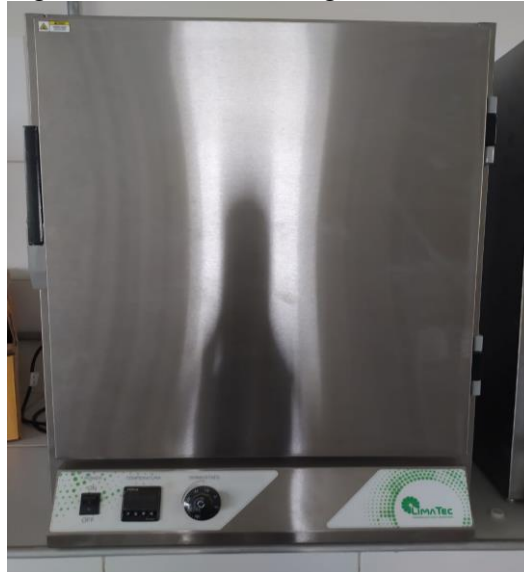
Pesquisas mostram que a adição de rejeitos da própria indústria cerâmica na argila melhora a qualidade do produto final, evitando por exemplo a formação de coração negro, que é um defeito na peça cerâmica que pode ocasionar inchamento nas peças, deformações deterioração das características técnicas e alteração do tom no produto final. Através do controle dos parâmetros de processo e das características químicas dessas matérias-primas, buscou-se produzir um protótipo que possua características e propriedades adequadas ao uso, com o reaproveitamento das cinzas.

3.2 Preparação do material na forma de matéria-prima

3.2.1 *Coleta das cinzas e argila*

O resíduo de cinza de madeira foi coletado na forma de pó fino. Após a coleta, a cinza foi colocada em estufa (Figura 4) de laboratório para remover o excesso de umidade, submetida a uma temperatura de 110°C por um período de 24 horas. A argila também passou pelo mesmo processo de secagem.

Figura 4 - Estufa de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.2 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica interfere na estabilidade dimensional, pois influenciam no preenchimento do molde de prensagem e empacotamento das partículas. Sabendo disso, as amostras foram submetidas à análise granulométrica por meio da passagem completa do resíduo em peneiras com malhas de 600 μm e 75 μm , apresentando granulometria final de 75 μm .

Figura 5 - Peneiras usadas na determinação da granulometria. (a) Peneira 600 μm . (b) Peneira 75 μm



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.3 *Formulação das massas*

Com a finalidade de incorporar resíduo de cinza nas massas argilosas, as massas cerâmicas foram preparadas sem adição de cinza, com substituição de parcela da massa de argila por cinza e totalmente composto por cinza. Foram então formuladas diferentes proporções apresentadas na Tabela 3. Os percentuais de cinza foram escolhidos com base em resultados da literatura, com diferentes tipos de cinzas que mostraram que essas substituições podem produzir produtos cerâmicos de interesse industrial (BORLINI, 2006).

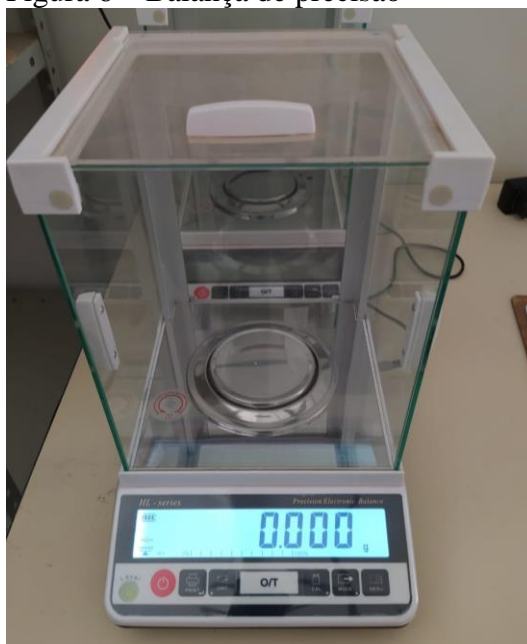
Tabela 3 – Composição dos corpos de prova (% em peso)

Mistura	Argila (%)	Cinzas (%)	Quantidade de amostras
M1	100	0	8
M2	95	5	8
M3	90	10	8
M4	80	20	8
M5	0	100	8

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Cada uma das amostras foi pesada em uma balança digital de precisão 0,001g (Figura 6), obtendo assim as porcentagens corretas de cada mistura com as proporções apresentadas na Tabela 3, tendo cada mistura 15,000g.

Figura 6 – Balança de precisão



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.4 Prensagem dos corpos de prova

A partir dos pós obtidos, foram preparados pequenos corpos de prova por prensagem uniaxial de uma punção em uma matriz metálica cilíndrica com 25 mm de diâmetro, como apresentado à seguir.

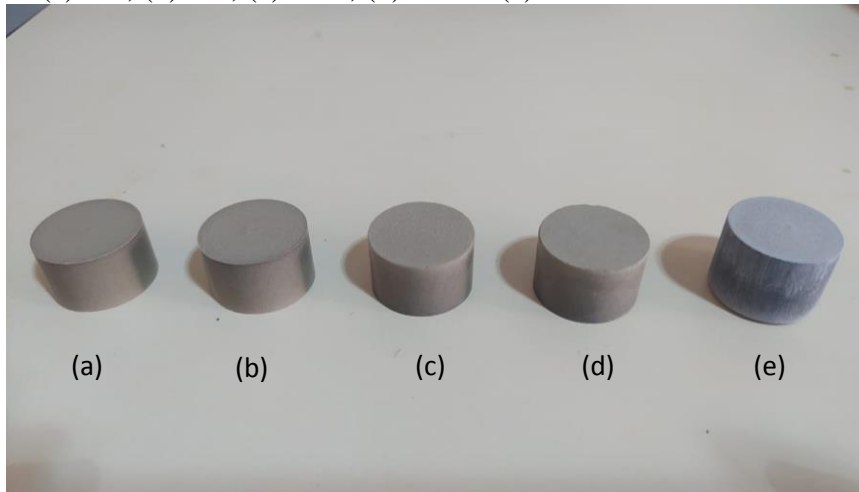
Figura 7 – Matriz metálica para prensagem das peças cerâmicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A compactação à temperatura ambiente produz os “compactados verdes” que ainda se apresentam bastante frágeis. Os corpos possuem formato cilíndrico com altura média de 15 mm e volume de $7,363 \text{ cm}^3$, semelhantes ao modelo apresentado (Figura 8).

Figura 8 – Peças a verde compactadas nas respectivas composições de (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 20% e (e) 100% de cinza



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para isso foi utilizada uma máquina de ensaio universal (Figura 9) da marca EMIC com capacidade de 300 kN presente no laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas. A carga aplicada foi de 20 kN produzindo uma pressão média de 40,74 MPa. As peças da mistura 5 (100% cinza) foram compactadas com uma força de 60 kN, gerando uma pressão de 122,23 MPa, com o objetivo de melhorar a aderência dos grãos.

Figura 9 – Máquina de ensaio universal EMIC: 300kN



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2.5 Sinterização dos corpos de prova

Após a compactação, as peças foram sinterizadas nas temperaturas de 850°C, 950°C e 1100°C, a uma taxa de aquecimento de 30°C/min e tempo de permanência no patamar de sinterização por 2 horas, sendo resfriadas lentamente ao forno. Para isso, foi utilizado um forno EDG 3000 10P com temperatura máxima de 1150°C presente no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC, o qual está mostrado na figura 10. Na sinterização busca-se adquirir uma estrutura sólida e consistente do compactado de pó, levando o sistema a densificação, contração volumétrica e redução da área superficial específica.

Figura 10 – Forno EDG modelo 3000 10P



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A determinação da temperatura de sinterização se baseia no resultado final da análise das características físicas e mecânicas do material cerâmico, que foram estabelecidas a partir dos resultados de trabalhos realizados por pesquisadores como Farias *et al.* (2017) e Borlini (2006) e alguns testes de aprimoramento da técnica de sinterização. Os corpos foram sinterizados da seguinte forma: 8 amostras da mistura 1 e 8 da mistura 2 foram sinterizados a temperatura de 850°C, 8 amostras da mistura 3 foram sinterizados a 950°C e 8 amostras da mistura 4 e 8 da mistura 5 foram sinterizados a 1100°C.

3.3 Caracterização Física

Depois de secos, peneirados, compactados e sinterizados, os corpos de prova foram submetidos a alguns ensaios de desempenho tecnológico, os quais têm sido desenvolvidos para que através de situações artificiais, utilize-se amostras representativas que possibilitem avaliar e prever o comportamento do material, seu desempenho e qualidade, por meio de ensaios destrutivos ou não. Tais ensaios permitem estabelecer se a formulação do material é compatível com os critérios exigidos pela indústria cerâmica para utilização deste material destinados a construção civil.

3.3.1 *Retração linear*

Para o ensaio de retração linear, os corpos de prova foram medidos em seus comprimentos utilizando-se um paquímetro digital.

