



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RAFAELLA CAVALCANTE REGIS**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS**  
**SINTERIZADAS DE GRANITO CORUMBÁ PRODUZIDAS POR METALURGIA**  
**DO PÓ**

**RUSSAS**

**2021**

RAFAELLA CAVALCANTE REGIS

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS SINTERIZADAS  
DE GRANITO CORUMBÁ PRODUZIDAS POR METALURGIA DO PÓ

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

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)

---

- R265e Regis, Rafaella Cavalcante.  
Estudo das propriedades físicas e mecânicas de peças sinterizadas de granito corumbá produzidas por metalurgia do pó / Rafaella Cavalcante Regis. – 2021.  
60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.
1. Rocha ornamental. 2. Rejeito. 3. Granito Corumbá. 4. Cerâmica. 5. Propriedades físicas e mecânicas..  
I. Título.

CDD 620

---

RAFAELLA CAVALCANTE REGIS

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS SINTERIZADAS  
DE GRANITO CORUMBÁ PRODUZIDAS POR METALURGIA DO PÓ

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

Aprovada em: 20/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC Pici)

A Deus.

A minha família, por acreditar em mim.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

A minha avó, que hoje é uma estrela no céu, por nunca ter medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante todo o meu período escolar. Por ter dedicado sua vida inteira aos netos, fica aqui registrado minha eterna gratidão.

Agradeço a minha mãe, heroína que me deu apoio e incentivo nas horas difíceis.

Obrigada meus irmãos, cunhada e cunhado, em especial ao meu querido sobrinho Cauã, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Cândido Lobo, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho, pelas suas correções e incentivos. Obrigada pelas valiosas contribuições dadas durante o processo e por toda a paciência.

Aos professores da UFC Campus Pici, Dr. Jorge Luiz e Dr. Ricardo Emílio, pela disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios desta pesquisa e por me darem a honra de tê-los em minha banca examinadora.

Aos técnicos de laboratório da UFC de Russas, Allisson Moreira, Myckelle Ferreira, Patrícia Viana, Orismildes Neto, Bruno Cunha, Wesley Saraiva e em especial ao meu amigo Marcos Ridiley, pelo auxílio na realização dos ensaios e pelas tardes agradáveis no campus.

À empresa W C Mármore e Granito, pelo fornecimento do material e conhecimentos técnicos dos processos, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha amiga e colega de formação Carol que esteve presente em todos os momentos durante a realização deste projeto e tornou essa jornada mais leve.

Aos amigos Gilmar, Jéssica Oliveira, Thiara, Érica, Nancy, Tasyely, Hedjane, Rudna, Edel Mary, Anna Luiza, Josilane, Nayara, Thalles Ruan e Davi Bernardo, dentre tantos outros, que de alguma forma me apoiaram, obrigada pela amizade antiga e duradoura.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao meu chefe Ricardo Rebouças, por toda compreensão, empatia e flexibilidade durante o processo da minha graduação. Obrigada Sheila, Alexandre, Paulo Natã, Paulo Roberto e Welligton Júnior, por todo apoio e paciência comigo nos meus piores dias.

Aos amigos, Aline Lima, Marlon Costa, Silvia Duarte, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

## RESUMO

A indústria de rochas ornamentais vem crescendo exponencialmente nas últimas décadas. Em concomitância a essa produção, tem sido gerada uma grande quantidade de resíduos provenientes do beneficiamento das rochas, despertando a necessidade de minimizar os impactos ambientais gerados e propor aplicabilidade a estes rejeitos. Este trabalho tem como objetivo analisar a potencialidade do rejeito do granito Corumbá como matéria-prima para fabricação de peças sinterizadas por meio da metalurgia do pó através da investigação de propriedades físicas e mecânicas. Foram realizadas análises de caracterização do pó do granito através da difração de raios-X e fluorescência. A fim de determinar a temperatura ótima de sinterização, foram sinterizados corpos de prova em quatro temperaturas diferentes: A – 1130 °C, B – 1140 °C, C – 1150 °C e D – 1200 °C. Concluiu-se que à temperatura de 1140 °C os corpos de prova apresentaram melhor vitrificação e menor perda de forma, sendo, portanto, a temperatura adotada para realização dos ensaios subsequentes. Em seguida foram avaliadas as propriedades físicas de variação volumétrica e porosidade e as propriedades mecânicas das peças sinterizadas por meio da dureza Rockwell B e compressão diametral. Os resultados obtidos permitiram concluir que não houve variação estatisticamente significativa das propriedades mecânicas de dureza e compressão diametral com a variação da pressão de compactação, sendo estas vinculadas exclusivamente à temperatura de sinterização.

**Palavras-chaves:** Rocha ornamental. Rejeito. Granito Corumbá. Cerâmica. Propriedades físicas e mecânicas.

## ABSTRACT

The ornamental stone industry has been growing exponentially in recent decades. Hence, resulting in the production of large amount of waste. Waste from the processing of rocks has been generated, awakening the need to minimize the environmental impacts generated and proportions applicable to these tailings. This work aims to analyse the potential of the Corumbá granite tailings as a raw material for the manufacture of sintered parts by powder metallurgy. Granite powder characterization analyses were performed using X-ray diffraction and fluorescence. In order to determine the optimal sintering temperature, specimens were sintered in four different specifications: A - 1130 °C, B - 1140 °C, C - 1150 °C and D - 1200 °C. It was concluded that at a temperature of 1140 °C the specimens is better vitrified and deforms less, therefore, that temperature was adopted for carrying out the subsequent tests. Specimens were evaluated regarding as physical properties of volumetric variation and porosity and as mechanical properties of the sintered parts using Rockwell B hardness and diametrical compression. The results obtained allow us to conclude that there was no statistically significant variation in the mechanical properties of hardness and diametrical compression with variation in the compaction pressure, which were exclusively linked to the sintering temperature.

**Keywords:** Ornamental rock. Waste. Corumbá granite. Ceramics. Physical and mechanical properties..



“Só se pode alcançar um grande êxito quando  
nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Aplicação de rochas ornamentais como revestimento de uma escada em Mármore Calacata Gold. ....	15
<b>Figura 2</b> - Aparência do granito Corumbá.....	19
<b>Figura 3</b> - Sequência de produção da metalurgia do pó convencional. 1) Pó solto; 2) Compactação; 3) Sinterização. ....	21
<b>Figura 4</b> - Ilustração de compactação uniaxial a frio. ....	23
<b>Figura 5</b> - Britador de pequeno porte. ....	25
<b>Figura 6</b> - Peneiras utilizadas na análise granulométrica: nº 200, 30, 4 e 3/8”, respectivamente da esquerda para direita. ....	25
<b>Figura 7</b> - Moinho de disco orbital MA 360. ....	26
<b>Figura 8</b> - Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas. ....	27
<b>Figura 9</b> - Peças verdes compactadas: a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN.....	27
<b>Figura 10</b> - Forno mufla Quimis.....	28
<b>Figura 11</b> - Mufla elétrica, modelo Linn Elektro Therm.....	29
<b>Figura 12</b> - Fluxograma da metodologia experimental adotada no estudo. ....	30
<b>Figura 13</b> - Equipamentos: a) Picnômetros no processo de fervura; b) Dessecador.....	32
<b>Figura 14</b> - Microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2.....	35
<b>Figura 15</b> - Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1.....	36
<b>Figura 16</b> - Ensaio de compressão diametral.....	37
<b>Figura 17</b> - DRX da amostra de granito. ....	39
<b>Figura 18</b> - Visualização externa e interna do Mufla Quimis .....	41
<b>Figura 19</b> - Peças sinterizadas a temperatura de A – 1130 °C, B – 1140 °C, C – 1150 °C, D – 1200 °C e carga de compactação a) CP-20 b) CP-40, c) CP-60 e d) CP-80. ....	42
<b>Figura 20</b> - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado. ....	47
<b>Figura 21</b> - Amostra fraturada após ensaio de compressão diametral.....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição mineralógica do granito Corumbá.....	20
<b>Tabela 2</b> - Caracterização tecnológica do granito Corumbá.....	20
<b>Tabela 3</b> - Quantidade de corpos de prova para os testes de sinterização de acordo com cada parâmetro.....	29
<b>Tabela 4</b> - Composição química do pó de granito Corumbá obtida por FRX.....	38
<b>Tabela 5</b> - Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 24° e K <sub>20</sub> 0,9998. ....	40
<b>Tabela 6</b> - Relação L/d proposta por Stanley (2001).....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Variação volumétrica (%). .....	44
<b>Gráfico 2</b> - Volume das peças verdes e sinterizadas.....	44
<b>Gráfico 3</b> - Determinação da porosidade (%). .....	45
<b>Gráfico 4</b> - Dureza Rockwell B para temperatura de sinterização a 1140°C. ....	49
<b>Gráfico 5</b> - Resistência à compressão diametral – 1140°C. ....	51

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> – Densidade real do solo .....	33
<b>Equação 2</b> - Densidade real do solo a 20 °C. ....	33
<b>Equação 3</b> – Variação volumétrica (%). ....	34
<b>Equação 4</b> – Porosidade (%). ....	34
<b>Equação 5</b> - Resistência à tração por compressão diametral .....	37

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivo geral	14
1.2. Objetivos específicos	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1. Rochas ornamentais	15
2.2. Panorama atual e geração de resíduos	16
2.3. Cerâmicas	17
2.3.1. <i>Classificação</i>	18
2.3.2. <i>Granito</i>	18
2.4. Metalurgia do pó	20
2.4.1. <i>Obtenção dos pós</i>	22
2.4.2. <i>Compactação</i>	22
2.4.3. <i>Sinterização</i>	23
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
3.1. Confeção dos corpos de prova	24
3.1.1. <i>Seleção do material</i>	24
3.1.2. <i>Britagem</i>	24
3.1.3. <i>Moagem e peneiramento</i>	25
3.1.4. <i>Compactação dos corpos de prova</i>	26
3.1.5. <i>Sinterização dos corpos de prova</i>	28
3.2. Caracterização química e mineralógica	31
3.2.1. <i>Fluorescência de raios x</i>	31
3.2.2. <i>Difração de raios x</i>	31
3.3. Determinação das propriedades físicas	31

3.3.1.	<i>Densidade real do grão solto</i>	31
3.3.2.	<i>Variação volumétrica</i>	33
3.3.3.	<i>Porosidade</i>	34
3.3.4.	<i>Microscopia óptica</i>	34
3.4.	<b>Determinação das propriedades mecânicas</b>	35
3.4.1.	<i>Dureza rockwell b</i>	35
3.4.2.	<i>Compressão diametral</i>	36
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	38
4.1.	<b>Caracterização do material</b>	38
4.1.1.	<i>Análise de fluorescência de raios-x</i>	38
4.1.2.	<i>Análise de difração de raios-x</i>	39
4.1.3.	<i>Densidade real dos grãos soltos</i>	40
4.2.	<b>Análise visual e temperatura ótima de sinterização</b>	40
4.3.	<b>Determinação das propriedades físicas</b>	43
4.3.1.	<i>Variação volumétrica</i>	43
4.3.1.	<i>Porosidade</i>	45
4.3.2.	<i>Microscopia</i>	46
4.4.	<b>Determinação das propriedades mecânicas</b>	48
4.4.1.	<i>Dureza rockwell b</i>	48
4.4.2.	<i>Compressão diametral</i>	49
5.	<b>CONCLUSÕES</b>	52
5.1.	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b>	54
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	55

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria das rochas ornamentais tem aumentado vertiginosamente ao longo dos anos. No entanto, simultâneo a esse crescimento decorre o acúmulo de subprodutos muitas vezes descartados indevidamente no ambiente, proporcionando danos ambientais irreparáveis.

Esses rejeitos, na maioria das vezes ricos em sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), são depositados no ambiente em forma de lama abrasiva, pó, cacos, filetes ou retalhos, descartados em depósitos ou ainda aterrando os rios, podendo causar contaminação por lixiviação e outros processos (LOBO, 2009).

