



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANNA KETHLEN FEITOSA DOS SANTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
COM A VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS
OBTIDAS A PARTIR DO REJEITO DO GRANITO BRANCO MARFIM.**

RUSSAS

2023

ANNA KETHLEN FEITOSA DOS SANTOS

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
COM A VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS
OBTIDAS A PARTIR DO REJEITO DO GRANITO BRANCO MARFIM.

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

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

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S233e Santos, Anna Kethlen Feitosa dos.
Estudo do comportamento das propriedades físicas e mecânicas com a variação da pressão de compactação de peças cerâmicas obtidas a partir do rejeito do granito branco marfim. / Anna Kethlen Feitosa dos Santos. – 2023.
56 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.
1. granito Branco Marfim. 2. rocha ornamental. 3. rejeitos. 4. propriedades físicas e mecânicas. I. Título.
CDD 620.1
-

ANNA KETHLEN FEITOSA DOS SANTOS

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
COM A VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS
OBTIDAS A PARTIR DO REJEITO DO GRANITO BRANCO MARFIM.

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

Aprovada em: ___ / ___ / _____

BANCA EXAMINADORA

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

Marcos Ridiley Alcântara Costa
Universidade de Calgary

Rafaella Cavalcante Regis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Edinalda e Francisco por todo apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Francisco, por não ter medido esforços para me manter firme, me ajudar a ultrapassar os diversos obstáculos que surgiram, e ser minha base durante esse tempo.

A minha mãe, Edinalda, por todo incentivo, ensinamentos e colo nos momentos de angústia. Obrigada por toda dedicação, apesar das dificuldades.

Mãe e Pai, a vocês, minha eterna gratidão.

Ao meu namorado, Paulo Mateus, agradeço por toda ajuda, parceria, cuidado e apoio durante esse ciclo. Obrigada por tornar essa jornada mais leve.

Aos meus amigos e colegas, em especial, Ari Lucas agradeço a amizade, companhia, conselhos e apoio.

Aos meus amigos Alisson e Felipe que passaram diversas etapas da graduação ao meu lado e me ajudaram na construção desse trabalho, desde a concepção.

As minhas colegas de quarto, Hellen e Helena. Helena obrigada por estar presente no meu dia a dia com essa alegria contagiante. Hellen, obrigada por todo apoio nas noites de estudo e disponibilidade para ajudar na elaboração deste trabalho.

Aos professores que contribuíram para minha formação, obrigada por todos os ensinamentos.

Aos técnicos da UFC-Russas que me ajudaram na realização dos ensaios, em especial ao Técnico e amigo Marcos Ridiley, obrigada por toda paciência, disponibilidade, auxílio e por todas as conversas valiosas.

A Rafaella Cavalcante, obrigada por toda ajuda e disponibilidade.

Ao meu orientador, Dr. Cândido Lobo, obrigada por todo tempo disponibilizado, paciência, ensinamentos e dedicação.

A empresa Mafort pelo fornecimento do material e informações necessárias para a elaboração deste trabalho.

Todos vocês foram importantes e contribuíram de alguma forma para que esse momento chegasse. Levarei todos os ensinamentos e momentos em que estiveram comigo no coração, por onde eu for.

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais tem testemunhado mundialmente um notável crescimento, com destaque para o Brasil, um dos maiores produtores e exportadores desse setor. No entanto, esse crescimento tem levado à geração significativa de resíduos resultantes das atividades de extração e beneficiamento. Grande parte desses rejeitos, é descartado no meio ambiente sem cuidados adequados para minimizar ou eliminar a potencial contaminação por componentes poluentes. O reaproveitamento do subproduto é uma oportunidade de mitigar os impactos ambientais e reutilizá-los na indústria. Com base nessas informações, este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade tecnológica do rejeito do granito Branco Marfim, como matéria prima de artefatos obtidos por meio do processamento cerâmico, através de análises das propriedades físicas e mecânicas. O pó do granito foi caracterizado quimicamente através da Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), as amostras foram compactadas em quatro cargas de compactação (20 kN, 40 kN, 60k N e 80 kN) e sinterizadas a temperatura de 1140°C. Posteriormente, foram realizados ensaios para a determinação das propriedades físicas (variação volumétrica, densidade real do grão solto, densidade específica aparente e porosidade) e para a determinação das propriedades mecânicas (dureza Rockwell B e resistência à tração por compressão diametral). Os resultados mostraram que, visualmente, os corpos de prova sinterizados apresentaram tonalidade marrom e aspecto fosco, não houve uma variação significativa no volume das peças sinterizadas e os valores de porosidade diminuíram juntamente com o aumento da carga de compactação, tendendo a ficarem mais próximos. Quanto às propriedades mecânicas, resistência à tração por compressão diametral e dureza aumentaram com o aumento da carga de compactação, a primeira obteve um grande desvio padrão em ambas cargas de compactação e a segunda mostrou tendência à estabilidade. Dessa maneira, foi possível concluir que as propriedades variam com o aumento da carga de compactação, mas tendem a se estabilizar à medida que aumenta.

Palavras-chave: granito Branco Marfim; rocha ornamental; rejeitos; propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

The ornamental rock industry has witnessed remarkable global growth, with Brazil standing out as one of the largest producers and exporters in this sector. However, this growth has led to the significant generation of waste resulting from extraction and processing activities. A substantial portion of these rejects is disposed of into the environment without adequate care to minimize or eliminate potential contamination by pollutant components. Repurposing the byproduct presents an opportunity to mitigate environmental impacts and reuse them in the industry. Based on this information, this study aimed to investigate the technological feasibility of the reject from white ivory granite as a raw material for artifacts obtained through ceramic processing, utilizing analyses of physical and mechanical properties. The granite powder was chemically characterized through Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The samples were compacted under four compaction loads (20 kN, 40 kN, 60 kN, and 80 kN) and sintered at a temperature of 1140°C. Subsequently, tests were conducted to determine physical properties (volumetric variation, real density of loose grain, apparent specific density, and porosity) and mechanical properties (Rockwell B hardness and tensile strength by diametral compression). The results indicated that visually, the sintered specimens exhibited a brown hue and a matte appearance, and there was no significant variation in the volume of the sintered pieces. Porosity values decreased with increasing compaction load, approaching stability. Concerning mechanical properties, tensile strength by diametral compression and Rockwell B hardness increased with an increase in compaction load. Tensile strength exhibited a large standard deviation under both compaction loads, while hardness showed a tendency towards stability. Thus, it was possible to conclude that properties vary with increasing compaction load but tend to stabilize with further increments.

Keywords: white ivory granite; ornamental rock; rejects; physical and mechanical properties.

“- Quem estará nas trincheiras ao teu lado?

- E isso importa?

- Mais que a própria guerra.”

Ernest Hemingway

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de peneiramento.....	25
Figura 2 - Tamanho das partículas que passam pelo processo de peneiramento	25
Figura 3 - Processo de compactação	26
Figura 4 - Mudanças microestruturais que ocorrem durante a queima para pós compactados. (a) Partículas de pó após a prensagem. (b) Coalescência das partículas e formação de poros conforme a sinterização tem início. (c) À medida que o processo de sinterização avança.	27
Figura 5 - Britador de mandíbulas BB 100.....	30
Figura 6 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica (a) Peneira 9,5 mm. (b) Peneira 4,75 mm. (c) Peneira 2,4 mm. (d) Peneira 1,2 mm. (e) Peneira 600 µm. (f) Peneira 75 µm.	30
Figura 7 - Moinho de disco orbital MA 360.....	31
Figura 8 - Balança analítica	31
Figura 9 - Matriz metálica para prensagem das peças cerâmicas.....	32
Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC: 300kN.....	32
Figura 11 - Forno Linn Elektro Therm.....	33
Figura 12 - a) Picnômetros no processo de fervura; b) Resfriamento no dessecador	36
Figura 13 - Durômetro Rockwell SUSSEN WOLPERT.....	38
Figura 14 - Peças verdes compactadas: a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN.....	40
Figura 15 - Corpos de prova sinterizados a 1140 °C: (a) CP-20, (b) CP-40, (c) CP-60, (d) CP-80	40
Figura 16 - Amostra fraturada após ensaio de compressão diametral.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas utilizadas e quantidade de corpos de prova.....	33
Tabela 2 - Composição química do granito Branco Marfim obtida por EDS.	41
Tabela 3 - Densidade específica aparente de peças sinterizadas de granito Branco Marfim. ..	45
Tabela 4 - Relação L/d proposta por Stanley (2001).....	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação volumétrica (%)	43
Gráfico 2 - Volume dos corpos de prova verdes e sinterizados.	44
Gráfico 3 - Porosidade (%).	46
Gráfico 4 - Dureza Rockwell B.	47
Gráfico 5 - Resistência à compressão diametral (MPa).	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Rochas ornamentais	17
2.2	Indústrias de rochas ornamentais	18
2.3	Processo produtivo	19
<i>2.3.1</i>	<i>Extração</i>	<i>19</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Corte dos blocos</i>	<i>20</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Levigamento</i>	<i>21</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Polimento</i>	<i>21</i>
2.4	Geração de resíduos e gestão Ambiental	22
2.5	Processamento cerâmico	23
<i>2.5.1</i>	<i>Obtenção dos pós</i>	<i>23</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Granulometria</i>	<i>24</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Compactação</i>	<i>25</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Sinterização</i>	<i>27</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Confecção dos corpos de prova	29
<i>3.1.1</i>	<i>Seleção do material</i>	<i>29</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Britagem</i>	<i>29</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Moagem e peneiramento</i>	<i>30</i>
<i>3.1.4</i>	<i>Compactação dos corpos de prova</i>	<i>31</i>
<i>3.1.5</i>	<i>Sinterização dos corpos de prova</i>	<i>33</i>
3.2	Caracterização Química	34
<i>3.2.1</i>	<i>Espectroscopia de Dispersão de Energia</i>	<i>34</i>
3.3	Caracterização Física	34
<i>3.3.1</i>	<i>Variação volumétrica</i>	<i>34</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Densidade real do grão solto</i>	<i>35</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Densidade específica aparente</i>	<i>37</i>
<i>3.3.4</i>	<i>Porosidade</i>	<i>37</i>
3.4	Determinação das propriedades mecânicas	38

3.4.1	<i>Dureza</i>	38
3.4.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	39
4	RESULTADOS	40
4.1	Análise visual	40
4.2	Caracterização Química	41
4.2.1	<i>Espectroscopia de Dispersão de Energia</i>	41
4.3	Análise das Propriedades Físicas	43
4.3.1	<i>Variação volumétrica</i>	43
4.3.2	<i>Densidade específica aparente</i>	45
4.3.3	<i>Densidade real do grão solto</i>	45
4.3.4	<i>Porosidade</i>	46
4.4	Análise das Propriedades Mecânicas	47
4.4.1	<i>Dureza Rockwell B</i>	47
4.4.2	<i>Compressão diametral</i>	48
5	CONCLUSÕES	50
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais desempenham um papel crucial no setor da construção civil e na indústria de revestimentos, proporcionando não apenas durabilidade e resistência, mas também uma estética singular.

A extração, beneficiamento e exportação dessas rochas contribui significativamente para o crescimento econômico. Especialmente no Brasil, as rochas ornamentais têm experimentado um crescimento significativo. De acordo com o Centro Brasileiro dos Exportadores de Rochas Ornamentais (2022), o setor de rochas exportou 2,09 milhões de toneladas em 2022, atingindo a marca de 1,28 bilhões de dólares.

