



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINA BRAGA MIRANDA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO CORUMBÁ EM
FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO POR METALURGIA DO PÓ**

RUSSAS
2021

ANA CAROLINA BRAGA MIRANDA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO CORUMBÁ EM
FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO POR METALURGIA DO PÓ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Programa de Graduação
em Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheira Civil.

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

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

M64e Miranda, Ana Carolina Braga.

Estudo das propriedades físicas do pó do Granito Corumbá em função dos parâmetros de fabricação por metalurgia do pó / Ana Carolina Braga Miranda. – 2021.

58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.

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

1. Rocha ornamental. 2. Granito Corumbá. 3. Propriedades físicas. I. Título.

CDD 620

ANA CAROLINA BRAGA MIRANDA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO CORUMBÁ EM
FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO POR METALURGIA DO PÓ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Programa de Graduação
em Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Engenheira Civil.

Aprovada em: 30/08/2021

BANCA EXAMINADORA

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

Profª Ma. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª Ma. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, Eurides por me incentivar,
acreditar em mim e ser minha maior
apoiadora nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de começar agradecendo a Deus porque tão profundo quanto as palavras é o que sentimos e em todos os tempos difíceis foi Ele quem me sustentou, amparou, guardou em seus braços, me fazendo continuar, persistir e concluir o meu objetivo.

A minha amada mãe, Eurides Braga, por me dar o mais importante que é a vida. Ela que foi meu ombro amigo e alicerce durante esse tempo. Foi quem sempre me apoiou e ajudou cada pequeno passo em busca dessa vitória e me proporcionou oportunidades que ela mesma nunca teve. À senhora, minha eterna gratidão!

À minha tia Diana e a todos da minha família que torceram por mim.

Ao meu sobrinho, Miguel Anjo, que apenas pelo fato de existir já me encorajou a prosseguir e realizar inúmeros desafios em busca de um futuro melhor.

Ao meu pai Antonio Carlos, pela ajuda na minha manutenção em Russas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cândido Lobo, por toda disposição, paciência e ajuda. Agradeço a ser sempre solícito e ter concretizado esse projeto comigo.

A todos os professores que contribuíram na minha formação acadêmica, em especial à Prof^a Ma. Daniela Machado e à Prof^a Ma. Andriele Nascimento que me concederam a honra de tê-las em minha banca examinadora.

Aos técnicos da Engenharia Civil e da Engenharia Mecânica da UFC-Russas e aos técnicos da UFC-Pici pelo auxílio nos ensaios para elaboração desse trabalho.

A WC Mármore e Granito pela doação do material e pela disponibilidade de informações acerca.

As minhas amigas Paula Vivian, Tatyane Alves, Lais Bernardo, Helena Aciole, Dávila Barros e Roceliane Ramos que já me apoiavam antes mesmo da idealização da graduação.

Aos presentes que a UFC me deu, Rafaella Cavalcante, Renato Alves, Junior Sombra, Ednara Oliveira e Rafaela Gomes que tornaram meus dias mais leves e felizes, vocês foram essenciais e levo-os no meu coração onde quer que estejam.

Aos filhos da terra que me abraçaram nesta cidade e foram tão parceiras por todo esse período, Ambrozina Araújo, Marcilene Lima, Marcos França e Laiza Dias.

A essas pessoas que vou citar a seguir, saibam que de alguma maneira vocês contribuíram para que eu chegasse até aqui, Douglas Sampaio, Daniele Fernandes, Alexandra Rodrigues, Bianka Gomes, muito obrigada.

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais registra a cada ano um maior crescimento no setor. Em decorrência a esse crescimento, tem sido gerada uma grande quantidade de materiais de refugo, oriundos do beneficiamento das rochas, impulsionando assim, o interesse e necessidade de minimizar os impactos ambientais causados e propor a empregabilidade a estes rejeitos. O presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial tecnológico do rejeito do granito Corumbá como matéria-prima para a produção de peças sinterizadas por meio da metalurgia do pó e, através de ensaios e análises de propriedades físicas. Foram realizadas análises de caracterização do pó do granito através da difração de raios-X, fluorescência de raios-X e densidade real do grão solto. Com o intuito de analisar a influência da carga de compactação na temperatura de sinterização, as amostras foram compactadas a quatro cargas diferentes a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN e, sinterizadas a duas temperaturas A – 1140 °C e B – 1170 °C. Posteriormente, foram feitas as análises de retração linear, de absorção de água, de densidade específica aparente das peças sinterizadas e de porosidade para os dois conjuntos. Os resultados obtidos permitiram concluir que à temperatura de 1140 °C a sinterização demonstrou-se insuficiente, pois a curva de gresificação evidenciou que a absorção diminui com o aumento da retração linear, ou seja, para diminuir a porosidade é necessária uma maior carga compactação e um maior consumo de energia. A sinterização a 1170 °C foi considerada satisfatória, pois os resultados obtidos na curva de gresificação demonstraram uma alta retração e baixa absorção de água. Os resultados da porosidade permitiram concluir que não houve variação estatisticamente significativa, pois a amplitude dos resultados de desvios-padrão se interceptam, o que sugere que os CP atingiram uma saturação de compactação e que a porosidade independe da pressão de compactação, sendo esta vinculada exclusivamente à temperatura de sinterização.

Palavras-chaves: Rocha ornamental. Granito Corumbá. Propriedades Físicas.

ABSTRACT

The ornamental stone industry registers a greater growth in the sector every year. As a result of this growth, a large amount of waste materials has been generated, originating from the processing of rocks, thus boosting the interest and need to minimize the environmental impacts caused and to propose the employability of these tailings. The present work aims to analyze the technological potential of the Corumbá granite tailings as a raw material for the production of sintered parts through powder metallurgy and through tests and analysis of physical properties. Granite dust characterization analyzes were performed using X-ray diffraction, X-ray fluorescence and real loose grain density. In order to analyze the influence of the compaction load on the sintering temperature, as they were compacted at four different loads a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN and d) 80 kN and sintered at two temperatures A - 1140°C and B - 1170°C. Subsequently, linear shrinkage, water absorption, apparent specific density of the sintered parts and porosity analyzes were performed for the two sets. The results obtained allowed to obtain that at a temperature of 1140 °C the sintering of 1140 °C, the previous sintering was insufficient, as the gresification curve showed that the adaptation with the increase in linear shrinkage, that is, to reduce the porosity, a greater compression load and higher power consumption. Sintering at 1170 °C was considered satisfactory, as the results obtained in the gresification curve showed high shrinkage and low water absorption. The results of porosity allowed us to conclude that there was no statistically decreased variation, as the amplitude of the results of standard deviations intersects, which forced that the PC reached a compaction saturation and that the porosity is independent of the compaction pressure, which is excluded exclusively at sintering temperature.