A primeira medição foi realizada após a prensagem na matriz metálica e antes da sinterização. Após a realização das medidas, os corpos de prova foram sinterizados em forno e novamente medidas as suas dimensões. A retração linear é determinada a partir da variação do comprimento das peças ao passarem pelas etapas citadas anteriormente, de acordo com a norma ABNT NBR 9623 por meio da seguinte equação:

$$RL(\%) = \frac{L_0 - L_q}{L_0} * 100$$

Onde:

RL(%) = porcentagem de retração linear;

L_0 = comprimento do corpo antes da sinterização (mm);

L_q = comprimento do corpo após a sinterização (mm).

3.3.2 *Absorção de água*

No ensaio de absorção de água, os testes foram feitos de acordo com a norma ABNT NBR 15270-3. Os corpos de prova foram secos a uma temperatura de 110°C em estufa e pesados em balança de precisão, em seguida foram imersos por um período de 24 horas em água destilada. O excesso de água foi removido e este voltou a ser pesado após o contato com a água, a fim de observar a quantidade de água que o corpo absorveu. Esse valor é obtido por meio da expressão:

$$AA(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100$$

Onde:

AA(%) = absorção de água percentual;

Mu = massa úmida do corpo (g);

Ms = massa seca do corpo (g).

3.3.3 *Massa específica Bulk*

Segundo Ribeiro (2017), a massa específica Bulk é a razão entre o corpo de prova seco e seu volume aparente, sendo influenciado tanto pela temperatura de queima quanto pelos materiais presentes no corpo de prova. A massa dos corpos de prova foram obtidas por meio de uma balança digital com precisão de 0,001g (Figura 6), e as medidas para o cálculo do volume foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital, obtida pela equação à seguir:

$$\rho_b = \frac{M}{V}$$

Onde:

ρ_b = Massa Específica Bulk (g/mm³);

M = massa do corpo de prova seco ou queimado (g);

V = volume do corpo de prova seco ou queimado (mm³).

3.3.4 *Perda de massa*

Pode-se também observar a perda em massa ou perda ao fogo do corpo, que está relacionada a perda de água adsorvida na superfície, estando associada a hidróxidos e a decomposição de alguns compostos e de matéria orgânica. Esse valor pode ser encontrado da seguinte maneira:

$$PM(\%) = \frac{Ms - Mq}{Ms} * 100$$

Onde:

PM = perda de massa;

Ms = massa seca (g);

Mq = massa queimada (g).

3.3.5 Microscopia

A microscopia óptica é a mais tradicional de todas e continua sendo uma técnica poderosa para o estudo da microestrutura dos materiais. Em comparação com outros microscópios disponíveis, o microscópio com luz visível tem facilidade de operação e custo modesto, oferecendo uma resolução da ordem de microns (KNIESS, 2005).

A preparação das amostras requer alguns cuidados especiais para garantir resolução e contraste adequado. As peças cerâmicas passaram por um processo prévio de lixamento visando remover deformações na superfície. Um corpo de prova de cada composição foi observado antes e depois da sinterização buscando verificar principalmente a formação da fase vítrea e, possivelmente, a presença de bolhas ou trincas na vitrificação.

As micrografias foram feitas em um microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2 (Figura 11), presente no laboratório de microscopia da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas.

Figura 11 – Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.4 Determinação das propriedades mecânicas

3.4.1 Dureza

Dureza é a resistência que um material apresenta ao risco ou a formação de uma marca penetrante, quando pressionado por outro material ou marcador personalizado. A utilização do ensaio de dureza na caracterização das cerâmicas é importante pois ajuda a caracterizar a resistência à deformação, densificação e fratura do material.

Foi realizado o ensaio de dureza Rockwell B, o qual se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma esfera de metal duro submetida a uma carga de 100 kgf e tempo de penetração de 10s, de acordo com a norma ABNT NBR 6508-1.

Para as medidas dos ensaios, utilizou-se o durômetro SUSSEN WOLPERT (Figura 12) do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará. Foram feitas 5 indentações para cada tipo de amostra em análise.

Figura 12 – Durômetro Rockwell SUSSEN WOLPERT



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.4.2 Resistência à compressão axial

A resistência mecânica à compressão uniaxial está diretamente relacionada à qualidade do material, à sua estrutura interna, ao seu desempenho em termos mecânicos e conseqüentemente à sua durabilidade (ANDRADE, 2012). À partir dos resultados encontrados pode-se fornecer parâmetros que viabilizam a aplicação do material na construção civil.

Este ensaio foi realizado baseado em uma adaptação da norma ABNT NBR 5739 para concreto. Os corpos de prova foram ensaiados em máquina de ensaio universal EMIC 300 kN (Figura 9) com carga contínua, sem choques e velocidade de carregamento constante de 1 mm/min, cessando o carregamento somente quando houvesse queda de força que indicasse a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão das peças sinterizadas foi obtida por meio da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Onde:

σ = resistência à compressão (MPa);

P = carga aplicada (N);

A = área da seção transversal (mm²).

3.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão permite avaliar o esforço suportado pelo material de acordo com a variação de parâmetros como temperatura, composição, velocidade de carregamento, forno de sinterização, etc. O termo “tração indireta” é usado porque uma tensão de tração perpendicular ao plano diametral entre as duas placas é produzida por meio de uma tensão de compressão no eixo vertical, sendo o estado plano de tensões biaxial.

Neste trabalho, o ensaio por compressão diametral foi realizado com o auxílio da máquina de ensaios universal citada anteriormente (figura 9). Cinco amostras de cada composição foram submetidas a uma força de compressão com velocidade de carregamento de 1 mm/min, sendo descartadas as amostras que apresentaram maior desvio padrão das demais.

O ensaio nos corpos de prova sinterizados foi realizado baseado na adaptação da norma ABNT NBR 7222 para argamassa e concreto, dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{xx} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot L}$$

Onde:

σ_{xx} = tensão de tração por compressão diametral na direção x positiva (MPa);

P = carga aplicada (N);

D = diâmetro da peça cilíndrica (mm);

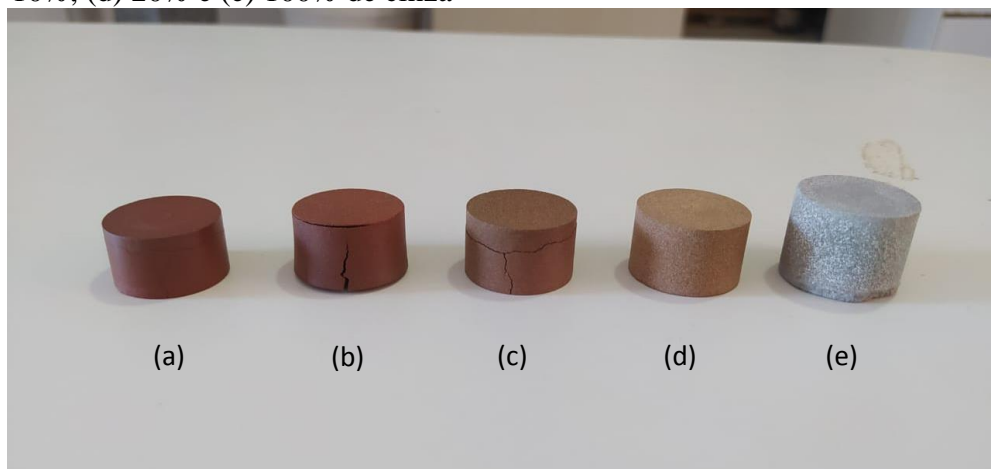
L = altura da peça cilíndrica (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da Sinterização

Visando estabelecer um padrão de sinterização mais adequado às misturas, os corpos de prova foram inicialmente sinterizados a 1100°C. As peças foram colocadas sobre um tijolo adequado para evitar a contaminação do refratário do forno. Após duas horas no patamar de sinterização e resfriamento ao forno, as misturas 1, 2 e 3 apresentaram trincas, enquanto nenhuma das peças da mistura 4 trincaram. As peças da mistura 5 também não apresentaram trincas, porém não vitrificaram de forma correta, apresentando partes não totalmente sinterizadas, conforme mostrado na Figura 13. As peças que foram colocadas no forno já aquecido sofreram choque térmico e fraturaram, sendo adequado submeter os corpos a rampa de aquecimento e resfriamento ao forno no processo de sinterização de materiais cerâmicos.

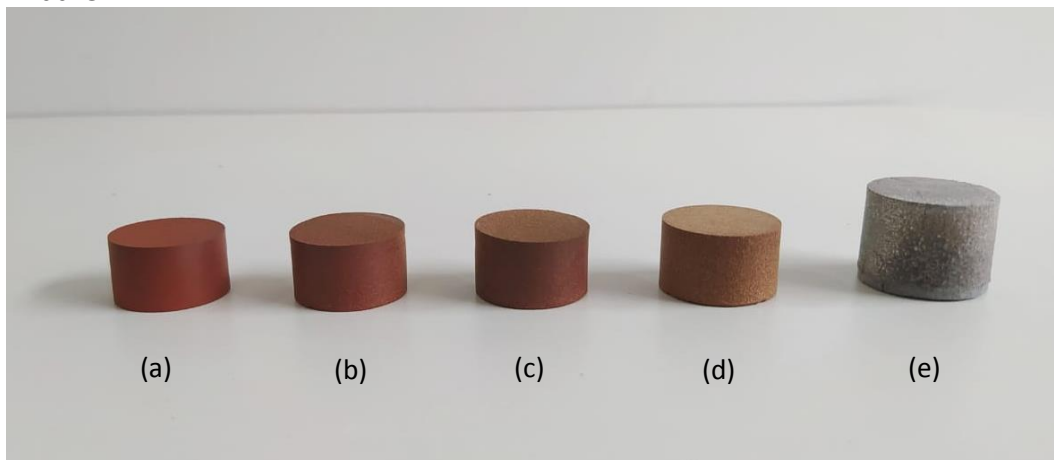
Figura 13 – Corpos de prova sinterizados a 1100°C: (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 20% e (e) 100% de cinza



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Novos corpos de prova foram levados ao forno, sendo as misturas 1 e 2 sinterizadas a 850°C e a mistura 3 sinterizada a 950°C. As peças das misturas 1 e 2 que foram colocadas a 950°C também apresentaram fissuras. A partir disso, pôde-se observar que quanto maior o teor de cinza na mistura, maior é a temperatura necessária à sinterização e vitrificação adequada. Como os resíduos de cinza são obtidos após um processo de queima da madeira, conseqüentemente é necessário que a temperatura de sinterização das cinzas seja mais elevada. A Figura 14 apresenta as amostras sinterizadas de forma adequada.