A diversidade geológica do país e a crescente demanda internacional tem impulsionado a extração e o processamento desses materiais de forma cada vez mais eficiente. No entanto, esse processo produtivo não é isento de desafios, os quais incluem o gerenciamento de resíduos e rejeitos resultantes do corte e beneficiamento das rochas.

Os rejeitos provenientes deste segmento econômico geram preocupação no cenário ambiental, uma vez que esses resíduos consistem em fragmentos de rochas, partículas de granulometria variada, lamas e outros materiais. A indústria de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais tem sido apontada por ambientalistas como uma grande fonte de poluição ambiental, devido à geração considerável de resíduos que muitas vezes são lançados nos ecossistemas sem tratamento adequado para reduzir ou eliminar seus componentes poluentes (LIMA; LIRA; NEVES, 2016). Segundo Vidal *et al.* (2018), estima-se que, no Brasil, são gerados cerca de 2,5 milhões de toneladas de resíduos finos proveniente das indústrias de beneficiamento.

Nesse sentido, surge a necessidade de desenvolver estudos destinados ao reaproveitamento desse subproduto, visando oferecer uma destinação final apropriada promovendo a minimização dos impactos ambientais.

Uma possibilidade para a gestão desses resíduos é a sua utilização como matéria prima no processamento cerâmico. Desta forma, este trabalho se propõe a investigar a viabilidade de aplicação tecnológica relativa às propriedades físicas e mecânicas do rejeito de granito Branco Marfim utilizando o processamento cerâmico para confeccionar os corpos de prova. Para tal foram realizadas caracterizações tecnológicas, ensaios mecânicos e análises dos respectivos resultados.

1.1 Objetivos

Nesse tópico será apresentado os objetivos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das propriedades físicas e mecânicas com a variação da pressão de compactação de peças cerâmicas obtidas a partir do rejeito de granito Branco Marfim.

1.1.2 Objetivos específicos

O trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Identificar a composição química do granito Branco Marfim através do ensaio de Espectroscopia de Dispersão de Energia;
- Determinar as propriedades físicas dos corpos de prova quanto à densidade real do grão solto, variação volumétrica e porosidade;
- Analisar a influência da carga de compactação nas propriedades de dureza e compressão diametral.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Essa seção explora o referencial teórico que fundamenta a pesquisa realizada.

2.1 Rochas ornamentais

As rochas ornamentais são materiais rochosos formados por diferentes tipos de compostos minerais, tais como mármore, granito e quartzito, de modo que, tem sua finalidade ligada principalmente a revestimentos e ornamentação. São extraídos em blocos ou placas, sujeitos a processos de beneficiamento.

O seu processo produtivo se inicia na pesquisa, onde são levantadas algumas informações em relação ao solo, qualidade e algumas características, seguido da extração com menor possibilidade de perdas e impactos. Após isso, tem-se o desdobramento, através de técnicas de corte e, por fim, o beneficiamento que vai fazer o tratamento final da rocha acerca do acabamento superficial e adequações de dimensões (ROCHA; SOUSA, 2010).

Diante o contexto econômico, as rochas ornamentais exibem um valor comercial considerável, tanto no âmbito nacional quanto internacional, sendo principalmente usadas no ramo da construção civil. No Brasil, esse setor vem gerando bastante empregabilidade e, nos últimos anos, estudos visando aplicabilidade estética como material de revestimento vem sendo desenvolvidos com o fito de se obter um melhor monitoramento da qualidade e propriedades (QUEIROZ; CARANASSIOS, 2015).

O mármore e o granito são destaque em revestimentos no mercado, pela sua variedade de tipos, cores, beleza visual, por permitirem uma amplitude de aplicações em pisos e fachadas, bem como pela sua resistência, qualidade e durabilidade (FRANGELLA, 2003).

Paralelo a isso os autores Mendes & Vidal (2002) ao analisarem o controle de qualidade e características no emprego das rochas ornamentais, apontam a importância de conhecer a composição do mineral, características petrográficas, tecnológicas, físicas, químicas e mecânicas, bem como, particularidades cromáticas e texturais como aspectos indispensáveis para garantir segurança e estabilidade, pois durante a sua utilização são submetidas a diversas solicitações, como ataques químicos, desgastes abrasivos, impactos e variadas condições climáticas.

2.2 Indústrias de rochas ornamentais

Mundialmente, a indústria de rochas ornamentais tem sucedido um desempenho crescente, entre 2013 e 2017 expandiu, em média, à taxa de 4,00% a.a. Por esse lado, em 2017, cerca de 10 países, dentre eles o Brasil, foram responsáveis por quase 82% da produção de rochas ornamentais do mundo e com a evolução da tecnologia de lavra e beneficiamento, no total da produção mundial, a fração de rochas silicáticas aumentou consideravelmente. (BEZERRA, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Rochas Ornamentais (2018), todas as partes que compõem o processo produtivo de rochas ornamentais e revestimentos ganharam destaque no Brasil, a partir da década de 90, esse fato se originou principalmente com o crescimento das exportações com o aumento da venda de rochas processadas semiacabadas, produtos acabados de ardósias, quartzitos foliados e, principalmente chapas polidas de granito.

No território brasileiro, o potencial econômico acerca da extração e produção de rochas ornamentais e de revestimento está essencialmente ligado à sua excelente diversidade geológica, às condições organizacionais da economia nacional e à forte demanda mundial de revestimentos. Esse cenário destaca uma profusa vantagem competitiva neste setor, sobretudo em litotipos ricos em minerais silicáticos, os granitos. (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

Nessa perspectiva, em 2020, o Brasil alcançou o valor de US \$987,4 milhões em exportações e produziu cerca de 2,16 milhões de toneladas em rochas ornamentais e de revestimento (ABRIROCHAS, 2021). Além disso, as chapas de granito tiveram maior destaque dentre as exportações brasileiras de rochas ornamentais no primeiro trimestre do ano de 2022, detendo cerca de 62,2% das exportações nesse período, um total de US \$176,4 milhões (CENTROROCHAS, 2022).

No ano de 2017, o Brasil exportou rochas ornamentais para 117 países, sendo os principais compradores EUA, China e Itália, respectivamente, além de se destacar como quarto maior produtor e exportador do mundo nesse setor. É válido destacar que dos 16 estados brasileiros que exportaram nesse ano, Espírito Santo se manteve como principal, com cerca de 81,7% do faturamento, seguido de Minas Gerais, Ceará, Bahia e Rio Grande do Norte que apontaram, para essas exportações, um faturamento superior a US \$10 milhões (ABRIROCHAS, 2018).

Análogo a isso, segundo o Bezerra (2018), estima-se que a mineração de rochas ornamentais no Nordeste, em 2017, tenha atingido 1,63 milhão de toneladas, o que representa

cerca de 20% da produção nacional. Além disso, na extração de rochas ornamentais no Brasil, destaca-se, no Nordeste, Bahia e Ceará com participação de 10,4% e 5,2%, respectivamente, do total de vínculos empregatícios formais nessa atividade.

2.3 Processo produtivo

Após o estudo do solo e planejamento técnico-econômico, o processo produtivo das rochas ornamentais é composto por, basicamente, duas etapas: extração e beneficiamento. Embora seja relativamente simples, o processo de produção requer cautela, devido à sua finalidade. A seguir serão descritos a extração e as etapas de beneficiamento, as quais incluem serragem/corte dos blocos extraídos, levigamento e polimento das estruturas rochosas.

2.3.1 Extração

Inicialmente o processo produtivo das rochas ornamentais acontece em pedreiras, onde os blocos rochosos são extraídos. Para isso, previamente, é necessário que haja um estudo do solo e um planejamento técnico-econômico, com o intuito de conhecer as características e potenciais das rochas, bem como, manter sua integridade física e minimizar o impacto ambiental.

O método de lavra mais utilizado é a lavra em bancada, onde, há uma subdivisão em bancadas altas e baixas. Nas lavras em bancadas altas geralmente são feitas extrações seletivas, pois elas acontecem, na maioria das vezes, em maciços heterogêneos, diferentemente das lavras em bancadas baixas que acontecem em maciços homogêneos (FEAM; FIEMG, 2015). Na extração por lavras em bancadas, o corte do maciço é realizado por meio de fio diamantado, que consiste em um cabo de aço composto por pérolas diamantadas fixas e separadas por anéis de borracha/plástico especial (SOUZA, VIDAL, CASTRO, 2012). Nesse método há uma formação de “corredores” que seguem uma geometria em “L” em cada nível da evolução lateral da lavra, destes são extraídos grandes volumes primários de rochas em formas de paralelepípedos, chamados “quadrotes”, que, em seguida são fracionados em volumes secundários, chamados "filões", posteriormente, desdobrados em pranchas, e, finalmente, blocos que são encaminhados para o beneficiamento (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

Há também o método de lavra por desmoronamento ou desabamento que permite a remoção de grandes volumes de rochas, através de desmontes por meio da aplicação de explosivos. Embora haja bastante precaução durante a detonação dos explosivos, este método produz grande volume de rochas com fraturas, fragmentadas e irregulares devido ao comprometimento da integridade físico-mecânica da rocha por fatores geológicos-estruturais presente no material e pelo próprio desabamento, sendo assim, inevitável o desperdício e a perda econômica (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013). Segundo Cabello *et al.* (2012), em razão do da quantidade de desperdício, bem como o impacto ambiental que fornece, a lavra por desabamento está em desuso.

2.3.2 Corte dos blocos

Depois da extração, os blocos selecionados são encaminhados para o processo de corte. Os blocos de rocha são geralmente transformados em chapas, e para produzi-las existem diversas técnicas, dentre elas, o desdobramento por meio de teares de lâminas e teares multifios, sendo a primeira a mais convencional.

Nos teares de lâminas o processamento é realizado através da ação de uma polpa abrasiva, composta por água, granalha de aço ou ferro, cal ou bentonita, e somado a essa mistura, pó da rocha gerado no processo. Essa polpa circula por um conjunto de lâminas movidas pelo tear, que operam arranjadas de maneira equidistantes e paralelas (FEAM; FIEMG, 2015). O tear é integrado com uma estrutura de sustentação constituída por um quadro de colunas que apoia o quadro porta-lâmina. O quadro porta-lâmina é agrupado a um mecanismo biela-manivela que é acionado por um motor elétrico, produzindo um movimento alternado que gera atrito entre os três elementos, mistura abrasiva, bloco e lâminas. A polpa abrasiva desliza entre as lâminas e o bloco, assim, as lâminas são pressionadas contra o bloco movendo-se em sentido descendente promovendo o avanço do corte (ANDRADE *et al.* 1996, *apud* FILHO, 2006).

Outra técnica de corte corresponde ao desdobramento por tear multifios, onde sua tecnologia é fruto do êxito da utilização de fio diamantado na extração das rochas ornamentais. Os teares multifios são compostos por um arranjo metálico que conta com fios diamantados integrados, separados igualmente entre si e tensionados de modo a produzir um movimento circular ao redor do arranjo. O conjunto arranjo metálico e fios diamantados é sustentado por colunas e movimenta-se verticalmente para baixo, assim, os fios diamantados tocam o bloco proporcionando o desgaste e promovendo o corte (SOUZA, VIDAL, CASTRO, 2012).