O beneficiamento dessas rochas ornamentais gera toneladas de refugos, constituídos por fragmentos que quebram ou sobram durante o processamento. As marmorarias compõem um setor da indústria responsável pela modelagem e acabamento de rochas ornamentais como mármores e granitos. Os produtos oriundos do beneficiamento dessas rochas são desde soleiras, peitoris, revestimento de pisos, escadas e fachadas; bancadas de pias e lavatórios, peças de decoração, entre outros. Faz-se necessário assimilar as origens desses resíduos, bem como suas características físicas e mecânicas para que se estabeleçam formas de redução e utilização destes (SANTOS, 2020).

Impulsionado pela problemática ambiental da geração dos rejeitos e pela necessidade de encontrar alternativas para seu melhor aproveitamento, surge o interesse em desenvolver estudos para a reciclagem deste subproduto, de modo a oferecer o destino final adequado minimizando os prejuízos da exploração, reduzindo, deste modo, os impactos ambientais. Diversos estudos apontam algumas soluções possíveis para esse problema, envolvendo o reaproveitamento dos resíduos de granito no setor de material de construção civil e como substitutos das cerâmicas sintéticas (ALMEIDA, 2020; TAGUCHI *et al.*, 2014; TCHADJIÉ *et al.*; TORRES *et al.*, 2019).

Em face deste contexto, o estudo da aplicabilidade desses produtos contribui para a prática do desenvolvimento sustentável, além de permitir a formulação de novos materiais através de análises da caracterização dos materiais e avaliação de propriedades físicas e mecânicas (PINHEIRO *et al.*, 2019; CAVALCANTI *et al.*, 2017).

Desta forma, esse trabalho buscou avaliar o comportamento físico e mecânico de cerâmicas obtidas a partir do resíduo de granito Corumbá. O processo de metalurgia do pó foi utilizado para confeccionar os corpos de prova submetidos à caracterização tecnológica e ensaios mecânicos.



### **1.1. Objetivo geral**

Estudar a viabilidade tecnológica do uso dos rejeitos do granito Corumbá provenientes do beneficiamento secundário destas chapas, como resultado da sinterização por metalurgia do pó de peças visando melhoria de propriedades físicas e mecânicas.

### **1.2. Objetivos específicos**

Espera-se ao final deste estudo, alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a caracterização química e mineralógica da matéria-prima utilizada na preparação de corpos de prova através do ensaio de Fluorescência de Raios X e Difração de Raio X.
- Determinar a temperatura ótima de sinterização de acordo com a análise visual dos corpos de prova.
- Analisar as propriedades físicas referentes à variação volumétrica e porosidade das peças sinterizadas.
- Estudar a influência da pressão de compactação na redução de porosidade e nas propriedades mecânicas de dureza e compressão diametral.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Rochas ornamentais

De acordo com a ABNT NBR 15012 (2004) a rocha ornamental é caracterizada como um material rochoso de origem natural, extraído em blocos ou placas, cortado em formas variadas e submetido a diversos processos de beneficiamento. A *American Society for Testing and Materials*, NBR ISO 13006 (2014), define as rochas ornamentais como qualquer material rochoso natural que passa por algum tipo de beneficiamento, com ou sem acabamento mecânico e que pode ser utilizado em revestimentos e outros produtos aplicados na ornamentação, ilustrado na figura 1 como revestimento de uma escada em Mármore Calacata Gold.

**Figura 1** - Aplicação de rochas ornamentais como revestimento de uma escada em Mármore Calacata Gold.



Fonte: Pinheiro (2016).

Diante de novas técnicas de produção, aliado à beleza natural e conhecimentos de durabilidade, a utilização de rochas ornamentais está cada vez mais intensa. Uma vez que são empregadas no setor ornamental, são escolhidas principalmente em função da estética (SANTOS, 2016).

Surge então a importância de aliar as características técnicas a fim de suprir o uso previsto. Faz-se necessário a caracterização física e mecânica das rochas, determinação das propriedades químicas, composição mineralógica e descrição petrográfica do material, bem como aspectos visuais (ARAÚJO *et al.* 2015).

Ainda de acordo com Santos (2016) o padrão estético de uma rocha ornamental é resultado da interação de três fatores:

- a) Coloração - depende da composição química dos minerais constituintes e de seu estado de alteração.
- b) Textura - distribuição espacial dos minerais que constituem a rocha.
- c) Granulação - refere-se aos tamanhos dos grãos minerais ou à forma dos cristais ou outros elementos pétreos que constituem a rocha.

## **2.2. Panorama atual e geração de resíduos**

A indústria de rochas ornamentais é uma das atividades que mais tem se desenvolvido nas últimas três décadas. No âmbito mundial, este setor econômico progrediu de 1,8 milhões de toneladas por ano, na década de 1920, para um cenário atual de 145 milhões de toneladas por ano (ABIROCHAS, 2018).

Estima-se que durante o ano de 2020, no Brasil, o setor de rochas ornamentais movimentou cerca de US \$987,4 milhões e foram produzidos 2,16 milhões de toneladas do produto. Quando comparado ao ano de 2019, o faturamento teve recuo de 2,65% e 0,36% para o volume dessas exportações. Os primeiros meses de 2020 foram marcados por um baixo desempenho motivado pela pandemia de Covid-19, entretanto, no segundo semestre do ano observou-se uma expressiva recuperação (ABIROCHAS, 2021).

De acordo com Buyuksagis *et al.* (2017), os resíduos gerados nas marmorarias correspondem a aproximadamente 30% do total consumido. Quando avaliado esse percentual em concomitância aos dados do ABIROCHAS (2021), com um consumo de rochas ornamentais no Brasil de 2,16 milhões de toneladas, pode-se sugerir que foram produzidos 0,65 milhão de toneladas de resíduos neste mesmo ano.

Paralela a essa produção, tem sido gerada uma grande quantidade de rejeitos durante o processo de beneficiamento. O resíduo pode ser na forma de polpa abrasiva, chamada de lama, que precisa ser descartada, como também retalhos de rochas proveniente do beneficiamento secundário das chapas do processo de corte e acabamento. Estes resíduos

sólidos, em sua grande maioria, são descartados de forma inapropriada, causando consequentemente poluição e danos ao meio ambiente (NEVES, 2002).

Impulsionado pela problemática ambiental da geração dos rejeitos e pela necessidade de encontrar alternativas para seu melhor aproveitamento, surge o interesse em desenvolver estudos para a reciclagem deste subproduto, de modo a oferecer o destino final adequado minimizando os prejuízos da exploração, reduzindo, deste modo, os impactos ambientais (DHANAPANDIANA, S.; SHANTHIB, M., 2009).

Uma série de pesquisas têm apontado a viabilidade da utilização desses rejeitos como matéria-prima nos diversos segmentos da indústria, bem como tem fomentado o interesse em estudos mais aprofundados da caracterização dos materiais, podendo-se citar alguns:

- a) Pinheiro (2016) realizou a formulação e caracterização de peças cerâmicas fabricadas a partir do rejeito do granito Asa Branca com adição dos produtos da combustão do carvão mineral.
- b) Santos (2016) estudou a caracterização de resíduos de rochas ornamentais aplicando conceitos mecano-químicos.
- c) Freires (2011) analisou os efeitos da co-utilização dos resíduos do beneficiamento do caulim e da extração do granito *Rain Forest* para produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água.
- d) Lobo (2009) utilizou o rejeito do granito Rosa Iracema como subproduto para fabricação de funis para a indústria têxtil.
- e) Cabral (2009) estudou o uso do rejeito do granito *Rain Forest* para a produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água.

### 2.3. Cerâmicas

Cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos, usualmente subdividido em dois grupos: cerâmicas avançadas e cerâmicas tradicionais. Estes materiais são tipicamente isolantes tanto térmicos como elétricos. Quanto ao comportamento mecânico, apresenta alta dureza e elevada resistência mecânica, porém não se deformam plasticamente e tem baixa tenacidade à fratura, dispondo então de alta fragilidade (CALLISTER, 2016).

São muitas as vantagens inerentes aos materiais cerâmicos, que vai desde a matéria prima de custo relativamente baixo e disponível em abundância na natureza, até a

característica de peso específico final quando relacionado a outras técnicas de fabricação.

### **2.3.1. Classificação**

De acordo com Setz e Silva (2019), os materiais cerâmicos possuem diversas classificações. Algumas delas são apresentadas a seguir:

**Vidros:** Oferece resistência à passagem do calor, além de possuir transparência ótica. Segundo a ASTM C162 – 05 (2015), vidro é um material inorgânico no qual apresenta uma condição rígida sem se cristalizar.

**Cerâmica vermelha:** Materiais que após a sinterização adquirem a cor avermelhada, comumente empregada na construção civil.

**Cerâmica branca:** Compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor, como por exemplo, louças sanitárias e louças de mesa.

**Cerâmicas avançadas:** Através de processos altamente rigorosos, esse tipo de cerâmica é bastante usado em revestimento de naves espaciais, chapas de blindagem e componentes eletrônicos.

**Refratários:** São materiais que suportam elevadas temperaturas sem perder suas propriedades.

**Revestimentos cerâmicos:** as placas cerâmicas são subdivididas em função de sua capacidade de absorção de água e na propriedade de resistência mecânica, podendo ser classificada em porcelanatos, grés, semi grés, semi porosos e porosos.

**Abrasivos:** São normalmente usados para cortar ou esmerilhar materiais mais moles, empregados na confecção de lixas, rebolos e ferramentas de corte.

**Cimento:** Possui propriedades pozolânicas, quando misturado com água forma uma pasta e endurece.

### **2.3.2. Granito**

Os granitos são rochas ígneas com textura granulares compostas basicamente de quartzo e feldspato e, em pequenas quantidades, micas e anfíbolos. Os granitos têm um alto teor de SiO<sub>2</sub>, em torno de 72%. Quando comparado a outras rochas, permite concluir que

possui boa resistência mecânica e, além disso, são mais duros (6 a 7 na escala de Mohs) e mais resistentes a ataques ácidos e desgaste abrasivo (LOBO, 2009).

Os feldspatos possuem temperatura de fusão menor que os outros constituintes. Isto significa que ele tem papel preponderante na fundição da estrutura, o qual confere as primeiras fases líquidas durante a sinterização. Logo são responsáveis pelo processo de densificação, variando de acordo com o produto desejado, à medida que proporciona diminuição da porosidade e absorção de água. Já o quartzo contribui para o controle da dilatação e da viscosidade da fase líquida formada durante a sinterização e, normalmente, propicia maior resistência ao desgaste abrasivo à medida que sua quantidade no material for maior (LUZ, 2008).

O granito Corumbá corresponde a um dos tipos mais comuns, cuja coloração é cinza esbranquiçada, conforme figura 2. Essa coloração se dá à presença de minerais primários tais como feldspatos (branco e cinza), quartzo (cinza e regiões incolores) e a biotita (preto) (SANTOS, 2016).

**Figura 2** - Aparência do granito Corumbá.



Fonte: Espírito Santo (2013).

As tabelas 1 e 2 identificam, respectivamente, parâmetros da composição mineralógica e tecnológica do granito Corumbá.

**Tabela 1** - Composição mineralógica do granito Corumbá.

<b>Composição mineralógica</b>	
K-feldspato	35%
Plagioclásio (oligoclásio)	31%
Biotita	10%
Quartzo	18%
Acessórios ( titanita, zircão, opacos)	6%

Fonte: Adaptado de Oliveira (2015).

**Tabela 2** - Caracterização tecnológica do granito Corumbá.

<b>Caracterização tecnológica</b>	
Densidade Aparente	2673 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade Aparente	0,93%
Absorção de Água	0,35%
Compressão Uniaxial	130,20 Mpa
Compressão após gelo/degelo	131,40 Mpa
Flexão	10,18 Mpa
Coeficiente de dilatação térmica linear	5,20 10 <sup>-3</sup> mm/m°C
Desgaste Amsler	1,00 mm

Fonte: Adaptado de Espírito Santo (2013).