Figura 14 – Amostras sinterizadas: (a) e (b) a 850°C, (c) a 950°C e (d) e (e) a 1100°C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2 Análise das Propriedades Físicas

4.2.1 Retração Linear

A Tabela 4 contém os resultados da retração linear média da queima dos corpos de prova com seus respectivos desvios padrões e coeficiente de variação, em função da média dos comprimentos L_0 e L_q das oito amostras de cada composição. Nesse teste, tanto a composição quanto a temperatura influenciam na retração linear e tamanho das peças. Tanto visualmente (Figura 14) como por meio da tabela 4 pode-se observar que o incremento de resíduo de cinza nas misturas aumenta o tamanho das amostras. Isso se dá devido a menor massa específica da cinza, que será visto no Gráfico 3, o qual provoca um aumento no volume das peças. Percebe-se uma tendência ao aumento da retração linear com o aumento da temperatura. Esse fato pode estar associado ao início do processo de sinterização das partículas da massa argilosa. O aumento progressivo da temperatura favorece a formação de uma maior quantidade de fase líquida durante a sinterização, resultando em maior densificação dos corpos de prova e, conseqüentemente, maiores valores de retração linear. Outra explicação para isso pode ser a de que os resíduos de cinza possuem elementos de baixo ponto de ebulição que, quando submetidos a temperaturas elevadas, são evaporados, assim como será visto na perda de massa ao fogo (Gráfico 4).

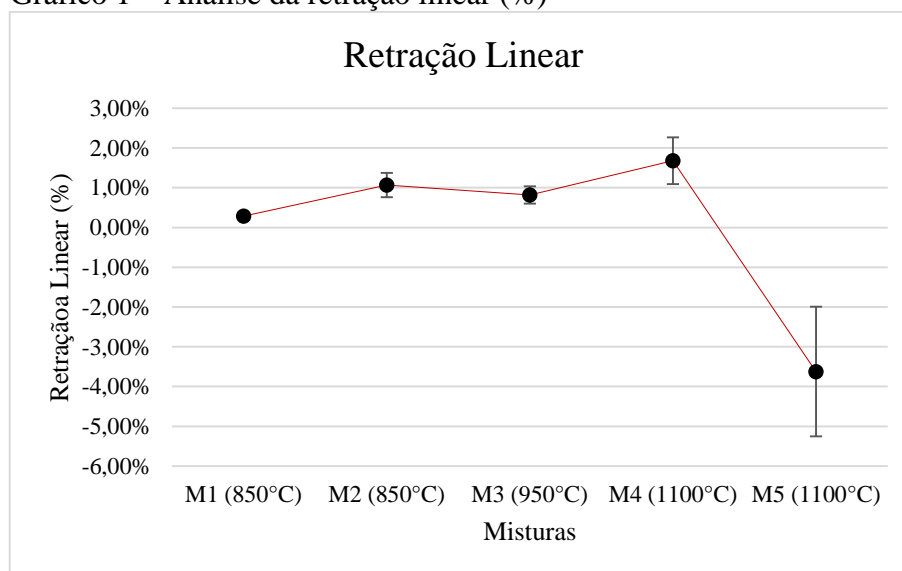
Tabela 4 – Resultado da Retração Linear (%)

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
L₀ médio (mm)	14,64	15,00	15,32	16,14	17,66
L_q médio (mm)	14,60	14,84	15,19	15,87	18,30
Retração (%)	0,29	1,07	0,82	1,68	-3,62
Desvio Padrão (S)	0,08	0,30	0,22	0,58	1,63
Coefficiente de Variação (%)	27,62	28,42	26,59	34,84	-45,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Curiosamente as amostras com 100% cinza apresentaram uma expansão linear ao invés de retração linear. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que a cinza não sinterizou completamente a 1100°C mas mesmo assim teve a maior perda de massa ao fogo. Logo, houve um aumento da porosidade, pois como foi citado anteriormente, as partículas de baixo ponto de ebulição evaporaram, porém a ausência da fase líquida necessária à vitrificação não preencheu os poros deixados por esses elementos evaporados. Estes resultados podem ser visualizados no Gráfico 1:

Gráfico 1 – Análise da retração linear (%)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.2 Absorção de Água

Os resultados do ensaio de absorção de água pós sinterização para cada amostra estão apresentados na Tabela 5. O comportamento da absorção de água está relacionado a

microestrutura do material pois, segundo Guimarães (2017), esta propriedade determina o nível de porosidade aberta das peças cerâmicas, e seu incremento pode ocorrer devido ao baixo grau de empacotamento dos corpos de prova, elevada perda de massa durante a queima e baixo teor de óxidos fundentes.

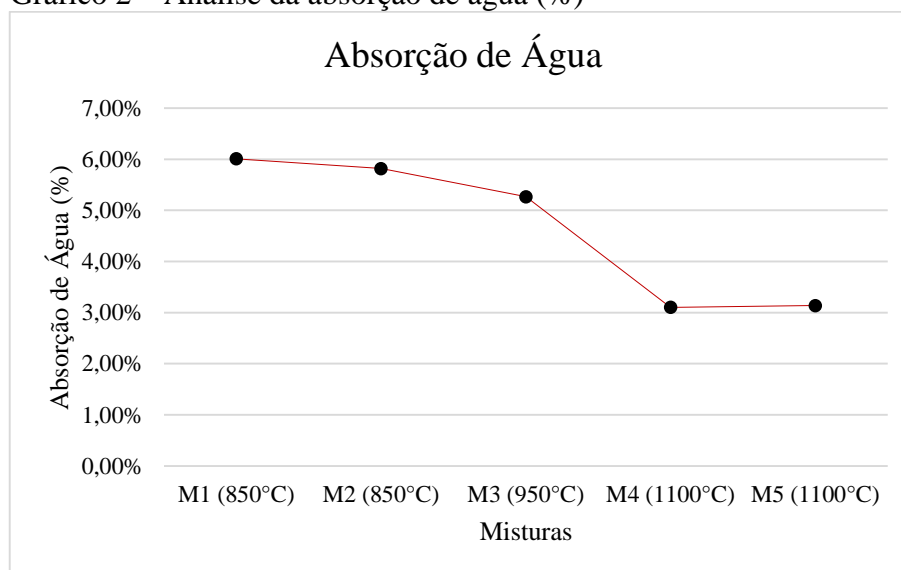
Tabela 5 – Resultado da Absorção de Água (%)

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Absorção de Água (%)	6,01	5,82	5,27	3,10	3,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nota-se que com o acréscimo do teor de resíduos de cinza à massa argilosa, o comportamento da absorção de água se apresenta decrescente. O aumento da temperatura de queima também tende a reduzir o teor de absorção de água pelos mesmos motivos que foram citados no tópico anterior. Quando ocorre a eliminação de poros abertos pelo preenchimento com material líquido proveniente da massa argilosa na sinterização, a água não penetra de forma considerável, pois houve maior empacotamento das partículas. De acordo com o padrão presente na norma ABNT NBR 13006 (Tabela 2), a mistura 1 classifica-se como produto semi-poroso, enquanto as misturas 2, 3, 4, e 5 classificam-se como semi-grês. A curva presente no Gráfico 2 a seguir demonstra o comportamento das amostras em relação a absorção de água.

Gráfico 2 – Análise da absorção de água (%)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.3 *Massa Específica Bulk*

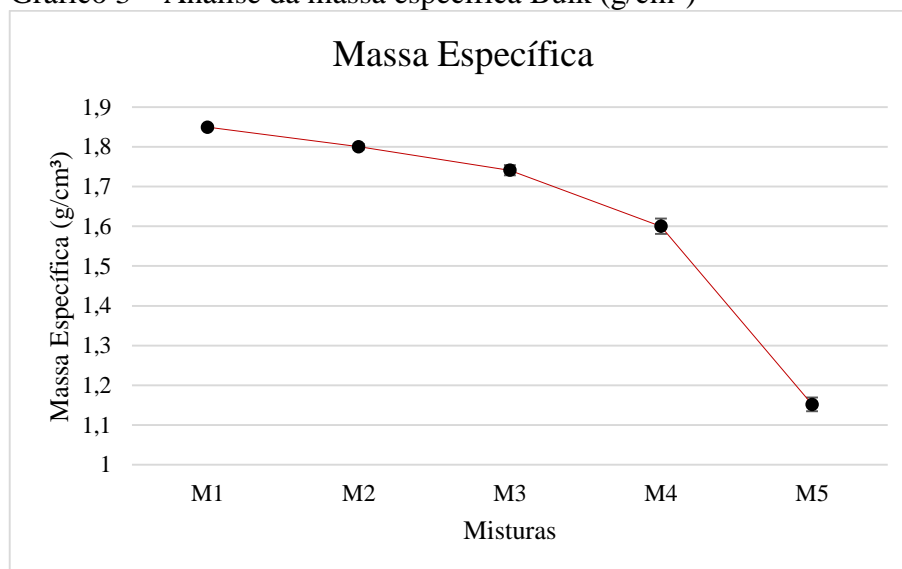
Na Tabela 6 são apresentados os valores das massa específica Bulk das peças de cerâmica vermelha sinterizadas em função da quantidade de resíduo de cinza.

