



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**LARA CRISTINA TEOBALDO DA SILVA**

**ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS FABRICADOS A  
PARTIR DA CINZA DA COMBUSTÃO DA LENHA**

**RUSSAS**  
**2021**

LARA CRISTINA TEOBALDO DA SILVA

ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS FABRICADOS A  
PARTIR DA CINZA DA COMBUSTÃO DA LENHA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel 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)

---

S581e Silva, Lara Cristina Teobaldo da.

Estudo da sinterização de produtos cerâmicos fabricados a partir da cinza da combustão da lenha / Lara Cristina Teobaldo da Silva. – 2021.

42 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. Cinzas. 2. Produto da combustão da lenha. 3. Metalurgia do pó. I. Título.

CDD 620.1

---

LARA CRISTINA TEOBALDO DA SILVA

TEMA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

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

À minha mãe, Silvana Teobaldo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por manter a minha saúde, física e mental, e sempre me mostrar os caminhos certos a seguir.

Aos meus pais, Enilson Cláudio (in memoriam) por me despertar a curiosidade por novas aventuras, e em especial a minha mãe Silvana Teobaldo, por não medir esforços para me proporcionar tudo que estava ao seu alcance.

À memória dos meus avós, Raimundo Francisco, Darcires Teobaldo e Antônio Barreto, por sempre exemplo de força, perseverança e amor.

À minha avó paterna, Irene Cláudio, por diante de todas as circunstâncias sempre se mostrar uma pessoa de garra.

Ao professor, orientador e amigo, Prof. Dr. Cândido Jorge Sousa Lobo, por toda a paciência e disposição em ajudar.

Aos demais professores da Engenharia mecânica pelos ensinamentos, em especial ao Prof. Me. Ramon Rudá Brito Medeiros, por sempre ter uma palavra amiga de encorajamento.

Aos meus irmãos, Emerson Teobaldo, Enilson Júnior e Eduardo Cláudio, pelo apoio e compreensão nos momentos mais árduos.

Ao meu amigo/irmão Ari Lucas, por muitas vezes ser o meu porto seguro e nunca me deixar desistir dos meus sonhos.

Ao meu namorado Luiz Fernando, por todo o apoio, motivação e acolhimento durante toda esta jornada.

Aos meus grandes amigos, Danielle Carvalho, Hívina Alves, Gabriel Bernardino, Marina Alves, Maria Alves, Jayanne Costa, Laís Carvalho, Dayanne Ribeiro, por todo o incentivo, e pela presença nos momentos difíceis e também nas inúmeras horas de risos.

Às minhas amigas de curso, Alinne Oliveira, Samille Kricia, Fernanda Santos e Michelle Nunes, pelo companheirismo nas inúmeras horas de estudo.

Ao Laboratório de caracterização dos materiais – Lacam, e em especial ao Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso, pelo auxílio na sinterização das amostras.

Ao Laboratório de extração de minerais e materiais – IFRN, na pessoa do Técnico Glauco Tavares Neto, pela disponibilidade para a sinterização das amostras

Aos técnicos do Laboratório de ensaios mecânicos, Marcos Ridiley e Bruno de Oliveira, pela ajuda na confecção das amostras.

## RESUMO

Pensando na preservação do meio ambiente, o descarte adequado de resíduos industriais tem se tornado base de estudos para formular técnicas que tenham como princípio o desenvolvimento sustentável. A utilização da lenha como combustível para fornos cerâmicos e olarias acarreta na produção de cinzas em grandes quantidades. Uma possibilidade para o uso dessas cinzas é a sua aplicação como matéria prima de produtos cerâmicos com ou sem a adição de outros materiais, visto que a sua composição química se assemelha a esse tipo de material, com o intuito de reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte indevido deste rejeito. Diante disto, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da produção de produtos cerâmicos, por metalurgia do pó, a partir do produto da combustão da lenha. Para a análise das propriedades físico mecânicas das amostras, foram usadas as ferramentas de : fluorescência de Raios – X, dureza Rockwell, variação mássica, retração linear e porosidade. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade do uso das cinzas como matéria prima de peças cerâmicas.

**Palavras-chave:** Cinzas. Produto da combustão da lenha. Metalurgia do pó.

## **ABSTRACT**

With a concern to preserving the environment, the proper disposal of industrial waste has become the basis for studies to formulate techniques based on sustainable development. The use of firewood as fuel for ceramic ovens and potteries leads to the production of ash in large quantities. One possibility for the use of these ashes is their application as a raw material for ceramic products with or without the addition of other materials, since their chemical composition is similar to this type of material, in order to reduce the environmental impacts caused by improper disposal of this waste. In view of this, this study aimed to evaluate the viability of the production of ceramic products, by powder metallurgy, from the product of firewood combustion. For the analysis of the physical and mechanical properties of the samples, the following tools were used: X-ray fluorescence, Rockwell hardness, mass variation, linear shrinkage and porosity. The results obtained proved the feasibility of using ash as a raw material for ceramic pieces.

Keywords: Ashes. Firewood combustion product. Powder metallurgy.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – APLICAÇÕES DA METALURGIA DO PÓ .....	18
FIGURA 2 – MOLDE METÁLICO PARA A COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	21
FIGURA 3 – FORNO MUFLA EDG .....	22
FIGURA 4 – FORNO MUFLA.....	23
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA NO TRABALHO ..	24
FIGURA 6 – PROCESSO DE PENEIRAMENTO A) CINZAS NO FINAL DO PROCESSO B) PENEIRA DE 200 MESH .....	25
FIGURA 7 – MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL EMIC .....	26
FIGURA 8 – CORPOS DE PROVA SOBRE UM TIJOLO CERÂMICO .....	26
FIGURA 9 – ARRANJO NO FORNO A) CORPOS DE PROVA DENTRO DO FORNO B) ESBOÇO DA PROGRAMAÇÃO DO FORNO .....	28
FIGURA 10 – DURÔMETRO ANALÓGICO .....	29
FIGURA 11 – MICROGRAFIAS OPTICAS COM AMPLIAÇÃO DE 500X A) CP3 (VERDE) B) CP7 (VERDE) C) CP3 (SINTERIZADO À 1100°C) D) CP7 (SINTERIZADO À 1100°C) .....	32
FIGURA 12 – GRÁFICO DAS DUREZAS MÉDIAS .....	33
FIGURA 13 – MATERIAL AGARRADO AO TIJOLO CERÂMICO.....	35

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRESSÕES DE COMPACTAÇÃO .....	27
TABELA 2 – RESULTADOS DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	31
TABELA 3 – RESULTADOS DE DUREZA ROCKWELL B .....	33
TABELA 4 – RESULTADOS DE VARIAÇÃO MÁSSICA PARA TEMPERATURA DE 1100°C .....	34
TABELA 5 – RESULTADOS DE VARIAÇÃO MÁSSICA PARA TEMPERATURA DE 1220°C .....	35
TABELA 6 – RESULTADOS DE RETRAÇÃO LINEAR PARA TEMPERATURA DE 1100°C .....	36
TABELA 7 – RESULTADOS DE RETRAÇÃO LINEAR PARA TEMPERATURA DE 1220°C .....	37
TABELA 8 – RESULTADOS DE POROSIDADE .....	38