## 2.4. Metalurgia do pó

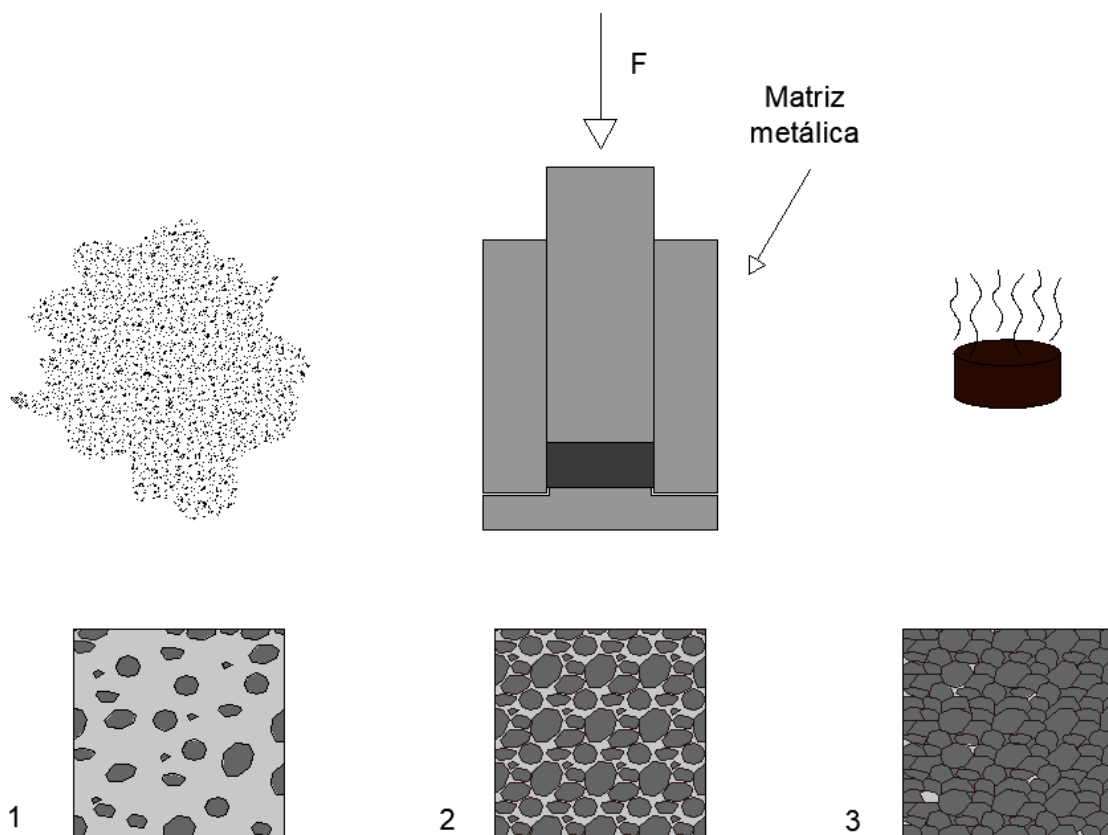
A Metalurgia do Pó (MP) é uma técnica competitiva e instigante motivada pelo seu baixo custo, menores perdas e conseqüentemente menores desperdícios, bem como sua grande versatilidade devido à adequação da técnica para configurar a microestrutura de acordo com a aplicação. O alto desempenho mecânico resultante é uma conseqüência da combinação de

propriedades mecânicas e parâmetros estruturais, do controle cuidadoso do pó constituintes do material, níveis de compactação que determinará a variação da densidade (baixa densidade com alta porosidade e, alta densidade com baixa porosidade), sendo assim determinantes na variação da resistência à tração (DELFORGE *et al.*, 2007).

Os processos de MP além de garantir o desenvolvimento de peças de formas complexas através da alta precisão e produção de componentes de pequeno tamanho, também proporcionam expressiva produção em massa, muitas vezes eliminando operações complementares, como usinagem ou outro acabamento adicional (HAMMES *et al.*, 2014).

A MP é um processo pelo qual materiais em pó são misturados, compactados em um formato desejado e em seguida sinterizados, conforme esquema da figura 3, a fim de proporcionar ligação das partículas e transformar o corpo em uma estrutura dura e rígida.

**Figura 3** - Sequência de produção da metalurgia do pó convencional. 1) Pó solto; 2) Compactação; 3) Sinterização.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).



#### ***2.4.1. Obtenção dos pós***

De acordo com Moraes (2007) quanto maior for a superfície de contato do pó, maior será sua reatividade nas etapas seguintes. Portanto, a moagem garante a redução do tamanho dos grãos, aumento da área superficial e melhora na eficiência das fases sucessivas de compactação e sinterização.

A redução do tamanho das partículas de uma determinada amostra pode ser obtida por meio de inúmeros equipamentos, dentre os quais o moinho de disco orbital se destaca como um dos mais conhecidos. Este equipamento consiste em executar movimento orbital das câmaras de moagem, cujo interior possui discos de cerâmica de alta dureza que atritam com a amostra acarretando cisalhamento e diminuição das dimensões das partículas.

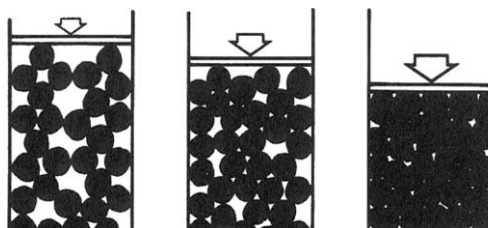
#### ***2.4.2. Compactação***

No processo de compactação, a densificação do material é algo previsível devido à redução da porosidade interna e a interconexão entre as partículas, porém ainda sem apresentar as propriedades mecânicas desejadas. De acordo com Cabral (2009), a conformação por prensagem se destaca no setor cerâmico em virtude da alta precisão dimensional dos elementos produzidos.

As partículas do pó são comprimidas através de uma carga exercida até o menor volume possível, obtendo o empacotamento e agregação dessas partículas, assumindo alta densidade aparente do corpo a verde. A prensagem do pó pode ser estabelecida por meio das técnicas uniaxial, isostática e prensagem a quente. A prensagem uniaxial consiste de três etapas: preenchimento do molde ou matriz, compactação do pó e, por fim, a ejeção da peça (PINHEIRO, 2016).

A compactação uniaxial ocorre mediante aplicação da carga em um único eixo através de punções unidirecionais (ver figura 4), apresentando zona neutra de densidade próxima a punção inferior fixa. Durante este processo muitos defeitos podem ser introduzidos na peça a verde devido aos atritos envolvidos. Os principais defeitos são poros, gradiente de densidade ao longo da altura do componente e micro trincas. (CABRAL, 2009).

**Figura 4** - Ilustração de compactação uniaxial a frio.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 2.4.3. Sinterização

A sinterização consiste no conjunto de modificações sofridas pelo compactado do pó durante um tratamento térmico de alta temperatura, em que as partículas, antes com ligações fracas (compactado verde), adquirem fortes ligações após sinterizadas, a fim de se obter a máxima densificação do componente (PINHEIRO, 2016). Almeida (2012) afirma que é nesta etapa que as peças cerâmicas adquirem suas propriedades finais de resistências mecânicas, causado pela retração de volume, redução dos poros e consequente aumento da densidade.

Segundo Nogueira (1992, apud GALDINO, 2003) vários fatores podem influenciar no processo de sinterização: temperatura, tempo, características do pó, densidade à verde, atmosfera de queima e aditivos utilizados. As forças de capilaridade resultantes da energia de superfície são determinantes para a densificação do material. Uma vez que essa energia é inversamente proporcional ao tamanho da partícula, é necessário que se tenha partículas pequenas para que a sinterização ocorra mais rapidamente. Além disso, pequenas alterações na temperatura podem influenciar de forma significativa na sinterização e densificação do material, pois os métodos de transporte de massa variam de acordo com a temperatura.

A redução da área de superfície total ocorre por meio de vários processos de difusão. Ligações se formam entre as partículas cujos poros intrapartículas são transformados em poros interpartículas e as superfícies dos poros tornam-se menos irregulares e apresentam menor rugosidade (SAMAL, 2015).

“Falhas e alterações bruscas durante este processo de queima podem alterar a microestrutura afetando significativamente o valor das propriedades finais dos corpos cerâmicos. Por isso, todo esse processo, deve ser realizado de maneira lenta e gradativa” (ALMEIDA, 2012, p.9). Quando atingida a temperatura para a vitrificação, a formação da fase vítrea permite obter baixa rugosidade da peça e praticamente nenhuma permeabilidade.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Este capítulo descreve a metodologia utilizada na confecção dos corpos de prova cerâmicos e suas técnicas de caracterização.

#### **3.1. Confecção dos corpos de prova**

##### ***3.1.1. Seleção do material***

O material que serviu de base para esse estudo é proveniente do beneficiamento secundário de chapas de granito, uma das etapas do processo produtivo na indústria de rochas ornamentais, cedidos pela empresa W C Mármore e Granitos, localizado na cidade de Russas, interior do Estado do Ceará. O granito utilizado é conhecido comercialmente como granito Corumbá, cujas chapas decorrem da extração de jazidas localizadas no estado de Santa Catarina.

##### ***3.1.2. Britagem***

O primeiro passo de cominuição do rejeito é chamado de britagem, cujo objetivo é fragmentar os pedaços do granito em partículas menores para posteriores processamentos desejados. Na britagem primária, os torrões ou blocos são reduzidos para o diâmetro médio de 100 mm, enquanto que na britagem secundária os fragmentos obtidos no primeiro processamento são submetidos novamente a britagem para assim reduzir o diâmetro para cerca de 10 mm.

Tendo em vista que o material utilizado foram retalhos de chapas nº 2 do granito Corumbá, esta etapa foi caracterizada apenas pela britagem secundária, no qual o conteúdo passou por um britador de pequeno porte com o objetivo de assumir valores finais em torno de 10 mm.

A figura 5 mostra o equipamento utilizado para a britagem dos retalhos de granito utilizados no estudo.

**Figura 5** - Britador de pequeno porte.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### **3.1.3. Moagem e peneiramento**

Após passarem pelo processo de britagem, os rejeitos do granito Corumbá foram submetidos à análise granulométrica através das peneiras 9,50 mm, 4,75 mm, 600  $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$ , conforme figura 6.

**Figura 6** - Peneiras utilizadas na análise granulométrica: n° 200, 30, 4 e 3/8", respectivamente da esquerda para direita.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A fim de adquirir a quantidade de amostra necessária, foi realizada moagem em moinho de disco orbital MA 360, pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil I da Universidade Federal do Ceará do Campus Russas (ver figura 7), por período suficiente para a redução da dimensão das partículas, para obter uma granulometria inferior a 200 mesh, cuja abertura da malha é de 75  $\mu\text{m}$ .

**Figura 7** - Moinho de disco orbital MA 360.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

#### ***3.1.4. Compactação dos corpos de prova***

Neste trabalho a água foi utilizada como ligante na seguinte proporção: 1 mL de água para cada 10 g do pó do granito. Após a adição do ligante, a pasta foi misturada manualmente até a homogeneização e uniformidade da umidade em todo o volume, procurando obter uma mistura livre de aglomerados. Essa proporção foi definida com o objetivo de proporcionar uma suficiente resistência mecânica para o manuseio das peças e garantir sua integridade após a remoção da matriz.

Em seguida, foram preparados corpos-de-prova (discos) submetidos à compressão uniaxial utilizando uma matriz de aço de seção circular com diâmetro interno de aproximadamente 25 mm, conforme apresentado na figura 8, sujeitos às cargas de compressão de 20 kN, 40 kN, 60 kN e 80 kN.

**Figura 8** - Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas.

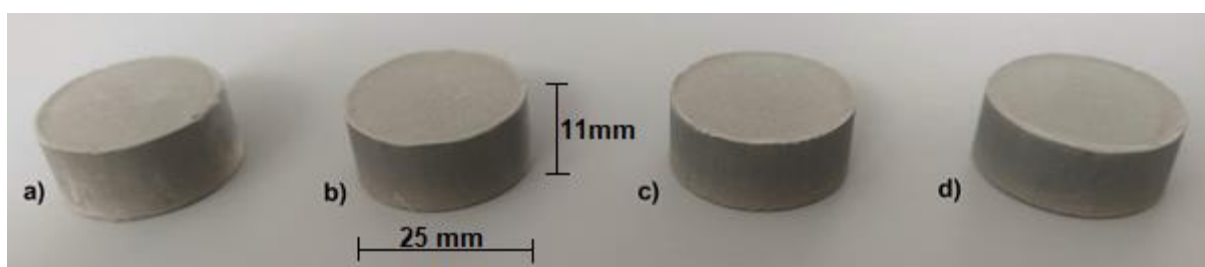


Fonte: Lima (2021).