Tabela 6 – Resultado da Massa Específica Bulk (g/cm^3)

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Massa Específica Bulk (ρ_b)	1,85	1,80	1,74	1,60	1,15
Desvio Padrão (S)	$5,14 \cdot 10^{-3}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente de Variação (%)	0,28	0,38	0,72	1,17	1,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Percebe-se que os corpos de prova com adição de resíduo apresentaram uma redução gradativa da sua massa específica quando comparados aos corpos de prova de referência (argila pura), influenciando na densificação. Esse fato pode ser explicado a partir de dois fatores: o resíduo de cinza de madeira apresenta alta perda de massa ao fogo, como será visto logo a seguir, assim a substituição parcial da argila pela cinza tende a reduzir a massa específica do corpo. A medida que se incorporou resíduo de cinza, foi reduzindo a porcentagem de argila, aumentando os índices de vazios devido a menor densidade da cinza (formada por agregados mais leves) comparada a cerâmica vermelha e aos componentes da cinza evaporados durante a queima. Para melhor visualização do comportamento das amostras, os dados experimentais são apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Análise da massa específica Bulk (g/cm³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.4 Perda de Massa

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos das medidas de perda de massa média das amostras, antes e após a sinterização, e seus respectivos desvios padrões e coeficiente de variância. Na etapa de queima um fenômeno comum que pode ocasionar a redução da massa é a eliminação da água residual presente nos poros da peça, que está fisicamente ligada à argila.

Tabela 7 – Resultado da Perda de Massa (%)

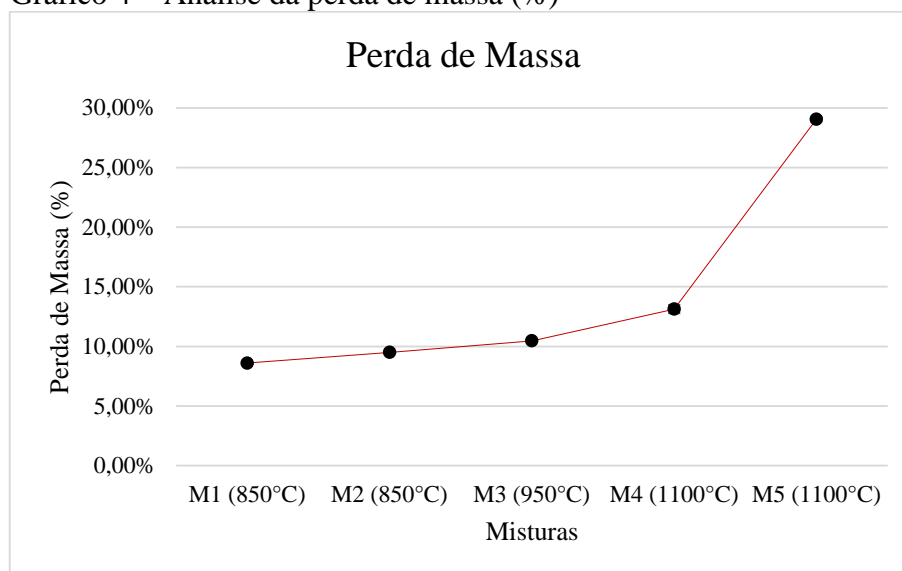
Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Perda de Massa (%)	8,60	9,51	10,47	13,12	29,05
Desvio Padrão (S)	0,05	0,08	0,05	0,35	0,18
Coeficiente de Variação (%)	0,54	0,79	0,51	2,67	0,62

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pode-se observar que a substituição parcial da argila pelo resíduo de cinza de madeira tende a aumentar a perda de massa. Como já foi citado anteriormente, a presença de elementos com baixo ponto de ebulição nos resíduos de cinza, quando submetidos a temperaturas elevadas provocam evaporação. Apesar do aumento de óxidos fundentes na composição em função do aumento da quantidade de cinzas, também há um aumento na quantidade de matéria orgânica presente, o que desfavorece a densificação dos corpos de prova

pelos gases liberados na queima, aumentando a quantidade de poros abertos e reduzindo sua massa. No Gráfico 4 é mostrada a curva obtida com a análise da perda de massa ao fogo das amostras.

Gráfico 4 – Análise da perda de massa (%)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.5 Microscopia

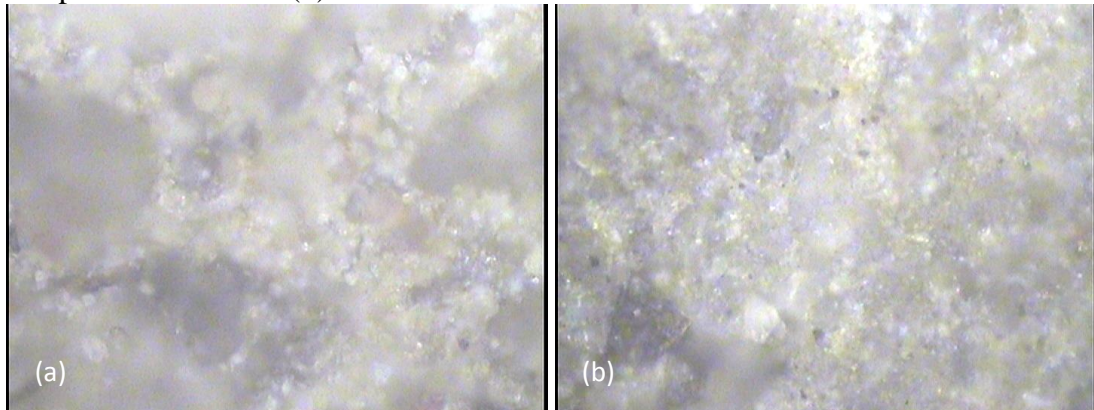
A análise microestrutural dos corpos cerâmicos em estudo contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da adição de resíduo de cinza de madeira nas massas argilosas. Como as peças em análise eram amorfas, opacas e maciças, as imagens obtidas não tiveram a resolução esperada, apesar do processo de lixamento das amostras. Nas fotomicrografias a seguir foi utilizada a objetiva de 50x, correspondendo a uma ampliação de 500 vezes.

As Figuras 15, 16, e 17 mostram um comportamento semelhante entre as misturas 1, 2 e 3, onde observa-se uma redução do tamanho dos poros nas peças após a sinterização. Isso ocorre pela formação da fase líquida de partículas argilosas que preenchem os poros, ocorrendo a vitrificação. Pode-se notar também uma mudança de coloração entre as figuras antes (a) e após (b) a sinterização, mostrando que houve as reações químicas típicas do processo. Já nas misturas M4 e M5, com maior teor de cinzas em sua composição, verifica-se um ligeiro aumento no tamanho dos poros abertos (Figuras 18 e 19). A presença de cinzas aumenta a porosidade da matriz cerâmica, possivelmente em função da decomposição de carbonatos existentes no resíduo que interferem na compactação da mistura. A fotomicrografia da mistura

M5, com 100% de cinza, possui características mais discrepantes das peças de matriz argilosa. Esse comportamento se justifica devido a sinterização incompleta dos resíduos de cinza, como também pode ser verificado nos resultados de retração linear. A porosidade é um fator que pode ser prejudicial para o desempenho tecnológico, todavia facilita o processo de secagem e evita o aparecimento de defeitos mais comprometedores consequentes de gases formados durante a queima.

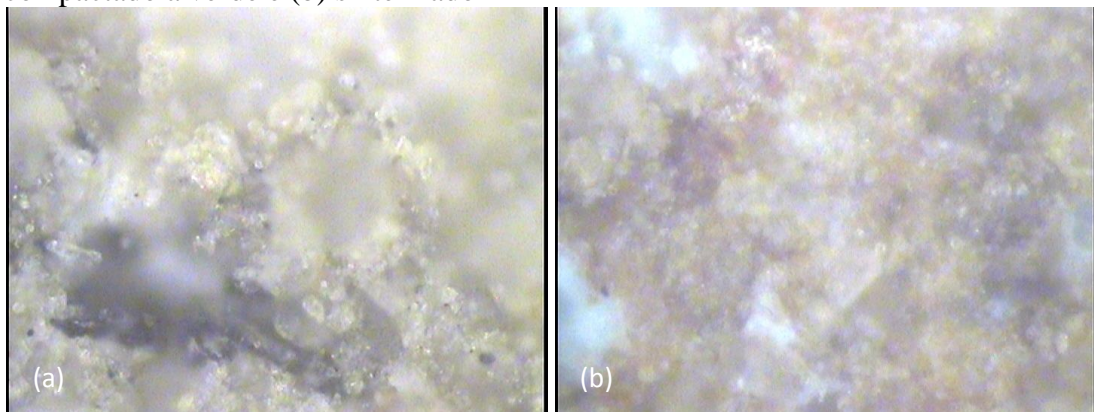
Apesar de alguns dos resultados condizerem com o que foi mostrado nos testes anteriormente apresentados, as análises devem ser feitas com certa precaução, pois dependendo da área visualizada, pode-se chegar a uma conclusão equivocada.