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 CERÂMICA .....	15
2.2 PRODUTOS DA COMBUSTÃO DA LENHA – CINZAS .....	16
2.3 USO DE REJEITOS .....	16
2.4 METALURGIA DO PÓ .....	17
2.4.1 COMPACTAÇÃO .....	19
2.4.2 SINTERIZAÇÃO .....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	21
3.1.1 CINZAS .....	21
3.1.2 MOLDE .....	21
3.1.3 EQUIPAMENTOS .....	21
3.2 METODOLOGIA .....	24
3.2.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	25
3.2.1.1 PENEIRAMENTO .....	25
3.2.1.2 COMPACTAÇÃO POR PRENSAGEM .....	25
3.2.1.3 SINTERIZAÇÃO .....	27
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURAL .....	28
3.2.2.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X .....	28
3.2.2.2 MICROSCOPIA ÓTICA .....	28
3.2.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	29
3.2.3.1 DUREZA ROCKWELL B .....	29
3.2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	30
3.2.4.1 VARIAÇÃO MÁSSICA .....	30
3.2.4.2 RETRAÇÃO LINEAR .....	30
3.2.4.3 POROSIDADE .....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURAL .....	31

4.1.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIO X.....	31
4.1.2 MICROSCOPIA ÓTICA .....	31
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	32
4.2.1 DUREZA ROCKWELL B.....	32
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	34
4.3.1 VARIAÇÃO MÁSSICA .....	34
4.3.2 RETRAÇÃO LINEAR.....	36
4.3.3 POROSIDADE .....	38
5 CONCLUSÃO.....	39
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	40
REFERÊNCIAS.....	41

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil conta com aproximadamente 6.903 cerâmicas e olarias de acordo com a ANICER - Associação Nacional da Indústria Cerâmica, onde a principal fonte de energia destas empresas é proveniente da combustão da lenha, na qual a queima deste material gera como resíduo a cinza. Foelkel (2011) afirma que o teor de cinzas produzidas durante o processo de queima pode atingir até 8% do peso seco da lenha. Em razão da quantidade de lenha utilizada nas indústrias, estas cinzas correspondem a uma porção significativa de resíduos gerados.

O descarte indevido destas cinzas ocasiona danos ao meio ambiente e a população exposta, pois sua granulometria fina facilita o transporte das partículas pela atmosfera, o que pode gerar problemas respiratórios graves. Uma alternativa para reduzir esses danos seria a inclusão das cinzas como matéria prima em produtos cerâmicos, que são materiais não metálicos obtidos pela ligação química de um ou mais elementos, onde são usados elevadas quantidades de materiais não renováveis.

Uma forma de implantação desse resíduo em materiais cerâmicos é através da metalurgia do pó, que consiste na compactação dos pós a uma dada pressão e geometria desejada e em sequência a sinterização dos mesmos, mediante aquecimento na peça à uma temperatura inferior ao ponto de fusão do principal elemento do pó. O uso desta técnica garante uma economia de material, controle dimensional, uma redução no impacto ambiental, e possibilidade de obtenção de peças mais complexas.

Deste modo, o presente trabalho tem como finalidade analisar o comportamento das cinzas mediante sua utilização para a fabricação de peças cerâmicas, por meio da análise das características físicas e a propriedade mecânica de dureza após o processo de sinterização dos corpos de prova, tendo como principal objetivo diminuir o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado destas cinzas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Caracterizar produtos cerâmicos, feitos por metalurgia do pó, a partir da combustão da lenha e avaliar o aproveitamento do resíduo como uma alternativa sustentável.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estabelecer um comparativo entre amostras com variadas pressões de compactação, e por meio de ensaios físico mecânicos avaliar os efeitos causados devido a essa variação;
- Estabelecer um comparativo entre amostras com variadas temperaturas de sinterização, e por meio de ensaios físico mecânicos avaliar os efeitos causados devido a essa variação;
- Determinar a pressão de compactação que confere maior densidade ao corpo verde;
- Determinar a temperatura de sinterização que confere maior densidade ao corpo de prova;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cerâmica

Para Callister Jr. e Rethwisch (2012), as cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos, na maioria dos casos, óxidos, nitretos e carbonetos. Alguns materiais cerâmicos comuns incluem alumina, sílica, carboneto de silício, nitreto de silício e até mesmo alguns materiais são compostos de minerais de argila, cimento e vidro, nas denominadas cerâmicas tradicionais. Quanto às propriedades mecânicas, os materiais cerâmicos são parcialmente rígidos e resistentes - os valores de rigidez e resistência são semelhantes aos dos metais. Tradicionalmente, as cerâmicas exibem fragilidade alta (falta de ductilidade) e são bastante propensos a fratura.

Segundo Kieckbush e Lopes (2005) os materiais cerâmicos podem se classificar em:

- Cerâmica vermelha: Inclui materiais avermelhados usados na construção civil, como tijolos, telhas e objetos de decoração.
- Materiais de revestimento: São materiais, que na forma de placas, empregados na construção civil para revestimentos como azulejos, porcelanatos e lajotas.
- Cerâmica branca: Inclui os materiais de coloração branca, tais como louças e cerâmica artística.
- Materiais refratários: São aqueles que têm como intuito suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas.
- Vidro, cimento e cal: São indispensáveis segmentos cerâmicos e que, por possuírem características próprias, são muitas vezes tratados separadamente da cerâmica.
- Cerâmica avançada: Engloba produtos de utilização intensa, com aplicação em naves espaciais, usinas nucleares, aparelhos de som, brinquedos, dentre outros.

## 2.2 Produto da combustão da lenha – Cinzas

O combustível frequentemente usado na indústria de cerâmica vermelha é a lenha, sendo os tipos de lenha mais comuns a poda do cajueiro e o eucalipto. Devido ao uso da lenha, a indústria cerâmica também se tornou uma grande produtora de cinzas. As cinzas são uma espécie de resíduo, podendo conter até mesmo metais, que são capazes de acarretar a poluição do ar e ser causador de sérios problemas respiratórios na população afetada. Uma possibilidade para diminuir o impacto ambiental provocado pela liberação desse resíduo é a sua introdução em artigos cerâmicos (BORLINI et al., 2005).

A poda do cajueiro e o eucalipto quando queimadas detêm determinado teor de minerais na sua formação. Com relação à poda do cajueiro, o teor de cinzas é bastante baixo (cerca de 0,3 a 0,6% com base no seu peso seco), já o eucalipto os teores de cinzas é bem mais significativo (de 3 a 8% com base no seu peso seco). Existem também contaminantes como terra/areia e pedras, que podem elevar o teor de cinzas juntamente com a quantidade de combustível queimado. A composição das cinzas varia de acordo com a qualidade da lenha até as formas como os fornos são operados (FOELKEL, 2011).

Para John et al. (2003) seja qual for a cinza vegetal, que tenha como componente principal a sílica e que possa ser produzida na condição amorfa e granulometria apropriada, pode ser usada como aditivo mineral quimicamente ativo, cuja reatividade depende dos componentes químicos relacionados ao insumo que originou a cinza, pelo processo ao qual ela foi gerada e pelo solo.

