



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON FELIPE FERREIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS
CONFECCIONADAS A PARTIR DE REJEITOS DE GRANITO BRANCO ITAÚNAS
POR PROCESSAMENTO CERÂMICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA PRESSÃO
DE COMPACTAÇÃO.**

RUSSAS
2024

ALISSON FELIPE FERREIRA DE OLIVEIRA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS
CONFECCIONADAS A PARTIR DE REJEITOS DE GRANITO BRANCO ITAÚNAS POR
PROCESSAMENTO CERÂMICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE
COMPACTAÇÃO.

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 Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira.

RUSSAS

2024

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)

- O45e Oliveira, Alisson Felipe Ferreira de.
Estudo das propriedades físicas e mecânicas de peças confeccionadas a partir de rejeitos de granito Branco Itaúnas por processamento cerâmico em função da variação da pressão de compactação / Alisson Felipe Ferreira de Oliveira. – 2024.
58 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Caroliny Gomes de Oliveira .
1. rocha ornamental. 2. granito Branco Itaúnas. 3. processamento cerâmico. 4. propriedades físicas. 5. propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 620.1

ALISSON FELIPE FERREIRA DE OLIVEIRA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS
CONFECCIONADAS A PARTIR DE REJEITOS DE GRANITO BRANCO ITAÚNAS POR
PROCESSAMENTO CERÂMICO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE
COMPACTAÇÃO.

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
Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em: 11/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Marcos Ridiley Alcântara Costa
Universidade de Calgary

À minha mãe, Verônica e minha irmã, Suzana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por em todos os momentos ter me regido, guardado, governado e iluminado.

À minha mãe, Verônica e minha irmã, Suzana, por em todos os momentos terem ficado ao meu lado e, incondicionalmente, terem me incentivado e apoiado durante esse período. A vocês minha eterna gratidão.

À minha namorada, Camila, por todo apoio emocional, cuidado e amparo. Muito obrigado por sempre acreditar em mim.

Aos meus amigos Felipe e Anna Kethlen, pela grande amizade e parceria em diversas etapas da graduação, além da ajuda e apoio na construção desse trabalho.

À minha orientadora, Dra. Carolyn Gomes, por toda disposição, ajuda e dedicação para que torna-se possível a realização desse trabalho.

A todos os professores que fizeram parte durante esse período, obrigado por todos os ensinamentos e conselhos, vocês foram fundamentais nessa jornada.

Aos técnicos da UFC Campus Russas, pelo auxílio na realização dos ensaios e processos, em especial Myckelle, João Pedro, Orismildes e Bruno, obrigado pela ajuda.

Ao Dr. Jorge Luiz, Dr. Cândido Lobo, Marcos Ridiley e Rafaella Cavalcante pela disponibilidade, dedicação e auxílio para realização dos ensaios dessa pesquisa.

Aos meus amigos de infância, Samuel, Lisvalder e Mateus, por sempre me apoiarem e estarem ao meu lado durante essa e outras jornadas.

Aos meus amigos, Antônio Carlos, Helena, Hellen e Jéssica, que estiveram presentes no meu dia a dia trazendo alegria e tornando esse período mais leve.

“Por isso, vos digo: tudo o que pedirdes em oração, crede que o tendes recebido, e ser-vos-á dado.”

Marcos 11:24

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais vem desempenhando um importante papel no Brasil, sendo um país destaque em relação a produção desses materiais. Porém, a evolução do setor trouxe consigo a elevada geração de resíduos decorrentes do processo produtivo, acarretando em impactos ambientais em virtude do descarte inadequado desses rejeitos no meio ambiente. Nesse sentido, apresenta-se a necessidade de buscar medidas a fim de reaproveitar esses resíduos, indicando um destino viável e ecologicamente correto. Em face do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o potencial dos rejeitos do granito Branco Itaúnas como matéria-prima para produção de peças sinterizadas, por meio do processamento cerâmico, com auxílio da análise das propriedades físicas e ensaios mecânicos. A fabricação dos corpos de prova ocorreu a partir da obtenção do pó do granito Branco Itaúnas compactado em quatro cargas de compactação diferentes: 20 kN, 40 kN, 60 kN, 80 kN e sinterizado a 1140 °C por duas horas. Logo, foi realizada a avaliação visual e microscópica das peças e, em seguida, foram diagnosticadas as propriedades físicas, por meio dos testes de variação mássica, variação volumétrica, densidade específica aparente, densidade real do grão solto e porosidade aparente; junto às propriedades mecânicas, por meio dos ensaios de dureza e compressão diametral. Portanto, os resultados apresentaram que houve uma variação semelhante de volume e massa, em função das cargas de compactação, nos corpos de prova após a sinterização, além da ocorrência de um crescimento da densidade específica e redução da porosidade em relação ao aumento da pressão aplicada. Por fim, os ensaios mecânicos de dureza e compressão diametral indicaram uma elevação de resultado de acordo com o acréscimo da pressão de compactação, com tendência à estabilidade para as cargas a partir de 60 kN de compactação.

Palavras-chaves: rocha ornamental; granito Branco Itaúnas; processamento cerâmico; propriedades físicas; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The ornamental stone industry has been playing an important role in Brazil, being a prominent country in relation to the production of these materials. However, the evolution of the sector has brought with it the high generation of waste resulting from the production process, resulting in environmental impacts due to the inadequate disposal of these wastes in the environment. In this sense, there is a need to seek measures to reuse this waste, indicating a viable and ecologically correct destination. In view of the above, the present work aims to study the potential of Branco Itaúnas granite waste as raw material for the production of sintered parts, through ceramic processing, with the help of analysis of physical properties and mechanical tests. The specimens were manufactured by obtaining powder from Branco Itaúnas granite compacted under four different compaction loads: 20 kN, 40 kN, 60 kN, 80 kN and sintered at 1140 °C for two hours. Therefore, visual and microscopic evaluation of the pieces was carried out and then the physical properties were diagnosed, through mass variation, volumetric variation, apparent specific density, real loose grain density and apparent porosity tests; together with mechanical properties, through hardness and diametral compression tests. Therefore, the results showed that there was a similar variation in volume and mass, depending on the compaction loads, in the specimens after sintering, in addition to the occurrence of an increase in specific density and reduction in porosity in relation to the increase in applied pressure. Finally, mechanical hardness and diametral compression tests indicated an increase in results according to the increase in compaction pressure, with a tendency towards stability for loads from 60 kN of compaction.

Keywords: ornamental rock; White Itaúnas granite; ceramic processing; physical properties; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peça de grantito branco Itaúnas	18
Figura 2 - Remoção das placas de quartzito foliado.....	20
Figura 3 - Processo de compactação	25
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, os poros mudam de tamanho e forma	26
Figura 5 - Fluxograma de processos.....	27
Figura 6 - Britador de Mandíbulas BB 100	28
Figura 7 - Moinho de Disco Orbital MA 360.....	29
Figura 8 - Peneiras utilizadas: (a) Malha 9,5 mm; (b) Malha 4,75 mm; (c) Malha 2,4 mm; (d) Malha 1,2 mm; (e) Malha 600 μm ; (f) Malha 75 μm	30
Figura 9 - Balança analítica Ohaus.....	30
Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC	31
Figura 11 - Matriz metálica para compactação das peças	32
Figura 12 - Microscópio Olympus	33
Figura 13 - Forno Linn Elektro Therm.....	34
Figura 14 - Ensaio densidade real do grão. (a) Picnômetros durante a fervura; (b) Dessecador durante o resfriamento	37
Figura 15 - Durômetro Rockwell Sussen Wolpert	39
Figura 16 - Microscopias: CP-20; CP-40; CP-60 e CP-80; (a) Verde; (b) Sinterizado.	41
Figura 17 - Peças verdes A); Peças sinterizadas B); Cargas de compactação: (a) CP-20; (b) CP-40; (c) CP-60 e (d) CP-80	42
Figura 18 - Peça rompida após ensaio de compressão diametral	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação Mássica (%)	43
Gráfico 2 - Massas das poças verdes e sinterizadas	44
Gráfico 3 - Variação Volumétrica (%)	45
Gráfico 4 - Volume das peças verdes e sinterizadas	46
Gráfico 5 - Densidade específica aparente	48
Gráfico 6 - Porosidade aparente (%)	49
Gráfico 7 - Dureza Rockwell B	50
Gráfico 8 - Resistência à tração por compressão diametral.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas utilizadas e quantidade de peças.....	32
Tabela 2 - Resultados do ensaio de densidade real do grão solto.....	46
Tabela 3 - Resultados de densidade específica aparente	47
Tabela 4 - Resultados de porosidade aparente (%).....	48
Tabela 5 - Resultados de dureza Rockwell B	50
Tabela 6 - Relação L/d por Stanley (2001).....	51
Tabela 7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Rochas ornamentais.....	18
2.2	Rochas ornamentais na indústria brasileira	19
2.3	Processo de industrialização das rochas ornamentais.....	20
<i>2.3.1</i>	<i>Extração</i>	<i>20</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Beneficiamento</i>	<i>21</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Beneficiamento primário</i>	<i>21</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Beneficiamento secundário</i>	<i>22</i>
2.4	Resíduos e impactos ao meio ambiente	22
2.5	Processamento cerâmico	23
<i>2.5.1</i>	<i>Obtenção dos pós</i>	<i>24</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Compactação</i>	<i>24</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Sinterização</i>	<i>25</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Fluxograma de processos	27
3.2	Recolhimento do material para produção dos corpos de prova.....	28
<i>3.2.1</i>	<i>Origem do material</i>	<i>28</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Britagem</i>	<i>28</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Moagem</i>	<i>29</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Separação por peneiramento</i>	<i>29</i>
3.3	Produção dos corpos de prova.....	30

3.3.1	<i>Pesagem da quantidade de material</i>	30
3.3.2	<i>Acréscimo do ligante</i>	31
3.3.3	<i>Compactação das peças</i>	31
3.3.4	<i>Medição, pesagem e análise microscópica</i>	33
3.3.5	<i>Sinterização das peças</i>	34
3.4	Caracterização Física	35
3.4.1	<i>Variação mássica</i>	35
3.4.2	<i>Variação Volumétrica</i>	35
3.4.3	<i>Densidade específica aparente</i>	36
3.4.4	<i>Porosidade aparente</i>	36
3.4.5	<i>Densidade real do grão solto</i>	37
3.5	Caracterização mecânica	39
3.5.1	<i>Dureza Rockwell B</i>	39
3.5.2	<i>Compressão diametral</i>	40
4	RESULTADOS	41
4.1	Análise da Microscopia	41
4.2	Análise visual	42
4.3	Análise das propriedades físicas	43
4.3.1	<i>Variação mássica</i>	43
4.3.2	<i>Variação volumétrica</i>	44
4.3.3	<i>Densidade real do grão solto</i>	46
4.3.4	<i>Densidade específica aparente</i>	47
4.3.5	<i>Porosidade aparente</i>	48
4.4	Ensaio mecânicos	49
4.4.1	<i>Dureza Rockwell B</i>	49
4.4.2	<i>Compressão diametral</i>	51
5	CONCLUSÃO	53

6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O protagonismo industrial das rochas ornamentais vem sendo cada vez mais evidenciado, mundialmente, no âmbito civil. Segundo o Centro Brasileiro dos Exportadores de Rochas Ornamentais (2023), o setor brasileiro registrou um faturamento de US\$ 1,11 bilhão em exportações no ano de 2023.