Figura 15 – Micrografia óptica (500x) da superfície da mistura com 0% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado



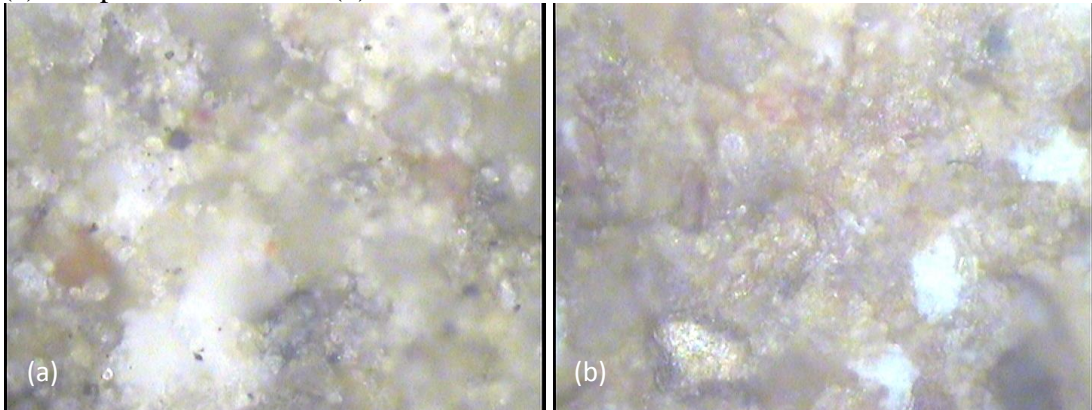
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 16 – Micrografia óptica (500x) da superfície da mistura com 5% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado



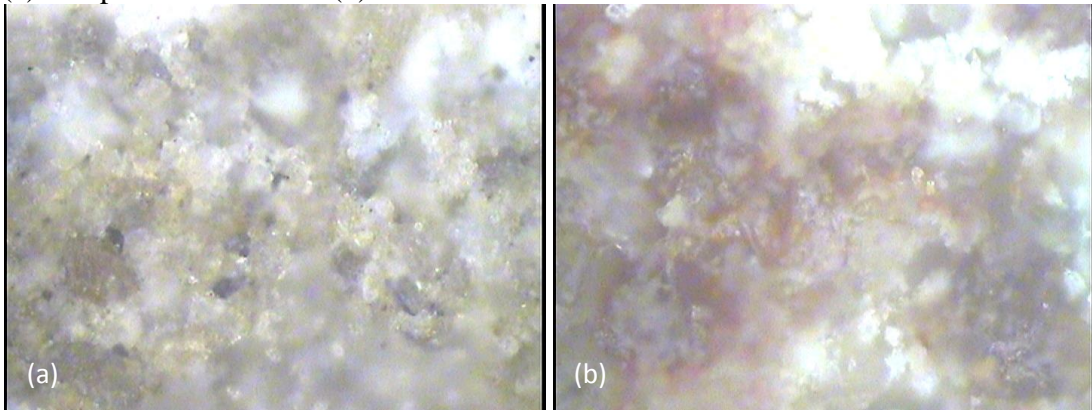
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 17 – Micrografia óptica (500x) da superfície da mistura com 10% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado



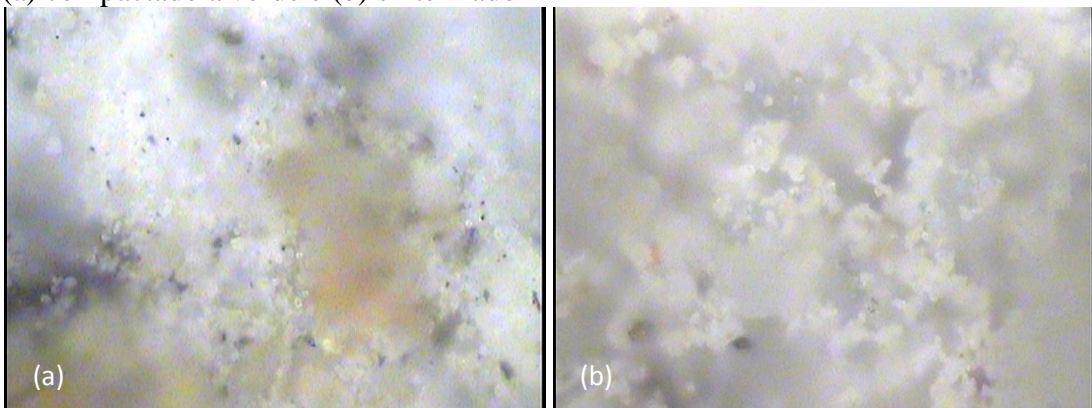
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 18 – Micrografia óptica (500x) da superfície da mistura com 20% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 – Micrografia óptica (500x) da superfície da mistura com 100% de cinza: (a) compactado a verde e (b) sinterizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.3 Análise das Propriedades Mecânicas

4.3.1 Dureza

A argila pura foi analisada buscando determinar as características da peça comercializada. Após isso, a propriedade foi analisada na medida em que houve acréscimo de rejeitos de cinza. Inicialmente tentou-se fazer o ensaio de microdureza Vickers, porém devido o material ser amorfo e possuir vários planos, não foi possível a visualização das diagonais da indentação no microscópio, mesmo após o lixamento da peça. A propriedade foi verificada através do ensaio de dureza do tipo Rockwell B, já que o tipo Rockwell C trincou a amostra instantaneamente.

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos da média de cinco indentações realizadas em cada amostra expressos em HRB:

Tabela 8 – Resultado da Dureza Rockwell B

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Dureza HRB	43,10	21,40	21,00	17,60	4,30
Desvio Padrão (S)	7,57	2,87	4,56	5,00	5,60
Coefficiente de Variação (%)	0,17	0,13	0,22	0,28	1,30

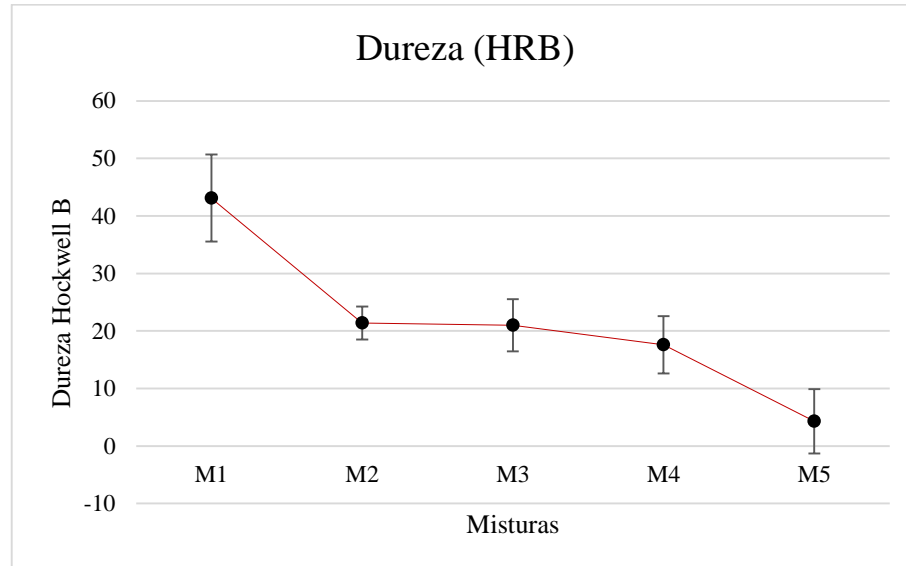
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando os dados, pode-se verificar que, a medida que aumentou a concentração de cinza nas peças em relação ao corpo de referência de argila, ocorreu uma redução da dureza, comprometendo essa propriedade. Os resultados devem ser analisados com ressalva, pois algumas indentações deram origem a trincas que se formaram no momento da aplicação da carga. Por esse motivo, alguns dos valores do desvio padrão foram altos, pois para cada indentação feita, mais fácil era a propagação de trincas devido o concentrador de tensão formado. Esse efeito tem como provável causa uma excessiva vitrificação da superfície.

Conforme observado no Gráfico 5, houve uma redução significativa da dureza (cerca de 40%) do material cerâmico com alguma porcentagem de resíduos de cinza em comparação com a amostra de argila pura. Os corpos de prova com 5%, 10% e 20% de cinza não apresentaram resultados com diferenças significativas entre eles. Já a amostra com 100% de cinza apresentou uma queda considerável da dureza, o que pode ser explicado pela sinterização incompleta desses corpos por necessitarem de temperaturas mais elevadas (o que

pode ser confirmado pelas curvas de resistência à compressão, retração linear e inspeção visual). O aumento da porosidade das peças com o aumento do teor de cinza (observado na microscopia) também contribuiu para a redução da dureza das amostras.