Keywords: Ornamental rock. Corumbá granite. Physical properties.

“A verdadeira coragem é ir atrás de seu sonho mesmo quando todos dizem que ele é impossível.”

Cora Coralina

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Granito Corumbá.....	20
Figura 2 - Processo de sinterização.	26
Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.....	28
Figura 4 - Triturador de pequeno porte.	29
Figura 5 - Moinho de disco orbital MA 360.	30
Figura 6 - (a) Peneira 75 µm. (b) Peneira 600 µm. (c) Peneira 4,75 mm. (d) Peneira 9,50 mm.	31
Figura 7 - Balança de precisão.....	32
Figura 8 - Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas.	33
Figura 9 - Peças a verde compactadas a carga de (a) 20 kN, (b) 40 kN, (c) 60 kN e (d) 80 kN.....	33
Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC – 300 kN.	34
Figura 11 - Forno mufla QUIMIS modelo Q318M24.....	35
Figura 12 - a) Picnômetros no processo de fervura; b) Dessecador.	37
Figura 13 - Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2.	40
Figura 14 - DRX da amostra de granito.....	42
Figura 15 - Visualização externa e interna do Mufla Quimis.	43
Figura 16 - Peças sinterizadas a temperatura de A – 1140 °C, B – 1170 °C e carga de compactação a) CP-20 b) CP-40, c) CP-60 e d) CP-80.	44
Figura 17 - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1140 °C.....	50
Figura 18 - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1170 °C.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas utilizadas e pressões geradas.	34
Tabela 2 - Quantidade de corpos de prova para os testes de sinterização de acordo com cada parâmetro.	36
Tabela 3 - Composição química do pó de Granito Corumbá obtida por FRX.	41
Tabela 4 - Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 24°C e K20 0,9998.	47
Tabela 5 - Densidade específica aparente dos grãos do pó de granito, sinterizado a 1140 °C e 1170 °C.	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Gresificação da sinterização a 1140 °C.	45
Gráfico 2 - Curva de Gresificação da sinterização a 1170°C.	46
Gráfico 3 - Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1140 °C.	48
Gráfico 4 - Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1170 °C.	49

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Densidade real do grão à temperatura t.....	37
Equação 2 – Densidade do solo à 20 °C.....	38
Equação 3 - Retração linear.....	38
Equação 4 - Absorção de água.....	39
Equação 5 - Densidade específica aparente.....	39
Equação 6 - Porosidade aparente.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Considerações iniciais sobre Rochas Ornamentais	16
2.1.1. Indústria de rochas ornamentais no contexto nacional e mundial	16
2.2 PROCESSO PRODUTIVO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS	17
2.2.1 Extração.....	18
2.2.2 Corte dos blocos.....	19
2.2.3 Levigação.....	19
2.2.4 Polimento.....	19
2.3 Granito Corumbá.....	20
2.4 Gestão Ambiental.....	21
2.5 Processamento da matéria-prima.....	22
2.5.1 Granulometria.....	22
2.5.2 Adição de ligante	23
2.5.3 Compactação.....	23
2.5.4 Sinterização.....	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Material utilizado	27
3.2 Metodologia	28
3.2.1 Seleção do material	29
3.2.1.1 Britagem	29
3.2.1.2 Moagem.....	30
3.2.1.3 Separação por peneiramento	30
3.2.2 Caracterização química.....	31
3.2.2.1 Fluorescência de Raios-x (FRX).....	31
3.2.2.2 Difração de Raios-x (DRX)	31
3.2.3 Confeção dos corpos de prova	32
3.2.3.1 Pesagem do material.....	32
3.2.3.2 Matriz metálica.....	32
3.2.3.3 Adição do ligante	33

3.2.3.4 Compactação.....	34
3.2.4 Sinterização dos corpos de prova	35
3.2.5 Caracterização física	36
3.2.5.1 Densidade real do grão solto	36
3.2.5.2 Retração linear.....	38
3.2.5.3 Absorção de água.....	39
3.2.5.4 Densidade específica aparente das peças sinterizadas	39
3.2.5.5 Porosidade aparente.....	40
3.2.5.6 Microscopia Óptica	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 Análise das propriedades químicas	41
4.1.1 Fluorescência de Raios-X	41
4.1.2 Difração de Raios-X	42
4.2 Análise da sinterização	42
4.3 Análise das propriedades físicas.....	45
4.3.1 Curva de Gresificação	45
4.3.2 Porosidade aparente.....	47
4.3.1 Microscopia Óptica	50
5. CONCLUSÕES	53
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais fomenta a economia mundial. Apesar das variações significativas na última década do setor no Brasil, as obras e edificações estão crescendo e com isso o consumo das matérias-primas de origem mineral, como as rochas britadas e ornamentais.

A indústria de Rochas Ornamentais, por sua vez, tem um crescimento cada vez mais expressivo. Entre os meses de janeiro e maio de 2021, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, o Brasil atingiu um crescimento 31,3% no faturamento da exportação desse produto em relação aos mesmos meses de 2020 (ABIROCHAS, 2021). Paralelo a esse crescimento, existe também um constante aumento na quantidade de rejeitos produzidos por essas indústrias, levantando, assim, questões ambientais acerca dessa produção.

O aumento significativo no consumo das rochas ornamentais se dá tanto pela sua beleza e durabilidade quanto pela flexibilidade em adaptar-se a qualquer projeto, sendo fabricadas de acordo a atender a particularidade de cada obra. Contudo, os resíduos provenientes dos cortes dessas rochas têm gerado toneladas de materiais que, na maioria das vezes, são descartados pelas marmorarias em depósitos avulsos em forma de pó, lama, cacos ou filetes, o que o torna um poluente do solo e causa danos ambientais e na natureza (SANTOS, 2020).

Os rejeitos produzidos que poluem o meio ambiente é tema de grande interesse no contexto ambiental. Diante disso, busca-se encontrar alternativas para empregar a reutilização desse material por meio da reciclagem, de modo a oferecer um destino final adequado, reduzindo os danos referentes a sua extração e exploração.