Entretanto, o crescimento do setor no país, somado a explorações desordenadas dos recursos minerais, trouxe como desafio o elevado acúmulo de resíduos, por muitas vezes, depositados a céu aberto, rios, lagos e córregos (VIDAL, 2003). Além disso, podendo ocasionar em danos ambientais como a contaminação química do solo e acidentes naturais decorrentes da acumulação desses subprodutos. Nesse sentido, vale mencionar que a Resolução nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) expõe a importância da aplicação de critérios e procedimentos para a gestão adequada de resíduos decorrentes da construção civil defendendo prioritariamente a não geração e secundariamente a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição adequada dos rejeitos.

Ademais, vale ressaltar que estima-se que no Brasil foram gerados nos últimos 10 anos mais de 25 milhões de toneladas dos resíduos finos de rochas ornamentais e o problema mostra-se grave visto que a grande parte das indústrias não gerencia corretamente o manejo de seus subprodutos. Além disso, o setor apresenta uma preocupação crescente, uma vez que o descarte inadequado pode causar diversos problemas ambientais (VIDAL *et al.*, 2021).

Desse modo, o processamento cerâmico apresenta-se como um aliado na gestão desses resíduos. Assim, o reaproveitamento dos rejeitos em forma de matéria-prima para fabricação de novas peças mostra-se como uma possibilidade adequada com o objetivo de mitigar danos tanto econômicos quanto ambientais.

Portanto, esse trabalho propõe uma forma de reaproveitar os resíduos do granito Branco Itaúnas, fabricando corpos de prova por meio do processamento cerâmico, expondo-os a diferentes pressões de compactação e determinando as propriedades físicas e mecânicas das peças.

1.1 Objetivos

Nesse tópico os objetivos gerais e específicos serão apresentados.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas em peças fabricadas a partir de rejeitos de granito Branco Itaúnas fabricados por meio do processamento cerâmico e como a variação da pressão de compactação impacta nessas propriedades.

1.1.2 Objetivos específicos

Tais objetivos específicos são pretendidos durante o presente trabalho:

- Analisar a influência do processo de sinterização no aspecto visual e microscópico das peças;
- Determinar as propriedades físicas referentes a variação volumétrica e mássica das peças sinterizadas;
- Determinar a densidade real do grão solto do material, além de mensurar as densidades específicas e porosidades de acordo com a pressão de compactação;
- Estudar a influência da pressão de compactação nas propriedades mecânicas por meio dos ensaios de dureza e compressão diametral.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico será apresentado o referencial teórico com base nas pesquisas realizadas.

2.1 Rochas ornamentais

As rochas ornamentais são materiais rochosos usados pelo homem desde a antiguidade, tradicionalmente são designadas utilizando a cor seguida pela localidade a qual foi extraída, como por exemplo: granito Branco Itaúnas e Branco Ceará (FRASCÁ, 2014). Compostas em sua formação por diferentes tipos de minerais (quartzo, mica etc), as rochas são extraídas geralmente em forma de blocos, apresentando uma alta gama de aplicabilidades, com principal propósito, atualmente, relacionado a utilização para fins decorativos, revestimento e ornamentação, como visto na Figura 1.

Figura 1 - Peça de granito Branco Itaúnas.



Fonte: Nanoprice (2020).

No contexto econômico, as rochas ornamentais apresentam relevante valor comercial tangente ao cenário da construção civil. No Brasil, o setor apresenta importante atuação, tendo em vista que pode-se estimar a existência de 11.100 empresas do setor de rochas sendo responsáveis pela geração de 114.000 empregos diretos (FILHO, 2003).

Ademais, vale ressaltar que na construção civil a seleção e especificação das rochas apresentam aspecto decisivo de acordo ao uso pretendido em relação principalmente ao padrão estético desejado no revestimento de edificações, fazendo-se necessário integrar beleza e funcionalidade na utilização (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

Ainda de acordo com Vidal, Azevedo e Castro (2013), as rochas apresentam propriedades com resultados particulares em virtude de suas características decorrerem inerentemente da natureza quanto ao modo de formação, inter-relações com outros corpos rochosos, composição mineral, granulação etc. Destarte, a determinação das propriedades é realizada por meio da aplicação de ensaios e análises normalizadas, com o objetivo de recomendar o uso mais adequado das peças.

2.2 Rochas ornamentais na indústria brasileira

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2018) o processo produtivo das rochas ornamentais e de revestimento apresentaram notável evolução no Brasil, desde a década de 1990 o crescimento da demanda por exportação desses materiais, com destaque para chapas de granito semiacabadas, vem fomentando a evolução do setor no país. Esses valores são evidenciados pela evolução do número quantitativo de exportações de 900 mil toneladas em 1997, para 2,5 milhões de toneladas em 2007.

Internamente, no Brasil, a indústria das rochas ornamentais vem mantendo altos valores de produção, sendo 10 milhões de toneladas em 2023, o mesmo de 2022, embora ligeiramente inferior aos valores de 2021 de 10,2 milhões de toneladas; com destaque para os Estados do Espírito Santo, Bahia, Minas Gerais. Ademais, os números destacam que uma grande relevância na produção de granito, responsável por 38% do valor, além do mármore, responsável por 29%, e quartzito, responsável por 20% do montante produzido em 2023 (ABRIROCHAS, 2023).

Outrossim, vale salientar que a geologia do território brasileiro apresenta condições bastante propícias à existência de jazidas de rochas ornamentais, evidenciando o alto potencial do território brasileiro relacionado a extração e produção das rochas e uma ampla vantagem competitiva para o país no segmento, devido a diversidade dos tipos litológicos encontrados, grande variedade cromática, além da ocorrência de tipos de materiais raros e de alta cotação comercial (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2023), o Nordeste apresentou ênfase na produção de rochas ornamentais como granito, pegmatito,

mármore, calcário e quartzito. A região apresentou uma produção de 4,4 milhões de toneladas, sendo equivalente a 44% da produção nacional em 2023. Somado a isso, vale mencionar o destaque na região para os estados da Bahia, com produção de 1,9 milhões de toneladas, e Ceará, com 1,4 milhões de toneladas.

2.3 Processo de industrialização das rochas ornamentais

As etapas do processo produtivo das rochas ornamentais são, de maneira geral, simples, porém exigem análises técnicas para uma aplicação com qualidade. O processo é composto por duas etapas principais: extração e beneficiamento. Em seguida, será discorrido a respeito de ambas as etapas do processo de industrialização das rochas.

2.3.1 Extração

O processo ocorre, primeiramente, nas pedreiras onde os blocos são brutaemente retirados, conforme ilustra a Figura 2. Todo o contexto é baseado na análise técnica do solo e planejamento estratégico com o objetivo de confirmar o potencial econômico e a qualidade das rochas da localidade, em relação aos esforços necessários para a extração. Além disso, o estudo adequado das propriedades do solo é mister para obter um método de extração que mantenha a viabilidade do local, com impactos ambientais controláveis.

Figura 2 - Remoção das placas de quartzito foliado.



Fonte: Valadão (2010).

A extração inicia-se com a realização de uma pesquisa de solo para considerar o potencial e qualidade das rochas. Essa etapa é de fundamental importância para as etapas posteriores, ela é realizada por profissionais qualificados, geralmente geólogos e engenheiros de minas, que baseados em critérios técnicos, condicionantes geológicos (regionais e locais), estimativas de reservas além de constituintes físico-químicas da rocha. Desse modo, concluem sobre viabilidade da lavra junto a melhor forma de extração, evitando perdas e prejuízos ao ambiente (ROCHA; SOUSA, 2010).

A lavra das rochas ornamentais consiste em uma atividade cujo objetivo é a remoção de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos. O resultado do produto da etapa de lavra é o bloco de arestas aproximadamente retangulares, de dimensões variadas procurando o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva. Ademais, vale ressaltar que a extração de rochas ornamentais obedece fase para sua execução, as principais são a prospecção - para localização ou identificação da ocorrência mineral; pesquisa mineral - para avaliação do potencial de aproveitamento da jazida; lavra – consistindo na atividade produtiva da extração desenvolvida com metodologias apropriadas às características do material; e, por fim, a recuperação da área degradada (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

2.3.2 Beneficiamento

Após extraídos os blocos brutos são levados para a etapa de beneficiamento. Segundo Vidal, Azevedo e Castro (2013), o beneficiamento de rochas ornamentais visa basicamente a transformação dos blocos, em produtos finais ou semiacabados. Assim, essa etapa pode se dividir em beneficiamento primário (desdobramento), e secundário. De maneira geral, o primário está ligado a preparação e serragem dos blocos em chapas de usualmente dois ou três centímetros; o secundário é a etapa a qual as chapas são sujeitas ao acabamento superficial, com ou sem resinagem, que pode ser um simples desbaste, levigamento, polimento, escovado etc.

2.3.3 Beneficiamento primário

A fase de Beneficiamento começa no carregamento dos blocos até o pátio ou até a zona de desdobramento por meio de pontes rolantes. Logo após, é feito o envelopamento do bloco para a etapa de serragem. Os blocos, posteriormente, passam pelo desdobramento, sendo

a etapa responsável em transformar esses materiais em chapas, com espessuras bastante próximas daquelas que terão os produtos finais. Com as chapas serradas, a fase de beneficiamento primário é finalizada com o carregamento e transporte das chapas por carrinhos ou pontes rolantes e levadas até o pátio de beneficiamento secundário (GONÇALVES, 2021).

2.3.4 Beneficiamento secundário

Gonçalves (2021) evidencia que a fase de Beneficiamento secundário inicia-se na telagem, junto a aplicação de resina, geralmente epoxídica ou fenólica, como agente colante para fixação da tela. A tela é aplicada na parte que não será polida das chapas garantindo o aumento da resistência à flexão. Posteriormente é realizado o levigamento, sendo uma etapa de refinamento das chapas, com a criação de superfícies planares e paralelas. Finalizado o levigamento, as chapas são levadas ao estucamento sendo a fase em que ocorre o preenchimento das fissuras presentes na chapa com resina e pó da própria rocha. Em seguida, a resinagem é realizada, por meio da aplicação uma resina adesiva na face da placa, com a finalidade de recuperação e valorização das chapas que apresentem irregularidades superficiais.

Além disso, vale destacar a respeito dos resíduos gerados no processo. Portanto, como resultado das etapas são gerados dejetos constituídos de água, pó de pedra, resinas e materiais provenientes do desgaste das sapatas de polimento. Esse resíduo é descartado e lançado nos tanques de sedimentação onde é misturado com a lama resultante do processo de corte (BASTOS et al, 2013).

2.4 Resíduos e impactos ao meio ambiente

Apesar dos diversos fatores positivos tanto econômicos quanto produtivos ligados a indústria do beneficiamento e extração das rochas ornamentais, são observados diversos atividades que geram impactos negativos ao ambiente. Isso ocorre principalmente em virtude da grande geração de resíduos decorrentes do processo de industrialização das peças.

Para Campos e Castro (2007) os resíduos na cadeia produtiva de rochas ornamentais, são classificados por tamanho, em resíduos grossos, finos e ultrafinos. Os resíduos grossos podem ser encontrados diretamente pedreiras, constituídos de blocos de tamanhos irregulares, blocos com defeito e pedaços de blocos; e nas serrarias e marmorarias, constituídos principalmente de aparas, pedaços de peças e lascas. Os resíduos finos e ultrafinos, formados por ocasião do corte da rocha, são geralmente encontrados em cerrarias e marmorarias,

composta de teares, resultando em uma mistura de água, cal e granalha, formando a lama abrasiva. Evidenciando a imensa variação de resíduos decorrentes do processo produtivo.