A carga foi exercida por meio de uma máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de até 300 kN, presente no laboratório de Engenharia Mecânica da UFC Campus de Russas, a uma taxa de 2 mm por minuto, levando em consideração as observações da NBR 5739 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). As cargas utilizadas foram de: 20 kN gerando uma pressão de aproximadamente 40,67 MPa, 40 kN gerando uma pressão de aproximadamente 81,53 MPa, 60 kN gerando uma pressão de aproximadamente 122,29 MPa e 80 kN gerando uma pressão de aproximadamente 163,05 MPa.

As amostras foram compactadas em formato cilíndrico (discos) com altura média de 11 mm. A Figura 9 apresenta algumas peças moldadas por compressão uniaxial em seu estado verde (peças produzidas após a compactação).

**Figura 9** - Peças verdes compactadas: a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 3.1.5. Sinterização dos corpos de prova

A estrutura compactada foi avaliada para um ciclo ótimo de sinterização. A determinação da melhor temperatura de sinterização pode se basear no resultado final das análises de características físicas, mecânicas e aspecto visual das peças sinterizadas.

O processo de sinterização foi realizado primeiramente às temperaturas de 1130 °C e 1150 °C, em Forno Mufla Quimis com temperatura máxima de trabalho de 1200 °C presente no Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN) da Universidade Federal do Ceará. Os corpos de provas foram sinterizados a uma taxa de aquecimento de aproximadamente 5 °C/min e tempo de permanência de 120 minutos ao atingir as respectivas temperaturas (patamar de sinterização). Subsequente à sinterização, as peças passaram pelo resfriamento dentro do próprio forno e, em seguida, retirado em temperatura ambiente. A figura 10 mostra o forno usado no processo de sinterização.

**Figura 10** - Forno mufla Quimis.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após a realização dos primeiros testes, foram sinterizadas outras duas amostras às temperaturas de 1140°C e 1200°C e, conservando-se a taxa de aquecimento e o tempo de permanência à temperatura de sinterização, em mufla elétrica, modelo Linn Elektro Therm, equipada com um sistema de controle de temperatura e tempo, presente no Laboratório

Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Ceará, campus Russas. As amostras foram resfriadas naturalmente dentro do próprio forno até a temperatura ambiente. A figura 11 mostra o forno utilizado nesta etapa de sinterização.

**Figura 11** - Mufla elétrica, modelo Linn Elektro Therm.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A tabela 3 informa a quantidade de corpos de prova avaliados de acordo com a pressão de compactação e temperatura de sinterização.

**Tabela 3** - Quantidade de corpos de prova para os testes de sinterização de acordo com cada parâmetro.

<b>Carga de compactação</b>	<b>2 t</b>	<b>4 t</b>	<b>6 t</b>	<b>8 t</b>
1130°C	1	1	1	1
1140°C	1	1	1	1
1150°C	1	1	1	1
1200°C	1	1	1	1

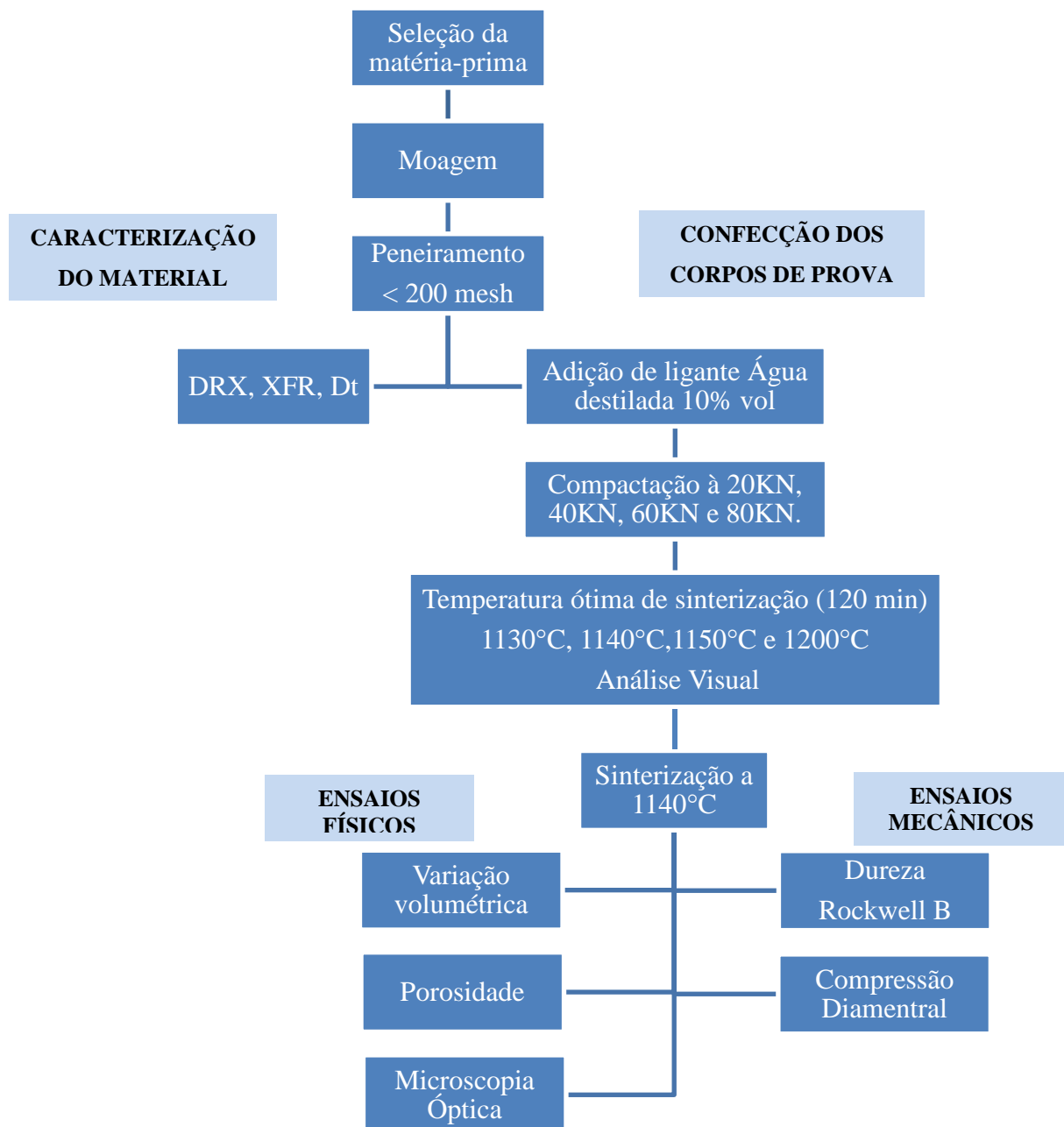
Fonte: Elaborado pela autora (2021).



Após realizar a escolha da temperatura ótima de sinterização, os corpos de prova passaram a ser denominados de CP-20 (corpos de prova compactados a 20 kN), CP-40 (corpos de prova compactados a 40 kN), CP-60 (corpos de prova compactados a 60 kN) e CP-80 (corpos de prova compactados a 80 kN).

Foi estabelecido um fluxograma determinando as etapas da metodologia experimental do estudo (ver figura 12).

**Figura 12** - Fluxograma da metodologia experimental adotada no estudo.



### **3.2. Caracterização química e mineralógica**

A amostra do granito em pó foi caracterizada através da Difração de Raios X (DRX) e da fluorescência de raios X (XRF) para análise de composição e pureza.

#### ***3.2.1. Fluorescência de Raios X***

Após o rejeito do beneficiamento do granito Corumbá passar pelos processos de moagem e peneiramento, garantindo uma granulometria inferior a 200 mesh, o pó foi submetido a análise química no Laboratório de Raios – X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, por fluorescência de Raios X (XRF), em um equipamento da Rigaku, modelo ZSX mini II.

### **4. Difração de Raios X**

Para a determinação das fases presentes na amostra do granito Corumbá, os pós foram caracterizados por difração de Raios X obtidos à temperatura ambiente usando um difratômetro do tipo Rigaku tendo como fonte de radiação  $K_{\alpha}$  do elemento Cobre (Cu),  $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$  operando com uma voltagem de 40 KV e uma corrente de 30 mA. A escala de varredura (em  $2\theta$ ) utilizada foi de  $20^{\circ}$  a  $100^{\circ}$ , com uma velocidade de varredura de  $0,02^{\circ}$  e tempo de medida de cada ponto de 1s.

A análise de DRX é uma técnica não destrutiva no qual utiliza apenas pequenas quantidades de amostras para a identificação de fases cristalinas presentes no material. A identificação das fases foi realizada utilizando o programa X'Pert High Score Plus.

### **4.1. Determinação das propriedades físicas**

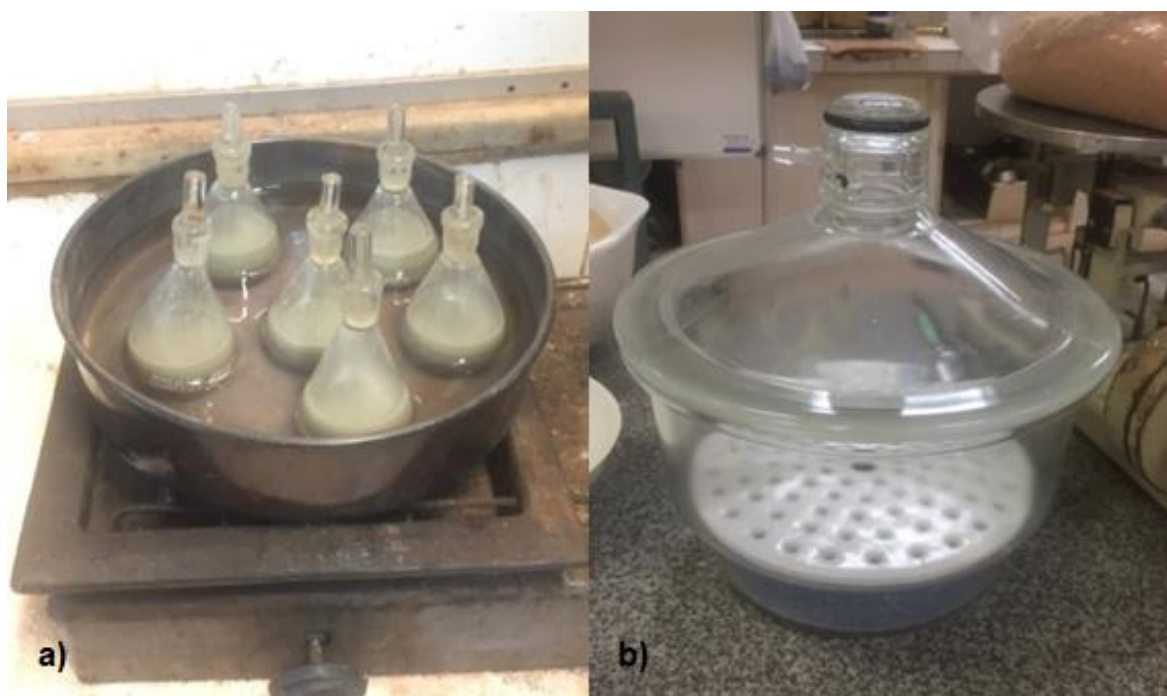
#### ***4.1.1. Densidade real do grão solto***

A densidade real da matéria-prima foi determinada de acordo com a norma técnica do DNER-ME 093/94, no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC. Para

tanto, se faz uso do picnômetro com capacidade de 50 ml e as medições foram efetuadas por meio da balança da marca BEL, modelo M214AI, com sensibilidade de 0,0001 g e capacidade máxima de 220 g. O valor da densidade real obtida foi utilizado para o cálculo da porosidade das peças.