2.3.3 Levigamento

Após o corte, o beneficiamento avança para um eficiente acabamento das chapas. Os acabamentos atribuem textura final na rocha, conforme a aplicação desejada. Uma das etapas de acabamento é o levigamento, que segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente e Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2015), é um processo produzido por abrasão mecânica através de politrizes manuais ou automáticas, que passam sucessivas vezes sobre a chapa, trocando a granulometria dos abrasivos utilizados nos discos das politrizes.

O levigamento corresponde ao desgrossamento e retificação de sua superfície, tendo como finalidade diminuir as irregularidades, eliminando marcas geradas durante o corte e principalmente as rugosidades. Para Silveira (2007), rugosidade, na rocha ornamental, afeta a durabilidade e qualidade estando intimamente ligada às propriedades físicas do material, ou seja, um material rochoso menos rugoso tem maior qualidade. Dessa maneira, o processo é realizado de tal forma que, se consiga uma chapa de mesma espessura, completamente lisa, plana e opaca (FEMA; FIEMG, 2015).

2.3.4 Polimento

No processo de polimento de rochas ornamentais, realiza-se o desgaste do tipo abrasivo. O polimento consiste no desgaste do contato entre a superfície da rocha e os rebolos abrasivos, de maneira similar ao processo de levigamento, utilizando politrizes, no entanto, com a granulometria do abrasivo alterada.

Para as rochas ornamentais, o polimento é responsável por realçar a textura, coloração e a aparência, a fim de dar ao material um aspecto brilhante, de forma que destaque a beleza da superfície rochosa. Além disso, no polimento das rochas ornamentais, o desgaste imprime também durabilidade ao material. Assim, compreender as características específicas da rocha e as características relativas à etapa de beneficiamento, bem como os processos de desgaste envolvidos no polimento é de grande importância para uma maior qualidade do produto final (SILVEIRA, 2007).

2.4 Geração de resíduos e gestão Ambiental

A extração e beneficiamento de rochas ornamentais, apesar de contribuírem para a indústria da construção civil e para a estética arquitetônica, são atividades que geram uma série de impactos ambientais significativos, dentre eles o grande volume de resíduos gerados.

Segundo Vidal *et al.* 2021, os resíduos gerados na indústria de rochas ornamentais podem ser classificados em duas categorias predominantes: os resíduos de natureza grosseira, originados nas operações de extração em pedreiras, e os resíduos finos provenientes das atividades de beneficiamento.

Só em 2016, a produção de rochas ornamentais no Brasil atingiu cerca de 8,5 milhões de toneladas, englobando mármore, travertinos, granitos e produtos similares. Essa produção resultou na geração de aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de resíduos, correspondendo a um quarto do total produzido, constituindo-se principalmente de rejeitos provenientes do corte de mármore e granito (CHIODI, 2018 *apud* CARDOSO *et al.*, 2021)

Devido a quantidade expressiva de resíduo gerado, é importante buscar maneiras para que haja um equilíbrio entre os benefícios econômicos da extração e beneficiamento de rochas ornamentais e a necessidade de proteger o meio ambiente e as pessoas.

Nesse sentido, para lidar com essa questão, a gestão ambiental dos resíduos de rochas ornamentais deve envolver uma série de medidas e estratégias. Em primeiro lugar, a redução na geração desses resíduos é fundamental. Isso pode ser alcançado através de práticas de extração e beneficiamento mais eficientes, bem como da promoção do uso racional dos materiais.

Além disso, a segregação adequada dos resíduos é importante para garantir que materiais potencialmente poluentes ou contaminados sejam devidamente isolados e tratados. Muitos dos resíduos de rochas ornamentais podem conter substâncias químicas que, se liberadas no meio ambiente, representam riscos à qualidade da água e do solo.

A reciclagem e a reutilização dos resíduos também são estratégias importantes na gestão ambiental. Resíduos como pós e lascas podem ser transformados em produtos úteis, como agregados para construção civil ou matéria-prima para a indústria cerâmica. Nesse processo, é fundamental considerar a caracterização física, química e ambiental dos resíduos, garantindo que os novos produtos atendam aos padrões de desempenho desejados e obtenham maior aceitação pelos consumidores. Essas práticas se apresentam como uma oportunidade

econômico-financeira, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação dos impactos ambientais e desenvolvimento sustentável dos setores envolvidos (REIS; ALVAREZ, 2007).

2.5 Processamento cerâmico

Segundo Santos (2018), a obtenção de peças por processamento cerâmico, nas últimas décadas, sucedeu inovações tecnológicas com o intuito de produzir componentes mecânicos com um maior controle dimensional, menor desperdício, baixo custo e de maior qualidade.

Paralelamente, Morais e Junior (2021) afirmam que o processamento cerâmico se destaca por ser um método que possui ampla aplicação industrial, uma vez que possibilita a aquisição de peças com geometrias diversas, com um bom acabamento superficial e porosidades controladas. À vista disso, os parâmetros que compõem o processamento da matéria prima influenciam diretamente as propriedades do produto final. Desta maneira, mais do que a composição química e mineralógica, é imprescindível o controle das variáveis nas etapas de compactação e sinterização do material.

A tecnologia de processamento cerâmico é um método usado no preparo de matéria prima, o qual pode ser compreendido basicamente pela prensagem dos pós em moldes metálicos à temperatura ambiente (atribuindo forma à peça), seguida da consolidação da peça por aquecimento controlado. Em suma, o processo consiste na produção e obtenção do pó, mistura (se desejar obter alguma composição química específica), compactação, sinterização e operações de acabamento (LIMA, 2021).

2.5.1 Obtenção dos pós

Há diversas maneiras de se obter os pós, uma delas é a redução dos tamanhos dos grãos através de métodos mecânicos (quebra e moagem), os quais são indicados para materiais frágeis. Essa metodologia consiste em fragmentar a amostra com o auxílio de moinhos ou martelos (MORO; AURAS, 2007).

Existem inúmeros tipos de moinhos com características específicas relacionadas à capacidade e à eficiência, e a escolha deste depende, principalmente, da finalidade e das peculiaridades do material que será moído. Em laboratórios, os moinhos mais comuns são os agitadores, os quais consistem em um copo com bolas de moagem sacudido em movimentos

laterais e cíclicos por uma biela; os planetários, que possuem movimentos de rotação e translação dos recipientes de moagem; os atritores, que são compostos por um tambor vertical fixo, e no seu interior, uma série de impulsionadores organizados formando ângulos retos uns com os outros, de maneira que as hélices são agitadas e giram rapidamente; e os convencionais que consistem em um recipiente horizontal cilíndrico com bolas de moagem que é rotacionado (CHIAVERINI, 2001; CASTAGNET, 2008).

Além desses, outro equipamento que se destaca é o moinho de disco orbital, que opera agitando as câmaras de moagem em um movimento orbital. Desse modo, ocorre a diminuição das partículas do material através do atrito de discos de cerâmica de alta dureza, dispostos no interior da câmara de moagem, com a amostra do material (REGIS, 2021).

2.5.2 Granulometria

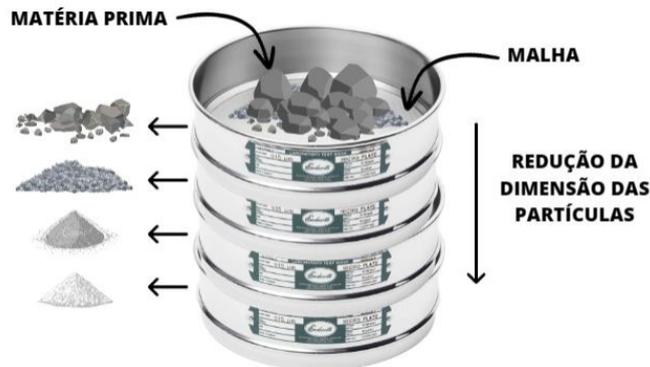
O estudo das propriedades e estruturas do material é fundamental para o desenvolvimento de produtos com bom desempenho, qualidade e durabilidade, de forma que atendam às necessidades específicas de sua aplicação. A amostra em forma de pó é composta por uma grande quantidade de partículas distribuídas em tamanhos contidos dentro de um intervalo de dimensões, e o controle dos tamanhos das partículas do material, bem como a forma, o grau de agregação e aglomeração são significativos para as características desejadas no produto final.

A homogeneização e uniformidade permite o aumento do contato entre as partículas do material. Assim, quanto mais homogêneo e uniforme for o tamanho da partícula, maiores as possibilidades de se obterem resultados consistentes. Por outro lado, fragmentos com dimensões maiores tendem a se segregar. Dessa maneira, é indicada a remoção das partículas maiores (SILVA et al, 2019 *apud* CHIAVERINI, 1992). Semelhante a isso, Knewitz (2009) afirma que a distribuição dimensional das partículas afeta o comportamento na sinterização e as propriedades da peça sinterizada, já que, o procedimento de sinterização é influenciado pela área da superfície e de contato entre as partículas, e estas, relacionadas com o tamanho e formato do pó.

A granulometria é uma técnica utilizada para determinar as grandezas e proporções das partículas do material. O processo de análise granulométrica corresponde à quebra do material em várias dimensões e subdivisão das partículas granulares, sendo expresso, habitualmente, em porcentagem (MORAIS *et al*, 2021). Diferentes técnicas podem ser utilizadas para realizar a análise do tamanho de uma partícula, dentre elas, a dispersão de luz,

análise por microscopia óptica, análise por microscopia eletrônica de varredura e peneiramento (KNEWITZ, 2009). O peneiramento é o método mais comum para realizar a análise granulométrica, efetuado por meio de grades (peneiras) de diferentes tamanhos de malhas (ver Figuras 1).

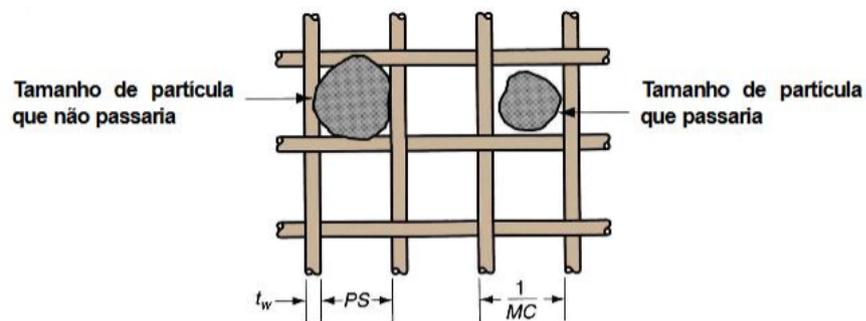
Figura 1 - Processo de peneiramento



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A contagem da malha corresponde ao número de abertura por polegada linear da grade (mesh). Assim, quanto maior for o mesh, mais elevado será o número de aberturas e, dessa forma, menor será o tamanho da partícula do material (DIAS, 2004; MORAIS, 2022). A figura 2 ilustra o tamanho das partículas que passam pelo processo de peneiramento.