Existem vários estudos do setor industrial que buscam a solução para essa problemática envolvendo o reaproveitamento dos resíduos de granito. Os argumentos dividem-se tanto por motivos de regulamentação ambiental ou para se transformar os rejeitos em matérias-primas de subprodutos. (SANTOS, 2016).

Desta forma, o trabalho buscou analisar e estudar o comportamento físico de cerâmicas obtidas a partir de materiais de refugo do granito Corumbá. A metalurgia do pó foi utilizada para confeccionar os corpos de prova submetidos à caracterização tecnológica e ensaios físicos.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar as propriedades físicas do pó do granito Corumbá em função dos parâmetros de fabricação por metalurgia do pó.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar a composição química do pó de granito Corumbá;
- Determinar as propriedades de densidade real do grão, densidade específica aparente e porosidade aparente;
- Determinar a influência da pressão de compactação na curva de gresificação do material;
- Determinar a influência da temperatura de sinterização na curva de gresificação do material.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações iniciais sobre Rochas Ornamentais

Ao termo rocha ornamental são atribuídos os materiais rochosos, que podem ser extraídas em blocos ou placas, cujo uso se dá para fins de ornamentação e revestimento, como o granito, gnaisse, sienito, gabro e mármore, tendo como característica ainda a possibilidade de polimento.

Economicamente são os mármore e os granitos as rochas com maior ênfase no mercado, tanto em um contexto nacional quanto internacional (MOYA, 1992). O grande valor comercial dessas rochas, em especial no ramo da construção civil, está atrelado ao seu alto grau de adaptabilidade aos usos em revestimentos (internos ou externos) e pisos, a beleza visual, bem como, tratando-se dos granitos, a sua considerável resistência a ataques químicos e desgastes abrasivos (LOBO, 2009).

O processo produtivo das rochas ornamentais perpassa por três etapas fundamentais: a pesquisa e extração da rocha, o processo de desdobramento e finalmente o beneficiamento ou acabamento das peças, em acordo com o tipo de rocha e o uso comercial desta. Dado tal processo produtivo e o poder aquisitivo atribuído aos produtos finais, é possível inferir que a indústria das rochas ornamentais compreende, além de altos níveis de faturamento, grande influência na geração de empregos (LOBO, 2009).

2.1.1. Indústria de rochas ornamentais no contexto nacional e mundial

Num contexto mundial, o mercado das rochas é um importante setor econômico de vários países. A produção mundial de rochas, em 2018, obteve uma produção de 153 milhões de toneladas, superior em 12% se comparado a sua produção no ano de 2014. Nesse aspecto, a China se destaca em relação aos demais países com uma produção de 48 milhões de toneladas em 2018, quase o dobro da produção do segundo maior produtor, a Índia, que apresentou uma produção de 26 milhões de toneladas, seguido da Turquia, Irã, Brasil e Itália (GADIOLI, 2021).

No que se refere à extração e produção de rochas ornamentais e de revestimento, o Brasil é tido como um dos países grandes produtores e

comerciantes do produto, quarto maior produtor na escala mundial. Desde o século passado, as rochas ornamentais são integrantes da pauta exportadora brasileira, ganhando recente destaque com o crescimento da produção e comercialização no setor (JESUS, 2020). A esse fato, atribui-se a vasta diversidade geológica do país, o que garante grande potencial extrativo das rochas, facilitando sua comercialização.

Em acordo com Lobo (2009), no ano de 2003, estima-se a produção nacional de rochas ornamentais e revestimento em 6,0 milhões de toneladas, totalizando cerca de 600 variedades comerciais, das quais as principais são distribuídas entre granitos, mármore, ardósias e quartzitos.

Paralelo a isso Rocha e Gadioli (2017), afirmam ser o Brasil o quarto maior exportador de rochas ornamentais do mundo, assumindo ainda o patamar de terceiro maior exportador de granito. Os autores constatam ainda que no ano de 2016 a exportação atingiu 2,46 toneladas de rochas, contabilizando um faturamento de US \$1.138,3 milhões, em acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (CHIODI FILHO, 2017). Essa exportação se deu para cerca de 120 países, sendo os Estados Unidos o principal comprador.

Em 2020, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, as exportações brasileiras de materiais rochosos naturais de ornamentação e revestimento atingiram o valor de US \$987,4 milhões e 2,16 milhões de toneladas, (ABIROCHAS, 2020). Vale salientar que o Espírito Santo apresenta-se como o principal estado produtor no país, compreendendo 77% do volume físico e 82% do faturamento total das exportações nacionais (ABIROCHAS, 2019).

O estado do Ceará, em razão de sua diversidade mineralógica, também ganha destaque no contexto nacional, apresentando-se como um dos líderes na extração e produção dos derivados das rochas no Nordeste. Em 2002, o estado deteve 28% da produção do Nordeste (4,2% da produção brasileira), equivalente a 250.000 toneladas, com destaque para o granito e a pedra Cariri (calcário laminado), perdendo apenas para a produção baiana, no contexto Nordestino.

2.2 Processo produtivo das rochas ornamentais

As etapas produtivas das rochas ornamentais, apesar de exigirem cautela, se

dão de forma simplória. Basicamente, após o estudo dos solos, o processo se baseia na extração, corte, levigamento e polimento das estruturas rochosas. Devido aos fins ornamentais, o processo de beneficiamento das peças exige cautela. As etapas do processamento são descritas a seguir.

2.2.1 Extração

O processo produtivo das rochas ornamentais tem início nas pedreiras, a partir da extração dos blocos de rocha. A priori, exige-se que seja realizada uma pesquisa prévia do solo, a fim de levantar o potencial e qualidade das rochas, dentre outras características.

Comumente, o método de extração mais aplicado se dá pela retirada dos blocos da frente de lavra por meio de técnicas de corte contínuo, geralmente por métodos de bancadas. Mas também, é possível extrair os blocos aproveitando rochas isoladas na área da pedreira (PONCIANO E GADIOLI, 2012).

Na extração por bancadas, o maciço é recortado com o uso do fio diamantado, técnica amplamente utilizada devido seu baixo custo e alta produtividade (MARCON et al., 2012). Esse método consiste, basicamente, no isolamento com fio de grandes porções de rocha chamadas de “quadrotes”, estas, posteriormente, são subdivididas em pranchas e, por sua vez, em blocos, por perfuração e detonação ou recorte a fio. Ao final desse processo, os blocos são direcionados para o beneficiamento.