Inicialmente secou-se a amostra até peso constante em estufa a aproximadamente 110 °C. O primeiro valor obtido foi  $P_1$ , que corresponde ao peso do picnômetro vazio. Em seguida, pesou-se 10 g da amostra e colocou-se no picnômetro com o auxílio de um funil, pesando novamente o conjunto obtendo o  $P_2$ . Então é adicionada água destilada no picnômetro até cobrir a amostra e levado ao fogo deixando-o ferver por aproximadamente meia hora para expulsar todo ar existente entre as partículas e, em seguida, resfriado até atingir a temperatura ambiente passando um breve período no dessecador (ver figura 13).

**Figura 13** - Equipamentos: a) Picnômetros no processo de fervura; b) Dessecador.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O picnômetro é então lentamente cheio com água destilada de modo que não haja muita turbulência no material e pesa-se obtendo o  $P_3$ . Logo após, todo o material de dentro do picnômetro é descartado, o frasco é então lavado e enche-o com água destilada, pesando novamente o conjunto, encontrando o  $P_4$ .

A densidade real é dada de acordo com a equação 1:

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (1)$$

Onde:

$D_t$  = densidade real do solo à temperatura  $t$ ;

$P_1$  = peso do picnômetro vazio e seco, em g;

$P_2$  = peso do picnômetro com amostra, em g;

$P_3$  = peso do picnômetro com amostra e água, em g;

$P_4$  = peso do picnômetro com água, em g.

O resultado do ensaio será considerado válido quando obtido pela média de no mínimo duas determinações e quando não diferem de 0,009. Além disso, o valor da densidade deverá ser referente à temperatura de 20 °C, sendo então necessário realizar um ajuste de acordo com a equação 2:

$$D_{20} = k_{20} * D_t \quad (2)$$

Onde:

$D_{20}$  = densidade real do solo a 20 °C;

$K_{20}$  = razão entre a densidade relativa da água à temperatura ( $t$ ) e a densidade relativa da água a 20 °C;

$D_t$  = densidade real do solo à temperatura ( $t$ ).

#### **4.1.2. Variação volumétrica**

O ensaio de variação volumétrica permite avaliar a retração dimensional volumétrica dos corpos de prova após estes serem submetidos a algum processo de sinterização. Resultados positivos indicam que houve retração e negativos indicam expansão. Para garantir medidas precisas, o ensaio foi realizado com o auxílio de paquímetro digital calibrado, efetuando as medidas após a secagem em temperatura ambiente durante 48 horas e depois de submetidos à sinterização. O ensaio foi realizado em todas as peças (CP-20, CP-40, CP-60 e

CP-80)

A variação volumétrica dos CP foi determinada mediante a equação 3:

$$VV (\%) = \frac{V_o - V_f}{V_o} * 100\% \quad (3)$$

Onde:

VV = Variação volumétrica;

V<sub>o</sub> = Volume inicial do corpo de prova (verde);

V<sub>f</sub> = Volume final do corpo de prova (após sinterização).

#### **4.1.3. Porosidade**

Para determinação do nível de porosidade do objeto de estudo, foram utilizados como base os dados obtidos da densidade real dos grãos, enquanto que para determinação específica aparente utilizou-se como base a NBR ISO 10545-3 (2020). Em seguida, a porosidade de todas as peças (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) foi calculada pela equação 4:

$$PA = \left( \frac{1 - DEA}{D_t} \right) * 100\% \quad (4)$$

Onde:

PA = Porosidade aparente expressa em percentual;

D<sub>t</sub> = Densidade real do grão;

DEA = Densidade específica aparente das peças sinterizadas.

#### **4.1.4. Microscopia Óptica**

As micrografias foram obtidas por meio de um microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2, pertencente ao laboratório de microscopia da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, conforme figura 14.

**Figura 14** - Microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

## **4.2. Determinação das propriedades mecânicas**

### **4.2.1. Dureza Rockwell B**

O ensaio de dureza rockwell foi realizado utilizando duas amostras referentes a cada característica estudada (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80). As medidas dos ensaios foram feitas através de um Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1, pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

A norma tomada como referência foi a ABNT NBR NM ISO 6508-1 - Materiais metálicos – Ensaio de dureza. Para a realização do ensaio de dureza Rockwell B foram feitas cerca de cinco indentações por amostra, no qual determina a resistência à penetração de um metal duro submetida a uma carga de 100 kgf e tempo de penetração de 10 s.

A figura 15 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio de Dureza Rockwell B.

**Figura 15** - Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

#### ***4.2.2. Compressão diametral***

Tendo em vista que na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*) não existem nenhuma norma que fundamente especificamente ensaios de compressão diametral em materiais cerâmicos, foi sucedida uma adaptação paralela da norma NBR 7222:2010 (Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos).

Quatro peças de cada característica analisada (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) foram ensaiadas utilizando a técnica de compressão diametral a fim de obter a resistência à tração dos corpos de provas sinterizados. O ensaio foi realizado por meio de uma máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de até 300 kN, presente no laboratório de Engenharia Mecânica da UFC Campus de Russas, a uma taxa de 2 mm/minuto até a ruptura

da peça (ver figura 16).

Considerou-se em todos os corpos de prova uma relação espessura/diâmetro ( $L/d$ ) entre 0,2 e 0,5, atendendo à proporção estabelecida por Stanley (2001).

O ensaio de compressão diametral foi realizado de acordo com a equação 5:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (5)$$

Onde:

$f_{t,D}$  = Resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;

$F$  = Carga máxima obtida no ensaio (kN);

$L$  = Espessura do corpo de prova (mm);

$d$  = Diâmetro do corpo de prova (mm).

**Figura 16** - Ensaio de compressão diametral.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Caracterização do material

Para a caracterização do material foram preparadas amostras do pó do rejeito do granito, com granulometria de 75  $\mu\text{m}$  para análises de difração de raios X, fluorescência e determinação da densidade real do grão solto.

#### 5.1.1. Análise de Fluorescência de Raios-X

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de Fluorescência de Raios X para o granito Corumbá, em percentual mássico, na forma de óxidos.

**Tabela 4** - Composição química do pó de granito Corumbá obtida por FRX.

Componentes	Massa (%)
SiO <sub>2</sub>	88,13
K <sub>2</sub> O	6,37
Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2,86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,15
CaO	0,38

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

De acordo com a análise da Tabela 4, observa-se que a matéria-prima é essencialmente constituída por SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO, perfazendo 99,9%.

Os altos teores de SiO<sub>2</sub> obtidos são típicos de rochas ígneas graníticas. O SiO<sub>2</sub>, associado a fase cristalina quartzo, atua como desplastificante favorecendo a trabalhabilidade da massa, diminui o tempo de secagem e a retração linear (MONTEIRO; VIEIRA, 2003).

A presença do óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é muito provavelmente o responsável pela cor marrom-avermelhada característica das peças após a sinterização. Os óxidos com essas propriedades são denominados de cromóforos (CABRAL, 2009).

Os óxidos alcalino K<sub>2</sub>O e alcalino-terroso CaO são os elementos que promovem a

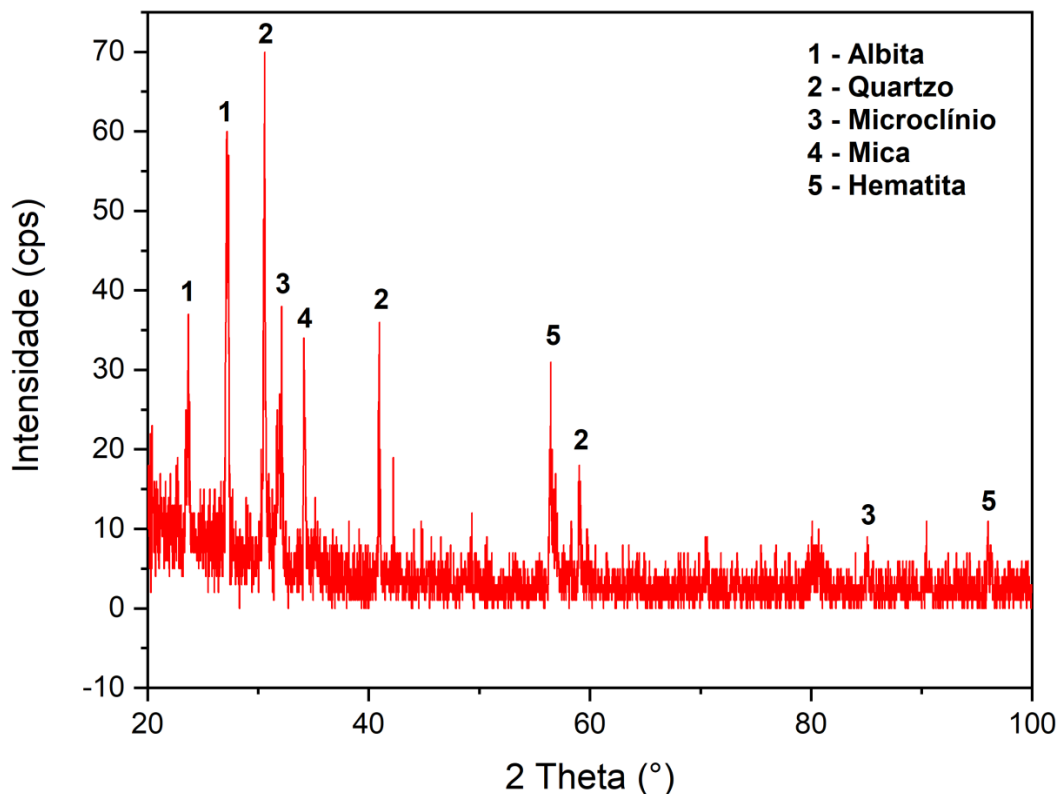
formação da fase líquida. A importância destes agentes fundentes na massa cerâmica está relacionada com sua capacidade de garantir o ponto de fusão em temperaturas mais baixas durante o processo de sinterização e auxiliar no fechamento da porosidade. A albita,  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , é um feldspato que também desempenha a função de fundente formadora da fase vítrea. (RIELLA; FRANJNDLICH; DURAZZO, 2002).

### 5.1.2. Análise de Difração de Raios-X

O difratograma de raios X da amostra de resíduo de granito estudado é mostrado na Figura 17. Verifica-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo, microclínio, albita, hematita e mica.

Pode-se observar que, para  $2\theta = 27,30^\circ$  ocorre uma grande intensidade de pico relativo à fase albita. O pico de maior intensidade ocorre a aproximadamente  $2\theta = 30,60^\circ$  relativo à fase quartzo, cujo resultado já era esperado por apresentar em sua composição grande percentual de  $\text{SiO}_2$ .

Figura 17 - DRX da amostra de granito.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

### 5.1.3. Densidade real dos grãos soltos

A partir do pó do granito foi determinada a densidade real da matéria prima, fator importante para a compactação do material e conseqüentemente para as propriedades mecânicas. A Tabela 5 indica os valores obtidos na determinação da densidade real.

**Tabela 5** - Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 24° e K<sub>20</sub> 0,9998.

Amostras	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\Delta\delta$	$\Delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta - 20^\circ$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	41,68	51,70	98,52	91,94	2,913			
	41,19	51,76	98,77	92,43	2,499	0,199	> admissível	#####
	39,37	49,41	95,52	89,18	2,714			
2	41,20	51,82	98,63	91,94	2,702			
	41,69	51,30	98,56	92,40	2,786	0,022	> admissível	#####
	39,38	49,87	95,82	89,18	2,725			
3	40,55	51,40	99,13	92,27	2,719			
	36,90	47,47	93,22	86,51	2,738	0,009	2,734	<b>2,73</b>
	38,57	49,38	96,72	89,87	2,730			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando a tabela temos que, nas primeiras duas determinações da amostra, a variação entre os três valores obtidos foram maiores que o admissível. Na terceira determinação observa-se  $\Delta\delta = 0,009$ , apresentando assim, um resultado satisfatório. Portanto, a densidade real dos grãos soltos do pó de granito Corumbá é de 2,73 g/cm<sup>3</sup>. A densidade calculada está próximo da faixa de valores disponíveis na literatura para o pó do granito, que corresponde em média a 2,67 g/cm<sup>3</sup> (ESPÍRITO SANTO, 2013).