A extração e o beneficiamento das rochas ornamentais produzem, em todas as suas etapas do processo uma quantidade expressiva de resíduos sólidos, com perdas de 65% a 75% de material, em média. Junto as perdas na produção, observa-se que o resíduos afetam diretamente o meio ambiente. Vale ressaltar que, principalmente, em relação a micro e pequenas empresas, grande parte desses resíduos são largados nas próprias pedreiras, acarretando em um grande impacto ambiental, visual e estético (CASTRO; VIDAL, 2009).

Segundo Vidal *et al.* (2021), estima-se que no Brasil foram gerados nos últimos 10 anos mais de 25 milhões de toneladas dos resíduos finos de rochas ornamentais, o problema mostra-se grave visto que grande parte das indústrias não gerenciam corretamente o manejo de seus subprodutos.

Evidencia-se, portanto, que devido à grande quantidade de resíduos gerados, é de suma importância buscar métodos com o fito de adquirir equilíbrio entre os benefícios econômicos e impactos decorrentes dos resíduos. Nesse sentido, buscar melhorias nas técnicas de extração e beneficiamento são vistas como objetivos iminentes do setor para mitigar a problemática, bem como métodos adequados de descarte e tratamento dos subprodutos líquidos afetados quimicamente no processo, que passam oferecer riscos ao solo.

Em muitos casos os resíduos são descartados de forma inadequada, o que afeta diretamente o meio ambiente, além da economia, por serem produtos aparentemente sem fins comerciais. Desse modo, a reutilização e renovação, na economia circular, do material não utilizado resultante dos processos de industrialização após a extração, tem por objetivo trazer um novo conceito estratégico, promovendo, assim, o crescimento econômico, e uma destinação adequada ou o retorno de maneira útil desses insumos para o mercado. (CUSTÓDIO; GOMES; CAVERZAN, 2023).

2.5 Processamento cerâmico

O processamento cerâmico de materiais apresenta-se como um método que possui uma grande diversidade industrial. Para Miranda (2021) o resultado dessa técnica corresponde a uma peça moldada segundo a forma desejada, com acabamento superficial satisfatório, além de propriedades e composição química controlada, sendo o processo produtivo aliado às necessidades finais do produto. Assim, podendo-se adaptar uma peça produzida de acordo com as características desejadas.

De acordo com Regis *et al.* (2022), a aplicabilidade dos materiais resultantes do processo ocorre mediante designação da finalidade, visto que as condições de processamento permitem a alteração das propriedades físicas finais do produto.

Segundo Lima (2021), o processamento cerâmico pode ser definido como um método utilizado a fim de preparar uma matéria-prima (subproduto), sendo, em suma, expresso pela prensagem dos pós em moldes metálicos à temperatura ambiente, seguida do processo de aquecimento controlado (sinterização). As etapas podem ser ramificadas em obtenção do pó, mistura, compactação, sinterização e operações de acabamento, caso seja necessário a fim de melhores aparências.

2.5.1 Obtenção dos pós

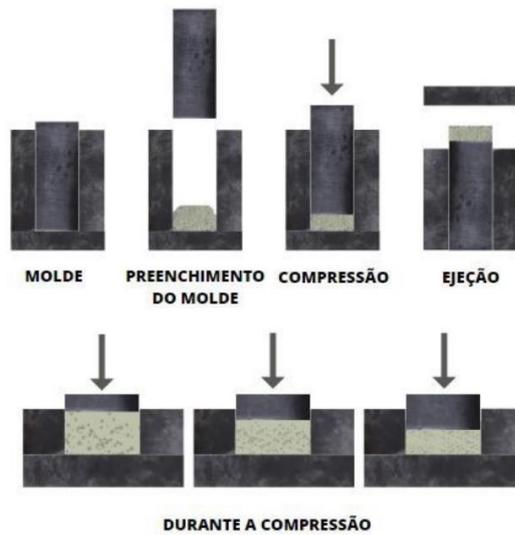
Os rejeitos brutos do material passam pelo processo de britagem, moagem e, em seguida, peneiramento adquirindo-se, por conseguinte, grãos com granulometria adequada para o processo. Regis (2021) evidencia que a moagem garante a redução do tamanho dos grãos, aumento da área superficial e auxilia na aplicação com qualidade das etapas sucessivas do processo de fabricação. Nesse sentido, a obtenção dos pós da matéria-prima de rochas ornamentais pode ser efetuada por meio de diversos processos, o principal está ligado a utilização de moinhos mecânicos, sua utilização tem o objetivo de obter menores partículas do subproduto, desse modo adquirindo propriedades dimensionais granulométricas apropriadas para serem levadas a etapa de compactação.

2.5.2 Compactação

Segundo Morais (2022) os resultados das características de compactação de um pó têm relação direta com a forma e o tamanho de suas partículas, sendo a compactação definida como a qualidade de as partículas de um pó ficarem o mais junto possível, decorrente da ação de uma pressão aplicada.

A compactação ocorre, dentre outras técnicas, por meio de uma carga aplicada uniaxial em um molde adaptado, conforme ilustrado na Figura 3, assim as partículas do pó são comprimidas até adquirir um menor volume de acordo com a quantidade de carga aplicada, obtendo uma alta densidade aparente na peça resultante. Além disso, a técnica uniaxial pode ser subdividida em três etapas: preenchimento do molde ou matriz, compactação do pó e ejeção da peça verde do molde (PINHEIRO, 2016 apud REGIS, 2021).

Figura 3 - Processo de compactação.



Fonte: Santos (2023).

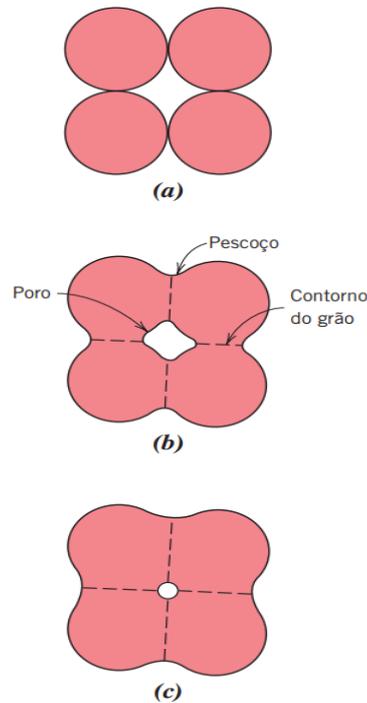
Ainda nesse sentido, Lima (2021) depreende que o aumento da pressão de compactação tende a favorecer a conexão entre grãos, gerando empacotamento e agregação das partículas, desse modo aponta que partes mais finas de cada partícula sofrem, concomitantemente, deformação em virtude da carga aplicada.

2.5.3 Sinterização

Para Palmeira (2012) o processo de sinterização pode ser entendido como um processo térmico cujo objetivo primordial é produzir uma forte união entre partículas ativadas termicamente. Ainda, indo ao encontro disso, na visão de Silva e Júnior (1998) a sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, acarretando, conseqüentemente, em que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquire resistência mecânica com a redução dos poros.

O ciclo de sinterização pode ser apresentado em três estágios. O estágio inicial (primário), reflete o manifesto dos primeiros sinais de contorno de grãos, o qual é formado um pescoço entre as partículas. O estágio intermediário (secundário), momento em que os poros se encontram em sua forma de equilíbrio. Por fim, o estágio final (terciário), quando os poros são comprimidos e se isolam no contorno dos grãos, reduzindo progressivamente até serem eliminados (VERCELINO; ARAÚJO, 2020 apud SANTOS, 2023). A Figura 4 mostra as mudanças da microestrutura dos pós durante a sinterização.

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, os poros mudam de tamanho e forma.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016, p. 490).

Há dois tipos principais de sinterização: por fase sólida e por fase líquida. Na sinterização por fase sólida, o material é transportado sem que haja qualquer tipo de líquido na estrutura, desse modo o material é transferido para as zonas vizinhas de contato entre partículas. Na sinterização por fase líquida, o processo ocorre por meio da formação de líquido na estrutura, decorrente da fusão de um dos componentes do sistema ou pelo resultado de reações entre dois ou mais componentes (BRITO; MEDEIROS; LOURENÇO, 2007 apud SANTOS, 2023).

A escolha correta do processo de sinterização aplicado é fundamental no resultado final do produto, em virtude principalmente do grau de porosidade pretendido nos corpos sinterizados, desse modo de acordo com as propriedades mecânicas requeridas faz-se necessário o controle do grau desse aspecto nos materiais cerâmicos. Destarte, para propriedades como condutividade e alta resistência mecânica, uma baixa porosidade é pretendida; e, para propriedades como permeabilidade, materiais com alta porosidade são demandados (PALMEIRA, 2012).

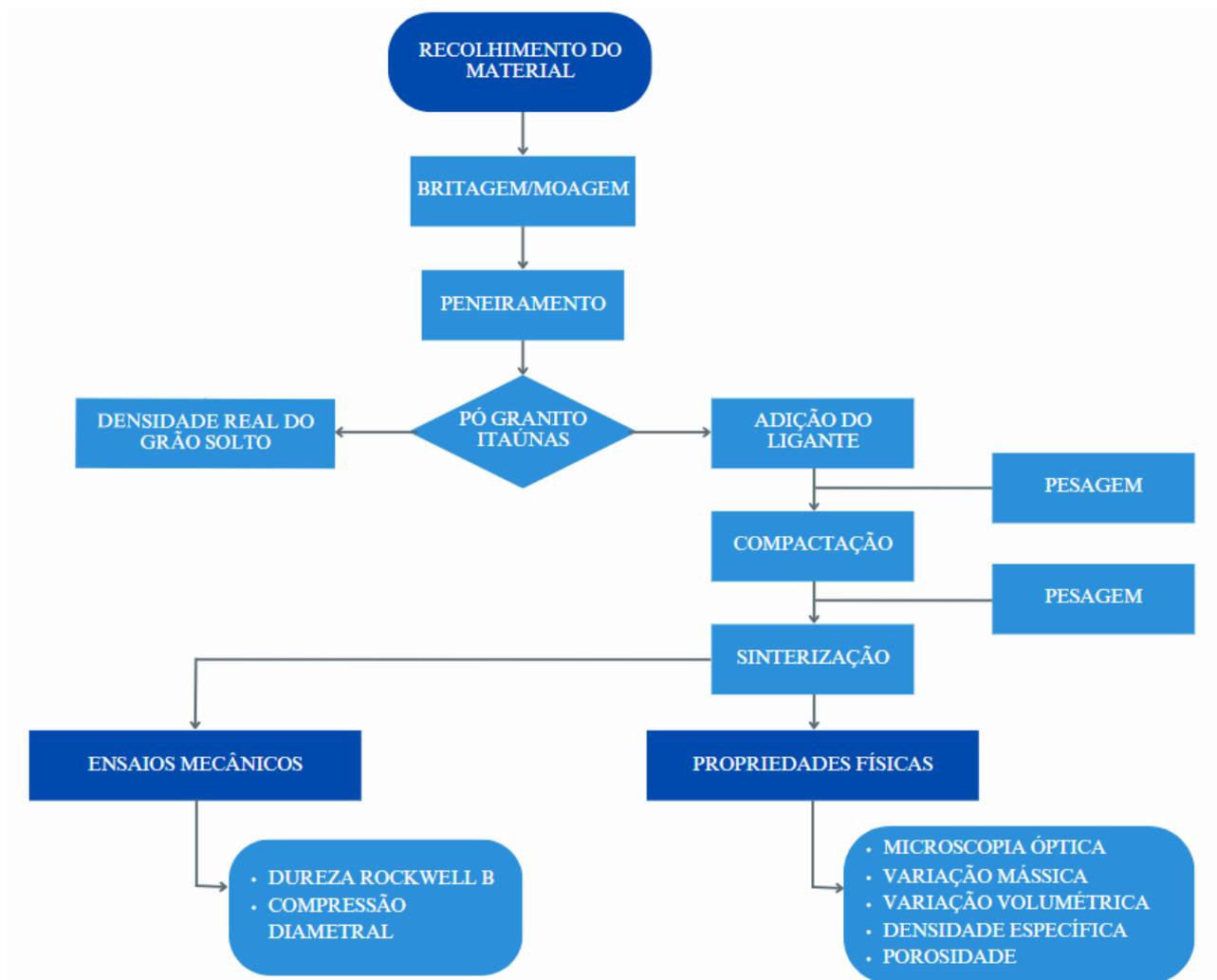
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia usada na fabricação dos corpos de prova por processamento cerâmico, os materiais utilizados durante o processo, microscopia, além das caracterizações físicas e ensaios mecânicos aplicados às peças de granito Branco Itaúnas.