Outra metodologia corresponde à lavra por desabamento, método que consiste no desmonte da rocha por explosivos, gerando grande quantidade de material fragmentado, bem como grandes blocos de forma irregular. Há ainda a lavra de matacões, onde a lavra é realizada em várias frentes, geralmente próximas entre si, por motivos econômicos, onde se realiza a demarcação de furos para detonação, perfuração, colocação de explosivos, detonação e, posteriormente, enquadramento dos blocos, utilizando-se processos de afeiçoamento manual (CARANASSIOS & STELLIN JR.; 1991). Ambas as metodologias estão em desuso graças ao impacto ambiental gerado.

2.2.2 Corte dos blocos

Após a extração, os blocos são selecionados e enviados para serem cortados. A grande maioria das rochas processadas é transformada em chapas polidas e o método mais tradicional de obtenção dessas chapas é o desdobramento dos blocos em tear de lâminas de aço.

A serragem dos blocos é realizada com esses teares. O processo se dá pela ação de uma polpa abrasiva composta por água, granalha de aço ou ferro, cal ou bentonita e o próprio pó da rocha. Essa mistura é direcionada por um conjunto de lâminas dispostas de maneira eqüidistante, fixadas e tensionadas num quadro que se movimenta de forma descendente sobre o bloco.

A sustentação desse quadro se dá por quatro colunas, sendo acoplado a um sistema de biela/manivela, que é acionado por um motor elétrico. Esse mecanismo é responsável pela movimentação do quadro porta lâmina, que entra em atrito com o bloco (SOUZA, 2012). Em suma, o processo de desgaste se dá entre os três corpos, onde o abrasivo desliza entre a lâmina e a rocha a ser serrada, gerando o corte desejado.

2.2.3 Levigação

Após o corte ou serragem, o beneficiamento segue para o acabamento final das chapas. São esses acabamentos, realizados a partir de diferentes processos, os responsáveis pela textura final do material, de acordo com o uso a ser atribuído à peça. Um processo de acabamento é a levigação, que corresponde ao desengrossamento das chapas, no qual o acabamento da chapa é produzido por abrasão mecânica em diferentes graus, o que garante uma superfície suave, totalmente lisa e plana.

2.2.4 Polimento

O polimento de rochas ornamentais se caracteriza pela abrasão entre a superfície rochosa e rebolos abrasivos, sendo o elemento cortante, na maioria das vezes, composto por diamante ou, secundariamente, carбето de silício (SiC)

(SILVEIRA E BOLONINI, 2016). O polimento proporciona uma superfície brilhante e espelhada que realça a coloração e promove melhores acabamentos às peças.

No caso do polimento de rochas ornamentais é o desgaste da superfície rochosa que imprime o brilho e a beleza a esses materiais. Portanto, é de suma importância compreender os mecanismos de desgaste envolvidos neste processo industrial.

2.3 Granito Corumbá

O granito Corumbá, material embasador deste estudo, corresponde a um material de refugo. O material usado nesse estudo é proveniente da “WC Mármore e Granitos”, empresa localizada no município de Russas-CE, sendo este proveniente do corte de Rochas Ornamentais, que é uma das etapas do processo produtivo da indústria e do comércio citado.

Na empresa em questão, para o processo produtivo, as placas de granito são adquiridas em sua integridade. São obtidas por meio de empresas extratoras e laminadoras terceirizadas. Nisso, as peças são transportadas de Santa Catarina ao Ceará e chegam ao estado em formas de placas/chapas. No Ceará são comercializadas a empresas de acabamento que produzem bancas de pias, revestimentos, pisos e placas de diversos tamanhos. A figura 1 ilustra o granito Corumbá.

Figura 1 – Granito Corumbá.



Fonte: Espírito Santo (2013)

2.4 Gestão Ambiental

Como toda e qualquer atividade de origem mineradora, a extração mineral de rochas ornamentais é uma atividade altamente impactante no que tange a gestão ambiental, sendo alvo de diversos questionamentos sobre seu processo produtivo.

A priori, a extração das rochas nas pedreiras, exige o desmatamento e a remoção do solo para tornar viável o acesso e a operação da lavra, gerando impactos de ordem ambiental e visual, mesmo que concedido as devidas licenças exigidas pela legislação.

Além disso, a intensa movimentação de máquinas, carros e caminhões acompanhados de ruídos e poeira, agravando-se quando a lavra entra em operação com as vibrações provocadas pelas explosões e máquinas perfuratrizes, além dos cascalhos de pedras, acarretam em diversos prejuízos locais (ROCHA E SOUSA, 20210).

Além dos prejuízos supracitados, a geração de resíduos representa um consumo desnecessário dos recursos naturais, requerendo, muitas vezes, a ocupação do solo para sua disposição. Nisso, o reaproveitamento de rejeitos e subprodutos como matéria-prima destinada à construção civil vêm se tornando uma alternativa viável do ponto de vista econômico, técnico e ambiental a tal problemática. Na indústria da cerâmica, diversos são os resíduos que podem ser incorporados ao processo produtivo, a fim de minimizar esses danos, desde que não prejudiquem o desempenho do produto final.

Em relação a geração de resíduos, Campos et al. (2009) pontuam ainda que 65 a 75% dos materiais extraídos correspondem aos rejeitos gerados durante as etapas do ciclo produtivo das rochas ornamentais, sejam elas lavra ou extração, beneficiamento primário e beneficiamento final. Esse cenário é um impasse no mercado das rochas e um entrave ao desenvolvimento sustentável.

Há ainda uma crescente pressão pelos ambientalistas, poder público e sociedade civil, quanto ao controle dos resíduos e a incorporação do reuso no processo produtivo, somado a isto a necessidade de manter a competitividade em uma economia globalizada têm imposto às indústrias a utilização de forma mais racional dos insumos de seus processos e a incorporação a seus processos produtivos metodologias de reuso, agregando valor comercial aos produtos e

contribuindo a sustentabilidade do sistema. Nessa perspectiva a reutilização surge como uma ferramenta indispensável para viabilizar a disposição destes materiais (LIMA, 2021; SOUZA et al., 2007).