Gráfico 5 – Análise da dureza Rockwell B



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Quando possível deve-se usar os ensaios de dureza Vickers ou Knoop para este material devido a sua fragilidade. Por meio deles pode-se obter resultados mais precisos e menor probabilidade de propagação de trincas no corpo de prova.

4.3.2 Compressão Axial

O ensaio de compressão axial demonstrou um comportamento esperado. Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que a adição de resíduos de cinza tende a diminuir a resistência à compressão simples dos corpos de prova, assim quanto maior for a porcentagem de cinza, menor é a resistência mecânica.

Tabela 9 – Resultado da Resistência à Compressão Axial (MPa)

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Resistência à Compressão Axial (MPa)	50,24	40,97	23,67	22,06	1,63

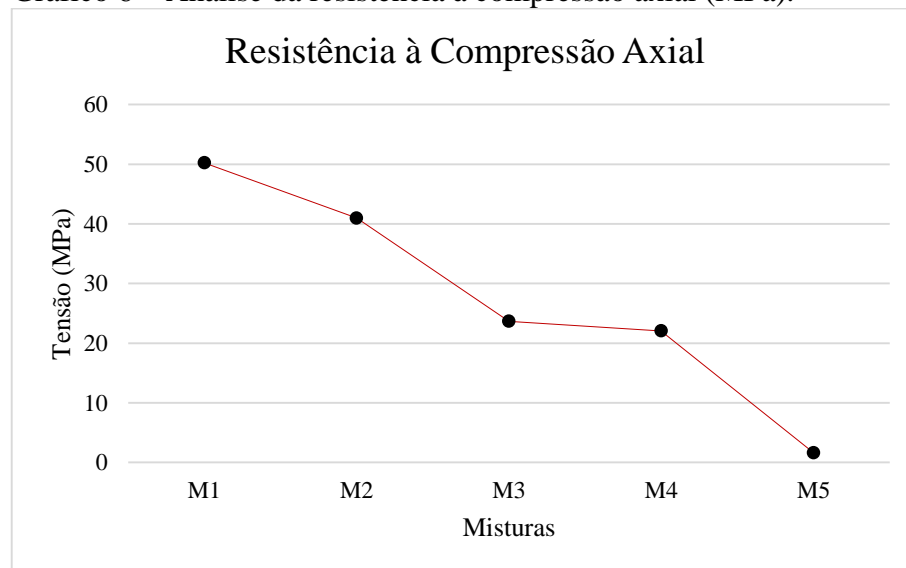
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Segundo Vitali (2008), a resistência à compressão uniaxial aumenta com a

diminuição da porosidade. Pelo que foi observado na microscopia óptica e no teste de perda de massa, a vitrificação ocorreu de forma menos significativa nas amostras com maior porcentagem de cinza, o que também contribuiu para a redução da resistência.

De acordo com valores especificados na norma ABNT NBR 7171 (1992), todas as amostras cerâmicas têm de atender o requisito mínimo de 1,0 MPa, independentemente da classificação. Apesar da redução progressiva da resistência, verifica-se que todos os corpos de prova apresentaram valores acima do recomendado pela norma. Isso se deve a alguns fatores que podem ter cotribuído para um melhor comportamento mecânico, tais como: bom empacotamento das partículas e maior densificação. Para melhor visualização do comportamento da resistência das peças, os dados experimentais são apresentados no Gráfico 6:

Gráfico 6 – Análise da resistência à compressão axial (MPa).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por meio da Figura 20, pode-se visualizar o padrão da propagação de trincas na fratura dos corpos de prova. Todas as peças apresentaram tipo de ruptura cônica.

Figura 20 – Amostra fraturada da mistura 4 após a compressão axial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.3.3 Compressão Diametral

O teste de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em cinco corpos de prova para cada mistura. Os resultados da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação das resistências das amostras são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado da Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)

Amostras	M1	M2	M3	M4	M5
Resistência à Compressão diametral (MPa)	1,34	1,11	1,25	2,35	0,66
Desvio Padrão (S)	0,04	0,27	0,21	0,72	0,07
Coeficiente de Variação (%)	0,03	0,24	0,17	0,30	0,11

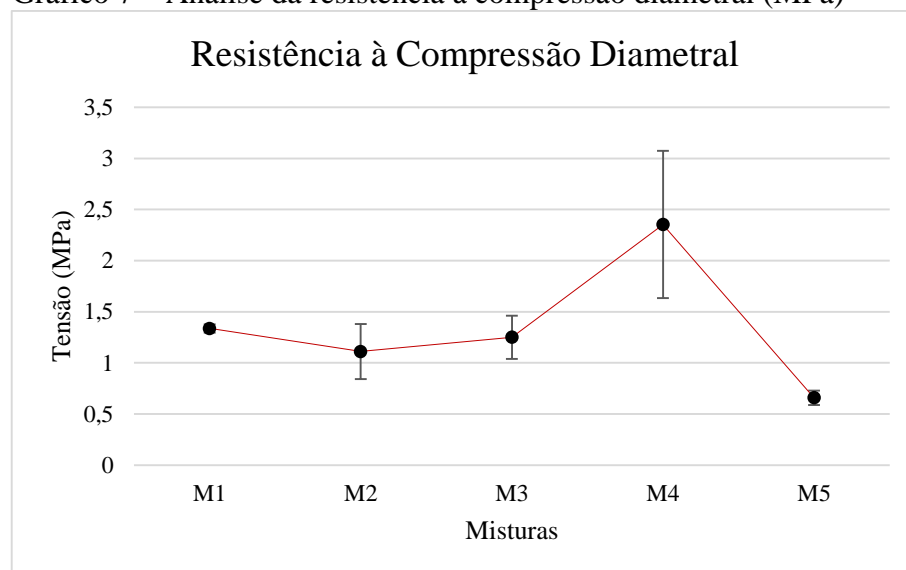
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nota-se que o comportamento da resistência neste ensaio apresentou resultados diferentes do ensaio de compressão axial. Durante os testes observou-se uma maior facilidade na propagação de trincas no sentido radial, o que pode ter sido provocado por um preenchimento irregular do molde, resultando em uma porosidade desigual, além de um grande acúmulo de tensões, as quais podem provocar defeitos ou até mesmo a quebra da peça (ARANTES *et al.*,

2001). Devido a isso, os valores de resistência mecânica à compressão diametral foram inferiores.

As misturas com 0%, 5% e 10% de cinza não apresentaram alterações significativas em seus valores de resistência. Porém a mistura M4, com 20% de cinza, atingiu o maior valor de resistência à compressão diametral. Isso se deve ao fato de que estes corpos de prova apresentaram menor probabilidade de formação de trincas na compactação e menor fragilidade pós sinterização, conseqüentemente possuem maior capacidade de absorção de energia antes da fratura. A mistura com 100% de cinza foi a que apresentou os menores valores de resistência à compressão diametral. Isso se deve a ausência de argila, que é o componente responsável pela promoção de resistência mecânica, e pelo fato de esses corpos apresentarem sinterização incompleta, necessitando de maiores temperaturas para que ocorra a vitrificação total, reduzindo a porosidade. Deve-se resaltar que todos os corpos com matriz argilosa apresentaram resistência superior ao valor mínimo (1,0 MPa) especificado na norma ABNT NBR 7171 (1992). O Gráfico 7 ilustra a curva para os resultados citados anteriormente.

Gráfico 7 – Análise da resistência à compressão diametral (MPa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O comportamento não padrão crescente ou decrescente dos resultados, além de altos valores de desvio padrão de algumas misturas se deu devido a não previsibilidade da formação de defeitos internos nas peças durante o processo de fabricação. A resistência mecânica de um produto depende de sua microestrutura e, principalmente, da distribuição e tamanho dos defeitos presentes. Os materiais cerâmicos apresentam uma série de defeitos que podem atuar como concentradores de tensão, determinando os pontos onde mais facilmente se inicia a fratura do

corpo.

Uma das características desse ensaio é a fácil visualização da fratura no plano vertical de simetria da peça, ou seja, no plano diametral, obtendo o formato de duas semicircunferências. Ao final do ensaio, todas as peças fraturaram verticalmente, como pode-se observar na Figura 21.

Figura 21 – Amostra fraturada da mistura 3 após a compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi estudada a possibilidade de incorporação de resíduos de cinza de madeira na formulação, propriedades e microestrutura de corpos argilosos para emprego em elementos estruturais de cerâmica vermelha, motivado pela necessidade de reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado dos rejeitos. Trabalhos anteriores pesquisados mostraram a viabilidade de utilização de materiais fundentes em materiais argilosos gerando produtos de qualidade. A partir dos testes e ensaios realizados, pode-se destacar algumas conclusões específicas.

Através das diferentes temperaturas de queima (850°C, 950°C e 1100°C) testadas nos corpos de prova com as cinco composições, verificou-se a necessidade de temperaturas mais elevadas para sinterizar as peças com maiores percentuais de cinza em sua composição. Dessa maneira, a vitrificação pode ocorrer de forma mais completa e a densificação pode ser melhorada.