3.1 Fluxograma de processos

A Figura 5 apresenta o fluxograma representando as etapas da metodologia, desde o recolhimento do material até os ensaios.

Figura 5 - Fluxograma de processos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2 Recolhimento do material para produção dos corpos de prova

O material utilizado no estudo adveio de rejeitos e rebarbas de rochas produzidos por sobras de cortes feitos anteriormente no material durante a produção das peças de granito Branco Itaúnas na indústria. O material foi disponibilizado pela empresa Mafort Marmoraria - empresa especializada em obras, confecções e acabamentos em peças de mármore, granitos e entre outras superfícies solidas - com sede em Fortaleza, capital do Estado do Ceará.

3.2.1 Origem do material

O material disposto no estudo é nomeado no comércio como granito Branco Itaúnas. Sua nomenclatura deriva-se do local de extração dos blocos, retirado principalmente de jazidas na cidade de Itaúnas, localizada ao norte do Espírito Santo.

3.2.2 Britagem

Após recolhidos os rejeitos, o material foi levado para o processo de britagem com o objetivo de fragmentar as rebarbas e assim obter peças menores de granito. O processo inicia-se pela britagem primária, obtendo peças com média diametral de 10 cm. Após isso, as peças de material foram submetidas novamente a britagem, sendo essa a britagem secundária, passando os blocos pelo Britador de Mandíbulas BB 100, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Ceará Campus do Pici, conforme ilustrado na Figura 6, adquirindo pedaços com média diametral de 1 cm.

Figura 6 - Britador de Mandíbulas BB 100.



Fonte: Santos (2023).

3.2.3 Moagem

Como, mesmo após a britagem secundária, não havia ainda quantidade de pó suficiente, sendo necessário seguir com o material para o processo auxiliar de moagem. A moagem foi realizada meio do Moinho de Disco Orbital MA 360, do Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, conforme ilustrado na Figura 7. O material foi porcionado e levado ao processo no moinho por em média 8 a 10 horas seguidas, assim obtendo a quantidade de pó necessária, com granulometria inferior a 75 μm do granito Branco Itaúnas, para confecção dos corpos de prova.

Figura 7 - Moinho de Disco Orbital MA 360.

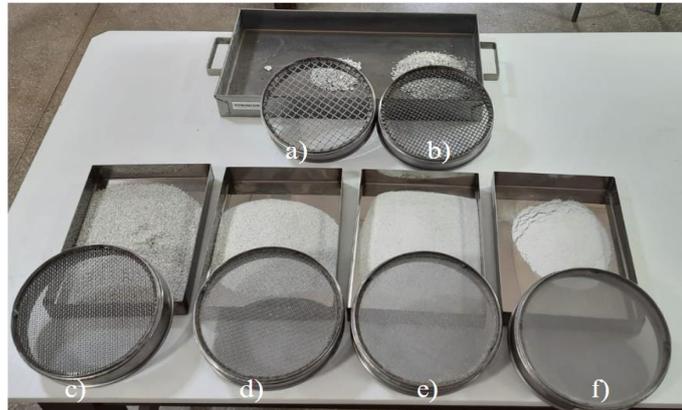


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.2.4 Separação por peneiramento

Depois do material passar pelo processo de britagem e moagem os grãos do granito Branco Itaúnas foram submetidos a separação por peneiramento, feita de forma manual através de peneiras, pertencentes ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, com malhas de 9,5 mm, 4,75 mm 2,4 mm, 1,2 mm, 600 μm e granulometria final de 75 μm , como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Peneiras utilizadas: (a) Malha 9,5 mm; (b) Malha 4,75 mm; (c) Malha 2,4 mm; (d) Malha 1,2 mm; (e) Malha 600 μm ; (f) Malha 75 μm .



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3 Produção dos corpos de prova

3.3.1 *Pesagem da quantidade de material*

Iniciando o processo de fabricação dos corpos de prova, pesou-se primeiramente a quantidade de amostra de material em uma balança analítica, como ilustra a Figura 9, da marca Ohaus modelo Adventurer AX523, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, com o objetivo de garantir o padrão de qualidade no peso de cada corpo de prova. Assim, garantindo que a análise seja observada apenas variando a pressão de compactação.

Figura 9 - Balança analítica Ohaus.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3.2 Acréscimo do ligante

Uma vez que o pó puro do material não estava dando a liga necessária para a compactação, ocasionando em corpos de prova muito frágeis, fez-se de suma importância a aplicação de uma substância ligante para garantir corpos de prova mais manuseáveis. Então, adicionou-se 1 ml de água destilada como um aditivo ligante para cada 10 g do pó do material, assim obtendo um produto mais pastoso e moldável, gerando corpos de prova com maior resistência ao manuseio.

3.3.3 Compactação das peças

A compactação dos corpos de prova foi realizada utilizando a máquina de ensaio universal da marca EMIC, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, com capacidade de até 300 kN e velocidade de carregamento de 2 mm por minuto, como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por conseguinte, o material foi levado para o processo de compactação uniaxial, com o objetivo de moldar a matéria-prima, assim obtendo os corpos de prova verdes do pó do granito Branco Itaúnas. O processo ocorre a partir da aplicação de cargas de compressão em uma forma cilíndrica metálica com diâmetro interno de 25 mm, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Matriz metálica para compactação das peças.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 1 apresenta a distribuição da quantidade de corpos de prova produzidos para cada pressão de compactação, sendo ao todo 20 corpos de prova.

Tabela 1 - Cargas utilizadas e quantidade de peças.

Carga (kN)	Quantidade de Peças
20	5
40	5
60	5
80	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Portanto, as amostras foram compactadas em formato de peças com 11 mm, em média, de altura e 25 de diâmetro, sendo esses os corpos de prova levados, posteriormente, ao processo de sinterização.

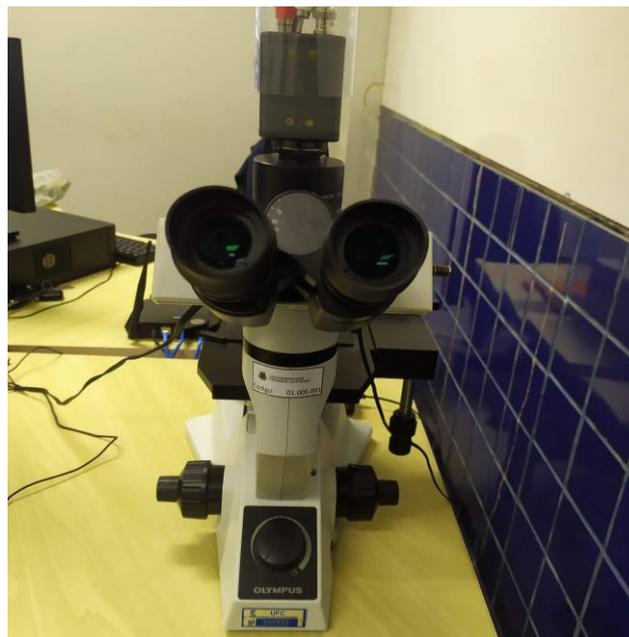
3.3.4 Medição, pesagem e análise microscópica

Após compactados os corpos de prova, ainda verdes, foram levados para realização de medições dimensionais e de massa e, posteriormente, após a sinterização, as medições de dimensão e massa foram feitas novamente. Esse processo foi necessário para obtenção da base de dados necessárias para os cálculos de variação mássica, volumétrica e densidade.

A medição do diâmetro e da altura dos corpos de prova foi realizada através de um paquímetro universal da marca Zaas Precision modelo ZAAS – 01,0013 pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará Campus Russas. Ademais, a medição da massa dos corpos de prova foi feita através da balança analítica.

Após medidas as dimensões e massas, os corpos de prova foram levados para a análise microscópica, feita através do microscópio modelo Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2 do Laboratório de Microscopia da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, que permite ampliações de 50, 200, 500 e 1000 vezes, conforme a Figura 12. Vale ressaltar que a análise, realizada antes e depois da sinterização, tem por objetivo visualizar os poros dos corpos de prova e compara-los, além de observar como a pressão de compactação influencia o tamanho e quantidade presente nas peças.

Figura 12 - Microscópio Olympus.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.3.5 Sinterização das peças

Após compactados os corpos de prova foram levados para o processo de sinterização utilizando o forno modelo Linn Elektro Therm, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, como mostra a Figura 13. Os corpos de prova foram sinterizados em uma única remessa de 20 unidades atingindo uma temperatura de 1140 °C com taxa de aquecimento de 5 °C por minuto e tempo de permanência no forno de 2 horas. Além disso, vale ressaltar que as amostras foram resfriadas naturalmente dentro do forno até a temperatura local, com o fito de impossibilitar o choque térmico das peças e o ambiente, além de facilitar o processo de remoção.

Outrossim, vale salientar que a escolha da temperatura utilizada no forno decorre de uma adaptação da análise proposta por Regis *at al.* (2022), a qual definiu como essa a temperatura de ótima sinterização para peças de granito Corumbá, a fim de se obter melhores características para os ensaios físicos e mecânicos. Logo, adaptar-se-á esse parâmetro de fabricação para o granito Branco Itaúnas.

Figura 13 - Forno Linn Elektro Therm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.4 Caracterização Física

3.4.1 Variação mássica

Os corpos de prova após a sinterização tiveram suas massas novamente medidas por meio da balança analítica, haja vista que há, normalmente, uma variação na massa das peças em virtude da eliminação de composições ligantes, além de reações químicas que podem ocorrer em reflexo ao do processo de sinterização. Desse modo, o ensaio, com o objetivo de mensurar essa variação após a sinterização, foi realizado nos corpos de prova; resultados positivos de variação expressam que ocorreu perda de massa e negativos expressam que ocorreu ganho.

Nesse sentido, a variação mássica foi calculada por meio da Equação 1:

$$VM(\%) = \left(\frac{M_o - M_f}{M_o} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

VM (%) = Variação mássica;

M_o = Massa inicial corpo de prova (verde);

M_f = Massa final do corpo de prova (sinterizado).