No mais, a partir de um planejamento metodológico coerente, que permita o uso racional dos recursos ambientais, promovendo a sustentabilidade ambiental, sustentabilidade econômica e a equidade social é possível reduzir a quantidade de rejeitos do beneficiamento de rochas ornamentais, bem como reduzir os impactos do processo extrativo das rochas. Para tanto, é preciso que haja investimento em soluções de baixo custo e capazes de agregar valor comercial aos rejeitos.

2.5 Processamento da matéria-prima

O processamento da matéria prima, assim como os parâmetros de processo de fabricação, impacta de forma significativa nas propriedades tecnológicas do produto gerado. Desde o processo de análise da composição química e mineralógica dos agregados, até as etapas de compactação e sinterização, o processo produtivo deve ser controlado e aliado às necessidades finais do produto.

Uma das metodologias usuais de processamento de matéria-prima corresponde à tecnologia da metalurgia do pó, compreendendo a compactação dos pós em moldes metálicos, seguida da consolidação da peça por aquecimento controlado. 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 assim, a técnica da metalurgia do pó consiste na produção e obtenção do pó, mistura (se houver necessidade de obtenção de composições químicas específicas), compactação, sinterização e operações de acabamento (LIMA, 2021).

2.5.1 Granulometria

A análise das características dos materiais é essencial no que se refere à qualidade do produto final para atender a necessidades específicas. De fato, a forma e estado de agregação dos materiais, bem como o tamanho dos particulados que o

constituem devem ser levados em consideração quando se deseja características finais bem definidas. É possível inferir que o tamanho da partícula tem uma forte influência na densidade, plasticidade, porosidade e resistência dos materiais.

Nesse sentido, a granulometria é responsável pela determinação das dimensões das partículas bem como de suas respectivas porcentagens de ocorrência. A metodologia de análise mais comum de determinação de tamanhos de grãos é através do peneiramento, por meio de peneiras com diferentes abertura de malha, que determinam as faixas de aceitação (LIMA, 2021).

Outras metodologias podem ser citadas a fim de caracterizar granulometricamente partículas/sedimento, a exemplo do protocolo metodológico baseado nos artigos de Lira & Pina (2009; 2011). Neste procedimento é feita a análise da imagem para caracterização granulométrica de sedimentos através do pacote Fiji do software Image J, dentre outras. Porém, para este trabalho mantém-se a metodologia usual do peneiramento dos particulados.

Vale ressaltar ainda que, no caso do material cerâmico, em acordo com Prado (2008), a curva de distribuição granulométrica interfere diretamente na estabilidade dimensional do produto. Essas interferências referem-se ao do tamanho, ao formato, à rugosidade e à homogeneização do pó que determinam o preenchimento do molde de compactação, bem como os pontos de contato entre as partículas.

2.5.2 Adição de ligante

O ligante pode ser entendido como um fluido a ser incrementado ao pó cerâmico, a fim de homogeneizar o pó cerâmico. Esse processo é essencial e prévio à sinterização, uma vez que comanda o empacotamento, aglomeração e mistura das partículas, garantindo que estas estejam nas condições de serem compactadas. Um dos ligantes mais utilizados nesse processo é a própria água, em acordo com a proporção desejada para a homogeneização que se almeja alcançar.

2.5.3 Compactação

No processamento de materiais cerâmicos, atribui-se à compactação o objetivo de conferir ao pó o formato desejado, bem como estabelecer as dimensões

finais, reduzindo os efeitos das altas temperaturas do processo de sinterização, além de obter a porosidade esperada e atribuir resistência mecânica ao pó compactado (CREMONEZI et. al, 2009).

As técnicas de compactação realizadas através da aplicação de forças sobre o pó são as mais comumente utilizadas, a saber, compactação uniaxial, compactação isostática, forjamento, extrusão, laminação, compactação dinâmica e moldagem por injeção.

Em compactados cerâmicos, a compactação uniaxial é empregada com muita frequência, podendo ser aplicada para fabricar produtos cerâmicos tanto argilosos quanto não argilosos. Nesse processamento, a compactação se dá pelo deslocamento de uma determinada punção à temperatura ambiente.

O aumento da pressão gera o empacotamento e agregação das partículas, onde as partes mais finas de cada partícula sofrem deformação ou quebra. Essa técnica tende a favorecer o vínculo entre os grãos, produzindo uma espécie de solda fria (LIMA, 2021). Nesse sentido, a pressão ou umidade de compactação determinará o empacotamento, bem como a retração linear e menores valores de absorção de água no produto (KNISS, 2005 *apud* LIMA, 2021).

O processo de compactação compreende, a priori, a ocorrência do escorregamento e rearranjo das partículas sem haver deformações plásticas ou fraturas. Seguido por deformações locais e fraturas das partículas nos pontos de contato. Posteriormente, ocorrem as deformações elásticas oriundas de pressões elevadas no processo de compactação, e, por fim, a ejeção do corpo de prova da matriz. Após a compactação, a peça torna-se um “compactado verde”, de consistência muito frágil, e que necessita de cuidado ao ser manuseado.

Nessa fase, é preciso atentar-se a duas características importantes, a saber, a densidade e a resistência, pois influenciam nas propriedades mecânicas da peça final (LIMA, 2021).

2.5.4 Sinterização

O processo da metalurgia do pó define a sinterização como o processo físico e termodinâmico pelo qual agregados são transformados em corpos sólidos por meio de dispositivos de transporte atômico difusionais a temperaturas abaixo do

ponto de fusão do constituinte principal, processo este que promove uma alteração na estrutura microscópica do elemento base (LIMA, 2021; JÚNIOR, 2015).

Nesse processo ocorre a diminuição de energia livre do sistema através da diminuição da superfície específica do material. Sua finalidade é obter uma peça sólida coerente de maior resistência mecânica. Durante esse processo, a porosidade presente na estrutura é fechada, promovendo o deslocamento do material para ocupar os espaços vazios presentes, o que promove a formação dos contornos de grãos e o crescimento dos pescoços interpartículas, preenchendo a região de contato.