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



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

2.5.3 Compactação

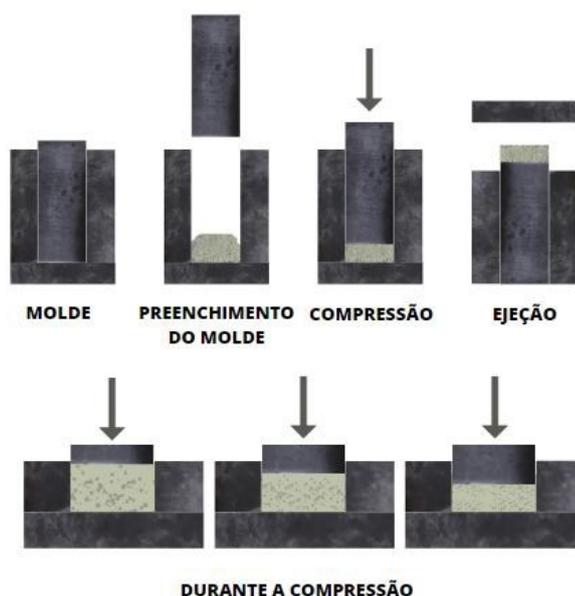
A prensagem (processo conjunto de conformação e compactação) é uma etapa intermediária que consiste na aplicação de pressão nos pós à temperatura ambiente. Esse processo é o análogo cerâmico à metalurgia do pó e é utilizado para fabricar peças/composições

tanto argilosas quanto não argilosas. Para compactação por prensagem, a utilização de alguns por cento de água ou um polímero solúvel aglutinante é adequada, pois uma de suas funções é promover a lubrificação das partículas pulverizadas à medida que elas se movem umas em relação às outras durante o processo de compactação (RICHERSON; LEE, 2018).

Dessa maneira, para a prensagem é necessário uma pré-determinada quantidade de pó, o qual é confinado no interior de uma matriz rígida (disposta em uma prensa de compressão) e comprimido através da aplicação de carga por meio do avanço do punção. A compactação de pós (secos ou semissecos) por prensagem uniaxial em matriz rígida estabelece, dentro da indústria cerâmica, um dos métodos de conformação de pós mais utilizados. Na prensagem uniaxial, a aplicação de carga pode se suceder de forma unidirecional ou bidirecional, quando somente um dos punções se movimenta e quando ambos os punções se movimentam, respectivamente (HOLANDA *et al.*, 2004; SANTOS, 2012).

As etapas de compactação podem ser ilustradas na Figura 3. Conforme a pressão é exercida há um rearranjo de partículas e preenchimento de poros, inferindo maior empacotamento (FERREIRA, 2022). Segundo Fonseca (2000), a peça conformada, possui a massa final aproximadamente igual a massa inicial do material granulado (*apud* LIMA, 2021). Além disso, é válido citar que logo após a compactação, o elemento compactado é chamado de “compactado verde”, o que indica que ainda não está completamente processado, tem uma consistência frágil e o manuseio inadequado pode esfarelar a peça (GROOVER, 2014; MARCHEZAN; AHMAD; THESING, 2020).

Figura 3 - Processo de compactação



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

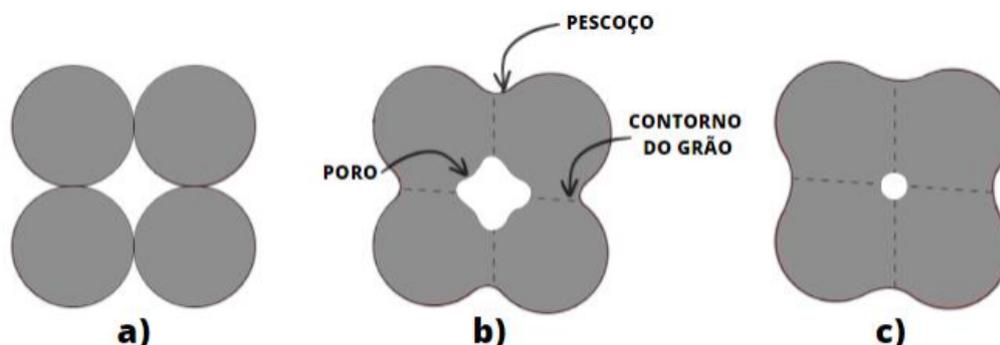
2.5.4 Sinterização

Após a compactação, ocorre a etapa de sinterização, que é descrita como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de um determinado material (em contato mútuo, inicialmente), adquira resistência mecânica e apresente redução de poros, resultando em um corpo rígido e completamente ou parcialmente denso devido a maior adesão entre as partículas (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

No processo de sinterização alguns parâmetros fundamentais são: temperatura, características das partículas do pó, composição do material, tempo e pressão aplicada. Como o corpo verde é composto de partículas separadas individualmente por poros, para potencializar as propriedades pretendidas, deseja-se eliminar o máximo de porosidade. As mudanças que ocorrem durante a sinterização estão relacionadas com modificações na forma e no tamanho dos grãos e poros (BRITO, 2005).

O ciclo de sinterização pode ser apresentado em três estágios: o inicial, o qual é formado um pescoço entre as partículas (gerado pelo contato entre elas), manifestando os primeiros sinais de contorno de grãos; o intermediário, onde se inicia quando os poros se encontram em sua forma de equilíbrio; e o final, que começa quando os poros são espremidos e se isolam no contorno dos grãos, de maneira que vão encolhendo até serem eliminados (VERCELINO; ARAÚJO, 2020). A Figura 4 ilustra as mudanças que ocorrem durante a queima para pós compactados.

Figura 4 - Mudanças microestruturais que ocorrem durante a queima para pós compactados. (a) Partículas de pó após a prensagem. (b) Coalescência das partículas e formação de poros conforme a sinterização tem início. (c) À medida que o processo de sinterização avança.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 447).

O decréscimo da energia livre superficial do agregado de partículas é a força motora para a ocorrência de qualquer tipo de sinterização. Tal decréscimo acontece através da

substituição da interface material/poro pela interface material/material, quando a porosidade desaparece. Durante o processo de sinterização, a porosidade da estrutura é fechada, para essa finalidade material precisa ser deslocado para ocorrer o preenchimento dos espaços vazios. O modo como esse material é deslocado indica o tipo de sinterização. Existem dois tipos básicos de sinterização: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. Com o primeiro há o deslocamento de partículas inteiras (sem qualquer tipo de líquido na estrutura) e há chance de se obter uma estrutura com porosidade controlada, ao passo que o segundo ocorra devido a formação de líquido na estrutura e seja mais fácil alcançar o fechamento total da porosidade (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos empregados para a construção deste trabalho, englobando várias etapas associadas à matéria prima utilizada, ao processo de fabricação, aos equipamentos empregados e aos ensaios realizados.

3.1 Confeção dos corpos de prova

Esse tópico aborda com detalhes os procedimentos para a confecção dos corpos de prova.

3.1.1 Seleção do material

Durante o processo de beneficiamento secundário das placas de granitos, há uma produção de resíduos de rocha, que geralmente são descartados sem reutilização, pois apesar de manterem sua integridade física, possuem dimensões não tão úteis. O material usado para o estudo foi o granito conhecido comercialmente como granito Branco Marfim, que foi cedido pela empresa Mafort localizado na cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará e selecionado devido seus aspectos visuais.

3.1.2 Britagem

Após a seleção, o material foi submetido ao processo de britagem, o qual tem por finalidade fragmentar pedaços de granito em elementos menores para a continuidade dos demais processos. Na primeira etapa, a britagem primária, as peças são reduzidas para, em média, 100 mm de diâmetros, e, na segunda etapa, a britagem secundária, os materiais fragmentados reduzidos no primeiro processo passam mais uma vez pela britagem para adquirir peças com o diâmetro médio de 10 mm.

O material utilizado foram pequenas frações de blocos do granito Branco Marfim, que foi processado a partir da britagem secundária, por um britador do laboratório de materiais de construção da Universidade Federal do Ceará Campus do PICI conforme ilustra a Figura 5, com a finalidade de apresentarem diâmetros de aproximadamente 10 mm.

Figura 5 - Britador de mandíbulas BB 100

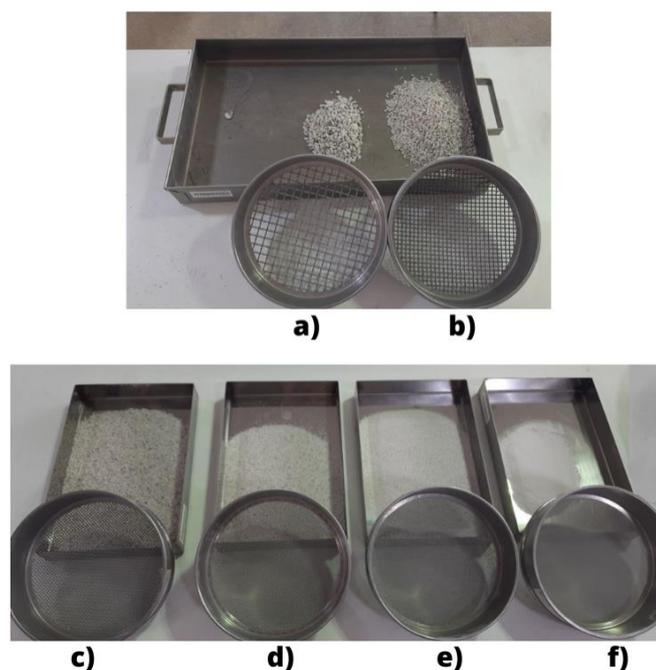


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.1.3 Moagem e peneiramento

Posterior ao processo de britagem, os fragmentos de granito Branco Marfim foram submetidos à análise granulométrica, de forma que, através de processo manual, foi feita uma separação por peneiramento utilizando peneiras com malhas de 9,5 mm, 4,75 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 600 μm e 75 μm , como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica (a) Peneira 9,5 mm. (b) Peneira 4,75 mm. (c) Peneira 2,4 mm. (d) Peneira 1,2 mm. (e) Peneira 600 μm . (f) Peneira 75 μm .



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para obter a quantidade de amostra necessária, o material foi fracionado e posto em um moinho de disco orbital MA 360, disposto na Figura 7, que pertence ao Laboratório de Engenharia Civil I da Universidade Federal do Ceará do Campus Russas, por cerca de 8 horas cada porção, a fim de reduzir o tamanho dos fragmentos de granito e obter granulometria suficiente para passar na peneira com malha de 75 μm .

Figura 7 - Moinho de disco orbital MA 360.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.1.4 Compactação dos corpos de prova

Neste trabalho, todas as amostras foram pesadas em uma balança analítica, conforme a Figura 8, com o objetivo de se obter um padrão. Após a pesagem foi adicionado água destilada como ligante, na proporção de 1 ml para cada 10 g de pó de granito, e misturado de forma manual até alcançar uma pasta com aspecto uniforme e homogêneo, livre de aglomerados. Essa proporção foi estabelecida com a finalidade de adquirir consistência e resistência mecânica suficiente para o manuseio das peças e garantir sua integridade após a remoção da matriz metálica.

Figura 8 - Balança analítica



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Logo depois, foram preparados corpos-de-prova compactados por compressão uniaxial utilizando uma matriz cilíndrica de aço, com cerca de 25 mm de diâmetro interno, como apresenta a Figura 9.

Figura 9 - Matriz metálica para prensagem das peças cerâmicas.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A compactação foi realizada a uma taxa de 2 mm/min em uma máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de 300 kN, pertencente ao laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, como mostra a Figura 11.

Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC: 300kN



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Foram produzidos 20 corpos de prova distribuídos de acordo com as cargas de compactação utilizadas nessa etapa, como ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Cargas utilizadas e quantidade de corpos de prova

Carga	Quantidade de Corpos de prova
20 kN	5
40 kN	5
60 kN	5
80 kN	5

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

3.1.5 Sinterização dos corpos de prova

A sinterização foi realizada em uma única remessa com 20 corpos de prova pós-compactados, em um forno Linn Elektro Therm, presente no laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, como ilustra a Figura 12.

Figura 11 - Forno Linn Elektro Therm



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os corpos-de-prova foram sinterizados a uma temperatura de 1140° C com uma taxa de aquecimento de aproximadamente 5° C/min e tempo de permanência de 120 minutos após atingir a respectiva temperatura de sinterização. As amostras, logo passaram por um desaquecimento lento, resfriando de maneira natural dentro do próprio forno até a temperatura ambiente, a fim de evitar um possível choque térmico.

3.2 Caracterização Química

Essa seção aborda a técnica de caracterização química utilizada para granito branco marfim.

3.2.1 Espectroscopia de Dispersão de Energia

Após passar pela etapa de beneficiamento, garantindo uma granulometria inferior a 200 mesh, o material foi submetido a análise química, por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

A análise EDS é uma técnica de caracterização de materiais que permite determinar a composição percentual em massa dos principais elementos que constituem a amostra. A caracterização foi realizada no Laboratório de Microscopia de Geologia da Universidade Federal do Ceará, em um microscópio eletrônico HITACHI TM 3000 agregado ao ESD SWIFT ED 3000.

3.3 Caracterização Física

Essa seção apresenta os ensaios utilizados para a caracterização física.

3.3.1 Variação volumétrica

Durante o processo de sinterização é esperado que haja uma variação dimensional nos corpos de prova, essa variação acontece principalmente devido a redução da porosidade que é sucedido dos fenômenos de transportes ocorridos (COSTA, 2022).

A variação volumétrica avalia o quanto o corpo de prova retraiu ou expandiu, se os valores forem negativos, denota retração, se forem os valores forem positivos, expansão. Sendo

assim, com o auxílio de um paquímetro calibrado, foram realizadas medidas de todos os corpos de prova antes da sinterização e após a sinterização. A equação 1 mostra como foi determinada a variação volumétrica dos CP:

$$VV(\%) = \frac{V_o - V_f}{V_o} * 100 \quad (1)$$

Onde:

VV (%) = Variação volumétrica;

V_o = Volume inicial do corpo de prova verde, em cm³;

V_f = Volume final do corpo de prova após sinterização cm³.

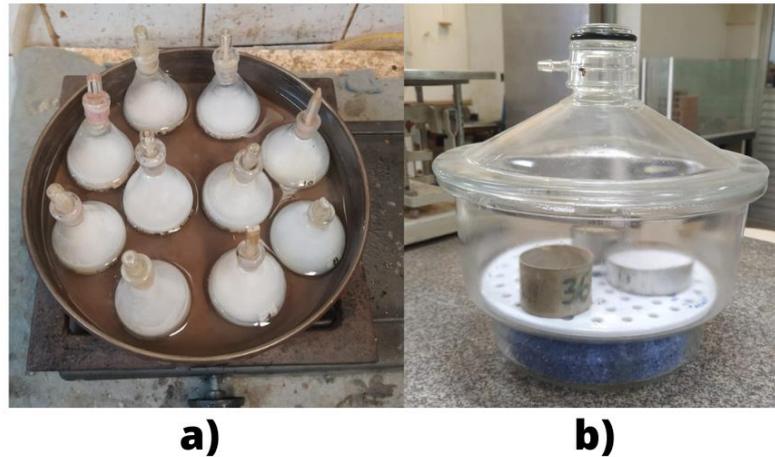
3.3.2 Densidade real do grão solto

O ensaio para determinar densidade real dos grãos foi realizado de acordo com a norma técnica DNER-ME 093/094. O procedimento foi executado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará, campus do Pici.

Para o ensaio utilizou-se um picnômetro com capacidade de 50 ml, uma estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C e as pesagens foram realizadas com o auxílio de uma balança digital (esse valor é necessário para ser utilizado, posteriormente, no cálculo da porosidade das peças).

Dessa forma, de acordo com a norma, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 110 °C até que seu peso se mantivesse constante. Posterior a isso, pesou-se o picnômetro vazio, seco e limpo, obtendo o valor de P1. Logo após, 10 g da amostra foram inseridas dentro do picnômetro com o auxílio de um funil e pesado novamente obtendo o valor de P2. Em seguida foi colocada água destilada no picnômetro até cobrir, com excesso, a amostra e levado ao fogo, deixando ferver por 20 minutos, a fim de expulsar todo ar existente entre as partículas. O picnômetro foi resfriado lentamente até atingir a temperatura ambiente. A Figura 13 ilustra os picnômetros no processo de fervura e resfriamento.

Figura 12 - a) Picnômetros no processo de fervura; b) Resfriamento no dessecador



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A pós o resfriamento, procedeu-se com o preenchimento cuidadoso do picnômetro utilizando água destilada, seguido de sua pesagem para obter o valor de P3. Em seguida, descartou-se o material e o picnômetro foi preenchido com água destilada para uma nova pesagem, obtendo-se o valor de P4. Por meio dos valores P1, P2, P3 e P4, é possível calcular a densidade real utilizando a equação 2:

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (2)$$

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.

A validade do ensaio será confirmada quando o resultado for obtido como a média de pelo menos duas determinações e quando a diferença entre elas for menor que 0,009. É válido citar que o valor da densidade deve ser correspondente à temperatura de 20 °C. Nesse sentido, é necessário aplicar um ajuste utilizando a equação 3:

$$D_{20} = k_{20} * D_t \quad (3)$$

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.

3.3.3 Densidade específica aparente

A densidade específica aparente do corpo de prova, de acordo com a ABNT NBR ISO 10545-3 (2020), é o quociente de sua massa seca pelo seu volume exterior, incluindo os poros. Dessa forma, após sinterizados, os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica e medidos com um paquímetro digital a fim de se obter o volume das peças. A equação 4 mostra ilustra como foi calculada a densidade específica aparente:

$$DEA = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Onde:

DEA = Densidade específica aparente expressa em g/cm³;

m = Massa, em g;

V = Volume, em cm³.

3.3.4 Porosidade

Para a determinação da porosidade foram utilizados os dados obtidos da densidade real do grão solto e da densidade específica aparente. A porosidade dos corpos de prova foi calculada de acordo com a equação 5:

$$PA(\%) = \left(\frac{1-DEA}{D_t} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde:

PA (%) = Porosidade aparente;

D_t = Densidade real do grão solto;

DEA = Densidade específica aparente, em g/cm³.

3.4 Determinação das propriedades mecânicas

Essa seção apresenta os ensaios utilizados para a determinação das propriedades mecânicas.

3.4.1 Dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material à deformação plástica localizada (um risco ou uma pequena penetração, por exemplo). Ela pode ser determinada por meio da realização de indentações com uma carga específica em uma área selecionada do material de interesse, por um período determinado. Quanto maior a dureza de um material, maior será sua resistência à deformação permanente (FARIA, 2017). Nos materiais cerâmicos é uma das características mais desejáveis. As cerâmicas são tipicamente duras, mas são extremamente frágeis e altamente suscetíveis à fratura (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

O ensaio de dureza Rockwell B, o qual determina a resistência que o material oferece à penetração de uma esfera de metal duro submetida a uma carga de 100 kgf e tempo de penetração de 10 s, foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6508-1 (2019).

O ensaio foi feito através de um Durômetro SUSSEN WOLPERT, tipo Testor HT1, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará (ver Figura 14). Foram realizadas cerca de 5 indentações para cada tipo de amostra (CP-20, CP-40, CP-60, CP-80).

Figura 13 - Durômetro Rockwell SUSSEN WOLPERT



Fonte: Lima (2021).

3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral possibilita avaliar a capacidade de um material suportar esforços conforme haja variação de parâmetros, tais como temperatura, composição, velocidade de carregamento e processo de sinterização (LIMA, 2021). É o ensaio mais utilizado e é conhecido internacionalmente como "Ensaio Brasileiro", pois foi desenvolvido por Lobo Carneiro em 1943. Este ensaio envolve a aplicação gradual de uma carga até sua ruptura por tração indireta (ruptura por fendilhamento), dessa forma, sendo destrutivo, ou seja, a amostra testada é deformada permanentemente (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; PINHEIRO, 2007).

Quatro amostras de cada característica analisada (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) foram submetidas a uma força de compressão com velocidade de carregamento de 2 mm/minuto a fim de se obter a resistência à tração das peças sinterizadas. Este ensaio foi realizado com o auxílio de uma máquina de ensaio universal EMIC, pertencente ao laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas (ver figura 10).

O ensaio nos corpos de prova foi realizado com base na adaptação da norma ABNT NBR 7222:2011 (Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos), de acordo com a equação 6:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (6)$$

Onde:

f_t = Resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;

F = Força máxima obtida no ensaio (N);

d = Diâmetro da peça cilíndrica (mm);

l = Altura da peça cilíndrica (mm).

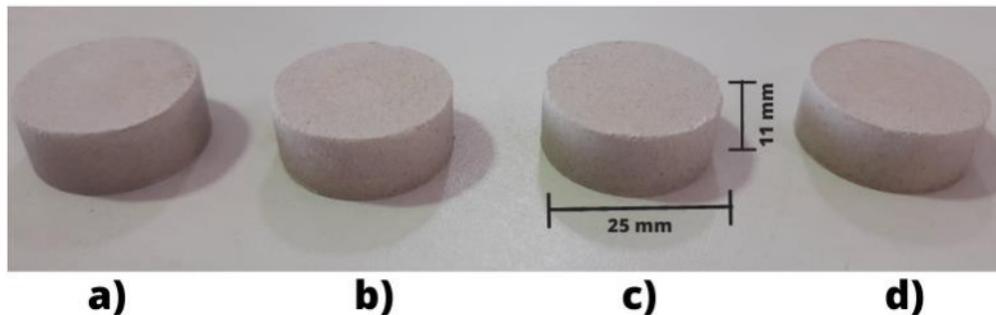
4 RESULTADOS

Essa seção apresenta os resultados obtidos após caracterizações e ensaios realizados.

4.1 Análise visual

Após o desmolde da matriz metálica, os corpos de prova “verdes” (produzidos depois da compactação) apresentaram altura média de 11 mm, como pode ser visualizado na figura 14.