O teste de retração linear mostrou uma tendência do aumento da retração a medida que se aumentou a concentração dos resíduos de cinza em relação a matriz cerâmica de argila e também com o aumento da temperatura. O maior valor de retração linear observado foi de 1,68% na mistura com 20% de cinza, mostrando que esta teve a melhor densificação e empacotamento das partículas. Neste teste também observou-se uma expansão do corpo de prova com 100% de cinza, mostrando que houve um aumento da porosidade devido a falta de preenchimento das cavidades pela fase líquida, constatando uma sinterização incompleta.

A partir dos resultados de absorção de água, notou-se uma diminuição da absorção de água com o acréscimo de cinzas à composição. Confirmando o que foi afirmado no teste de retração linear, a amostra M4, com 20% de cinza, foi a que apresentou o menor valor de absorção de água (3,10%). Isso mostra que essa mistura foi a que apresentou a melhor vitrificação, redução da porosidade e empacotamento das partículas.

Nos resultados das medições da massa específica Bulk constatou-se uma queda nessa propriedade com o acréscimo de cinzas à matriz argilosa. Isso pode ser explicado pela presença de elementos de agregados leves na composição das cinzas, que reduzem a densidade do material. A evaporação de componentes de matéria orgânica presentes nos resíduos também contribui para essa redução. Tal fato mostra que as peças fabricadas com 20% de cinza apresentam boas propriedades tecnológicas e ainda são mais leves.

A curva apresentada no teste de variação mássica mostrou que com o aumento da temperatura e com a substituição de parte da massa argilosa pelo resíduo de cinza, há o aumento

da perda de massa. Isso comprova o que foi observado nos resultados da massa específica, que quanto maior é a quantidade de cinzas, maior é a quantidade de gases de óxidos fundentes e matéria orgânica que evaporam com a elevação da temperatura.

As micrografias obtidas por meio da microscopia óptica demonstraram uma redução da porosidade após o processo de sinterização, principalmente nas amostras com 0%, 5% e 10% em peso de cinza. Porém, devido a dificuldade de obter imagens com resolução mais adequada, os resultados aqui apresentados devem ser analisados com ressalvas, podendo admitir que também houve redução da porosidade na amostra com 20% de cinza, de acordo com resultados obtidos nos testes de retração linear e absorção de água. A micrografia dessa composição apresentou aparente aumento da porosidade, mas este pode ter sido um comportamento particular de uma área específica, não sendo este o comportamento predominante na sinterização da peça como um todo. Comprovando o que foi constatado na retração linear e perda de massa, a amostra com 100% de cinza apresentou um aumento da porosidade após a queima devido a sinterização incompleta.

Com o ensaio de dureza Rockwell B, verificou-se que a incorporação dos agregados de cinza reduziu a dureza das peças. O corpo de prova de referência de argila pura apresentou dureza média de 43,10 HRB, enquanto o corpo de prova com 20% de cinza apresentou dureza média de 17,60 HRB, tendo uma redução de aproximadamente 40% em sua dureza em relação aos resultados obtidos com 0% de cinza. Apesar disso, pôde-se observar que com a diminuição da dureza houve também a redução da fragilidade, pois as peças com 20% de cinza não trincaram tão facilmente quanto as outras amostras enquanto o ensaio era realizado, mostrando que houve um aumento da tenacidade pela maior capacidade de absorver energia na deformação.

A curva para os resultados de resistência a compressão axial apresentou comportamento decrescente com a adição dos resíduos fundentes à matriz cerâmica argilosa. A peça de referência com 0% de cinza teve uma resistência mecânica de 50,24 MPa, enquanto a amostra com 20% do resíduo apresentou resistência de 22,06 MPa. Isso corresponde a uma redução de 43,90% na resistência mecânica das peças. No entanto, esses valores ainda são muito superiores ao critério mínimo de 1,0 MPa exigido na norma ABNT NBR 7171, constatando que é possível utilizar esta matéria-prima na formulação de materiais cerâmicos para construção civil.

No ensaio mecânico de compressão diametral pôde-se verificar que os corpos de prova com 20% em peso de cinza apresentaram resistência média de 2,35 MPa, sendo superior a todas as outras peças. Em comparação com o resultado de 1,34 MPa apresentado pelas peças

com 0% de cinza, houve um aumento de 57% na resistência mecânica, sendo também superior ao valor mínimo exigido pela norma.

Observando os resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas peças com 100% de cinza, constata-se que este não pode ser usado como matriz para utilização em peças estruturais de construção civil, não sendo adequado misturas com mais de 50% de material fundente em composição, pois estes não apresentaram consistência mecânica necessária, nem propriedades tecnológicas que justifiquem o seu uso.

Os resultados indicam que a incorporação deste tipo de cinza em cerâmica vermelha é promissora, podendo assim se tornar um destino ambientalmente correto para o resíduo. Este estudo mostra resultados que sugerem a incorporação de quantidades em torno de 20% em massa de cinzas na argila para não prejudicar o comportamento mecânico da cerâmica, bem como evitar o aparecimento de porosidade aberta excessiva.

De acordo com trabalhos existentes na literatura, como por exemplo em Kumar, Singh e Ramachandrarao (2001), o percentual máximo de cinzas pesadas que pode ser adicionado nos materiais cerâmicos sem que haja o comprometimento de suas propriedades físicas é de 25%. Portanto, através desse trabalho comprovou-se que é possível a adição dos percentuais analisados desse subproduto, que combinados com os percentuais das demais matérias-primas podem originar materiais cerâmicos com melhores propriedades físicas que alguns materiais desenvolvidos com as matérias-primas tradicionais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de desenvolver novos estudos, assim como propor a continuação ou aplicação do presente trabalho, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar o comportamento de amostras com maiores porcentagens de cinza em sua composição visando a possibilidade de reaproveitar ainda mais insumos que seriam descartados;
- Analisar a influência da granulometria dos pós usados sobre as propriedades físicas e mecânicas, e a possibilidade da utilização de outras granulometrias para fabricação das peças;
- Utilizar outro tipo de ensaio de dureza mais apropriado para materiais cerâmicos, como dureza Vickers ou Knoop, para facilitar a obtenção dos resultados;

- Analisar a composição química da argila e da cinza por meio de técnicas como fluorescência de raio - x ou difração de raio – x para conhecer a influência dos elementos químicos sobre o comportamento das peças pós sinterização;
- Aprofundar os estudos de sinterização como variação da temperatura e patamar de sinterização, visando otimizar a combinação de propriedades para obter um produto final com menos trincas e tensões internas;
- Realizar um estudo sobre a redução do impacto ambiental causado pelo uso do resíduo quando da sua utilização em escala industrial;
- Realizar um estudo sobre a viabilidade econômico-financeira da produção desse composto cerâmico na indústria de cerâmica vermelha.

REFERÊNCIAS

- ACCHAR, Wilson. **Materiais cerâmicos: ciência e tecnologia**. Natal: EDUFRN, 2000. 129 p.
- ANDRADE, C. **Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de eta e resíduos da produção de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- ANFACER. Associação nacional dos fabricantes de cerâmicas para revestimento. **Manual de assentamento de revestimento cerâmico**. Disponível em: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/manual-de-assentamento-de-revestimentos-cerc3a2micos.pdf>. Acesso em 27 mar. 2020.
- ARANTES, F. J. S., *et al.* O manchamento e a porosidade fechada de grês porcelanato. **Cerâmica Industrial**, jun. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508-1: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)**, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7171: Bloco cerâmico para alvenaria**, nov. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9623: Materiais de moldagem termofixos – Determinação da contração e pós contração em corpos de prova moldados por compressão e injeção em formas de barra**, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Classificação dos resíduos sólidos**, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRALISEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13006: Placas cerâmicas – Definições, classificação, características e marcação**, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio**, 2005.
- BARBIERI, L., CORRADI, A., LANCELLOTTI, T., e MANFREDINI, T. Use of municipal incinerator bottom ash as sitering promoter in industrial ceramics. **Waste management**, v. 22, p. 859 – 863, 2002.

BORLINI, M. C., *et al.* Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza. **Cerâmica**, vol. 51, n. 319, p. 192-196, 2005. ISSN 0366-6913. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000300004>. Acesso em: 23 mar. 2020.

BORLINI, M. C. *et al.* Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. **Matéria**, Rio de Janeiro, vol.11, n.4, 2006.

BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, M. J. Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó. **Holos**, v. 23, n. 3. 2007.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Uso direto e propriedades da madeira para geração de energia. **IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 52, jun. 1979.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora (LTC), 2008.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora (LTC), 2013.

CARDOSO, G. V. *et al.* **Adequação de metodologia amostral de madeira de Eucalyptus Saligna e Eucalyptus Globulus para determinação do teor de cinzas**. 2001. Trabalho apresentado no 34º Congresso Anual de Celulose e Papel, 2001, Santa Maria.

CASAGRANDE, M. C. **Efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico de massa cerâmica para pavimento**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CHIH-HUANG WENG; DENG-FONG LIN; PEN-CHI CHIANG. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in environmental research**, v. 7, p. 679-685, mai. 2003.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS [CEMIG]. 24º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG, ano base 2008. **Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas**. Belo Horizonte: 2009.

CONSEHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE [CONAMA]. Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986. **Diário Oficial da União** de 17 fev. 1986.

CÓRDOVA, M. V. **Diagnóstico da poluição atmosférica no setor de cerâmica estrutural do município de morro da fumaça - SC**. 2007. p 79. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, nov. 2007.