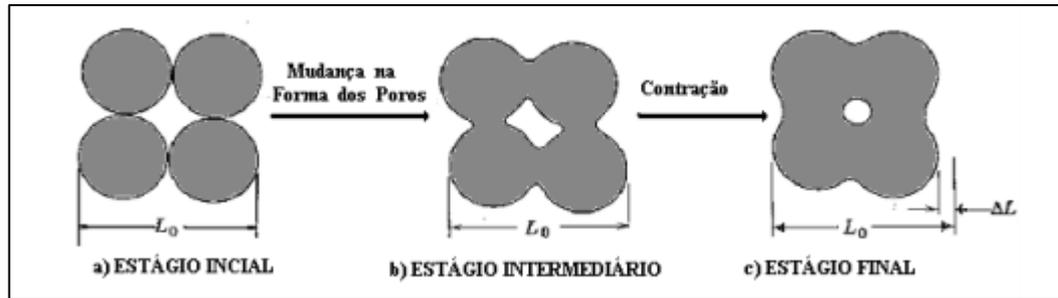
Cremonesi *et al.* (2009) discrimina seis estágios distintos para o processo de sinterização, a saber:

- Difusão inicial das partículas;
- Crescimento de pescoços e diminuição da área superficial;
- Arredondamento dos poros;
- Fechamento dos canais que interligam os poros;
- Contração dos poros e densificação e;
- Coalescimento e crescimento dos poros.

A partir da divisão atômica do particulado em grão adjacente, forma-se a região do pescoço, região de elevado grau de coesão existente. O crescimento do pescoço é continuado com a etapa de fechamento dos poros intercomunicantes e de forma simultânea o arredondamento dos poros.

E com o aumento da temperatura, visualiza-se a contração dos poros, bem como diminuição do volume da peça e aumento de suas propriedades mecânicas. Por fim, o coalescimento e crescimento dos poros correspondem a diminuição da energia livre do sistema e uniformização do sistema, como ilustrado na figura 2.

Figura 2 - Processo de sinterização.



Fonte: Reed (1995).

É importante atentar-se a outras duas variáveis nesse processo: o tempo de sinterização e o tamanho das partículas dos pós utilizados no compactado. O tempo determina o grau de ligação da mistura, sendo estas grandezas diretamente proporcionais.

Enquanto que o tamanho do particulado influencia diretamente na quantidade de transporte do material, logo, quanto menor o tamanho da partícula, maior será sua área superficial. Isso implica em uma maior área de contato entre as partículas havendo diminuição da distância de difusão sobre a qual os átomos devem movimentar-se durante a transformação (JUNIOR, 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

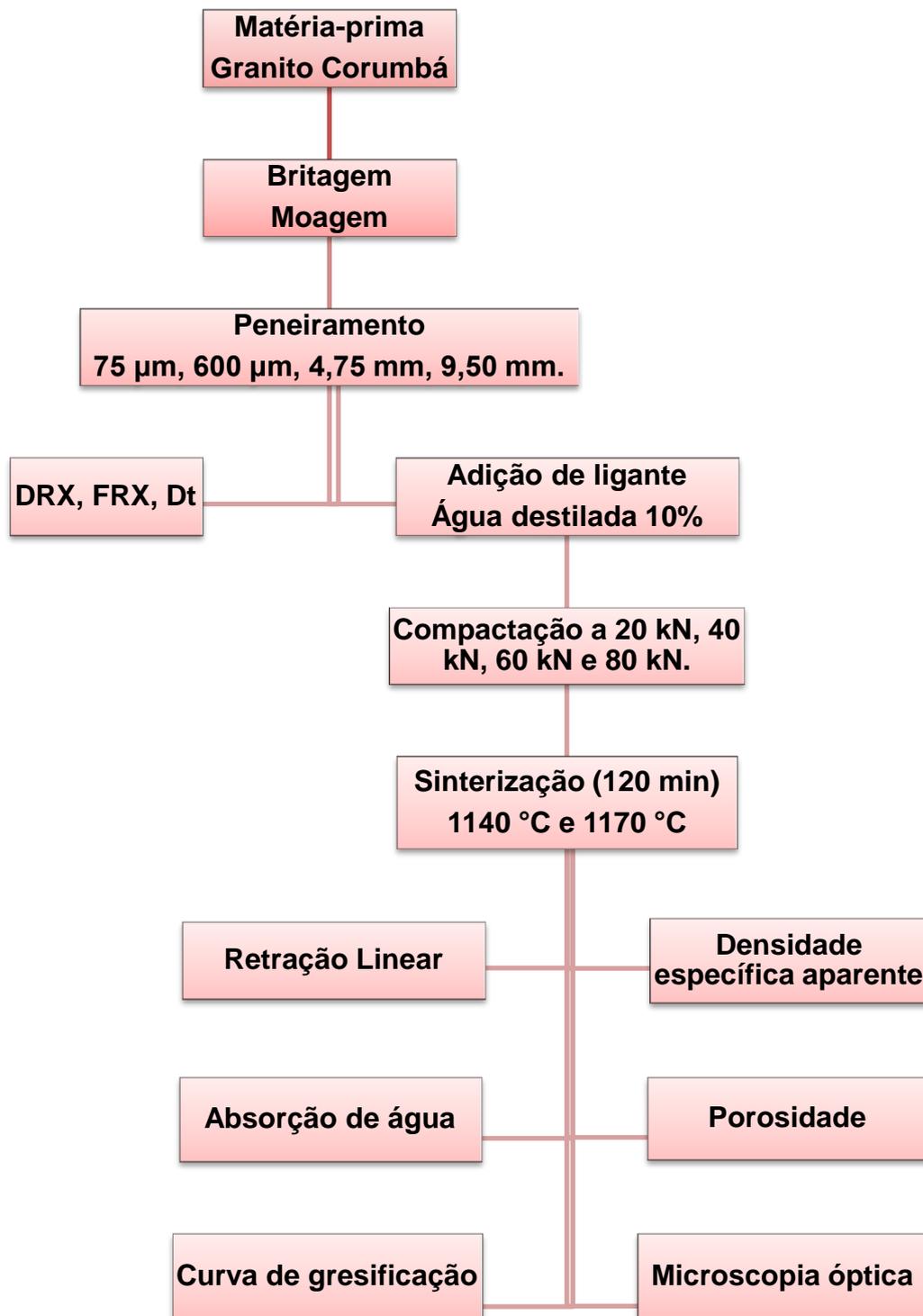
3.1 Material utilizado

Através do processamento de cortes das placas de granito são produzidos rejeitos de rochas que mantêm sua integridade física, mas não sua utilidade devido seu tamanho, sendo atualmente descartado sem nenhum reuso. Os pedaços de rochas foram coletados de forma manual diretamente do local de descarte da empresa, selecionando os fragmentos do granito Corumbá através da identificação estética visual.