3.4.2 Variação Volumétrica

Os corpos de prova após a sinterização tiveram suas dimensões novamente medidas por meio do paquímetro, haja vista que há, normalmente, uma variação das dimensões (diâmetro e altura) em virtude da eliminação de composições ligantes, além de reações químicas que podem ocorrer em reflexo ao processo de sinterização, atingindo diretamente o volume dos corpos de prova. Desse modo, o ensaio, com o objetivo de mensurar essa variação após a sinterização, foi realizado nos corpos de prova; resultados positivos de variação expressam que ocorreu retração e negativos expressam que ocorreu expansão.

Nesse sentido, a variação volumétrica foi calculada por meio da Equação 2:

$$VV(\%) = \left(\frac{V_o - V_f}{V_o} \right) * 100 \quad (2)$$

Onde:

VV (%) = Variação volumétrica;

V_o = Volume inicial do corpo de prova (verde);

V_f = Volume final do corpo de prova (sinterizado).

3.4.3 Densidade específica aparente

Assim, como foram mensurados os valores de massa e volume dos corpos sintetizados para os cálculos das variações volumétricas e mássicas pode-se, então, utilizar os valores também para o cálculo da densidade específica aparente, de acordo com a ABNT NBR ISO 10545-3, sendo ela a razão entre a massa e o volume do corpo de prova após o processo de sinterização. Vale ressaltar que esse valor será de suma importância, posteriormente, no cálculo da porosidade aparente dos corpos de prova.

Desse modo, a densidade específica aparente foi calculada por meio da Equação 3:

$$DEA = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Onde:

DEA = Densidade específica aparente do corpo de prova (sinterizado);

m = Massa do corpo de prova (sinterizado);

V = Volume do corpo de prova (sinterizado).

3.4.4 Porosidade aparente

Logo, como já se foi obtida a densidade específica do corpo de prova (DEA), a qual considera a porosidade intrínseca do corpo, e conhecendo, posteriormente, a densidade real de grão solto (Dt) do material, sendo esse o valor considerando um grão isolado do material. Pode-se, então, mensurar a porosidade das peças.

Nesse sentido, a porosidade aparente foi calculada por meio da Equação 4:

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

Onde:

PA (%) = Porosidade aparente do corpo de prova (sinterizado);

DEA = Densidade específica aparente do corpo de prova (sinterizado);

D_t = Densidade real do grão solto.

3.4.5 Densidade real do grão solto

Uma amostra do material foi levada ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará Campus do Pici para o mensurar a densidade real do grão do granito Branco Itaúnas, realizado segundo a norma técnica DNER-ME 093/094.

Assim, para realização do ensaio, utilizou-se picnômetro com capacidade de 50 ml, postos para fervura, como mostrado na Figura 14 (a) e as medições foram feitas, posteriormente, por meio da balança digital de alta precisão. Desse modo, congruente a norma, as amostras foram posta em estufa a 110 °C até que seu peso tornar-se constante. Primeiramente pesou-se o picnômetro sendo esse correspondente ao valor de P1. Em seguida, pesou-se 10 g da amostra de granito Itaúnas colocado dentro do picnômetro e pesado novamente a vidraria sendo esse resultado correspondente ao valor de P2. Posteriormente, é adicionada água destilada no picnômetro até revestir completamente a amostra e, após isso, levado ao fogo para ferver e expulsar o ar entre as partículas e, por conseguinte, resfriado até atingir a temperatura ambiente no dessecador, como mostra a Figura 14 (b).

Figura 14 - Ensaio densidade real do grão. (a) Picnômetros durante a fervura; (b) Dessecador durante o resfriamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Posteriormente, o picnômetro é preenchido, de maneira cautelosa, com água destilada para ir novamente para o processo de pesagem sendo esse resultado correspondente ao valor de P3. Por fim, o material dentro do picnômetro é descartado e, em seguida, enche-se a vidraçaria apenas com água destilada e, logo depois, é novamente pesada sendo esse resultado correspondente ao valor de P4.

Portanto, com os valores de adquiridos pode-se calcular, finalmente, a densidade real do grão, por meio da Equação 5:

$$Dt = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} \quad (5)$$

Onde:

Dt = Densidade real do solo à temperatura t;

P1 = Peso do picnômetro vazio e seco;

P2 = Peso do picnômetro com amostra;

P3 = Peso do picnômetro com amostra e água;

P4 = Peso do picnômetro com água.

O resultado é considerado definitivo quando extraído da média de no mínimo duas medições e quando elas não diferirem 0,009. Outrossim, vale ressaltar que o valor da densidade nesse ensaio é referente a temperatura de 20 °C.

Nesse sentido, é, então, necessário aplicar o fator de correção tangente a temperatura, expresso por meio da Equação 6:

$$D_{20} = K_{20} * Dt \quad (6)$$

Onde:

D₂₀ = Densidade real do solo a 20 °C;

k₂₀ = Razão entre a densidade relativa da água à temperatura t e a densidade relativa da água 20 °C;

Dt = Densidade real do solo à temperatura t.

3.5 Caracterização mecânica

3.5.1 Dureza Rockwell B

Após finalizados, os corpos de prova sinterizados foram levados ao Laboratório de Ensaaios Mecânicos do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará Campus do Pici com o objetivo de ser realizado o ensaio de dureza Rockwell B, estabelecendo a resistência que o material mostra à penetração de um metal duro submetido a uma carga de 100 kgf com tempo de penetração de 10s, orientando-se pela norma ABNT ISO NBR 6508-1. Segundo Neto *at al* (2018), a dureza é uma característica importante pois mensura a resistência de um material a uma deformação plástica localizada.

O processo foi realizado por meio do Durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1, conforme ilustra a Figura 15, coletando os resultados de cinco indentações nos corpos de prova, para cada parâmetro de compactação.

Figura 15 - Durômetro Rockwell Sussen Wolpert.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.5.2 Compressão diametral

Em seguida, as peças foram submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral com o objetivo de mensurar a carga máxima que as peças fabricadas suportam até a fratura. Assim, para realização do ensaio, utilizou-se uma adaptação da norma ABNT NBR 7222:2011, empregada para determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de argamassa e concreto.

Desse modo, três corpos de prova de cada pressão de compactação foram levados ao ensaio de compressão diametral. A aplicação da força foi realizada através da máquina de ensaio universal EMIC, pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, com o objetivo de se calcular, posteriormente, o valor máximo de resistência à tração suportada pelas peças até sua ruptura, aplicando uma força de compressão com velocidade de carregamento de 2 mm por minuto. Ademais, aplicou-se, nos corpos de prova, a análise da relação L/d (espessura/diâmetro), conforme proposto por Stanley (2001), estabelecendo valores ideais do intervalo de confiança da razão para a realização do ensaio entre 0,2 e 0,5.

Dessa maneira, a resistência à tração por compressão diametral das peças foi calculada por meio da Equação 7:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi * d * l} \quad (7)$$

Onde:

f_{ct} = Resistência à tração;

F = Força máxima obtida no ensaio;

l = Comprimento do corpo de prova (sinterizado);

d = Diâmetro do corpo de prova (sinterizado).

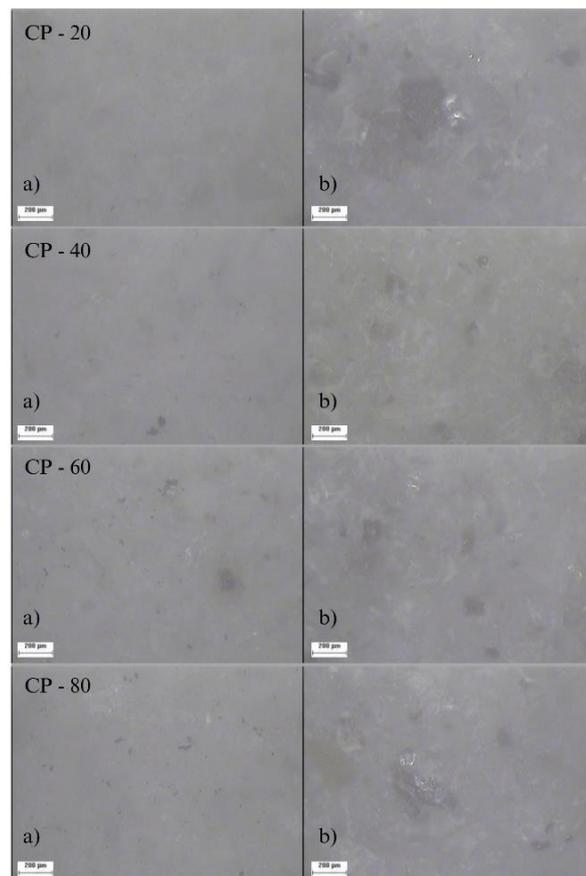
4 RESULTADOS

Esse capítulo tem como objetivo expor os resultados obtidos após caracterizações físicas e ensaios mecânicos nos corpos de prova.

4.1 Análise da Microscopia

Os corpos de prova primeiramente verdes e, em seguida, sinterizados obtiveram os seguintes resultados adquiridos na análise óptica expressos de acordo com a Figura 16, por meio de uma lente de ampliação de 200 vezes.

Figura 16 - Microscopias: CP-20; CP-40; CP-60 e CP-80; (a) Verde; (b) Sinterizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Vale ressaltar que o ensaio teve a nitidez da análise das imagens afetada em virtude do aspecto fosco dos corpos de prova, assim afetando a observação do comportamento visual

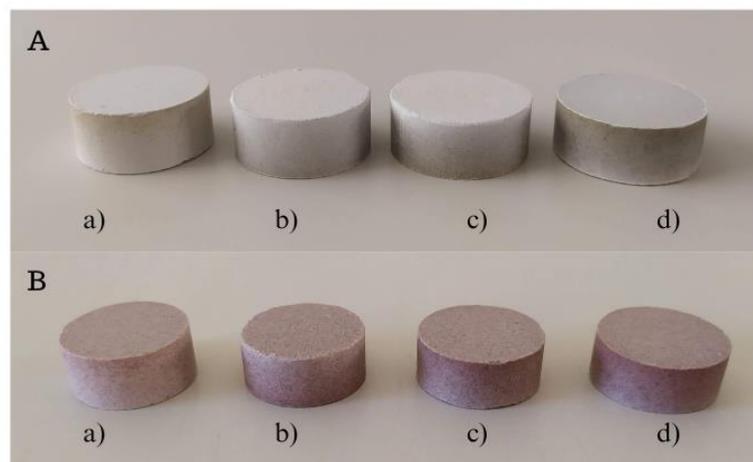
relacionado a mudança de pressão de compactação e o estado antes e depois da sinterização das peças.

Nesse sentido, observa-se, primeiramente, uma leve modificação da coloração para um aspecto mais escuro, algo esperado entre os corpos de prova (a) e (b) em virtude principalmente das reações que acontecem durante o processo de sinterização. Além disso, independente da pressão aplicada, em (b) vê-se claramente uma maior presença de pontos escuros bem definidos, sendo esses representantes dos poros na peça.

4.2 Análise visual

Os corpos de prova verdes, com médias de 11 mm e altura e 25 mm de diâmetro, foram levados ao forno em remessa única a uma temperatura de 1140 °C por 2 horas, organizados em grupos de 5 amostras de cada pressão de compactação. A Figura 17 em (A) apresenta um representante isolado de cada carga das peças antes da sinterização (verdes) e, após o processo no forno, em (B) os corpos sinterizados, respectivamente, para uma melhor comparação visual.