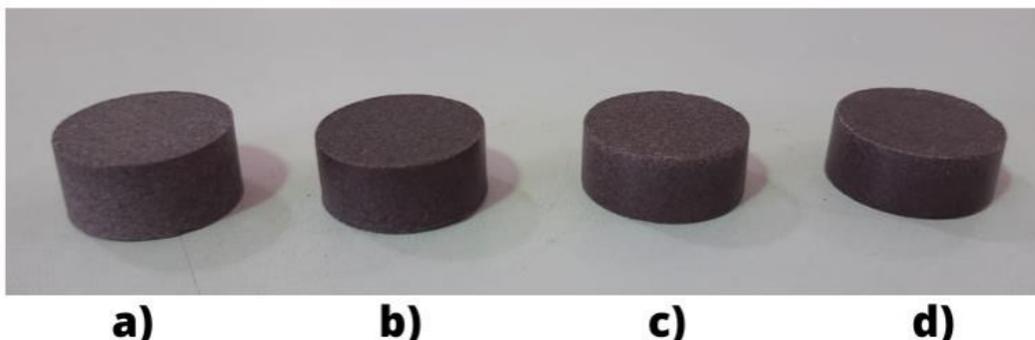
Figura 14 - Peças verdes compactadas: a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os corpos de prova obtidos com diferentes pressões de compactação foram sinterizados à temperatura de 1140 °C. Após duas horas no patamar de sinterização e resfriamento dentro do próprio forno (até a temperatura ambiente), as peças desenvolveram tonalidade marrom e aspecto fosco. Além disso, as peças não perderam sua forma inicial, garantindo a ausência de trincas ou fraturas, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Corpos de prova sinterizados a 1140 °C: (a) CP-20, (b) CP-40, (c) CP-60, (d) CP-80



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A cor resultante da sinterização de cerâmicas é afetada diretamente pela composição química da matéria prima e as condições específicas do processo de sinterização. A presença de trincas ou fraturas durante o processo de sinterização pode acontecer devido à má distribuição de temperatura na peça ou tensões térmicas.

4.2 Caracterização Química

Essa seção apresenta os resultados obtidos após a caracterização química.

4.2.1 Espectroscopia de Dispersão de Energia

A Tabela 2 apresenta os resultados da Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) em percentual mássico, na forma de óxidos, para o granito Branco Marfim.

Tabela 2 - Composição química do granito Branco Marfim obtida por EDS.

Componentes	Massa (%)
SiO ₂	74,47
Al ₂ O ₃	15,88
K ₂ O	7,83
Na ₂ O	1,48
TiO ₂	0,37

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme mostram os dados da tabela, observa-se que 99,99% da matéria prima é constituída por SiO₂ (dióxido de silício), Al₂O₃ (óxido de alumínio), K₂O (óxido de potássio), TiO₂ (dióxido de titânio) e Na₂O (óxido de sódio).

O alto teor de sílica obtido é comum em rochas ígneas graníticas. A sílica, representada pelo óxido de silício (SiO₂), é o principal componente do quartzo. De acordo com o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, rochas com teores de SiO₂ acima de 65% são classificadas como rochas ricas em quartzo, sendo o granito um exemplo típico desse tipo de rocha. A presença de silício na forma de óxido confere maior dureza, resistência mecânica e durabilidade às rochas (SILVA, 2014).

O óxido de alumínio (Al_2O_3) está possivelmente relacionado aos feldspatos que contém alumínio em sua composição. Os feldspatos formam o grupo mineral mais abundante na natureza, compreendendo aproximadamente 60% da crosta terrestre. Eles são compostos por silicato de alumínio, com diferentes porções de K, Na, Ca e, ocasionalmente, Ba entre seus membros, como a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e Ortoclásio (KAlSi_3O_8) e podem ser encontrados em rochas ígneas. Quando se apresentam nessa forma combinada, atuam como fundentes, ou seja, diminuem a temperatura de fusão e permitem que a mistura se torne líquida durante o processo de sinterização favorecendo o molde (AARAO, SCHOLZ; 2016).

Os óxidos alcalinos K_2O e Na_2O podem estar associados também aos feldspatos e ambos também desempenham a função de fundente. Os feldspatos potássicos são um dos principais minerais presentes em granitos e podem contribuir significativamente para o teor de K_2O na rocha. O sódio pode estar presente em granitos devido a presença de feldspatos plagioclásios em sua composição mineralógica. A presença de Na é uma característica distintiva dos feldspatos plagioclásios. De acordo com SAAR (2013), granito Branco Marfim é uma rocha rica em porfiroclastos de até 10 cm, de feldspatos potássicos perthítico, ou seja, há fragmentos de feldspatos potássico perthítico centimétricos incorporados na matriz da rocha, conferindo ao granito uma textura especial chamada “perthítica” que ocorre quando feldspato potássico contém cristais ou lamelas de feldspato plagioclásio em sua estrutura, criando uma característica notável e aparência que pode ser apreciada por seu impacto estético.

O TiO_2 (dióxido de titânio) pode ser encontrado em rochas ígneas, é responsável pela coloração clara do granito e tem sua origem provavelmente relacionada a minerais acessórios como o rutilo que é uma das formas cristalinas de TiO_2 . O teor de TiO_2 em granitos é geralmente menor que 1%, dessa forma é possível observar na tabela que o teor de TiO_2 foi o menor (0,372%), uma vez que que minerais acessórios como rutilo são encontrados em baixos volumes nos leucogranitos/granito branco/claro (JUNIOR; TESSER; DUARTE, 2018).

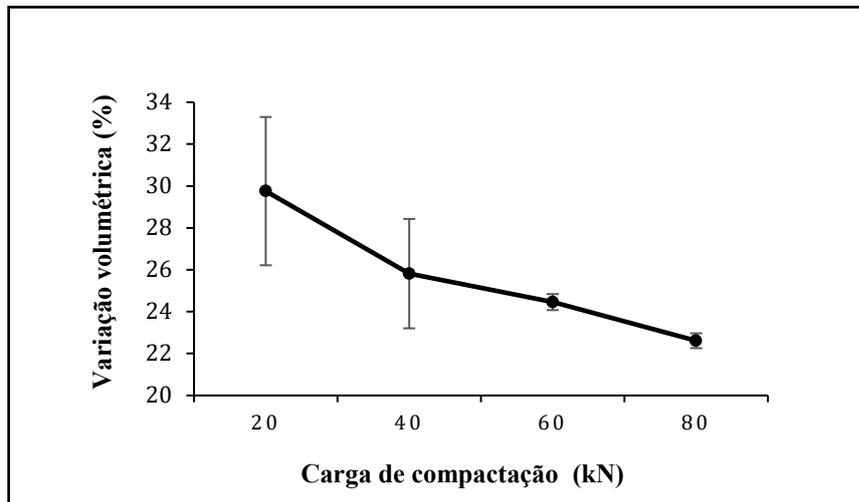
4.3 Análise das Propriedades Físicas

Essa seção apresenta os resultados obtidos após a caracterização física.

4.3.1 Variação volumétrica

No Gráfico 1, são apresentados os resultados relativos à variação volumétrica percentual dos corpos de prova, juntamente com seus desvios padrão correspondentes. A representação gráfica tem como base a média dos volumes das peças verdes (V_0) e dos volumes após sinterização (V_f) das 5 amostras para cada carga de compactação.

Gráfico 1 - Variação volumétrica (%)

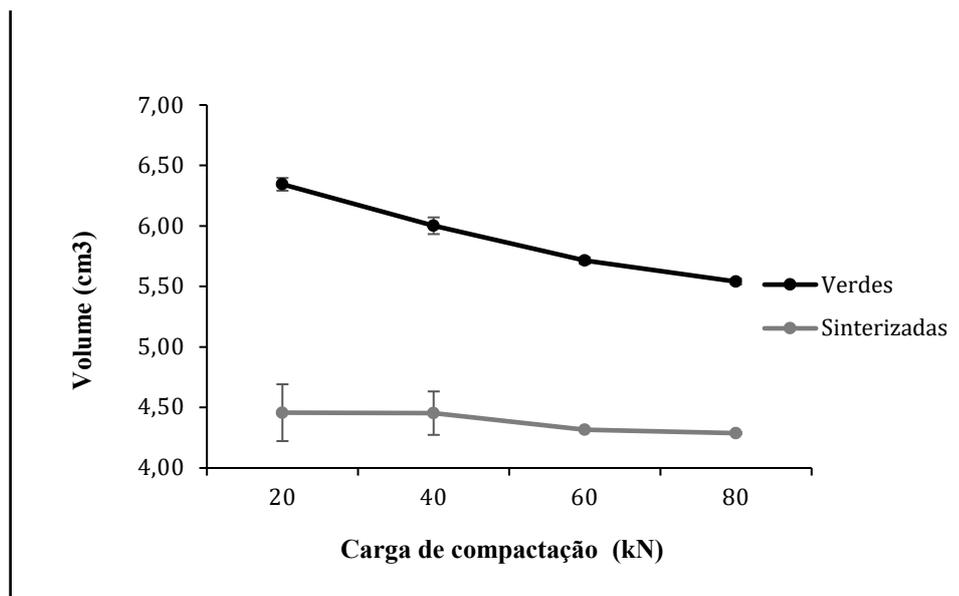


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme houve o aumento da carga de compactação, observou-se uma notável redução na variação volumétrica das peças. Isso pode sugerir uma relação direta entre a compactação e a estabilidade dimensional das peças.

O Gráfico 2 indica a média dos volumes dos CP verdes e após sinterização.

Gráfico 2 - Volume dos corpos de prova verdes e sinterizados.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Fazendo uma análise do gráfico é possível observar que o volume das peças verdes diminuem proporcional ao aumento da carga de compactação. Os corpos de prova exibiram menor tendência a sofrer mudanças significativas em seu volume à medida em que a carga de compactação nas peças verdes se aproxima do patamar de saturação.

Quando sinterizadas, as peças tendem a apresentar aproximadamente o mesmo volume final. Os valores mais próximos foram para 60 kN e 80 kN, com 4,32 cm³ e 4,29 cm³, respectivamente.

Essa situação pode estar relacionada à presença de óxidos fundentes na composição do material, uma vez que durante o processo de sinterização, as peças são aquecidas a altas temperaturas, fazendo com que as partículas individuais se fundam parcialmente. Isso resulta em uma redução nos espaços vazios entre as partículas, levando a um encolhimento adicional na estrutura. Dessa forma, quanto maior a quantidade dos óxidos fundentes, mais eles atuam nas fases líquidas e se consolidam entre as partículas, contribuindo para aumentar a densificação das peças e redução da porosidade (DUARTE *et al.*, 2022).

Outro fato relevante que pode explicar esse comportamento é que durante a queima há uma perda da umidade adquirida e da água destilada (usada como ligante durante a confecção dos corpos de prova), devido ao seu baixo ponto de ebulição (100 °C). Esse processo exerceu uma influência direta sobre a variação volumétrica das amostras.

Embora esses fatores ocorram, a redução de volume pode chegar a um limite à

medida que as partículas do material atingem um estado de empacotamento mais próximo, o que resulta em um efeito estabilizador. O que provavelmente justifica a proximidade dos valores volumétricos das peças após sinterizadas.

4.3.2 *Densidade específica aparente*

A determinação da densidade específica foi realizada a partir dos volumes e massas das peças sinterizadas. Os valores médios obtidos estão ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Densidade específica aparente de peças sinterizadas de granito Branco Marfim.

Carga	DEA média (g/cm³)
20 kN	2,21
40 kN	2,26
60 kN	2,29
80 kN	2,31

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com a tabela é possível observar que houve um leve aumento da densidade com o aumento da carga de compactação, tendendo a estabilidade.