3.2 Metodologia

A figura 3 apresenta um fluxograma da metodologia do trabalho e preparação do material na forma de matéria-prima.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.1 Seleção do material

3.2.1.1 Britagem

A princípio o material fornecido pela empresa foi submetido ao processo de britagem, cuja finalidade era fragmentar os pedaços em peças menores. A primeira etapa, britagem primária, constitui-se do descarte dos corte das peças de granito que possuíam em média 100 mm de diâmetro.

A segunda etapa, britagem secundária, foi o processamento desse material pela trituradora da própria empresa, onde obtiveram-se britas de em média 10 mm. A máquina trituradora também possuía de um mecanismo o qual separava as britas dos pedriscos e pó do granito, como ilustra a figura 4.

A partir das características que foi coletado o material, pode-se afirmar que foram utilizados pequenos blocos de chapa nº 2 do granito Corumbá e que foi utilizado a partir da britagem secundária.

Figura 4 - Triturador de pequeno porte.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.1.2 Moagem

Após coleta do material, os pedriscos de granito foram fracionados em quantidades de 200 g para respeitar a capacidade do moinho de disco orbital MA 360, do Laboratório de Engenharia Civil I da Universidade Federal do Ceará do Campus Russas, conforme ilustrado na figura 5, e cada fração passou em média de 6 a 8 horas no equipamento para obtenção do pó do granito passante na peneira 200.

Figura 5 - Moinho de disco orbital MA 360.

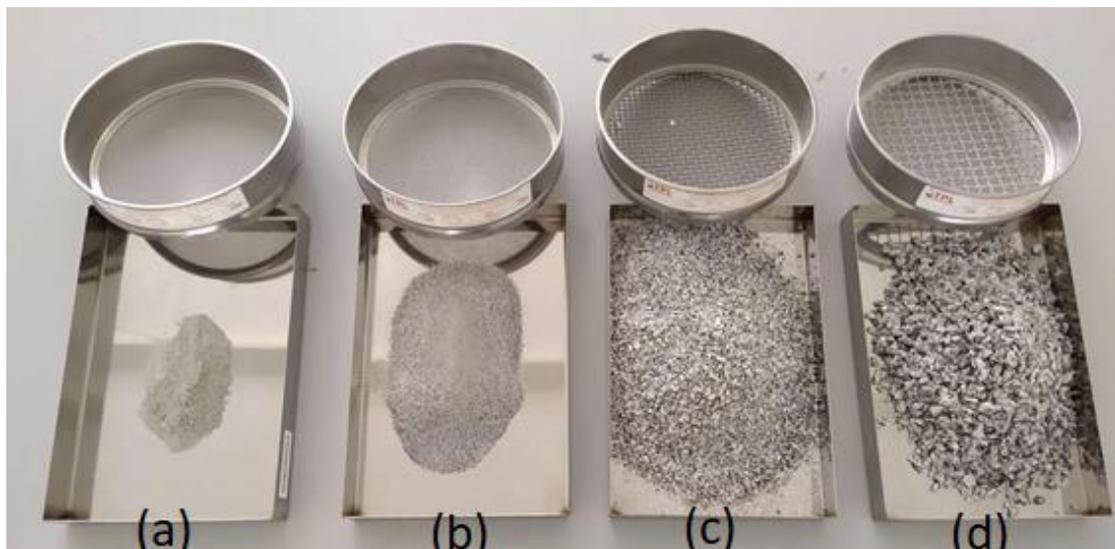


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.1.3 Separação por peneiramento

Após o processo de moagem foi necessário submeter o material à separação por peneiramento, feito de forma manual e utilizando as peneiras com malhas de 600 μm e 75 μm , apresentando granulometria final de 75 μm (nº. 200). As peneiras utilizadas estão demonstradas na figura 6.

Figura 6 - (a) Peneira 75 μm . (b) Peneira 600 μm . (c) Peneira 4,75 mm. (d) Peneira 9,50 mm.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.2 Caracterização química

3.2.2.1 Fluorescência de Raios-x (FRX)

Após os processos de beneficiamento do rejeito do granito Corumbá garantiu-se uma granulometria inferior a 200 mesh. Com isso, o pó foi submetido a análise química por fluorescência de Raios-x, em um equipamento da Rigaku, modelo ZSX mini II do Laboratório de Raios – X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

3.2.2.2 Difração de Raios-x (DRX)

Para determinar as fases cristalinas, ou seja, os minerais que compõem a amostra de granito Corumbá realizou-se a análise de Difração de Raios-x obtidos a temperatura ambiente utilizado um difratômetro do tipo Rigaku tendo como fonte de radiação $K\alpha$ do elemento Cobre (Cu), $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ a 40 KV e 30 mA. A escala de varredura (em 2θ) utilizada foi de 20° a 100° , com uma velocidade de varredura de $0,02^\circ$ e tempo de medida de cada ponto de 1s. Os equipamentos utilizados foram do Laboratório de Raios – X do Departamento de Física da Universidade Federal do

Ceará e a identificação de tais fases foi realizada utilizando o software X'Pert High Score Plus.

3.2.3 Confeção dos corpos de prova

3.2.3.1 Pesagem do material

Cada uma das amostras foi pesada em uma balança analítica, como ilustrada na figura 7. Assim obtendo-se assim um padrão visto que às amostras que devem variar apenas com a pressão de compactação nessa etapa.

Figura 7 - Balança de precisão.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.3.2 Matriz metálica

Após pesagem, o material foi encaminhado para o processo de compactação uniaxial, feito a partir de pressão em uma matriz cilíndrica com diâmetro de 25 mm, que está demonstrada na figura 8.

Figura 8 - Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas.