Figura 17 - Peças verdes A); Peças sinterizadas B); Cargas de compactação: (a) CP-20; (b) CP-40; (c) CP-60 e (d) CP-80.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se, primeiramente, que após o processo os corpos de prova ganharam um aspecto avermelhado claro e fosco. Além disso, na figura 17 em (B) é evidente a influência da pressão de compactação no resultado visual das peças e, comparando as pressões de compactação, nota-se que em (c) e (d) as peças apresentaram uma melhor vitrificação, em

relação aos resultados dos corpos de prova (a) e (b). Para Silva (2021), o aspecto visual vitrificado pode ser influenciado pela quantidade de óxidos fundentes presentes nas amostras.

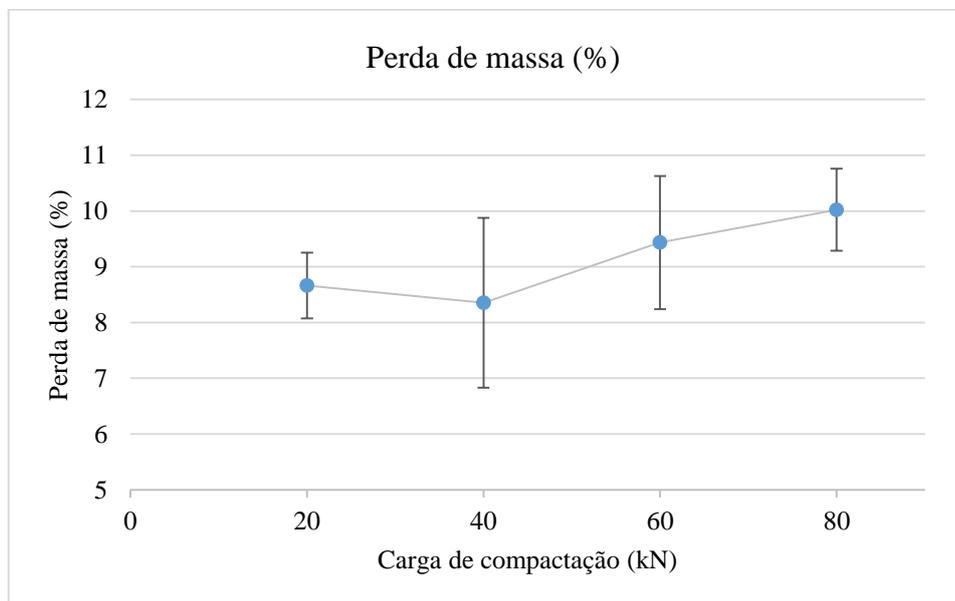
Ademais, vale ressaltar que as peças não apresentaram problemáticas no momento da retirada da base posta no forno para alocação, assim garantindo a estrutura intacta dos corpos de prova ao fim do processo de sinterização, sendo essa uma característica necessária para serem levados aos ensaios mecânicos, posteriormente.

4.3 Análise das propriedades físicas

4.3.1 Variação mássica

O Gráfico 1 mostra o resultado percentual da variação mássica das amostras de acordo com sua pressão de compactação, o resultado foi encontrado tomando como base as medições de massa dos corpos de prova em cada pressão, antes do processo de sinterização e após, extraindo assim a variação média e o desvio padrão dos resultados mensurados na balança.

Gráfico 1 - Variação Mássica (%).



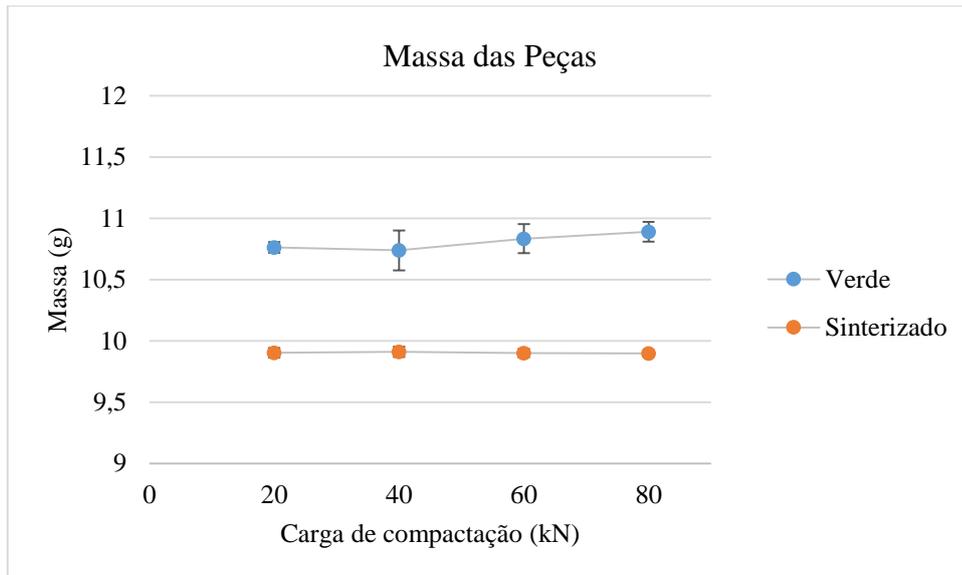
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo o Gráfico 1, observa-se uma constância na média dos resultados da porcentagem de perda de massa das peças em relação as pressões de compactação, apresentando resultados constantes com média aproximada entre 8% a 10% de perda de massa das peças verdes para sintetizadas. Esse resultado deve-se principalmente a evaporação da água destilada,

decorrente do processo de sinterização, que havia sido adicionada durante a fabricação dos corpos de prova.

O Gráfico 2 apresenta média e desvio padrão das medições de massa dos corpos de prova verdes e sinterizados de acordo com cada carga de compactação.

Gráfico 2 - Massas das peças verdes e sinterizadas.



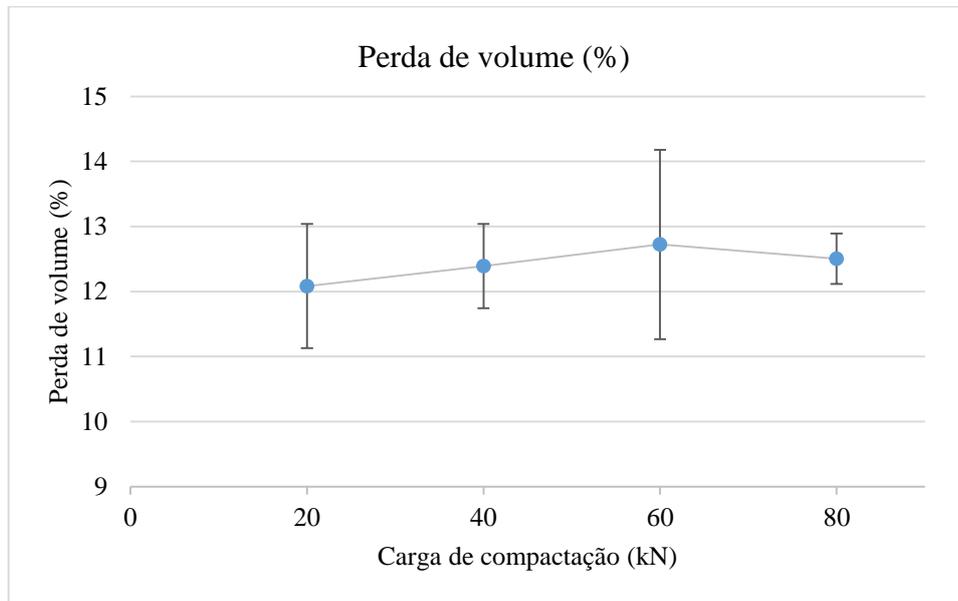
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se, de acordo com o Gráfico 2, a redução das massas das peças verdes em relação aos resultados após o processo de sinterização. Assim, fundamentando os resultados obtidos de variação mássica percentual. Além disso, vale ressaltar a ocorrência de valores aproximadamente constantes de massa dos corpos sinterizados, correspondente a 9,9 g de média, junto a presença de um baixo de desvio padrão durante as quatro diferentes pressões de compactação.

4.3.2 Variação volumétrica

O Gráfico 3 mostra o resultado percentual da variação volumétrica das amostras de acordo com suas pressões de compactação, o resultado foi encontrado tomando como base os dados dimensionais e assim sendo possível o cálculo do volume em cada pressão, antes do processo de sinterização e após, extraindo a variação média e o desvio padrão dos resultados mensurados na balança.

Gráfico 3 - Variação Volumétrica (%).

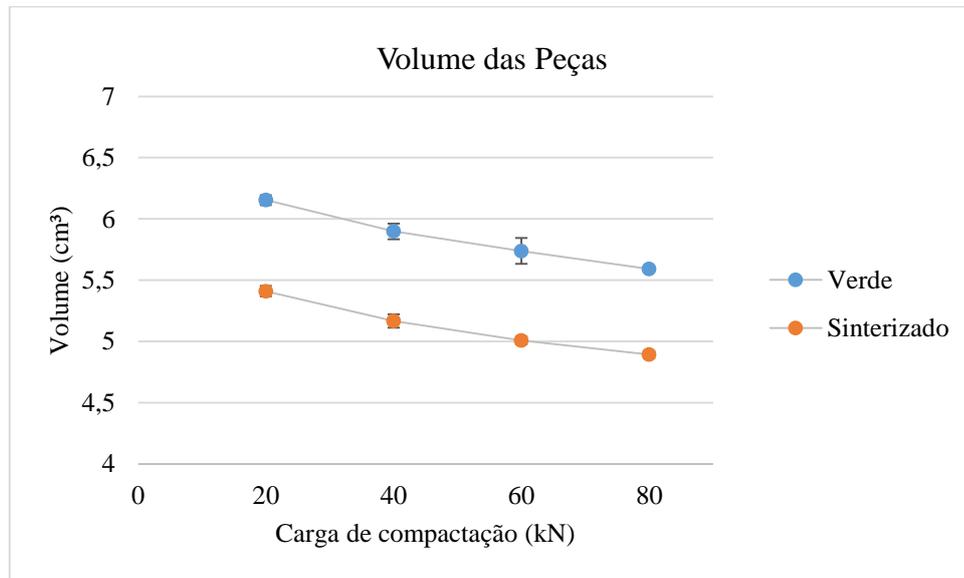


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo o Gráfico 3, infere-se uma constância na média dos resultados da porcentagem de perda de volume das peças em relação as pressões de compactação, apresentando resultados constantes com média aproximada entre 12% a 13% de perda de volume das peças verdes para sintetizadas. Esse resultado deve-se principalmente a presença de óxidos fundentes que, em virtude das altas temperaturas da sinterização, ocasionam a coalescência dos poros, reduzindo vazios da peça (SILVA, 2021). Além disso, ocorre a influência da evaporação da água destilada, decorrente do processo de sinterização, que havia sido adicionada durante a fabricação dos corpos de prova, gerando consequentemente uma perda de volume percentual das peças.

O Gráfico 4 apresenta média e desvio padrão das medições de volume dos corpos de prova verdes e sinterizados de acordo com cada carga de compactação.

Gráfico 4 - Volume das peças verdes e sinterizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se, de acordo com o Gráfico 4, a redução dos volumes das peças verdes em relação aos resultados após o processo de sinterização. Assim, fundamentando os resultados obtidos de variação volumétrica percentual. Ademais, vale mencionar que, apesar de obtermos dados de massas aproximadamente constantes dos corpos após a sinterização, os valores de volume apresentaram quedas decorrentes do aumento da pressão de compactação de um grupo para o outro, conseqüentemente, afetando diretamente as dimensões dos corpos de prova.