É preciso ressaltar que o equipamento usado na queima, a duração desta e a temperatura que foi atingida estão associadas com a morfologia da cinza, amorfa ou cristalina, assim como a distribuição granulométrica devida, aspectos esses que são bastante significativos para maximizar os benefícios, como resistência mecânica e durabilidade (VESKE, 2012).

## 2.3 Uso de rejeitos

Em todo o mundo, peças cerâmicas obtidas pela adição de resíduos sólidos, envolvendo cinzas, têm aumentado expressivamente. O motivo para este avanço é encontrar um método estável para a condição final das cinzas, a fim de impossibilitar



a poluição do meio ambiente com o descarte incorreto deste material. Várias técnicas têm sido estudadas, como a obtenção de vitrocerâmicas por meio de cinzas puras na composição da massa da cerâmica tradicional. Em determinados casos, a finalidade é apenas estabilizar os poluentes inclusos nas cinzas, e não obter um maior valor agregado ao produto final (BORLINI et al., 2005).

Júnior (2019) estudou a formulação e caracterização de peças cerâmicas fabricadas a partir dos produtos da combustão do carvão mineral, no qual concluiu que peças com apenas os produtos da combustão do carvão possuem boas propriedades físico mecânicas, sem ser necessário a adição de outros resíduos.

Peterson et al. (2016) estudou a incorporação da cinza proveniente da queima da lenha do eucalipto na formulação de massa na cerâmica vermelha, e afirmou a viabilidade do uso da cinza do eucalipto como aditivo na massa destinada a cerâmica industrial, sendo necessário apenas uma manutenção nas características almejadas no produto final.

## **2.4 Metalurgia do pó**

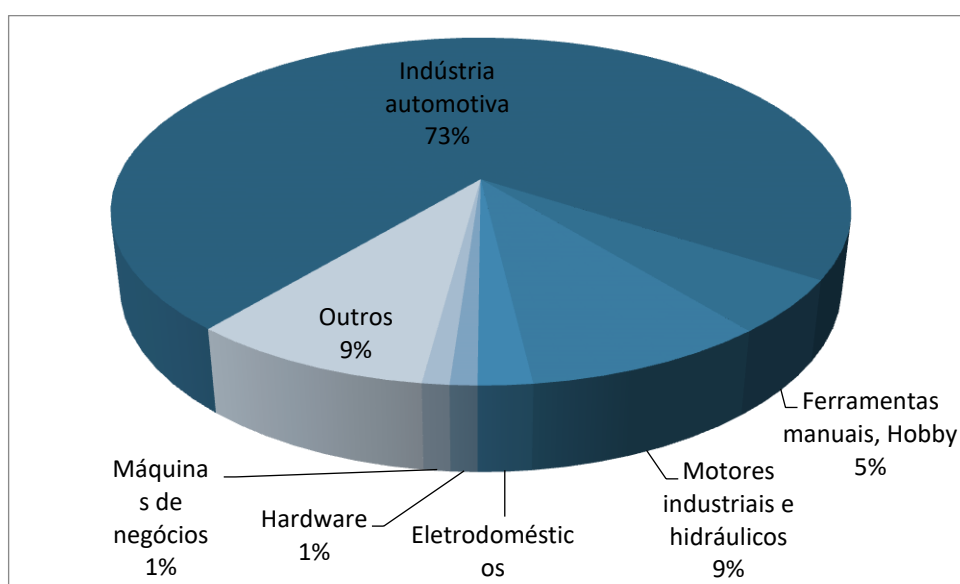
A metalurgia do pó é um processo utilizado para fabricar compostos metálicos ou cerâmicos por meio da geração do pó e de sua solidificação por meio da pressão e calor ao qual é submetido. Os estágios de preparação de um material por esse processo englobam, dentre outras, a obtenção e moagem do pó, como também a conformação e sinterização da peça (BRAGA; FERREIRA; CAIRO, 2006).

Segundo Panda, Jancik e Pandová (2016), as aplicações para componentes de metalurgia do pó se dividem em dois grupos principais.

- Primeiro são os componentes que são difíceis de fabricar por qualquer outro método, como os feitos de tungstênio, molibdênio ou carboneto de tungstênio. Além disso, rolamentos porosos, filtros e muitos tipos de componentes magnéticos duros e moles são fabricados exclusivamente usando MP.
- O segundo grupo consiste em componentes da metalurgia do pó que oferecem uma alternativa econômica aos componentes usinados, peças fundidas e forjadas. Placas de embreagem automotiva, bielas, árvores de cames e porta engrenagens planetárias são alguns exemplos.

As peças fabricadas pela metalurgia do pó são usadas em uma variedade de mercados, e, à medida que os estudos mostram cada vez mais sobre o desempenho superior, economia de custos e tolerâncias incomparáveis que o processo de metalurgia do pó pode oferecer, a tendência indica que os componentes de MP continuam a se expandir em mercados anteriormente inexplorados. (PANDA; JANCIK; PANDOVÁ, 2016). O gráfico da Figura 1 representa as principais aplicações da metalurgia do pó.

Figura 1- Aplicações da Metalurgia do pó



Fonte: Adaptado de Panda, Jancik e Pandová (2016)

O tamanho, a distribuição granulométrica, e a forma da partícula fazem parte das características mais importantes para o projeto de peças sinterizadas. Os inúmeros métodos de obtenção dos pós levam a diversos tamanhos, distribuições, formatos e outras propriedades, se tornando fundamental o conhecimento do processo de obtenção e caracterização dos pós para se alcançar uma peça sinterizada que atenda as condições de engenharia (SCHAERER, 2006).

Para Schaeerer (2006), o diâmetro médio das partículas interfere nas características do produto final. Partículas de maior diâmetro proporcionam menor compactação, ao mesmo tempo em que as de menor diâmetro admitem uma superfície com menor rugosidade.

### **2.4.1 Compactação**

Para Shaeffer (2016), a compactação é a aplicação de pressão, uniaxial ou biaxial, em temperatura ambiente ou a quente. Em algumas situações onde é necessário uma maior densidade das peças e uma melhoria nas propriedades mecânicas, se deve aplicar uma pressão de compactação mais elevada.

Durante o primeiro estágio da compactação os pós são aglomerados para eliminar os vãos formados por meio da junção das partículas. O segundo estágio abrange a deformação plástica que as partículas são submetidas, a dimensão dessa deformação varia de acordo com a ductilidade do pó, dentre outras características. A habilidade do pó de se deformar plasticamente está diretamente relacionada a sua compressibilidade, sendo mais acentuada em materiais dúcteis. No seguinte estágio, com as partículas já encruadas devido às etapas anteriores, o pó se quebra em fragmentos menores (MORO; AURAS, 2007).

### **2.4.2 Sinterização**

O corpo verde, ou seja, antes do processo de sinterização, ainda dentro do molde ou fora dele, é aquecido a elevadas temperaturas, mas que se mantém abaixo da temperatura de fusão do material. Da mesma forma, são monitoradas a taxa de aquecimento e resfriamento, tempo de queima e a atmosfera em que ocorre a sinterização. A taxa de aquecimento aperfeiçoa o processo de coesão da peça compactada para estipulada temperatura, em contrapartida, temperaturas muito próximas às de fusão do material, causam o ganho máximo de força coesiva em um período curto de tempo (MORO; AURAS, 2007).