## 5.2. Análise visual e temperatura ótima de sinterização

Foram testados corpos de provas de diferentes pressões de compactação (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) a quatro temperaturas de sinterização: 1130 °C, 1140 °C, 1150 °C e 1200 °C.

O primeiro fato a se destacar foi a diferença de sinterização entre as amostras de mesma carga de compactação cuja queima ocorreu no forno Mufla Quimis. O gradiente de

temperatura ao longo do forno ocorreu devido a problemas pontuais como: comprometimento da isolamento do forno por uma danificação na parte superior da porta; defeitos no refratário interno e, conseqüentemente, possíveis danos às resistências embutidas. Como medida paliativa, foi posto um tijolo refratário acima da porta a fim de fechar a abertura e assim reduzir a variação da temperatura, conforme a figura 18. Vale salientar que o outro forno utilizado, Mufla Linn Elektro, estava em perfeitas condições de uso, não apresentando nenhuma intercorrência.

**Figura 18** - Visualização externa e interna do Mufla Quimis

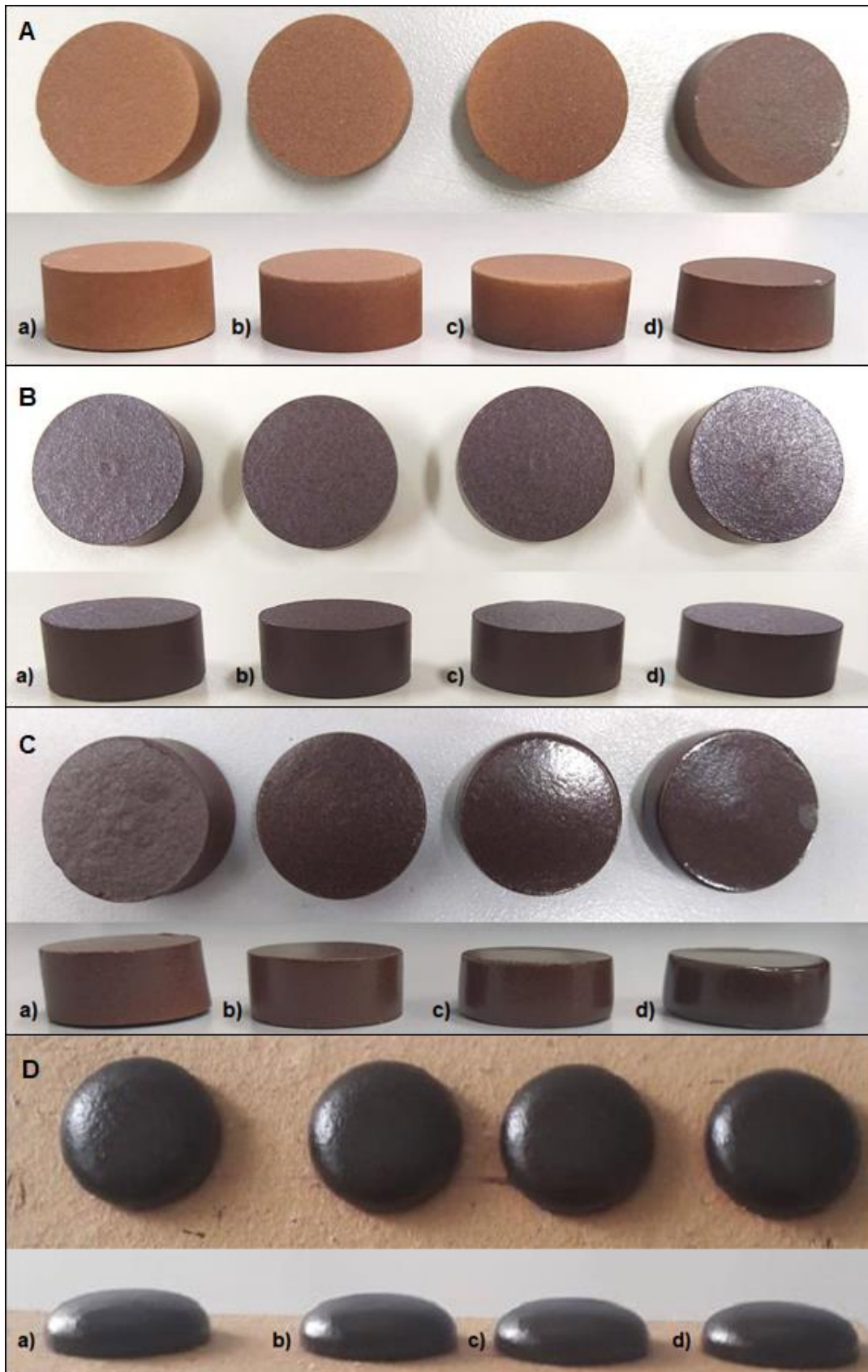


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Amostras pertencentes à mesma profundidade do forno foram analisadas. O aumento da temperatura de sinterização culminou em: aumento do brilho da superfície e tendência de arredondamento das bordas dos CP. Essas características podem ter sido ocasionadas pela vitrificação da superfície da peça, resultado da gradual transformação da estrutura cristalina da albata em fase vítrea e conseqüente fusão dos componentes.

A figura 18 apresenta os corpos de prova sinterizados às temperaturas de sinterização A, B, C e D variando a carga de compactação.

**Figura 19** - Peças sinterizadas a temperatura de A – 1130 °C, B – 1140 °C, C – 1150 °C, D – 1200 °C e carga de compactação a) CP-20 b) CP-40, c) CP-60 e d) CP-80.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

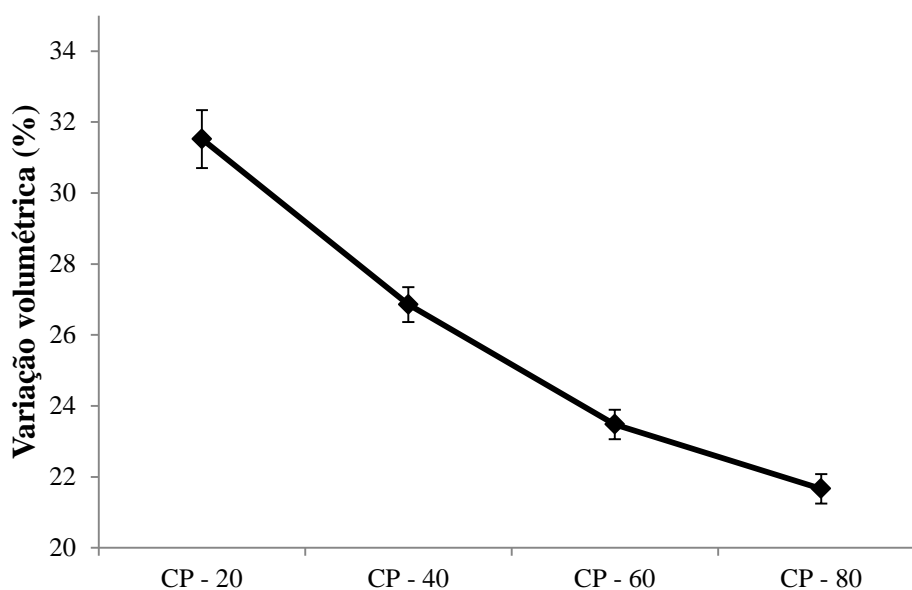
Pode-se perceber que à medida que aumenta a temperatura a intensidade das cores mais escuras aumenta, chegando aos tons de marrom escuro, possivelmente devido a presença de óxidos corantes. De acordo com Roveri *et. al.* (2007) a 1000°C inicia a liberação de  $\text{Fe}^{2+}$ , que por oxidação passa a  $\text{Fe}^{3+}$  responsável pela cor vermelha e, acima de 1100 °C, o  $\text{Fe}^{3+}$  começa a reduzir novamente gerando a cor marrom avermelhado.

À temperatura 1130 °C percebeu-se a baixa queima dos corpos de prova evidenciada pela coloração avermelhada clara e a superfície fosca. Na temperatura 1140 °C verificaram-se aspecto brilhoso e a coloração marrom escura das peças, características da vitrificação. A temperatura 1150 °C obteve as mesmas características da temperatura de 1140 °C, porém ocorreu a perda da forma inicial dos CP submetidos à compactação de 6 kN e 8 kN, cujas bordas ficaram ligeiramente arredondadas. Em 1200 °C ocorreu intensa perda da forma, impossibilitando a realização dos ensaios mecânicos. Diante destas observações, conclui-se que a temperatura 1140 °C possui as melhores características para a realização dos ensaios do objeto de estudo.

### **5.3. Determinação das propriedades físicas**

#### **5.3.1. Variação volumétrica**

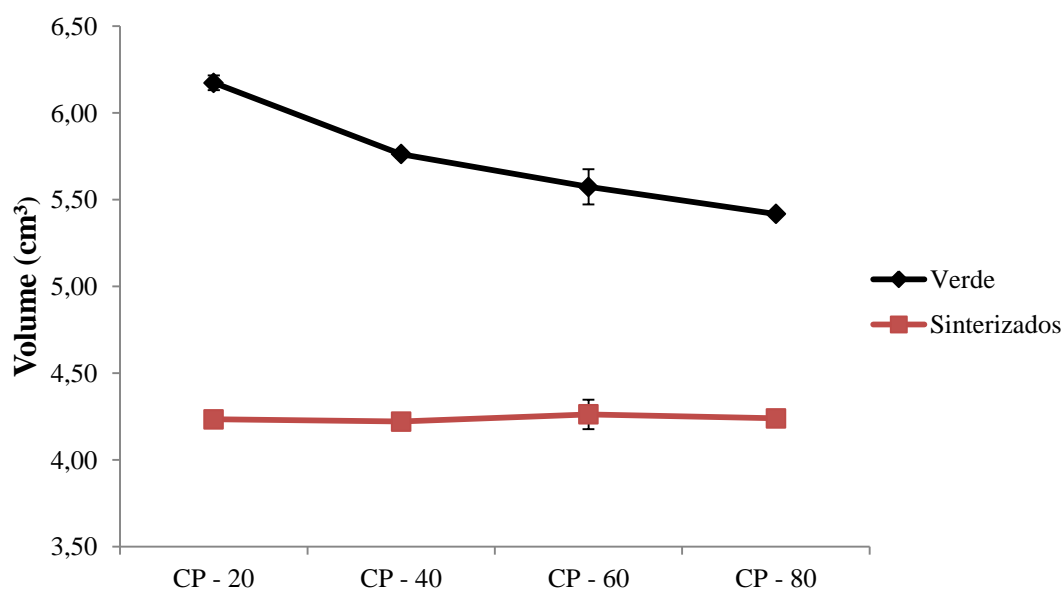
O gráfico 1 mostra os resultados do percentual da variação volumétrica dos CP com seus respectivos desvios padrões, em função da média dos volume das peças verdes ( $V_0$ ) e do volume pós sinterização ( $V_f$ ) das 10 amostras sinterizadas de cada carga de compactação.

**Gráfico 1** - Variação volumétrica (%).

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

De acordo com o gráfico 1 nota-se que há a tendência de diminuição da variação volumétrica à medida que aumenta a carga de compactação nas peças verdes, até chegarem ao patamar de saturação. Para menores cargas de compactação se faz necessário maiores trabalhos para chegar ao patamar de saturação de porosidade à temperaturas adequadas.

O gráfico 2 indica a média dos volumes dos CP verdes e pós sinterização.

**Gráfico 2** - Volume das peças verdes e sinterizadas.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando o gráfico 2 percebeu-se uma tendência de diminuição do volume nas peças verdes a medida que aumenta a carga de compactação. Porém, quando sinterizados, os corpos de prova atingem aproximadamente o mesmo volume final, apresentando densidade média de  $2,35 \text{ g/cm}^3$  para todas as pressões.

Esse fato pode estar associado à presença intensa de óxidos fundentes na composição, no qual favorece a densificação dos corpos de prova através dos processos de união das partículas e redução de porosidade que ocorrem por difusão dos átomos.