4.3.3 Densidade real do grão solto

As amostras do granito foram levadas a laboratório, assim foi determinada a densidade real do grão solto do pó do granito Branco Itaúnas. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de densidade real do grão solto.

AMOSTRA	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	δ (g/cm³)	$\Delta\delta$	δ (g/cm³)	δ -20° (g/cm³)
	28,12	38,14	84,30	78,43	2,414			
BRANCO ITAÚNAS	29,51	39,66	85,58	79,39	2,563	0,008	2,559	2,56
	43,90	53,94	101,58	95,47	2,555			

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se, a partir da Tabela 2, que o valor de $\Delta\delta$ da amostra não ultrapassou 0,009, sendo esse um valor, conseqüentemente, considerado satisfatório pela norma aplicada. Portanto, tem-se 2,56 g/cm³ equivalente ao valor de densidade real de grão solto do granito Branco Itaúnas. Portanto, vale ressaltar que a densidade calculada está próxima ao valor requisitado para granitos com finalidade de revestimentos, devendo ele ser maior ou igual a 2,55 g/cm³, segundo a norma ABNT NBR 15845-2.

4.3.4 Densidade específica aparente

A partir dos valores adquiridos de volume e massa dos corpos de prova pode-se, então, definir os valores de densidade específica, sendo ela a razão entre esses dois resultados. A Tabela 3 apresenta a média dos resultados de densidade específica dos corpos de prova sinterizados em cada pressão de compactação.

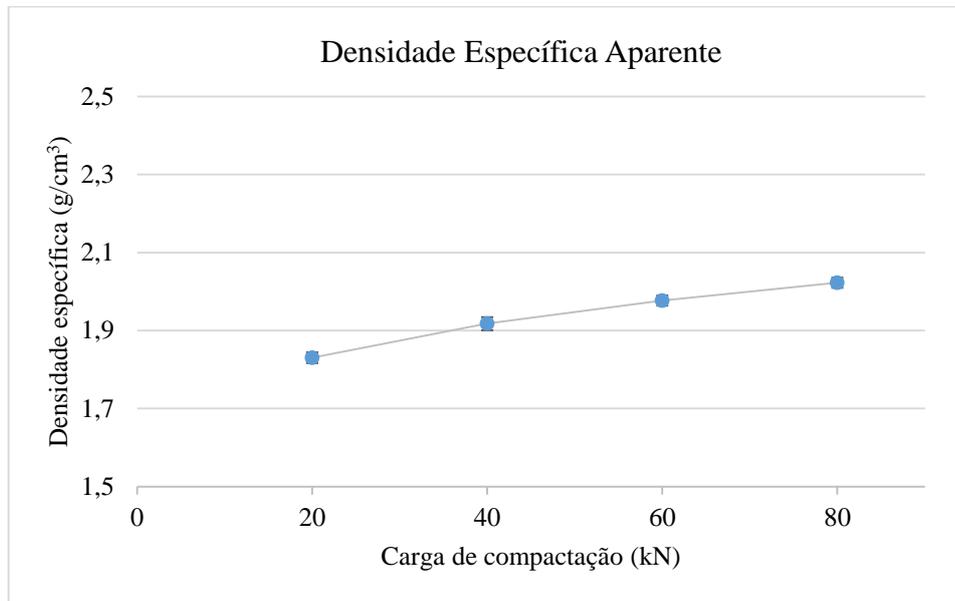
Tabela 3 - Resultados de densidade específica aparente.

CP	DEA (g/cm³)
20	1,830
40	1,917
60	1,977
80	2,022

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por conseguinte, o Gráfico 5 ilustra a representação dos valores junto ao desvio padrão para cada pressão de compactação.

Gráfico 5 - Densidade específica aparente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se, a partir do Gráfico 5, um aumento da densidade de acordo com o aumento da pressão de compactação. Logo, esse resultado está dentro do esperado, haja vista que maiores pressões de compressão ocasionaram peças com menores volumes, com massas aproximadamente constantes dos corpos de prova, gerando, conseqüentemente, corpos de prova com maior densidade a medida que se aumenta a carga aplicada.

4.3.5 Porosidade aparente

A partir do resultado da densidade de real de grão solto do granito Branco Itaúnas e os valores de densidade específica dos corpos de prova em cada pressão de compactação, foi possível mensurar os valores de porosidade aparente das peças. A Tabela 4 apresenta a média dos resultados percentuais de porosidade aparente das peças em cada pressão de compactação.

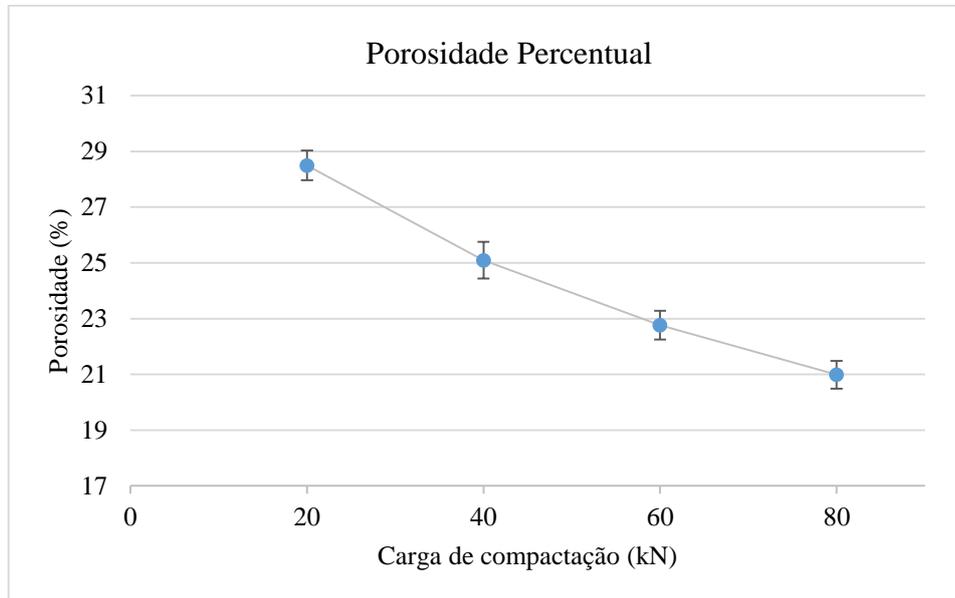
Tabela 4 - Resultados de porosidade aparente (%).

CP	PA (%)
20	28,495
40	25,091
60	22,768
80	20,987

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por conseguinte, o Gráfico 6 ilustra a representação dos valores junto ao desvio padrão para cada pressão de compactação.

Gráfico 6 - Porosidade aparente (%).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De acordo com o Gráfico 6, percebe-se que a pressão de compactação influenciou diretamente nos resultados de porosidade, sendo inversamente proporcional, haja vista que com o aumento da pressão os resultados de porosidade diminuíram. Além disso, nota-se que, comparando os valores de porosidade entre os corpos, a queda de porosidade apresenta-se com menor diferença de resultados em relação ao antecessor a medida que se aumenta a pressão de compactação, apresentando uma menor taxa de redução percentual progressiva. Entretanto, nesse sentido, nota-se a necessidade da aplicação de ensaios com maiores pressões de compactação para inferir a confirmação do alcance de uma possível estabilidade. Ademais, conforme Palmeira (2012), em virtude do alto percentual de porosidade, depreende-se que o material é indicado para peças que necessitem de alta permeabilidade.

4.4 Ensaios mecânicos

4.4.1 Dureza Rockwell B

A Tabela 5 apresenta os resultados médios obtidos de Dureza Rockwell B, referente aos corpos de prova sinterizados em cada pressão de compactação.

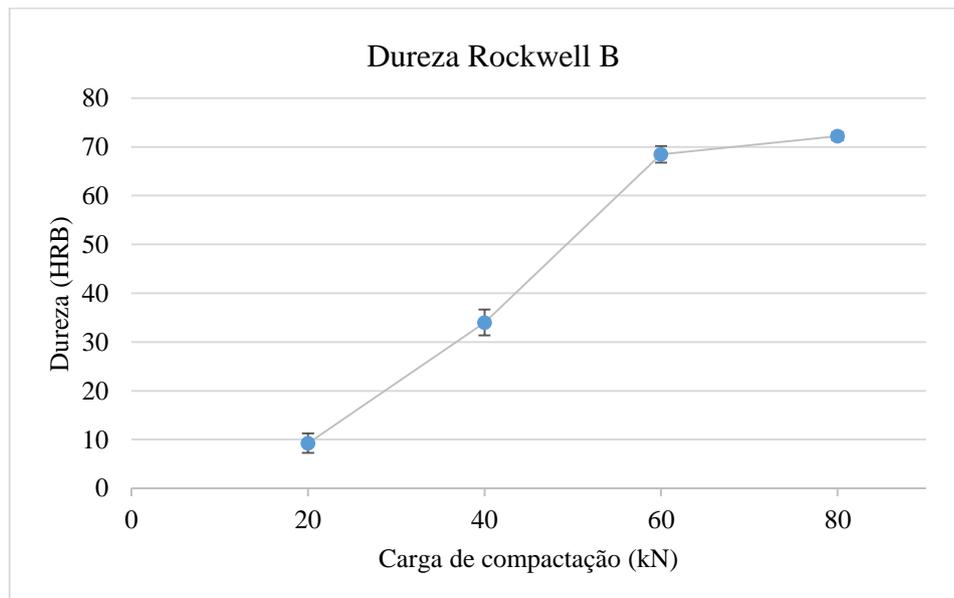
Tabela 5 - Resultados de dureza Rockwell B.

CP	Dureza Rockwell B (HRB)
20	9,260
40	34,000
60	68,480
80	72,200

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por conseguinte, o Gráfico 7 ilustra a representação dos valores junto ao desvio padrão para cada pressão de compactação.

Gráfico 7 - Dureza Rockwell B.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota-se, de acordo com o Gráfico 7, que com o aumento da pressão de compactação obtiveram-se resultados maiores de dureza. Entretanto, observa-se que a partir do ponto de dureza obtida pelos corpos de 60 kN de pressão de compactação os resultados apresentaram estabilidade, ao observar a proximidade dos dados com os obtidos pelas peças de 80 kN. Logo, infere-se que os corpos de 60 kN apresentaram os melhores resultados proporcionais de dureza, haja vista que apresentaram, com um menor esforço energético aplicado, um resultado similar ao de maior esforço.

4.4.2 Compressão diametral

A relação L/d (espessura/diâmetro), indicada por Stanley (2001), utilizada para retificar valores apropriados para a realização do ensaio de resistência à tração, tem seus valores expressos pela Tabela 6. Desse modo, deve-se permanecer no intervalo de confiança entre 0,2 e 0,5 os resultados de L/d para serem considerados ideais.

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

CP	L/d (Médio)
20	0,470
40	0,445
60	0,427
80	0,418

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Infere-se, portanto, que os resultados médios de L/d das peças ficaram dentro do intervalo de confiança (entre 0,2 e 0,5) ideal, conforme idealizado por Stanley (2001). Assim, sendo possível a aplicação do ensaio de maneira apropriada.

A Figura 18 ilustra um exemplar de uma das peças rompidas, observa-se que houve uma propagação da trinca em meio ao seu diâmetro, sendo esse um resultado esperado durante o ensaio.

Figura 18 - Peça rompida após ensaio de compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 7 apresenta os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, referente aos corpos de prova sinterizados em cada pressão de compactação.