A sinterização se divide basicamente em dois segmentos: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. O necessário para o acontecimento da sinterização é o decréscimo da energia livre superficial presente no agregado de partículas. Este decréscimo de energia acontece devido à ausência da interface material/poro, que é modificado para a interface material/material no momento em que a porosidade some. Os dois modelos de sinterização são aptos à aderir densidade parcial ou total a peça, sendo a sinterização por fase sólida mais propícia a obtenção de uma porosidade controlada, ao mesmo tempo que a sinterização por

fase líquida garante o fechamento total dos poros com maior facilidade (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

No decorrer da sinterização ocorre o fechamento dos poros da peça, por meio do deslocamento do material para o preenchimento dos espaços vazios. É exatamente a forma como estas partículas se deslocam que apontam o tipo de sinterização realizada. Desta perspectiva, o movimento das partículas se diferencia imensamente na presença ou não de um líquido na composição do material (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

Habitualmente a temperatura empregada na sinterização é na ordem de  $\frac{3}{4}$  da temperatura de fusão do material em questão, na qual a peça deve permanecer durante determinado tempo neste patamar de temperatura (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais utilizados

#### 3.1.1 Cinzas

O material usado no presente estudo é resultante da combustão da lenha, usada como combustível em fornos cerâmicos. As cinzas foram extraídas de uma cerâmica localizada em Russas, Ceará.

#### 3.1.2 Molde

Para compactar o material e fabricar os corpos de prova, foi utilizado um molde cilíndrico de 25 mm de diâmetro da cavidade de compactação, composto por um pistão, matriz e base, conforme Figura 2

Figura 2 – Molde metálico para a compactação dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 3.1.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados podem ser classificados basicamente em: equipamentos para confecção dos corpos de prova, equipamentos para sinterização, equipamentos para a realização de ensaios.

**a) Equipamentos para confecção dos corpos de prova**

- Máquina universal de ensaio, modelo Emic.
- Molde cilíndrico.

**b) Equipamentos para sinterização**

- Para a sinterização a 1100°C foi utilizado um forno tipo mufla da marca EDG equipamentos, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Forno mufla EDG



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Para a sinterização a 1220°C foi utilizado um forno do tipo mufla semiautomático, conforme Figura 4.

Figura 4 – Forno mufla



Fonte: Elaborada pelo autor.

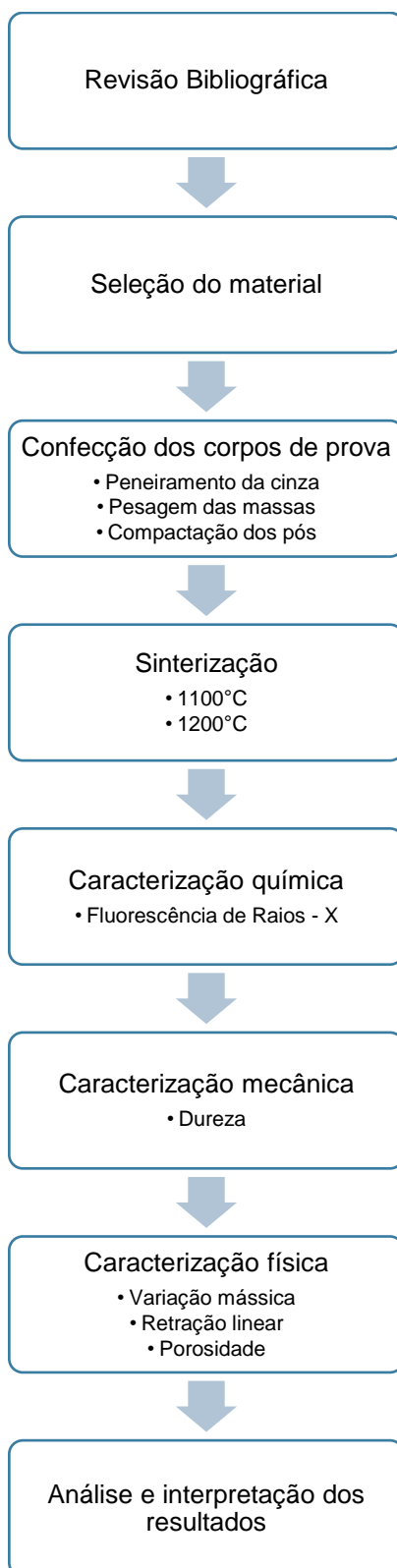
**c) Equipamentos para a realização de ensaios**

- Balança eletrônica de precisão;
- Durômetro analógico de bancada Rockwell;
- Espectrômetro por fluorescência de raios X, modelo Axios Advanced PANalytical
- Paquímetro analógico.

### 3.2 Metodologia

A Figura 5 apresenta um fluxograma com uma síntese da metodologia utilizada no trabalho.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia empregada no trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor



### 3.2.1 Confeção dos corpos de prova

#### 3.2.1.1 Peneiramento

Com o material já definido, foi realizada a etapa de peneiramento, na qual as cinzas passaram por peneiras (Figura 6) de telas até que fossem atingidas dimensões inferiores a  $75\ \mu\text{m}$  (ou 200 mesh) que é a granulometria pretendida para o trabalho nas etapas posteriores.

Figura 6 – Peneiras a) Cinzas no final do processo. b) Peneira de 200 mesh



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.2.1.2 Compactação por prensagem

De início, foi definido que para a realização deste trabalho o estudo seria com base na variação das pressões de compactação e preservação da massa. Os corpos de prova foram compactados em uma máquina de ensaio universal Emic, do Laboratório de ensaios mecânicos da UFC- Campus Russas, com capacidade de 300kN (Figura 7), a uma velocidade de 0,2 mm/s para que não houvesse travamento do molde.

Figura 7 – Máquina de ensaio universal Emic



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o preenchimento dos moldes, foi definido experimentalmente o uso de aproximadamente 10 g de cinzas, tendo sido utilizada uma balança eletrônica de precisão para a pesagem do material em questão. Com o intuito de diminuir o atrito entre o pistão e as paredes da matriz, foi utilizado um óleo lubrificante no pistão. A Figura 8 apresenta as amostras compactadas a verde.

Figura 8 – Corpos de prova sobre um tijolo cerâmico



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram produzidos 16 corpos de prova (CP), com a aplicação das cargas de 20 kN, 40 kN, 60 kN e 80 kN, o que é equivalente a pressões de 40,74 MPa, 81,49

MPa, 122,23 MPa e 162,97 MPa, respectivamente. A distribuição está de acordo com a Tabela 1. O critério de seleção das cargas usadas foi definido pensando a preservação do molde utilizado.