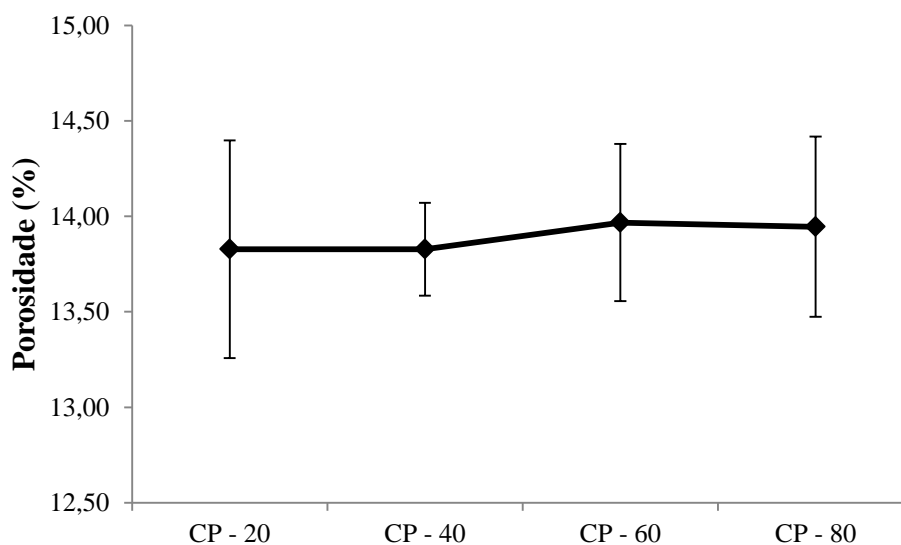
Além disso, a pequena umidade adquirida e a água destilada (ligante) utilizada durante a confecção dos corpos de prova foram perdidas logo no início da sinterização por possuir baixo ponto de ebulição ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), influenciando diretamente na variação volumétrica das amostras.

Em função da presença de elementos fundentes a baixas temperaturas de ebulição, a fase vítrea líquida tende a preencher o volume dos poros deixados por esses elementos evaporados, provocando assim uma retração tridimensional da peça, reduzindo a porosidade e o volume da peça sinterizada (LOPES JÚNIOR, 2011).

### 5.3.1. Porosidade

O gráfico 3 mostra os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas.

**Gráfico 3 - Determinação da porosidade (%).**



Fonte: Elaborado pela autora (2021).



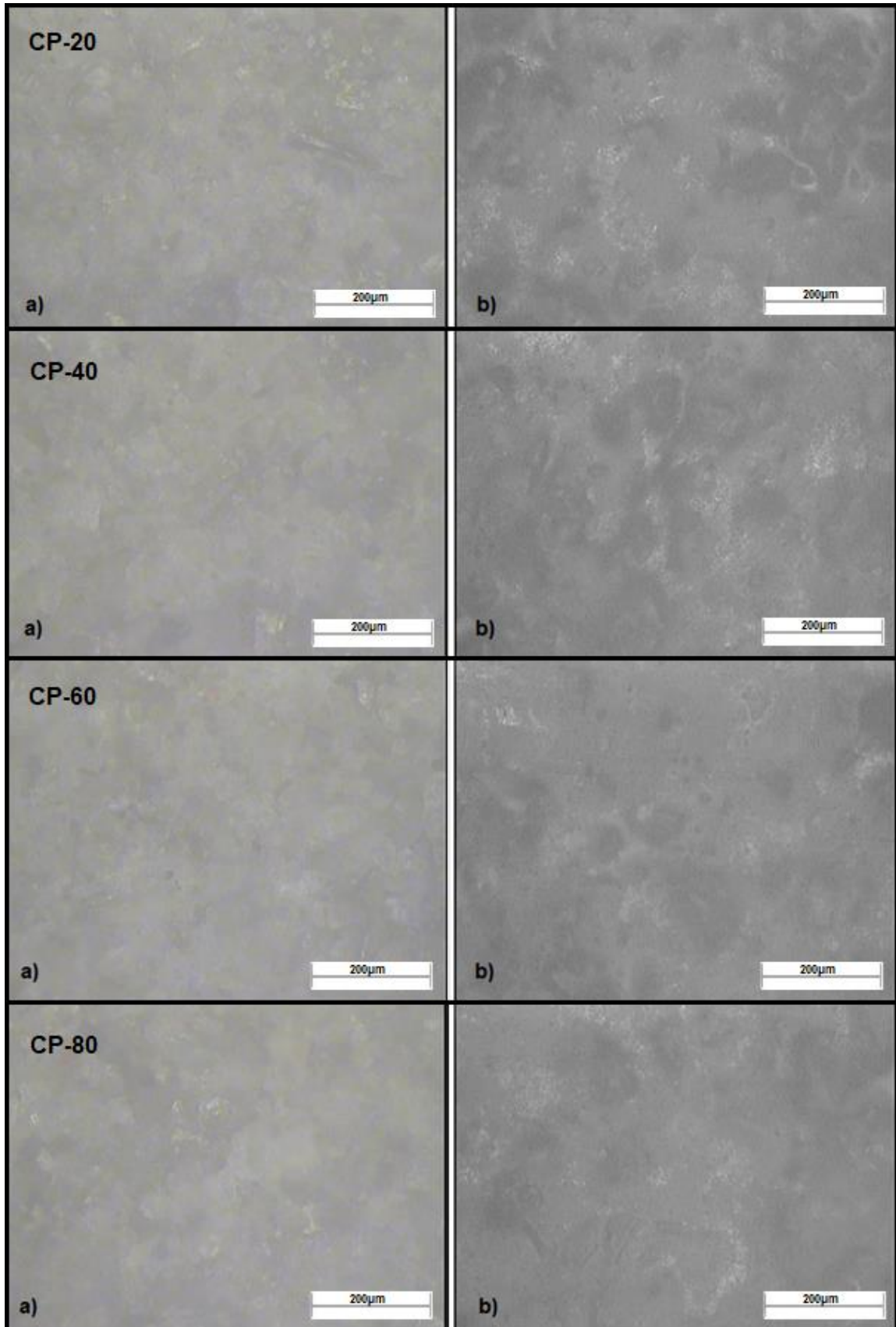
Analisando o gráfico 3 é possível perceber que, de modo geral, a pressão de compactação não interfere significativamente no grau de porosidade, pois as amplitudes do desvio padrão estabelecem um parâmetro concomitante entre as amostras. Isto significa que o material atinge o grau de saturação da compactação e eliminação dos poros a menores esforços e utilizando menos energia. Esta característica é desejável para materiais que demandem baixa absorção da estrutura, pois indica que quanto menor a pressão de compactação de processamento, menor será o consumo energético e, conseqüentemente menor o custo de fabricação.

Como esperado, a menor pressão de compactação CP-20 experimentou maiores desvios padrão gerado pelas grandes movimentações de matéria causadas pela baixa compactação, aumentando a quantidade de poros a serem preenchidos no momento da sinterização.

### **5.3.2. *Microscopia***

Como as peças em análise eram amorfas, foscas e maciças, as imagens obtidas não tiveram resolução nítida. Nas fotomicrografias da figura 20 foi utilizada a objetiva de 20x, correspondendo a uma ampliação de 200 vezes.

**Figura 20** - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A análise microestrutural dos corpos cerâmicos em estudo contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da variação da pressão de compactação nas peças à verde.

A figura 19 mostra um comportamento semelhante entre os CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80, onde se observa aparentemente a mesma quantidade de poros nas peças após a sinterização, como também pode ser verificado nos resultados da porosidade e variação volumétrica.

Foi possível visualizar o contorno dos grãos nas peças verdes (a) entre as amostras nas diferentes pressões de compactação, sendo verificada interface entre os grãos antes de ocorrer a difusão das partículas através da sinterização. Enquanto que nas imagens (b) é verificada maior homogeneidade e a presença de poros caracterizada pelas regiões escuras das micrografias, cujas partículas fundentes não foram capazes de preencher os vazios nas condições executadas no ensaio.

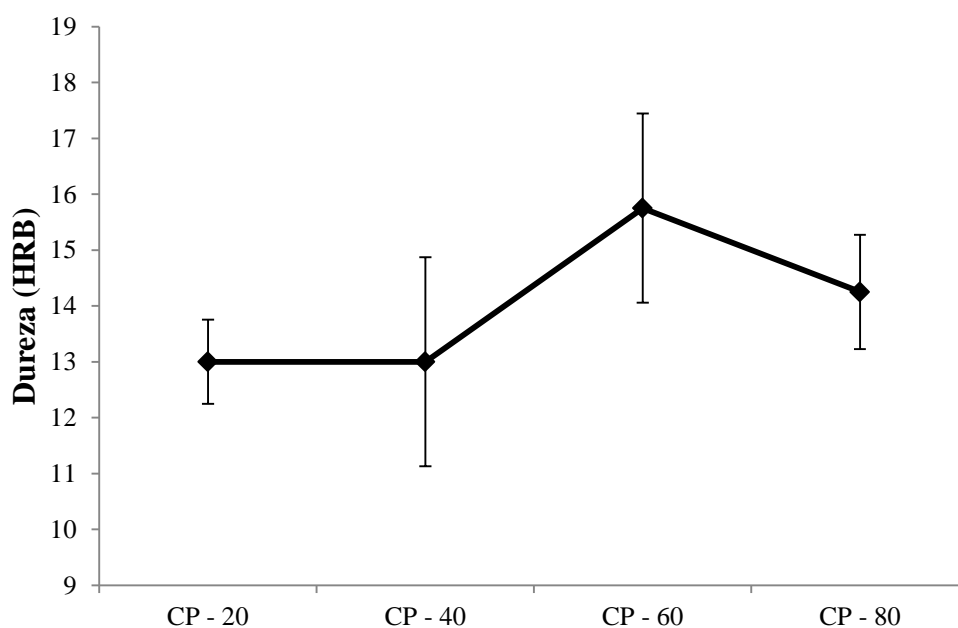
A mudança de coloração entre as figuras verdes (a) e sinterizadas (b) é característica do processo das reações químicas que ocorrem durante o desenvolvimento da queima. Embora os resultados condigam com os demais ensaios realizados, as análises devem ser feitas com certa cautela, pois dependendo da região visualizada, pode-se chegar a uma conclusão equivocada.

## **5.4. Determinação das propriedades mecânicas**

### **5.4.1. Dureza Rockwell B**

O Gráfico 4 ilustra os resultados da Dureza Rockwell B para as amostras CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80 na temperatura de sinterização de 1140 °C . Verifica-se que os valores de dureza obtidos para as amostras se mantiveram bem próximos mesmo com o aumento da pressão de compactação, o que sugere ainda a possível igualdade da resistência mecânica, sendo esta avaliada posteriormente.

**Gráfico 4** - Dureza Rockwell B para temperatura de sinterização a 1140°C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando os dados do Gráfico 4, pode-se verificar que, à medida que se aumentou a carga de compactação das amostras, ocorreu uma estabilidade da Dureza Rockwell B. Isto significa que, para as mesmas condições do ensaio realizado, estatisticamente a pressão de compactação não interfere na dureza, corroborando novamente os resultados propostos das propriedades físicas.

#### **5.4.2. Compressão diametral**

O ensaio de compressão diametral do grupo de amostras demonstrou um comportamento esperado de fratura descrito por Stanley (2001). Ao término do ensaio, todas as peças fraturaram no plano diametral de simetria da peça, ou seja, a propagação da trinca ocorreu ao longo do seu diâmetro no sentido longitudinal, obtendo o formato de duas semicircunferências, conforme mostra a figura 21.

**Figura 21** - Amostra fraturada após ensaio de compressão diametral.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A tabela 6 mostra a relação L/d (espessura/diâmetro) proposta por Stanley (2001), no qual determina valores apropriados para realização do ensaio de compressão diametral, com intervalo L/d entre 0,2 e 0,5.