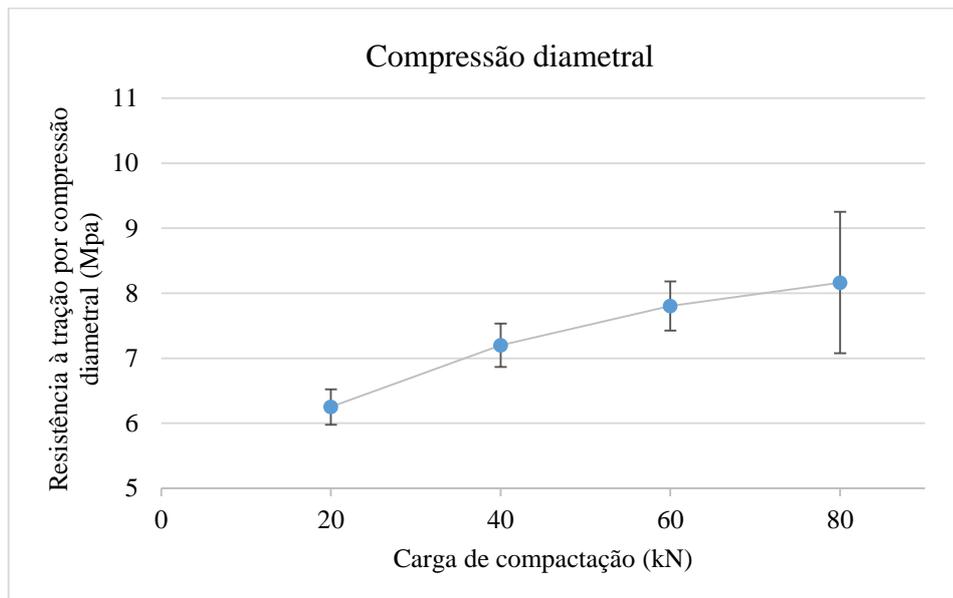
Tabela 7 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral.

CP	Resistência à tração por compressão diametral (Mpa)
20	6,250
40	7,200
60	7,803
80	8,162

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por conseguinte, o Gráfico 8 ilustra a representação dos valores junto ao desvio padrão para cada pressão de compactação.

Gráfico 8 - Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se, de acordo com o Gráfico 8, que com o aumento da pressão de compactação obtiveram-se resultados parcialmente maiores de resistência. Logo, o comportamento diretamente proporcional apresentado era esperado, haja vista que os resultados da dureza também apresentaram crescimento de acordo com a pressão de compactação. Entretanto, em virtude do alto desvios padrão, nota-se que apenas as cargas de 20 kN apresentaram resultados evidentemente menores em relação aos outros corpos. Ademais, observou-se uma notória menor taxa de aumento entre os resultados das médias de resistência entre as peças de 60 kN e 80 kN.

5 CONCLUSÃO

Portanto, esse estudo procurou evidenciar a viabilidade da fabricação dos corpos de prova confeccionados por meio do processamento cerâmico a partir de resíduos do granito Branco Itaúnas, expostos a quatro diferentes pressões de compactação (20 kN, 40 kN, 60 kN, 80 kN) e sinterizados a 1140 °C, com base na análise referente às propriedades físicas e mecânicas das peças. Desse modo, por meio dos ensaios e análises realizados, pôde-se depreender que:

As peças apresentaram um visual avermelhado claro e fosco após o processo de sinterização, tal característica interferiu negativamente na nitidez das imagens na análise microscópica. Entretanto, pôde-se observar uma leve mudança de coloração para um aspecto mais escuro, além da presença bem definidas dos poros nos corpos de prova após a sinterização.

O volume e massa dos corpos de prova, após o processo de sinterização, tiveram redução em virtude da presença de óxidos fundentes e evaporação da água destilada no processo. Assim, a variação percentual volumétrica revelou um resultado constante em relação ao aumento da pressão de compactação, com média de 12% a 13% de perda após a sinterização nas quatro diferentes cargas; além disso, a variação percentual mássica obteve um padrão parecido, constante com médias de perda entre 8% a 10 % nas quatro diferentes cargas.

A densidade real dos grãos soltos do material obteve, através do ensaio, um resultado de 2,56 g/cm³. Ademais, as densidades específicas das peças sinterizadas, obtidas através da análise dimensional dos corpos de prova, indicaram um aumento de densidade de acordo com o aumento da pressão de compactação.

Obtendo os valores de densidade real do grão solto e densidades específicas foi possível obter os valores de porosidade. Logo, os resultados da porosidade evidenciaram que a compactação influenciou fortemente nesse fator, haja vista que o aumento das cargas resultaram em uma diminuição no percentual obtido de porosidade dos corpos de prova, sugerindo uma relação inversa. Outrossim, nota-se que, comparando os resultados de entre os corpos de prova, uma redução progressiva de porosidade indicando uma menor diferença de resultados em relação ao antecessor a medida que se aumenta a pressão de compactação, sendo necessária a aplicação de maiores pressões de compactação a fim alcançar a estabilidade dos resultados.

Os valores do ensaio de dureza indicaram um aumento da característica de acordo com o aumento da pressão. Não obstante, vale salientar que os corpos de prova a partir da carga de 60 kN apresentaram uma grande estabilidade comparando com os resultados obtidos com os de 80 kN, haja vista os resultados similares obtidos.

Os resultados do ensaio de compressão diametral revelaram um parcial aumento da resistência a tração de acordo com o aumento da carga, sendo esse resultado diretamente proporcional esperado após os dados obtidos de dureza. Além disso, vale ressaltar que apenas os corpos de 20 kN apresentaram evidentemente menores resultado de dureza, em virtude do alto desvio padrão dos valores das outras amostras.

Destarte, os resultados mostraram-se harmônicos, apresentando, de maneira holística, um aperfeiçoamento das propriedades de acordo com o aumento das pressões de compactação. Porém, vale ressaltar que os corpos de prova de 60 kN de compactação expressaram uma maior viabilidade, pois em comparação as peças de maior carga (80 kN) apresentaram, com menos esforços de fabricação, resultados similares ou com menor taxa de melhoramento em relação a carga subsequente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou as propriedades física e mecânica dos corpos de prova fabricados por meio do processamento cerâmico, com resíduos do granito Branco Itaúnas. Não obstante, com o objetivo de realizar complementações e o desenvolvimento de novas pesquisas, segue abaixo sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar processos de sinterizações em mais temperaturas, com o fito de mensurar a temperatura de ótima sinterização;
- Avaliar a influência nas propriedades mecânicas a partir da aplicação de maiores cargas de compactação;
- Realizar a análise de difração de Raios-X e ensaio de fluorescência na matéria- prima, com o objetivo de determinar as propriedades químicas;
- Realizar a análise de absorção de água do material;
- Averiguar a aplicabilidade, relacionado ao custo-benefício, em processos concretos de construção e ornamentação civil.

REFERÊNCIAS

- ABRIROCHAS. **Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2023. Informe 01/2024.** Brasília, 2024.
- ABRIROCHAS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais. Informe 05/2018.** Brasília, 2018.
- 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 tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: concreto e 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
- BASTOS, R. S. et al. **Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção.** Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Goiabeiras, p.01-16, 2013
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução n.º 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 2002.
- BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó. **HOLOS**, [S. l.], v. 3, p. 204–211, 2007. DOI: 10.15628/holos.2007.139. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/139>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- 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.
- CAMPOS, A. R.; CASTRO, N. F. **Tratamento e Aproveitamento De Resíduos De Rochas Ornamentais.** Ouro preto: XXII ENTMMME / VII MSHMT, 2007.
- CASTRO, N. F., VIDAL, F. W. H. Anais do XXIII Simpósio Geologia do Nordeste; VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. In: **SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE**, 7., 2009, Fortaleza. Anais...Fortaleza: CETEM/MCT, 2009. 192 p.
- CUSTÓDIO, A. R., GOMES, Q. C., CAVERZAN, D. Aproveitamento econômico dos rejeitos e resíduos do beneficiamento das rochas ornamentais: Revisão Bibliográfica. **Revista**

Ifes Ciência, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 01–09, 2023. DOI: 10.36524/ric.v9i2.1951. Disponível em: <https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/1951>. Acesso em: 12 fev. 2024.

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

FILHO, C. **Desempenho e competitividade do setor de rochas no Brasil**. In: Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 16 a 19 de novembro de 2003, Fortaleza. Rio de Janeiro: CETEM/SBG, 2003. p.245-252.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas**. In: Tecnologia de Rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.2, p.44-98.

GONÇALVES, R. D. D. M.; LIMA, F. M. R. S. **Atualização do inventário do ciclo de vida de rochas de granito do Espírito Santo**. [s.l.] CETEM/MCTI, 2021.

Granito Branco Itaúnas: 10 dicas de como aplicar. Nanoprice. 25 nov. 2020 Disponível em: <https://blognano.com.br/2020/11/25/granito-branco-itaunas>. Acesso em: 10 jul. 2024.

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.

MIRANDA, A. C. B. **Estudo das propriedades físicas do pó do granito corumbá em função dos parâmetros de fabricação por metalurgia do pó**. 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Russas. 2021.

MORAIS, G. A. **Desenvolvimento da metalurgia do pó**. Natal: EDUFRN, 2022.

NETO, E. B. et al. **Estudo da relação da microdureza e limite de resistência a tração do aço api 51 x80**. Anais III CONAPESC. Campina Grande: Realize Editora, 2018. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/43133>. Acesso em: 26/08/2024 01:24

PALMEIRA, A. A. **Estudo comparativo da sinterização dos pós nanoestruturados e microestruturados de ZrO_2 tetragonal estabilizado com Y_2O_3** . 2012. 165 f. Tese (Doutorado) – Ciências na área de concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

PINHEIRO, H. S. **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) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

REGIS et al. Reaproveitamento de detritos da indústria de rochas ornamentais como estratégia de mitigação ambiental. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 4, p. 01–20, 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.

ROCHA, C. H.; SOUSA, J. Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação Cachoeiro de Itapemirim - ES. **Enciclopedia biosfera**, [S. l.], v. 6, n. 09, 2010. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4714>. Acesso em: 8 jan. 2024.

SANTOS, A. K. F. **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.** 2023. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Russas. 2023.

SILVA, A. G. P., JÚNIOR, C. A. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. **Cerâmica**, [S.L.], v. 44, n. 290, p. 225-232, dez. 1998. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69131998000600004>.

SILVA, R. A. **Efeitos da temperatura no comportamento mecânico de matérias-primas utilizadas na produção de cerâmica de revestimento em indústria do Cabo de Santo Agostinho – PE.** 2021. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2021.

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)

VALADÃO, G. E. S., Dutra, J. I. G., Galéry, R., Morais, B. F., Braga, G. P, Oliveira, M. M. (2010) **Quartzito no parque nacional da serra da Canastra e seu entorno - Relatório Final.** DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

VERCELINO, L. H., ARAÚJO, H. E. Revisão bibliográfica acerca da sinterização e da anisotropia da microestrutura. **CONICT - Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia**, Brasil, nov. 2020. Disponível em: <https://ocs.ifsp.edu.br/conict/xiconict/paper/view/7028/1727>. Acesso em: 15 dez. 2023.

VIDAL, F. W. H. **Aproveitamento de rejeitos de rochas ornamentais e de revestimentos.** In: Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 16 a 19 de novembro de 2003, Fortaleza. Rio de Janeiro: CETEM/SBG, 2003. p.221-229.

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: 5 dez. 2023