Tabela 1 – Pressões de compactação

Pressões de compactação			
40,74 Mpa	81,49 MPa	122,23 MPa	162,97 Mpa
CP1 – CP2	CP3 – CP4	CP5 - CP16	CP7 – CP8
CP9 – CP10	CP11 – CP12	CP13 – CP14	CP15 – CP16

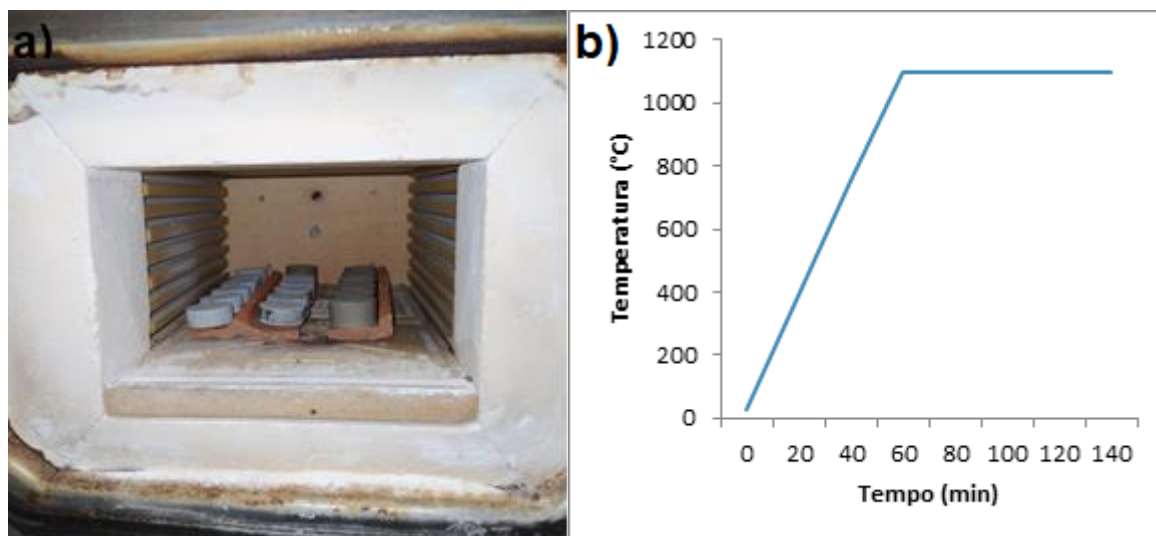
Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova foram retirados cuidadosamente dos moldes, e em seguida foram pesados com o intuito de realizar uma comparação entre as massas antes e depois da sinterização, logo após, os mesmos foram armazenados em recipientes de plástico e fechados, até a etapa de sinterização.

### 3.2.1.2 Sinterização

A sinterização das amostras CP1-CP8 foi realizada em um forno do tipo mufla, cedido pelo LACAM do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC. Os corpos verdes foram identificados e dispostos sobre um tijolo cerâmico e em seguida levados ao forno, onde permaneceram por 120 minutos com a temperatura de 1100°C com uma taxa de aquecimento de 20°C/min, conforme Figura 9.

Figura 9 – Arranjo do forno. a) Corpos de prova dentro do forno. b) Esboço da programação do forno



Fonte: Elaborada pelo autor

Os demais corpos de prova, CP9-CP16, foram sinterizados em um forno do tipo mufla semiautomático, do Laboratório de extração de minerais e materiais – IFRN, a uma temperatura de 1220°C durante 120 minutos. Após o processo de sinterização, o resfriamento dos corpos de prova ocorreu no próprio forno até a temperatura ambiente. Logo após, as amostras foram separadas, analisadas, pesadas novamente e devidamente armazenadas.

### 3.2.2 Caracterização química e microestrutural

#### 3.2.2.1 Fluorescência de Raios – X

A fluorescência de Raios – X possui a capacidade de identificar e quantificar as concentrações dos elementos químicos presentes no material analisado, através da fluorescência distinta que cada átomo emite. Foi utilizado um espectrômetro por fluorescência de raios X, modelo Axios Advanced PANalytical, o processo foi efetuado à temperatura de 1.000°C por 30 minutos.

#### 3.2.2.2 Microscopia

Com o intuito de observar a microestrutura dos corpos de prova, foi realizada uma análise microscópica a partir de um microscópio metalúrgico compacto

invertido modelo GX41 do Laboratório de microscopia e caracterização de materiais – UFC.

### 3.2.3 Caracterização mecânica

#### 3.2.3.1 Dureza Rockwell B

A dureza de um material está relacionada a sua resistência à deformação plástica. Quando se pretende obter a grandeza dessa propriedade de forma pontual a maneira mais empregada é a Dureza Rockwell, por ser de fácil execução e não requerer maiores habilidades do operador. Este método consiste em determinar a diferença de profundidade da penetração decorrente da aplicação de uma força inicial e uma carga principal maior. Foi utilizado um durômetro analógico de bancada Rockwell do Laboratório de extração de minerais e materiais – IFRN, conforme Figura 10.

Figura 10 – Durômetro analógico



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2.4 Caracterização física

#### 3.2.4.1 Variação mássica

A variação mássica percentual dos corpos de prova, baseada nas variações de massa geradas pelas reações químicas que acontecem no interior das amostras no decorrer do processo de sinterização, é dada pela Equação 1

$$\Delta m(\%) = \left( \frac{m_s - m_o}{m_o} \right) \times 100\% \quad (1)$$

onde  $m_s$  é a massa da amostra sinterizada e  $m_o$  é a massa do corpo de prova verde.

#### 3.2.4.2 Retração linear

O ensaio de retração linear possibilita analisar a variação das dimensões das amostras após o processo de sinterização. Ainda que essa retração se manifeste de forma tridimensional, a mesma é medida linearmente de acordo com a norma ABNT NBR 9623:1986 que determina a retração pela Equação 2

$$\Delta L(\%) = \left( \frac{L_s - L_o}{L_o} \right) \times 100\% \quad (2)$$

onde  $L_s$  é o comprimento da amostra sinterizada e  $L_o$  é o comprimento do corpo de prova verde. Para a medição desses comprimentos, foi utilizado um paquímetro manual com precisão de 0,05 mm.

#### 3.2.4.3 Porosidade (%Poros)

A porosidade é uma característica significativa para a análise de elementos sinterizados, pois quanto menor a porosidade (vazios) na amostra sinterizada, maior a sua densificação durante o processo de queima.

De acordo com Lobo (2014), o cálculo da porosidade se dá através da equação

$$\%Poros = \left[ 1 - \left( \frac{D_m}{D_t} \right) \right] \times 100\% \quad (3)$$

onde  $D_m$  é a densidade medida e  $D_t$  é a densidade teórica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização química

#### 4.1.1 Fluorescência de Raios – X

O recurso quantitativo de fluorescência de raios – X permitiu uma análise aprofundada da composição química do material em estudo, os resultados estão expressos na Tabela 2

Tabela 2 – Resultados de Fluorescência de Raios – X

Elemento	% em massa
SiO <sub>2</sub>	58,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,8
CaO	9,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3
Outros	1