4.3.3 *Densidade real do grão solto*

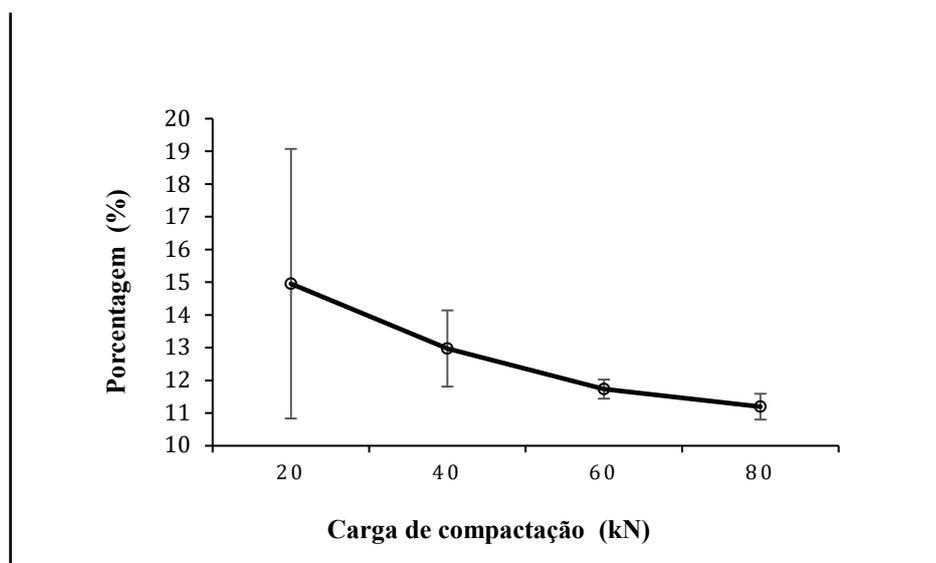
A determinação da densidade real foi realizada a partir do ensaio com o pó de granito. A densidade real do pó de granito Branco Marfim corresponde a 2,60 g/cm³.

A densidade calculada está próxima ao valor mínimo requisitado para granitos destinados a revestimentos (2,55 g/cm³), de acordo com a norma ABNT NBR 15845-2. E próxima também dos valores encontrados na literatura para o granito Branco Marfim, que apresenta um valor médio de 2,63 g/cm³ (ALENCAR, 2013).

4.3.4 Porosidade

O Gráfico 3 apresenta os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas.

Gráfico 3 - Porosidade (%).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando o gráfico é possível verificar a relação inversa da porosidade e carga de compactação, ou seja, à medida que a pressão de compactação aumenta, a porosidade diminui de maneira consistente. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito da pressão exercida sobre as partículas durante o processo de compactação.

As cargas de 20 kN e 40 kN apresentaram maiores amplitudes de desvio padrão possivelmente por serem as menores cargas e terem gerado menor compactação das amostras, oferecendo maiores variações volumétrica e conseqüentemente grandes variações de porosidade.

As cargas de 60 kN e 80 kN, obtiveram valores próximos de porosidade (11,73 % e 11,19 %, respectivamente), além de demonstrarem valores de desvio padrão consideravelmente menores por haver um maior controle dimensional sobre as peças mais compactadas.

Com esses resultados é possível concluir que é mais favorável utilizar a carga de compactação de 60 kN, pois além de ter menor desvio padrão, requer menos esforços para alcançar valores de porosidades próximos a carga sequente.

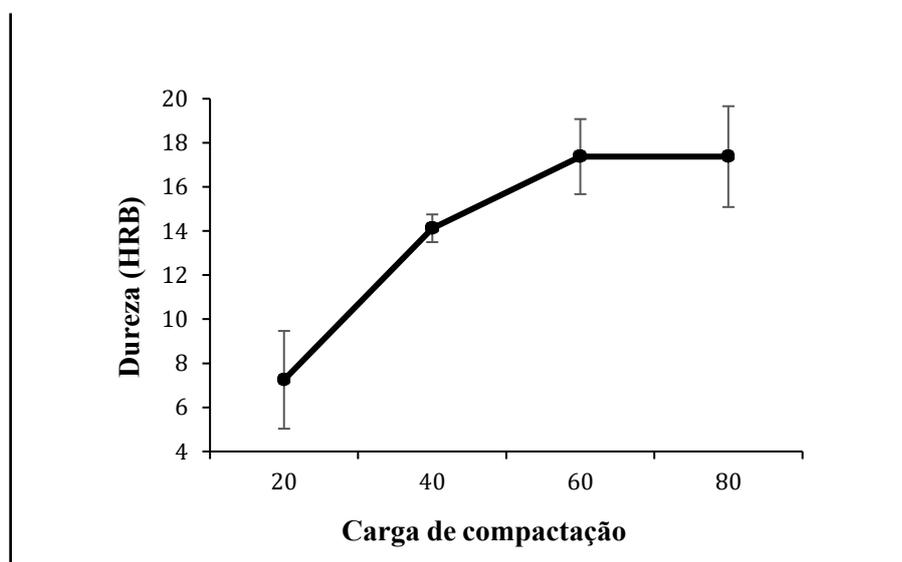
4.4 Análise das Propriedades Mecânicas

Essa seção apresenta os resultados obtidos após a determinação das propriedades mecânicas.

4.4.1 Dureza Rockwell B

O Gráfico 4 representa os resultados da Dureza Rockwell B referentes às amostras CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80, obtidos à temperatura de sinterização de 1140 °C.

Gráfico 4 - Dureza Rockwell B.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O gráfico mostra um padrão consistente de aumento à medida que a carga de compactação foi aumentada. Tal aumento vai do CP-20 ao CP-60. Esse comportamento evidencia uma relação entre a compactação do material e sua resistência à penetração.

Ainda, é interessante observar que para as cargas de 60kN e 80kN os resultados médios de dureza foram idênticos e o desvio padrão bastante próximo, indicando uma notável estabilidade. Esse resultado sugere que a compactação atingiu um ponto no qual a resistência do material à penetração não aumentou mais significativamente.

4.4.2 Compressão diametral

Na Tabela 4 são apresentadas as proporções L/d (espessura/diâmetro) conforme proposto por Stanley (2001), os quais estabelecem valores adequados para a condução do ensaio de compressão diametral. O intervalo recomendado para L/d varia entre 0,2 e 0,5.

Tabela 4 - Relação L/d proposta por Stanley (2001).

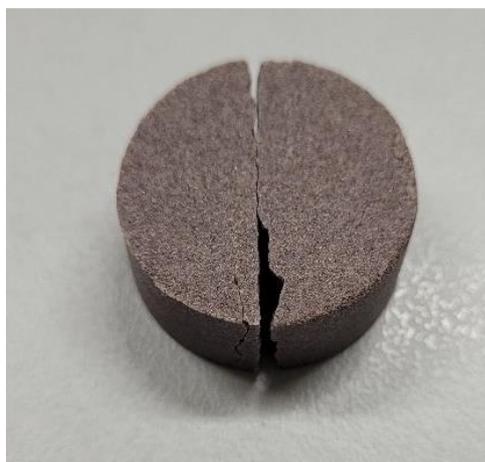
Carga	L/d (médio)
20 kN	0,48
40 kN	0,46
60 kN	0,43
80 kN	0,41

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Como ilustrado, a média da relação L/d das peças permaneceu dentro da faixa estabelecida por Stanley (2001).

Ao concluir o ensaio, todas as peças apresentaram fraturas ao longo do plano diametral de simetria da peça. Isso significa que a propagação da trinca ocorreu ao longo do diâmetro da peça no sentido longitudinal, resultando em um padrão com formato de duas semicircunferências (ver Figura 16).

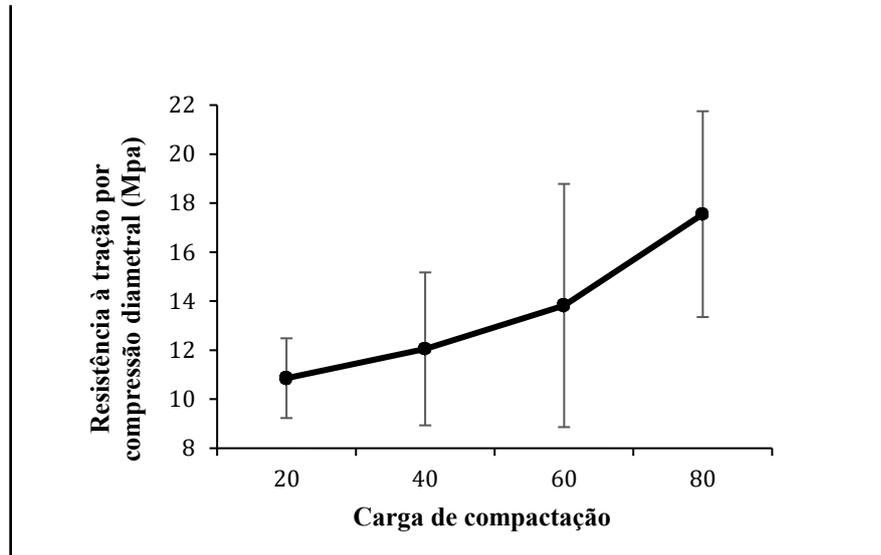
Figura 16 - Amostra fraturada após ensaio de compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O Gráfico 5 mostra os resultados da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de provas à temperatura de 1140°C.

Gráfico 5 - Resistência à compressão diametral (MPa).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os valores da resistência à tração por compressão diametral aumentaram com o aumento da carga de compactação. Isso pode estar relacionado a diminuição dos poros durante o processo de sinterização. Embora seja um resultado esperado, ambas cargas de compactação mostraram alto desvio padrão que muito provavelmente é provocado pela pouca quantidade de corpos de prova.

5 CONCLUSÕES

Devido a necessidade de diminuir os danos ambientais resultantes do descarte inadequado desses resíduos, este estudo teve como finalidade analisar a viabilidade de aplicação tecnológica referente às propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de rejeito de granito Branco Marfim como matéria prima no processamento cerâmico. Com base nas análises dos resultados obtidos através de ensaios realizados, pode-se concluir que:

Embora o granito Branco marfim possua um teor significativo de materiais fundentes em sua composição, observou-se nas peças uma tonalidade marrom e aspecto visual fosco, indicando uma baixa formação de fase líquida a 1140 °C.

A densidade real dos grãos soltos pó de granito Branco Marfim corresponde a 2,60 g/cm³. Já a densidade específica aparente das peças sinterizadas é 2,21 g/cm³, 2,26 g/cm³, 2,29 g/cm³ e 2,31 g/cm³ para as cargas 20 kN, 40 kN, 60 kN e 80 kN, respectivamente. Observa-se que houve um aumento sutil da densidade com o aumento da pressão de compactação, tendendo a estabilidade.

A porosidade foi calculada com base nos valores de densidade real do grão solto e densidade específica aparente e apresentou uma diminuição à medida que a pressão de compactação aumentou. Os valores mostram-se além de menores, mais próximos com o aumento da carga de compactação. Esse fato é evidenciado pelos resultados das cargas de 60 kN e 80 kN, as quais obtiveram valores bem próximos (11,73 % e 11,19 %, respectivamente) e ambos com menores desvios de padrão.

A variação volumétrica reduziu conforme a carga de compactação aumentou, sugerindo uma relação direta entre a carga de compactação e a estabilidade dimensional das peças verdes. Dessa forma, o volume das peças verdes diminuiu à medida que aumentou a carga de compactação. Já, quando sinterizadas, as peças tendem a apresentar aproximadamente o mesmo volume final, que se torna mais próximo entre as cargas de compactação de 60kN e 80kN, ratificando os resultados de porosidade.

Os resultados de Dureza permitiram observar um aumento à medida que a carga de compactação cresce tendendo a estabilizar. É possível visualizar que para as cargas de 60kN e 80kN os resultados médios de dureza foram idênticos e o desvio padrão bastante próximo.