CRANMER, D. C., RICHERSON, D. W. **Mechanical Testing Methodology For Ceramic Design And Reliability**, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.

CRUZ, F. J. R. **Utilização de cinza de aveloz de fornos cerâmicos para produção de tijolos e telhas**. 2012. p. 78. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

DUTRA, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. 2007. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Civil e Ambiental) - Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2007.

ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE [ETENE]. **Informe Setorial Cerâmica Vermelha**. Fortaleza, out. 2010.

ESTRELA, S. P. **Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina**. 1996. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

ETIÉGNI, L. e CAMPBELL, A. G. Physical and chemical characteristics of Wood ash. **Bioresource technology**, v. 37, p. 173 – 178, 1991.

FARIAS, R. D. *et al.* Effects of Wastes from the Brewing Industry in Lightweight Aggregates Manufactured with Clay for Green Roofs. **Materials**, v. 10, n. 5, p. 527-544, 2017.

FONSECA, A. T. **Técnicas de processamento cerâmico**. Lisboa: Universidade Aberta, 2000. 554p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Belo Horizonte: **plano de ação para adequação ambiental e energética das indústrias de cerâmica vermelha no estado de Minas Gerais**, FEAM, jun. 2012.

GALDINO, E. A. G. S. **Caracterização mecânica e microestrutural de cerâmicas porosas obtidas a partir de diferentes aluminas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2000.

GUIMARÃES, C. A. O. **Avaliação do Ciclo de Queima nas Propriedades Tecnológicas de Cerâmica Vermelha**, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Ed. UNICAMP, 2003. p. 145 – 190.

KIMINAMI, R. H. G. A. **Curso de Especialização em Engenharia de Materiais – Processamento de Materiais Cerâmicos**, Apostila da Universidade Federal de São Carlos, 1994.

KNISS, C. T. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KUMAR, S., SINGH, K., RAMACHANDRARAO, P. Effects of fly ash additions on the mechanical and others properties of porcelainised stoneware tiles. **Journal of Materials Science**, v. 36, 2001.

LOPES JUNIOR, G. S. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com produtos da combustão do carvão mineral**. Monografia (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LUCENA, M. M. **Efeito da introdução de resíduo de cinzas de forno em massa para cerâmica estrutural**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15556>. Acesso em: 24 mar. 2020.

MACEDO, G. R. **Desenvolvimento de bioprocessos para agregação de valor a resíduos agroindustriais do Nordeste**, 2010. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/60ra/textos/SI-GoreteMacedo.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2020.

MARCOLIN, M. **Emissões e Remoções de Dióxido de Carbono por Mudança nos Estoques de Florestas Plantadas**. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito estufa do Ministério de Ciência e Tecnologia. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, p.35, 2006. Disponível em: <http://livroaberto.ibict.br/handle/1/807>. Acesso em: 17 mar. 2020.

MARTINS, M.; CASTELETTI, L. C.; BONAVINA, L. F.; FORTI, L. R. N. **Análise Microestrutural de Aços Inoxidáveis Altamente Ligados: Da Amostragem à Interpretação**. 2008. IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável- INOX 2008, 2008, São Paulo, p. 86-95.

MELQUÍADES JR. Olarias usam madeira de cajueiro. **Diário do nordeste**, 5 jul. 2012. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/regiao/olarias-usam-madeira-de-cajueiro-1.524331>. Acesso em: 18 mar. 2020.

MONTEIRO, C. T. S. **Incorporação de resíduo de cinza da queima de madeira na produção de tijolos cerâmicos ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2018.

MORA, N. D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. **Propriedades mecânicas dos materiais**. Apostila de Materiais Elétricos, cap. 10 – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2010. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap10.pdf>

MOREIRA, A. S. **Avaliação da utilização de resíduo gerado em sistemas úmidos de filtragem e particulados de fundição como matéria prima na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2006.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W.O. **Estatística básica**. São Paulo: Atual, 2002.

NASCIMENTO, Carmem Francisco. **Materiais Cerâmicos: Teoria e Aplicação**. Apostila. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão. São Luis, 2007.

NETO, A. R. **Impactos da indústria de cerâmica vermelha em Russas – CE**. Canal Ciência, Universidade de Brasília, 15 set. 2016. Disponível em: <http://www.canalciencia.ibict.br/ciencia-em-sintese1/ciencias-exatas-e-da-terra/326-impactos-da-industria-de-ceramica-vermelha-em-russas-ce>. Acesso em: 14 mar. 2020.

NOGUEIRA, R. E. F. Q. **Processing and Properties of Moulded Alumina Bodies**, Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Materials Technology, Brunel University, 1992.

PARANHOS, R. J. S. **Aproveitamento de resíduos de cinza da cana de açúcar em massas cerâmicas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

PETERSON, M. *et al.* **Estudo da Incorporação de Cinza Proveniente da Queima de Lenha de Eucalipto na Formulação de Massa de Cerâmica Vermelha de uma Indústria de Cerâmica Estrutural do Sul Catarinense**. Revista da Unifebe, n. 15.

PINHEIRO, B. C. A. **Processamento e caracterização de massas cerâmicas incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada para fabricação de grês porcelanato**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

PRADO, A. C. A., *et al.* Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 466-471, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000400013>. Acesso em: 22 mar. 2020.

PRADO, A. O.; BEDOYA, R. N.; MERCURY, J. M. R. **Influência da incorporação de chamote nas propriedades físico-mecânicas de materiais cerâmicos estruturais**. ENGEVISTA, v. 18, n.1, p. 158-173, 2016.

PROTÁSIO, T. P., *et al.* **Compactação de biomassa vegetal visando a produção de biocombustíveis sólidos**. Pesquisa Florestal Brasileira, Brazilian Journal of Forestry Research, v. 3, n. 68, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/288/227>. Acesso em: 18 mar. 2020.

QUINN, G. D. **Strength and Proof Testing, Engineered Material Handbook**, The Materials Information Society, Vol. 4, 585 – 609, 1991.

REED, J. S. **Principles of ceramic processing**. New York: John Wiley & Sons, Ed. 2, 1995. 565p.

RIBEIRO, S. V. **Reutilização de resíduo de cinza de madeira na produção de tijolo solo-cimento: formulação, propriedades e microestrutura**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade estadual do Norte do Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2017.

RICE, R. W. **Porosity of Ceramics**, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.

ROCHA, R. D. C. da; ZOREL JR, H. E.; LANDO, T. Utilização de planejamento experimental no estudo para imobilização de lodo galvânico em cerâmica vermelha para minimização de impactos ambientais. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633651964>. Acesso em: 15 mar. 2020.

RODRIGUES, A. C. *et al.* **Análise química por espectroscopia de raio-X por dispersão energia (EDS): adaptação aplicada à raízes de dendezeiro (*Eleais guineensis* JACQ.)** 2017. Trabalho apresentado no 21º Seminário de Iniciação Científica da Embrapa Amazônia Oriental, 2017, Belém.

SALES, K. A. **Incorporação de cinza de capim-elefante em cerâmica vermelha.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Produção) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2013.

SANTOS, L. L. **Adição de cinza de lenha de algaroba (*prosopis juliflora*) em massa cerâmica para revestimento.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** São Paulo: Edgard Buchner, 1989.

SILVA, A.G.P., ALVES JUNIOR, C.; A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. **Cerâmica**, vol. 44, n. 290, p. 225-232, 1998. ISSN 0366-6913. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69131998000600004>. Acesso em: 19 mar. 2020.

SILVA, A. M. F. D. **Incorporação de cinza de capim-elefante em cerâmica vermelha.** 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013.

SIMÕES, H. O. *et al.* **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação do grau de sinterização dos grãos em pelotas de minério de ferro através de análise automática de imagens.** set. 2012.

SOARES, R. A. L., NASCIMENTO, R. M. **O Processo Produtivo e a Qualidade do Produto Cerâmico Estrutural.** 2007. Trabalho apresentado no II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2007, João Pessoa.

SONG, M. S.; GUO, B.; GEERT, M.; SCHUTTER, D.; LI, X. Effect of Shale Addition on Properties of Sintered Coal Fly Ash. **Construction and Building Materials**, vol. 25, p. 617-622, fev. 2011.

SOUZA, M. A. **Estudo do processo de sinterização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar por forno resistivo e de vitrificação por combustão de gás natural assistido por tocha de plasma tipo arco deslizante.** Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais e Catalise) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2014.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos sólidos.** Tese (Concurso público para Livre-Docência em Física) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

TRIGUEIRO, A. Biomassa já responde por quase 10 % de toda a matriz energética do Brasil. **Jornal da Globo**, out. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2014/10/biomassa-ja-responde-por-quase-10-de-toda-matriz-energetica-do-brasil.html>. Acesso em: 16 mar. 2020.

VASCONCELOS, Y. Cinzas de valor: Produtos com alto valor agregado utilizam resíduo da queima do bagaço de cana. **Pesquisa FAPESP**. Ed. 174, ago. 2010.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2008.

WANG, Z. W. **Study on dynamics performance of biomass based ethyl levulinate blended fuels**. Henan Agricultural University, 2013.

WIEMES, L. **Utilização de lodo da indústria automobilística como componente de valor para fabricação de materiais cerâmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.