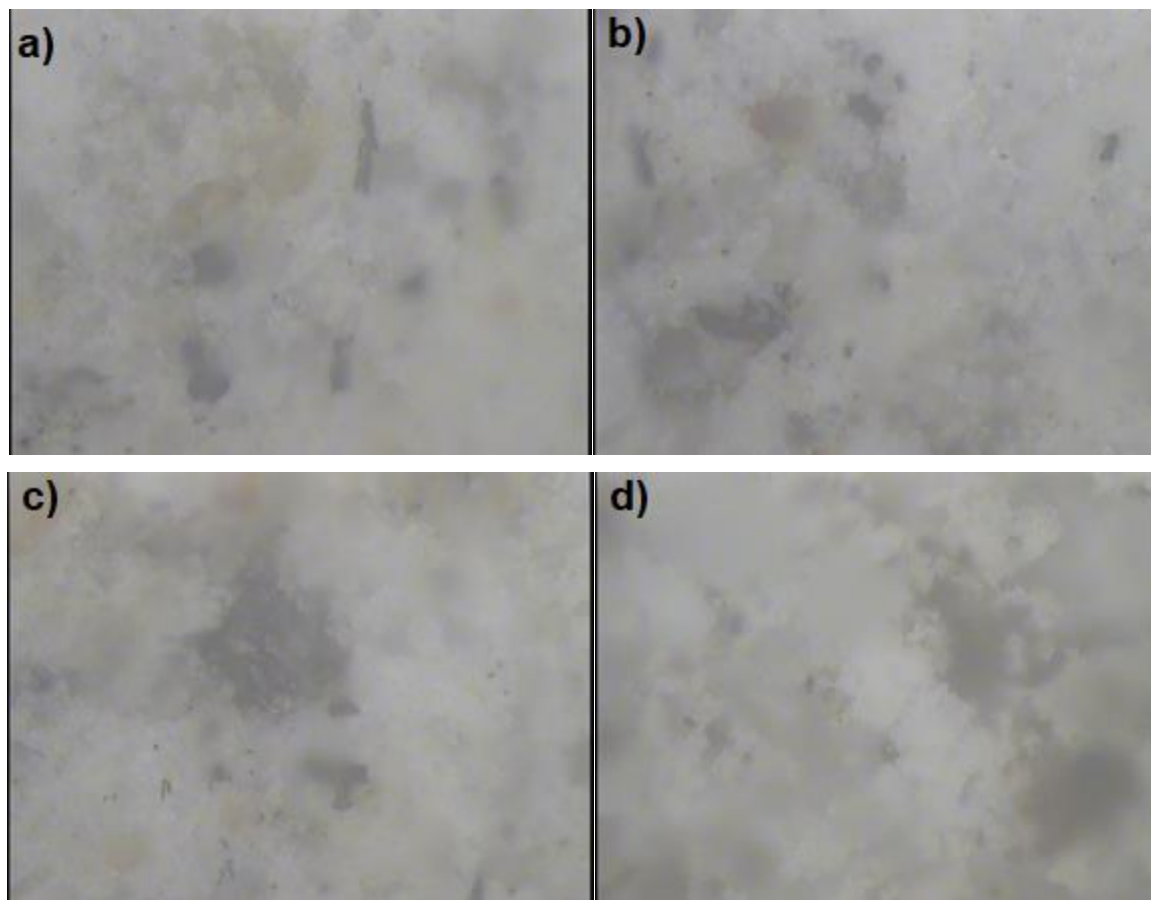
Fonte: Elaborada pelo autor

É possível observar que os principais elementos presentes na cinza são a Sílica (SiO<sub>2</sub>) com 58,6% e a Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com 27,8%, que são os componentes fundamentais que constituem um material cerâmico. Com isso, se reforça a possibilidade de utilização deste material para aplicações cerâmicas.

#### 4.1.2 Microscopia ótica

A técnica de microscopia foi realizada somente nas peças verdes e nas sinterizadas à temperatura de 1100°C, com a finalidade de observar o comportamento dos poros antes e após a sinterização. A Figura 10 mostra as micrografias óticas das amostras compactadas a 81,49 MPa e 162,97 MPa.

Figura 11 – Micrografias ópticas com ampliação de 500x a) CP3 (verde) b) CP7 (verde) c) CP3 (sinterizado à 1100°C) d) CP7 (sinterizado à 1100°C)



Fonte: Elaborada pelo autor

Por meio das imagens, é possível observar um aumento no tamanho dos poros nas amostras que passaram pelo processo de sinterização à uma temperatura de 1100°C. Essa dilatação dos poros está relacionada à emissão de gases provenientes das reações químicas que ocorrem no interior da peça, como os corpos de prova não foram completamente sinterizados à essa temperatura, não foi possível a eliminação de todos os gases e com isso a diminuição no tamanho dos poros.

## 4.2 Caracterização mecânica

### 4.2.1 Dureza Rockwell B

O ensaio de dureza foi realizado somente nas amostras sinterizadas à temperatura de 1220°C, pois as demais não apresentaram densidade suficiente para



a realização do ensaio. Os valores obtidos pelas perfurações estão expressos na Tabela 3.

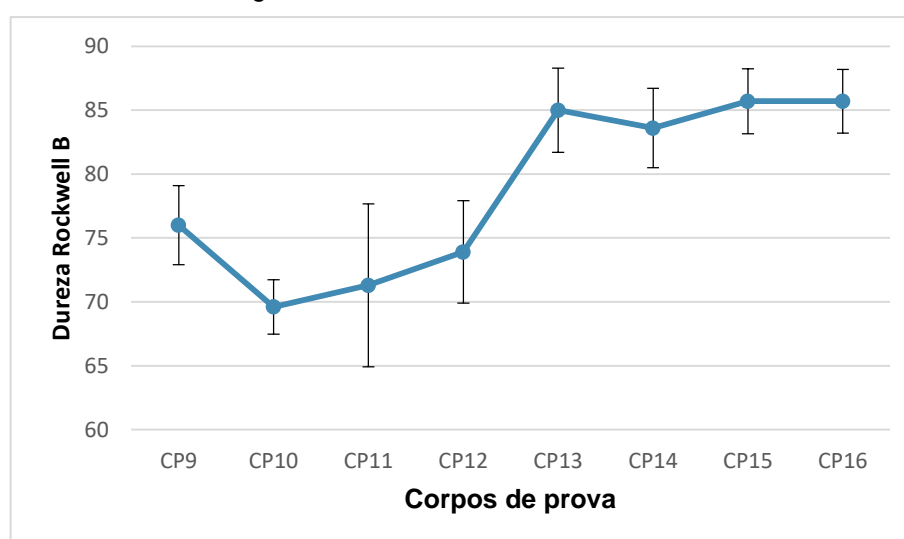
Tabela 3 – Resultados de Dureza Rockwell B

Perfurações	Corpos de prova							
	CP9	CP10	CP11	CP12	CP13	CP14	CP15	CP16
HR1	75	69	70	76	82	83	85	88
HR2	77	67	75	77	85	82	86	87
HR3	78	66	75	76	88	80	88	88
HR4	72	69	76	65	87	83	84	81
HR5	73	72	77	78	88	84	82	84
HR6	78	71	63	77	84	90	89	85
HR7	77	70	60	72	85	83	88	89
HR8	79	73	65	70	81	88	88	87
HR9	80	69	77	73	80	82	85	84
HR10	71	70	75	75	90	81	82	84
Média	76	70	71	74	85	84	86	86
Desvio padrão	3	2	6	4	3	3	3	2

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 12 mostra um gráfico das médias de perfurações de cada corpo de prova e seus respectivos desvios padrão.

Figura 12 – Gráfico das durezas médias



Fonte: Elaborada pelo autor

Com os valores obtidos, pode-se observar que ocorre um aumento da dureza de acordo com o aumento da pressão de compactação dos corpos de prova, onde os corpos de prova que foram compactados a uma pressão de 40,74 MPa chegam a possuir média de 70HRB e os compactados a pressão de 162,97 MPa possuem média de 86HRB, com desvio padrão de apenas 2 em ambos os casos. Esse aumento está relacionado ao do número de poros da peça, quanto menor a quantidade de poros, melhor a propriedade de dureza.