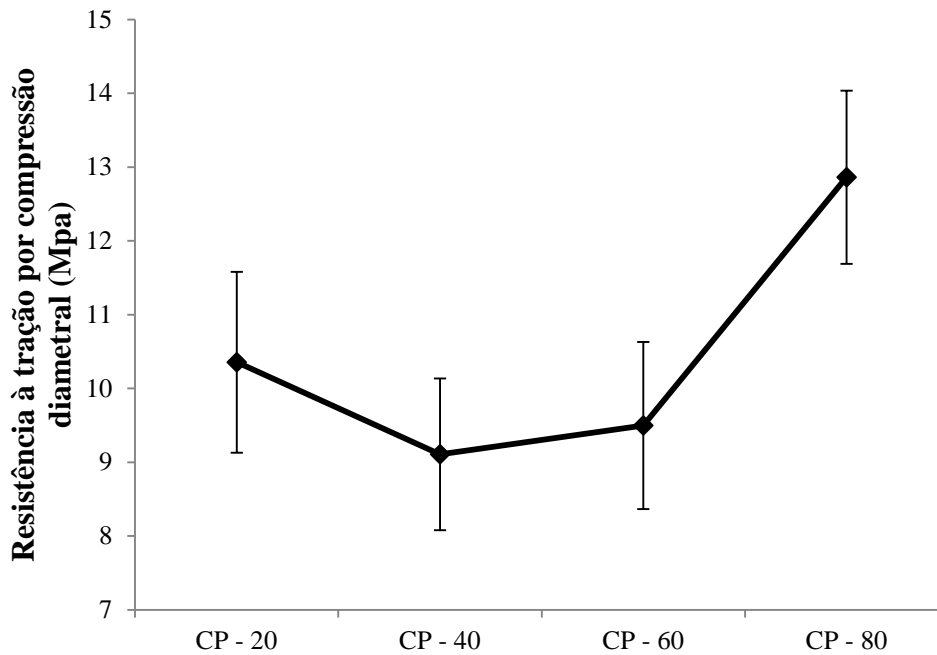
**Tabela 6** - Relação L/d proposta por Stanley (2001).

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>L/d</b>
<b>CP - 20</b>	0,46
<b>CP - 40</b>	0,43
<b>CP - 60</b>	0,41
<b>CP - 80</b>	0,40

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que a média da razão L/d de todas as peças ficaram dentro do intervalo proposto por Stanley (2001).

O gráfico 5 ilustra os resultados da resistência a tração por compressão diametral à temperatura de 1140 °C:

**Gráfico 5** - Resistência à compressão diametral – 1140°C.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para essa temperatura de sinterização, as variações da resistência à tração por compressão diametral se mantiveram estatisticamente constantes com o aumento da carga de compactação das peças verdes, provavelmente devido a minimização dos vazios (porosidade) no interior do material durante o processo de sinterização. Este comportamento das peças já era esperado, pois a dureza também se manteve constante com o aumento da carga de compactação.

A curva para os resultados de resistência à compressão diametral de peças sinterizadas a 1140°C revela um comportamento constante entre os CP-20, CP-40 e CP-60. Porém, à mesma temperatura, nota-se uma pequena variação no CP-80.

Alguns fatores podem ter sido determinantes neste resultado do CP-80, como: Realização do ensaio em poucos corpos de prova, que culminou em um alto desvio padrão; capacidade da máquina muito superior à realidade das peças, podendo causar imprecisão de modo significativo.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo consistiu em analisar a possibilidade da utilização dos resíduos do granito Corumbá como matéria prima na metalurgia do pó através da investigação das propriedades físicas, mecânicas e microestrutural de corpos sinterizados, motivado pela necessidade de reduzir os danos ambientais causados pelo descarte inapropriado destes rejeitos. A partir dos ensaios realizados, podem-se destacar algumas conclusões:

O granito Corumbá é essencialmente composto por quartzo, responsável pela estrutura do corpo e, os feldspatos albita e microclínio, usados como fundentes formadores da fase líquida.

A intensa presença de fundentes na composição química permitiu a sinterização em temperaturas mais baixas ( $<1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o que implica menor custo energético. A cor escura (marrom avermelhada) é muito provavelmente resultado da presença de óxido de ferro na massa cerâmica.

Os corpos de prova submetidos à temperatura de  $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$  apresentaram baixa sinterização sendo evidenciada pela coloração clara e aspecto visual fosco. À temperatura de  $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$  observou-se estabilidade dimensional e vitrificação das peças devido ao aspecto brilhoso e coloração marrom escura. Verificou-se um início de perda da estabilidade dimensional nos corpos de prova sinterizados a  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a perda da forma inicial foi generalizada.

A porosidade não é alterada significativamente com o aumento da pressão de compactação. Isto significa que o material atinge o grau de saturação da compactação e eliminação dos poros a menores esforços e utilizando menos energia.

A variação volumétrica diminui à medida que aumenta a carga de compactação nas peças verdes, até chegarem ao patamar de saturação. Percebeu-se uma tendência de diminuição do volume das peças verdes à medida que aumenta a carga de compactação, entretanto, quando sinterizados, os corpos de prova atingem aproximadamente o mesmo volume final, corroborando o fato da porosidade das peças sinterizadas permanecerem a mesma independente da carga de compactação.

As micrografias permitiram observar a mesma quantidade de poros nas peças sinterizadas para as diferentes pressões de compactação, assim como pode ser constatado nos resultados da porosidade e variação volumétrica. Foi possível visualizar o contorno dos grãos nas peças, sendo verificada interface entre os grãos antes de ocorrer a difusão das partículas

através da sinterização, enquanto que nas peças sinterizadas foi verificada maior homogeneidade e a presença de poros.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza mantiveram a tendência de estabilidade com a elevação da pressão de compactação.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de compressão diametral, concluiu-se que estatisticamente não há variação expressiva da resistência à tração com o aumento da pressão de compactação, com exceção para o ensaio realizado no corpo de prova compactado a 80 kN, que teve sua resistência ligeiramente aumentada, provavelmente pela capacidade da máquina ser muito superior à realidade das peças ensaiadas, implicando em possíveis imprecisões dos resultados. Além disso, a limitação da quantidade de corpos de prova podem ter acarretado altos desvios padrões.



### **6.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Este trabalho constituiu a caracterização de peças cerâmicas a partir do Rejeito do granito Corumbá. Entretanto, estes resultados são preliminares, havendo um conjunto de características e ensaios a serem explorados e investigados para consolidar as ideias aqui desenvolvidas. Dessa forma, algumas sugestões seguem para trabalhos futuros:

- Realizar o ensaio de desgaste para os corpos de prova cerâmicos;
- Realizar a sinterização com maiores taxas de aquecimento, para otimizar a queima;
- Realizar o ensaio de flexão em 3 pontos, a fim de estudar o comportamento do material e as principais propriedades: deflexão máxima de ruptura, módulos de ruptura, elasticidade, resiliência e tenacidade.
- Verificar outros níveis de compactação se há interferência na porosidade final das peças sinterizadas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS, Associação brasileira da indústria de rochas ornamentais. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Julho/2018. Brasília, 2018.

ABIROCHAS, Associação brasileira da indústria de rochas ornamentais. **Balanço das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020. Informe 01/2021**. São Paulo, 2021.

ALMEIDA, Felipe Fraga de. **Avaliação dos procedimentos não-convencionais de laboratório para determinação do comportamento mecânico e de durabilidade de materiais cerâmicos vermelhos**. 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

ALMEIDA, Kelson Silva *et al.*, Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Revista Matéria**, [S.L.], v.25, n.1, p.1-14, Out. 2020.

ARAÚJO, Alinne Marianne Martins *et al.* Caracterização tecnológica do granito exótico fuji para usos ornamentais. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 251-256, jul. 2015. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0896>.

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 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-3: Placas cerâmicas - Determinação da absorção da água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente**, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2004.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **C119-14: standard terminology relating to dimension stone**. West Conshohocken, 2014.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **C162 – 05 (2015): Standard terminology of glass and glass products**. West Conshohocken, 2015.

BUYUKSAGIS, I.S.; UYGUNOGLU, T., TATAR, E. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 734–742, 2017.

CABRAL, Daniel Henrique Pires. **Uso de rejeitos do granito rain forest para a produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora (LTC), 2006.

CAVALCANTI, L. F. M., OLIVEIRA, F. M. C., MELO, E. B., *et al.*, “Granito Azul Sucuru: caracterização tecnológica por meio do aproveitamento do material”, **Revista Principia**, n. 33 p. 11-20, mai. 2017.

DELFORGE, Daniel Yvan Martin *et al.* Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, p. 95-100, mar. 2007.

DHANAPANDIANA, S.; SHANTHIB, M. Utilization of marble and granite wastes in brick products”, **Journal of Industrial Pollution Control**, v. 25, Issue 2, p. 145 -150, 2009.

ESPÍRITO SANTO. Carlos Rubens Araujo Alencar. Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo. **Manual de Caracterização, Aplicação, Uso e Manutenção das Principais Rochas Comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim, 2013. 242 p.

FREIRES, P. F. **Efeitos da co-utilização dos resíduos do beneficiamento do caulim e da extração do granito Rain Forest para produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água**. 2011. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará.

GALDINO, André Gustavo de Sousa. **Caracterização mecânica e microestrutural de cerâmicas porosas obtidas a partir de diferentes aluminas**. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

HAMMES, Gisele *et al.* Effect of double pressing/double sintering on the sliding wear of self-lubricating sintered composites. **Tribology International**, [S.L.], v. 70, p. 119-127, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.09.016>.

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**. 2021. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

LOPES JUNIOR, Genilson de Souza. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com produtos da combustão do carvão mineral**. 2011. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LUZ, J. C. **Desenvolvimento de formulações para a produção de grés porcelanato a partir de matérias primas da região da bacia da Parnaíba**. 2008. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F., Influência da temperatura de queima na microestrutura de argilas de Campos dos Goytacazes-RJ. **Cerâmica**, v. 49, p. 6 – 10, 2003.

OLIVEIRA, Glenda Aparecida Rodrigues de. **Rochas ornamentais do espírito santo e do nordeste: avaliação da aplicabilidade através da caracterização tecnológica**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PINHEIRO, Halisson de Souza. **Formulação e caracterização de peças cerâmicas fabricadas a partir do rejeito do granito asa branca com adição dos produtos da combustão do carvão mineral**. 2016. 100 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PINHEIRO, H. S., NOGUEIRA, R. E. F. Q., LOBO, C. J. S., “Peças Cerâmicas fabricadas usando pó de granito com adição dos produtos da combustão do carvão mineral: Caracterização Mecânica”, **Revista Matéria**, v.24, n.1, p.1-18, 2019.

RIELLA, H.G.; FRANJNDLICH, E.u. de C.; DURAZZO, M.. Caracterização e Utilização de Fundentes em Massas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, Florianópolis, v. 3, n. 7, p. 33-36, jun. 2002.

ROVERI, C. D.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T.. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP. **Cerâmica**, [S.L.], v. 53, n. 328, p. 436-441, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132007000400016>.

SAMAL, P.; NEWKIRK, J. **Powder Metallurgy Methods and Applications**, vol. 7, ASM Handbook of Powder Metallurgy, 2015.

SANTOS, Jeferson dos. **Caracterização de resíduos de rochas ornamentais: aplicação de conceitos mecanoquímicos**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SANTOS, Lucas Souza. **Processo produtivo e geração de resíduos de corte de mármore e granitos em marmorarias de rio verde/go**. 2020. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2020.

SETZ, Luiz Fernando Grespan; SILVA, Antônio Carlos da. **O processamento cerâmico sem mistério**. São Paulo: Blucher, 2019. 256 p.

STANLEY, PETER – **Mechanical strength testing of compacted powders**. The Manchester School of Engineering, Simon Building, University of Manchester, Oxford Road, Manchester M13 9PL, UK. 2001.

TAGUCHI, S. P., SANTOS, J. C., GOMES, T. M., *et al.*, “Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado”, **Cerâmica**, v. 60, n. 354, p. 291-296, Ago. 2014.

TCHADJIÉ, L. N., RANJBAR, N., DJOBO, J. N. Y., *et al.*, “Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis”, **Ceramics International**, v. 42, n. 2, p. 3046-3055, Fev. 2016.

TORRES, P., FERNANDES, H. R., OLHERO, F., *et al.*, “Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles”, **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, n. 1, p. 23-30, Jan. 2009.