A partir da análise do ensaio de compressão é possível verificar o aumento da resistência à tração indireta com o aumento da carga de compactação que embora seja um resultado desejado, ambas as cargas de compactação mostraram alto desvio padrão provocado possivelmente pela pouca quantidade de corpos de prova.

Os resultados indicaram coerência entre os ensaios, mostrando a influência do aumento da carga de compactação com a variação das propriedades físicas e mecânicas e a tendência a estabilidade com esse aumento. De acordo com as análises, é possível concluir que é mais favorável utilizar a carga de compactação de 60 kN, pois requer menos esforços para alcançar valores próximos a carga sequente. Contudo, é necessário que sejam realizadas mais análises para entender melhor tal comportamento.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para promover continuidade e desenvolvimento de novas pesquisas nesta área de estudo, segue abaixo algumas sugestões para futuros trabalhos:

- Realizar a sinterização em variações de temperaturas a fim de identificar a temperatura de ótima queima;
- Realizar o ensaio e análise de absorção de água e retração linear;
- Realizar a micrografia das amostras a fim de identificar defeitos, presença de poros ou trincas;
- Analisar a influência de outras cargas de compactação na porosidade, em peças sinterizadas;
- Análise de aplicações além da construção civil;
- Realizar análises comparativas das propriedades físicas e mecânicas das peças sinterizadas com outros com outros granitos submetidos às mesmas condições.

REFERÊNCIAS

AARAO, G. M.; SCHOLZ, R. Caracterização química, espectroscópica e microtextural de feldspatos piroexpansíveis para possível aplicação nas indústrias de cerâmica de revestimento e vidreira **SciELO**, [s. l.], p. 206 - 214, 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623621933>. Acesso em: 12 ago. 2023.

ABRIROCHAS. **Balanco das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2020. Informe 01/2021**. Brasília, 2021.

ABRIROCHAS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais. Informe 05/2018**. Brasília, 2018.

ALENCAR, C. R. A. Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais. 1 ed. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Evaldo Lodi (IEL), 2013. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15845-2**: Determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água: rochas para revestimentos. Rio de Janeiro: ABNT. p. 08. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Determinação da resistência à atração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: concreto de argamassa. Rio de Janeiro: ABNT. p. 09. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-3**: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente: placas cerâmicas. Rio de Janeiro: ABNT. p. 15. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6508-1**: Ensaio de dureza Rockwell: materiais metálicos. Rio de Janeiro: ABNT. p. 39. 2019.

BEZERRA, F. D. Rochas ornamentais. **Caderno Setorial ETENE**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 3, n.60, dez. 2018.

BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ. **Holos**, [s. l.], ano 23, v. 3, p. 204 - 221, 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549274019>. Acesso em: 4 abr. 2023.

BRITO, F. V. **Processamento de cerâmicas porosas à base de sílica visando aplicações na indústria do petróleo**. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/dissertacoes/2005-1/601--550/file>. Acesso em: 14 dez. 2022.

CABELLO, M. L. *et al.* Métodos de lavra aplicados à extração de rochas ornamentais. **Holos**, [s. l.], v. 5, p. 167-173, 2012. DOI: 10.15628/holos.2012.1057. Acesso em: 15 jan. 2023.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2016.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2012.

CARDOSO, W. *et al.* Avaliação da Incorporação de Resíduo de Cortes de Mármore e Granito em Concreto para Produção de Pisos Intertravados para Pavimentação. **Revista Ifes Ciência**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 01-17, 2021. DOI: 10.36524/ric.v7i1.1192.

CASTAGNET, M. **Avaliação da compressibilidade de misturas de pós de nióbio e alumínio ativadas mecanicamente**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CENTROROCHAS. Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais, Cal e Calcário do Espírito Santo. **Informativo mensal de exportações de rochas**: abril de 2022. Vitória: CENTROROCHAS/SINDIROCHAS, 2022.

CENTROROCHAS. Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais, Cal e Calcário do Espírito Santo. **Informativo mensal de exportações de rochas**: dezembro de 2022. Vitória: CENTROROCHAS/SINDIROCHAS, 2022.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. 4 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2001.

COSTA, M. R. A. **Estudo da influência da pressão de compactação nas propriedades físicas e mecânicas de peças de aço processadas por metalurgia do pó**. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Russas. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – METÓDO DE ENSAIO. **DNER-ME 093/94**: Determinação da densidade real: Solos. Brasília, p. 04. 1994.

DIAS, J. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos**. Faro, 2004. 91p.

DUARTE, G. V. *et al.* Formulação de massa cerâmica para revestimento poroso utilizando resíduos de madeiras tropicais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 2348 - 2371, 2022. DOI <https://doi.org/10.5902/1980509870383>. Acesso em: 8 mar. 2023.

FARIA, T. C. V. **Avaliação da dureza vickers nas cerâmicas de dissilicato de lítio submetidas a diferentes protocolos de fadiga**. 2017. 52 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Odontologia) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos, 2017.

FERREIRA, A. S. **Efeito do tamanho e formato dos pós metálicos no processo de compactação na Metalurgia do Pó**. 2022. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

FILHO, C. G. C. **Relação entre processo de corte e qualidade das superfícies serradas de granitos ornamentais**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Geotecnia, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FRANGELLA, J. Usos, adequações e aplicações das rochas ornamentais e de revestimentos. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 4., 2003, Fortaleza. **Anais....** Rio de Janeiro: CETEM/SBG, 2003. p.342-350.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades Mecânicas: Ensaios Fundamentais**. Santa Catarina: CERMAT. v. 1. 2015.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Guia técnico ambiental da indústria de rochas ornamentais**. Belo Horizonte: FEAM; FIEMG, 2015.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2014.

HOLANDA, J. N. F. *et al.* Comportamento de compactação de mix argila/resíduo de pó de pedras. **SciELO**, [s. l.], p. 50 - 57, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000100008>. Acesso em: 16 mar. 2023.

JÚNIOR, R. P.; TESSER, L. R.; DUARTE, B.P. A origem do acamamento magmático no granito pedra branca, maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 237 - 251, 2018. DOI <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i2.12235>. Acesso em: 13 jun. 2023.

KNEWITZ, F. L. **Estudo comparativo de amostra de NiTi produzidas por metalurgia do pó**. 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Departamento de metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17634/000721415.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 maio 2023.

LIMA, S. K. B. **Reaproveitamento de cinzas de madeira para a produção de cerâmica vermelha e estudo das propriedades mecânicas e tecnológicas pós sinterização**. 2021. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Russas. 2021.

LIMA, W. B. C., LIRA, H. L., NEVES, G. A. Incorporação de resíduo lama do processo de beneficiamento de granito na argamassa expansiva de demolição. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 11, n.2, p. 89-95, 2016. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/453> . Acesso em: 24 out. 2022.

MARCHEZAN, R., AHMAD, A. M., THESING, L. A. Metalurgia do pó e suas características. In: SALAO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSAO, 11., 2020, Sant'Ana do Livramento. **Anais....** Sant'Ana do Livramento: UNIPAMPA, 2020.

- MENDES, V. A.; VIDAL, F. W. H. Controle de qualidade no emprego das rochas ornamentais na construção civil. In: SIMPÓSIO SOBRE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3., 2002, Recife. **Anais...** Recife: CETEM/UFPE, 2002. 197p.
- MORAIS, A. L. S. *et al.* Análise granulométrica: uma revisão bibliográfica. **Journal of Exact Sciences**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 05-10, 2021. Disponível em: https://www.mastereditora.com.br/periodico/20210311_094515.pdf. Acesso em: 19 jul. 2023.
- MORAIS, A. S. O.; JUNIOR, M. Q. S. **Estudo da influência da temperatura de sinterização e pressão de compactação em amostras de cromo obtidas por metalurgia do pó.** 2021. 7 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró. 2021.
- MORAIS, G. A. **Desenvolvimento da metalurgia do pó.** Natal: EDUFRN, 2022.
- MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de fabricação: metalurgia do pó e o futuro da indústria.** Florianópolis, 2007. 28p.
- PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios.** São Carlos, 2007. 380p.
- QUEIROZ, J. P. C.; CARANASSIOS, A. Petrografia microscópica e caracterização de rochas ornamentais. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA DO CETEM, 1., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/157> Acesso em: 22 out. 2022.
- REGIS, R. C. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de peças sinterizadas de granito corumbá produzidas por metalurgia do pó.** 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Russas. 2021.
- REIS, A. S.; ALVAREZ, C. E. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. In: Encontro nacional, 4, encontro latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, 2., 2007, Campo Grande. **Anais [...]** Campo Grande, 2007. p. 511 – 520. Disponível em: https://lpp.ufes.br/sites/lpp.ufes.br/files/field/anexo/2007_artigo_009.pdf. Acesso em: 17 fev. 2023.
- RICHERSON, D. W.; LEE, W. E. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design.** 4 ed. New York: CRC Press, 2018.
- ROCHA, C. H. B., SOUSA, J. G. Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: Aplicação em Cachoeira de Itapemirim - ES. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.6, n.9, p. 17, mar. 2010. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4714>. Acesso em: 20 out. 2022.
- SAAR, L. C. A. **Avaliação dos “granitos” giallo são Francisco real, branco dallas e branco marfim, do município de barra de São Francisco/ES para aplicação como rocha ornamental e de revestimento.** 2013. Dissertação (Mestrado) - Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.

- SANTOS, A. A. **Estudo das variáveis no processo de compactação de pós à base de alumina**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2012. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Alan%20Andrade%20dos%20Santos_M.pdf. Acesso em: 22 nov. 2022.
- SANTOS, M. A. **A metalurgia do pó para produção de peças de alumínio na indústria metalúrgica**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- SILVA, A. P. *et al.* Manufatura de liga de $Al-5\%Cu$ pelo processo de metalurgia do pó. **Atena Editora**. Ponta Grossa, v. 3, p. 69 - 84, 2019. DOI 10.22533/at.ed.4871905049. Acesso em: 9 ago. 2023.
- SILVA, C. C. **Rochas na construção civil: tipos, aplicações e critérios de seleção**. 2014. 90 f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9LZPRW/1/monografia_rochas_na_constru__o_civil.pdf. Acesso em: 11 jul. 2023.
- SILVEIRA, L. L. L. **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. 2007. Tese (Doutorado) - Geotecnia, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-31102007-095421/publico/tese.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2023.
- SOUZA, D. V.; VIDAL, F. W. H. CASTRO, N. F. Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/68>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- STANLEY, P. Mechanical Strength testing of compacted powders. **Revista Elsevier**, [s. l.], v. 227, p. 27-38, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00782-7](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00782-7).
- VERCELINO, L. H., ARAÚJO, H. E. Revisão bibliográfica acerca da sinterização e da anisotropia da microestrutura. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 5., 2020, Araraquara. **Anais....** Araraquara: IFSP, 2020.
- VIDAL, F. W. H. *et al.* Normatização da utilização de resíduos de rochas ornamentais em artefatos de cerâmica vermelha e à base de cimento Portland. Cachoeiro de Itapemirim: CETEM/MCTI, 2021.
- VIDAL, F. W. H., AZEVEDO, H. C. A., CASTRO, N. F. (Eds). **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1960> Acesso em: 24 out. 2022.