### 4.3 Caracterização física

#### 4.3.1 Variação mássica

A variação entre as massas dos corpos de prova, antes e depois do procedimento de sinterização, estão expressas nas Tabelas 4 e 5, de acordo com a Equação 1.

Tabela 4 – Resultados de Variação mássica para temperatura de 1100°C

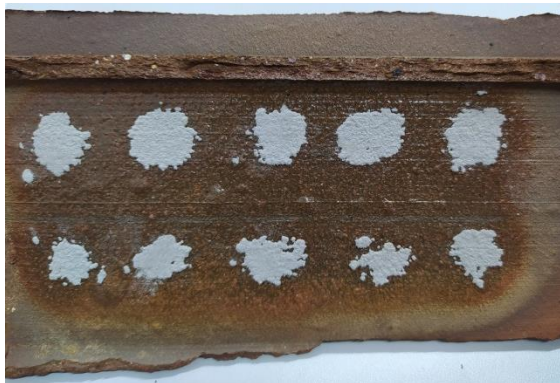
Amostras	$M_o$ (g)	$M_s$ (g)	Perca de massa (g)	Variação mássica
CP1	10,018	8,189	1,829	-18,26%
CP2	10,021	8,189	1,832	-18,28%
CP3	10,010	8,163	1,847	-18,45%
CP4	10,029	8,255	1,774	-17,69%
CP5	10,032	8,278	1,754	-17,48%
CP6	10,024	8,238	1,786	-17,82%
CP7	10,028	8,270	1,758	-17,53%
CP8	10,025	8,231	1,794	-17,90%
Média	10,023	8,227	1,797	-17,93%
Desvio padrão	0,007	0,042	0,035	0,004

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando a Tabela 4 pode-se constatar que a média de perca de massa foi de 1,797 g, o que representa uma variação mássica média de - 17,93 % com o desvio padrão de 0,004. A variação de massa apresentada nestes corpos do prova

está relacionada com a não sinterização dos mesmos, pois as cinzas continuaram se desprendendo com facilidade, o que acarretou uma perda de massa significativa durante o transporte do material. Além disso, durante o processo de sinterização o tijolo cerâmico em contato com os corpos de prova se fundiu, o que acarretou em uma perda de material, conforme Figura 13.

Figura 13 – Material agarrado ao tijolo cerâmico



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para os corpos de prova sinterizados a temperatura de 1220°C.

Tabela 5 – Resultados de Variação mássica para temperatura de 1220°C

Amostras	$M_o$ (g)	$M_s$ (g)	Perca de massa (g)	Variação mássica
CP9	10,018	9,950	0,068	-0,68%
CP10	9,992	9,900	0,092	-0,92%
CP11	9,978	9,900	0,078	-0,78%
CP12	10,037	10,000	0,037	-0,37%
CP13	9,992	9,950	0,042	-0,42%
CP14	10,000	10,000	0,000	0,00%
CP15	10,000	9,990	0,010	-0,10%
CP16	10,000	9,950	0,050	-0,50%
Média	10,002	9,955	0,047	-0,47%
Desvio padrão	0,018	0,040	0,032	0,32%

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível observar que a variação mássica dos corpos de prova sinterizados à temperatura de 1220°C é bastante inferior aos que foram sinterizados à temperatura de 1100°C, chegando a possuir uma média de perda de massa de apenas 0,047 g o que acarreta numa variação mássica média de - 0,47%. A redução desses valores está atrelada ao fato de que a sinterização a 1220°C se mostrou efetiva, ou seja, o pó não se desprende do corpo de prova, o que proporciona uma pesagem mais fiel em comparação aos demais.

#### 4.3.2 Retração linear

Para cada amostra foi realizada a medição do seu comprimento a verde (antes da sinterização) e após a sinterização. Os valores estão expressos nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Resultados da Retração linear para temperatura de 1100°C

Amostras	$L_o$ (mm)	$L_s$ (mm)	Varição (mm)	Retração linear
CP1	12,90	13,30	0,40	3,10%
CP2	13,40	13,90	0,50	3,73%
CP3	12,00	12,40	0,40	3,33%
CP4	12,10	12,50	0,40	3,31%
CP5	11,30	11,80	0,50	4,42%
CP6	11,20	11,75	0,55	4,91%
CP7	10,80	11,30	0,50	4,63%
CP8	10,70	11,20	0,50	4,67%
Média	11,80	12,27	0,47	4,01%
Desvio padrão	0,98	0,95	0,06	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar a Tabela 6 pode-se observar que as amostras sinterizadas à temperatura de 1100°C demonstraram um aumento de seu comprimento inicial em média de 4,01% e um desvio padrão de 0,01. Esse fenômeno está relacionado com as reações químicas que ocorrem no interior dos corpos de prova, e conseqüentemente a emissão de gases, onde a expansão das amostras se dá

temporariamente até a liberação desses gases e a sinterização propriamente dita. Como os corpos de prova não foram completamente sinterizados à temperatura de 1100°C, os mesmos permaneceram dilatados.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para os corpos de prova sinterizados a temperatura de 1220°C.

Tabela 7 – Resultados da Retração linear para temperatura de 1220°C

Amostras	$L_o$ (mm)	$L_s$ (mm)	Variação (mm)	Retração linear
CP9	13,25	13,05	0,20	-1,51%
CP10	13,20	12,95	0,25	-1,89%
CP11	11,90	11,85	0,05	-0,42%
CP12	12,20	12,10	0,10	-0,82%
CP13	11,40	11,40	0,00	0,00%
CP14	11,40	11,35	0,05	-0,44%
CP15	11,15	11,15	0,00	0,00%
CP16	11,20	11,15	0,05	-0,45%
Média	11,96	11,88	0,09	-0,69%
Desvio padrão	0,86	0,77	0,09	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao contrário dos corpos de prova sinterizados à temperatura de 1100°C, os sinterizados à temperatura de 1220°C mostraram uma retração em relação ao seu comprimento inicial em média de - 0,69% e desvio padrão de 0,01. A mudança de comportamento das amostras é referente ao êxito da sinterização, na qual os gases gerados pelas reações químicas foram completamente eliminados.

Peterson et al. (2016) que estudou a incorporação da cinza proveniente da queima da lenha do eucalipto nas porcentagens de 0,1%; 0,5%; 1%; 2% e 5% na formulação de massa na cerâmica vermelha, obteve uma redução da retração linear à medida que aumentou o percentual de adição de cinzas, para uma temperatura de sinterização de 950°C, inferior as usadas no presente trabalho. Ao comparar com os resultados obtidos por Peterson et al. (2016), a pequena taxa de retração dos corpos de prova é proporcional ao percentual de cinza usada para a fabricação dos mesmos, que no caso do trabalho em questão é de 100%.

### 4.3.3 Porosidade

Para se determinar o percentual de poros dos corpos de prova após o processo de sinterização, foi adotado a densidade teórica de acordo com Borges et al. (2017) de 2,62 g/cm<sup>3</sup> para a cinza do eucalipto. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos a partir da Equação 3 para a porcentagem de poros. A densidade medida é uma média entre os dois corpos de prova de cada pressão de compactação e temperatura de sinterização.

Tabela 8 – Resultados de Porosidade

Temperatura de sinterização	Pressões de compactação	Densidade medida	Densidade teórica	%Poros
1100°C	40,74 Mpa	1,05 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	59,82 %
	81,49 Mpa	1,16 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	55,66 %
	122,23 Mpa	1,21 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	53,94 %
	162,97 Mpa	1,26 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	52,00 %
1220°C	40,74 Mpa	1,56 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	40,62 %
	81,49 Mpa	1,69 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	35,35 %
	122,23 Mpa	1,79 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	31,71 %
	162,97 Mpa	1,82 g/cm <sup>3</sup>	2,62 g/cm <sup>3</sup>	30,43 %

Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova sinterizados à temperatura de 1100°C apresentaram elevado percentual de poros, chegando a até 59,82%, o que determina que a peça não foi completamente sinterizada a essa temperatura. Os dados obtidos para a temperatura de 1220°C mostram que com o aumento da temperatura de sinterização, ocorre uma diminuição significativa no percentual de poros nas amostras estudadas, chegando a atingir 30,43%, o que comprova que a temperatura de 1220°C apresenta um maior grau de coesão entre as partículas, na qual se aproxima da condição ideal de trabalho com o material em questão, as cinzas. A partir desses dados também é possível afirmar que, com o aumento da pressão de compactação, o percentual de poros das amostras reduz - independente da temperatura utilizada no processo.

## 5 CONCLUSÃO

Com base na análise conjunta dos resultados dos ensaios realizados, é possível afirmar que a possibilidade de utilização das cinzas provenientes da combustão da lenha na fabricação de produtos cerâmicos é sim possível. Além de exibir similaridade com a composição química das cerâmicas de acordo com a literatura, ao possuir os elementos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ , o processo se mostrou viável como uma alternativa de reutilização dos resíduos produzidos pela combustão da lenha nas indústrias cerâmicas e na redução dos impactos ambientais causados pelo descarte indevido deste material.

Os corpos de prova mostraram, por meio do ensaio de dureza, boa resistência à deformação plástica, uma vez que foram obtidos valores de até 86 HRB. Esse resultado está associado à porosidade das amostras, pois os poros atuam como concentradores de tensão e podem ser causadores da falha do material. A partir disto, é possível afirmar que quanto maior a pressão de compactação e temperatura de sinterização, maior densidade é aderida ao corpo de prova e melhores os resultados de dureza.

Com relação a retração linear, os corpos de prova sinterizados à temperatura de  $1100^\circ\text{C}$  apresentaram um inchaço devido a não liberação total de gases durante o processo, enquanto que as amostras sinterizadas à temperatura de  $1220^\circ\text{C}$  obtiveram redução de  $-0,69\%$  de seu comprimento inicial. Esse resultado possibilita identificar o grau de densificação dos corpos de prova através do preenchimento dos poros por meio da fase de vitrificação do material.

Os ensaios mostraram que a temperatura de  $1100^\circ\text{C}$  não foi suficiente para aderir densidade satisfatória ao corpo de prova ou mesmo proporcionar uma superfície vitrificada, ao contrário da temperatura de  $1220^\circ\text{C}$  que diminuiu significativamente a porcentagem de poros para as mesmas pressões de compactação e aderiu o aspecto de vitrificação na superfície das amostras. Assim como a pressão de compactação que aderiu maior densidade ao corpo de prova foi a de 162,97 MPa.

Os resultados atingidos por meio das caracterizações físicas e mecânicas se mostraram satisfatórios, e até mesmo similares a outros trabalhos que utilizaram o produto da combustão da lenha em diferentes percentuais. Dessa forma, foi

concluído que as cinzas apresentam boas propriedades físico mecânicas sem ser necessária a adição de outros resíduos ou outro material na sua formulação.

### **5.1 Trabalhos Futuros**

- Realizar a análise da emissão de gases durante o processo;
- Estudo da mudança de fases do material por meio da Difração de Raios X;
- Análise da resistência à tração por compressão diametral;
- Estudo da porosidade com base no ensaio de absorção de água.



## REFERÊNCIAS

- BORGES, Diego; VALVERDE, Diego; BIANCHI, Gislaine; AKASAKI, Jorge Luís; TRENTIN, Thiago Francisco Silva. Uso de cinza de madeira de eucalipto em compostos cimentícios, uma alternativa sustentável. **Periódico técnico e científico Cidades Verdes**, v. 05, ed. 11, p. 89-103, 2017.
- BORLINE, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha: Parte I: características da cinza. **Cerâmica 51**, p. 192-196, 2005.
- BRAGA, Neila de Almeida; FERREIRA, Neidenêi Gomes; CAIRO, Carlos Alberto Alves. Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó. **Química nova**, v. 30, p. 450-457, 28 nov. 2006.
- BRITO, F. Iran Gomes de; MEDEIROS, Catarine F.; LOURENÇO, Jorge Magner. Um estudo teórico sobre a Sinterização na Metalurgia do Pó. **Holos**, Rio Grande do Norte, v. 3, p.204-211, 01 mar. 2007.
- CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G.; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes de D'Almeida. **Ciência e Engenharia dos materiais: Uma Introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 7p.
- FOELKEL, Celso. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais. **Eucalyptus Online Book**. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011.
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1ª edição São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. 320 p.
- JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maristela Gomes da. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: Tecnologias e materiais alternativos de construção, **Ed. UNICAMP** 2003.
- JÚNIOR, Marcos Rinaldo Carvalho Cunha. **Formulação e caracterização de peças cerâmicas fabricadas a partir dos produtos da combustão do carvão mineral**. 2019. 70 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia metalúrgica) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, 2019
- KIECKBUSCH, Rafael Ernesto; LOPES, Fabrício Paulo. Diagnóstico da cerâmica para revestimento catarinense (2005). **Cerâmica Industrial**, vol.5, no 2, p. 33-46.
- LOBO, Cândido Jorge de Sousa. **Estudo das propriedades mecânicas de Ligas fe-ni e fe-ni-mo processadas por metalurgia do pó**. 2014. 159

f. tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. Processos de Fabricação: Metalurgia do pó e o futuro da Indústria. **Revista Tecnológica do Instituto Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, setembro 2007.

PANDA, A; JANCIK, M; PANDOVÁ, I. Components from Powder Metallurgy. **Transfer Inovácií**, n. 33, p. 10, 2016.

PETERSON, Michael; NANDIB, Vítor de Souza; ZACCARON, Alexandre Zaccaron; PEREIRA, Sílvia Izaura; FERNANDES, Paulo. Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na formulação de massa de uma indústria cerâmica estrutural do sul - catarinense. **Revista da Unifebe**, v. 15, p. 9-17, Maio 2016.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. Imprensa Livre, 2016.

SCHAERER, Magna Maria Monteiro. **Análise numérica do comportamento de densificação de pós metálicos resultante do processo de compactação uniaxial**. 2006. 89 f. Tese (Doutor) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

VASKE, Nei Ricardo. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro mult ciclone pela combustão da lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. 325 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.