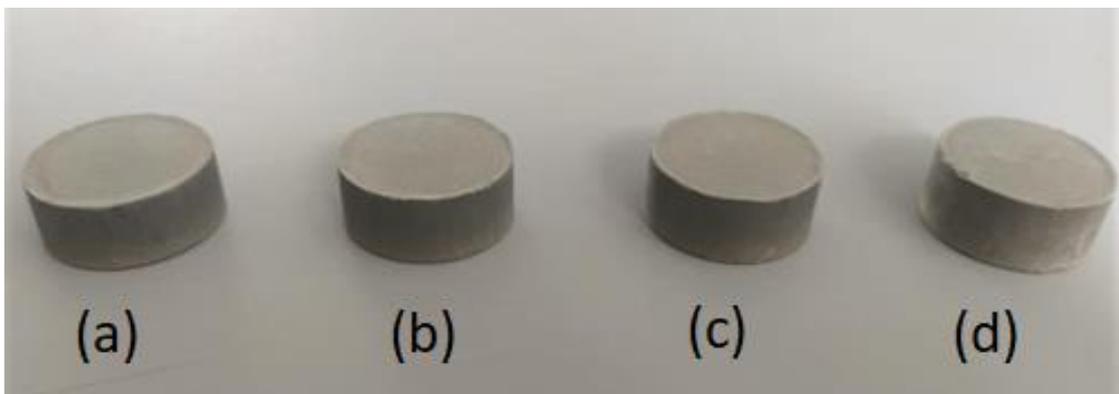
Fonte: Lima (2021).

3.2.3.3 Adição do ligante

Em temperatura ambiente a compactação produz os “compactados verdes” que apresentaram-se frágeis e quebradiços. Diante disso, a fim de melhorar as condições de processamento e consistência da massa, adicionou-se 1 ml de água destilada em cada corpo de prova e foi realizado o destorroamento da mistura para garantir melhor uniformidade.

Essa tomada de decisão teve como objetivo proporcionar resistência mecânica para o manuseio das peças e garantir sua integridade após a remoção da matriz metálica. A figura 9 mostra os corpos de prova após desmonte da matriz metálica, cuja altura média foi de 11 mm.

Figura 9 - Peças a verde compactadas a carga de (a) 20 kN, (b) 40 kN, (c) 60 kN e (d) 80 kN.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.3.4 Compactação

Para compactação foi utilizada uma máquina de ensaio universal, apresentada na figura 10, da marca EMIC com capacidade de 300 kN presente no laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, a uma taxa de 2 mm por minuto. As cargas utilizadas estão expostas na tabela 1.

Figura 10 - Máquina de ensaio universal EMIC – 300 kN.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 1 - Cargas utilizadas e pressões geradas.

Cargas	Pressão gerada
20kN	40,67 MPa
40kN	81,53 MPa
60kN	122,29 MPa
80kN	163,05 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2.4 Sinterização dos corpos de prova

A sinterização foi realizada em duas etapas, a primeira remessa de 20 unidades atingiu uma temperatura de 1140 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min, a segunda remessa atingiu uma temperatura de 1170 °C, ambas com tempo de permanência no grau de sinterização de 120 minutos e desaquecimento lento da mufla para evitar choque térmico e possíveis fraturas nas peças.

Para a sinterização utilizou-se o Forno Mufla da marca QUIMIS modelo Q318M24 com temperatura máxima de 1200 °C do Departamento de Hidráulica, da Universidade Federal do Ceará - Campus picí, conforme a figura 11.

Figura 11 - Forno mufla QUIMIS modelo Q318M24.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A fim de obter a maior densificação e melhores características técnicas do produto confeccionado, as amostras também foram analisadas, de acordo com a variação de temperatura na sinterização, além da pressão de compactação. A tabela 2 informa a quantidade de corpos de prova avaliados e sua respectiva identificação de acordo com a temperatura e a pressão de compactação.

Tabela 2 - Quantidade de corpos de prova para os testes de sinterização de acordo com cada parâmetro.

Identificação	Temperatura de sinterização	20 kN	40 kN	60 kN	80 kN
A	1140 °C	5	5	5	5
B	1170 °C	5	5	5	5

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.5 Caracterização física

3.2.5.1 Densidade real do grão solto

O ensaio para determinação da densidade real dos grãos foi realizado de acordo com as preconizações confitnas na DNER-ME 093/94 e realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC-Campus do Pici. Para isso, utilizou-se picnômetro com capacidade de 50 ml e as pesagens foram realizadas utilizando uma balança digital, marca BEM, modelo M214AI, com precisão de 0,0001 g e capacidade máxima de 220 g. A determinação desse valor foi requisitada para que posteriormente fosse utilizado no cálculo da porosidade das peças.

De acordo com a norma, as amostras foram inseridas em estufa a 110 °C até que seu peso se mantivesse constante. Primeiro pesou-se o picnômetro vazio obtendo o valor de P_1 . Depois pesou-se 10 g da amostra com o auxílio de um funil foi colocado dentro do picnômetro e pesado novamente obtendo o valor de P_2 .

Após esse procedimento foi inserido água destilada no picnômetro completando até o topo do recipiente. Foi levado ao fogo para que fervesse e expulsasse todas as bolhas de ar contidas no material e, em seguida, foi resfriado no dessecador até atingir a temperatura ambiente, mostrado na figura 12.

Figura 12 - a) Picnômetros no processo de fervura; b) Dessecador.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após resfriamento o picnômetro é cuidadosamente preenchido com água novamente para pesagem do material obtendo o valor real do conjunto amostra + água + picnômetro (P_3). Em seguida o material é descartado e o picnômetro é preenchido de água destilada para uma nova pesagem obtendo o valor do conjunto água + picnômetro (P_4). Dessa forma, com os valores de P_1 , P_2 , P_3 , P_4 é possível obter o valor da densidade real a partir da equação 1.

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

Onde:

- D_t = densidade real do solo à temperatura t ;
- P_1 = peso do picnômetro vazio e seco, em g;
- P_2 = peso do picnômetro com amostra, em g;
- P_3 = peso do picnômetro com amostra e água, em g;
- P_4 = peso do picnômetro com água, em g.

O resultado é considerado satisfatório quando o valor obtido pelas médias das amostras não ultrapassarem 0,0009. Também é necessário fazer o fator de correção de temperatura, pois esse ensaio de densidade refere-se a temperatura de 20 °C, para o ajuste utiliza-se a equação 2.

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

Onde:

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

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

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

3.2.5.2 Retração linear

Para obtenção de resultados para o ensaio de retração linear, foi utilizado um paquímetro manual e feita a medição dos corpos de prova.

A primeira medição foi feita após a compactação na matriz metálica com as peças ainda a verde. Após realizado, as peças foram sinterizadas em forno e realizado uma nova medição de suas dimensões.

Com isso, obteve-se os resultados da variação dos comprimentos das peças e determinado, assim, a retração linear, normatizado pela ABNT NBR 9623 por meio da equação 3.

$$RL(\%) = \frac{L_0 - L_q}{L_0} * 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$RL(\%)$ = porcentagem de retração linear;

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

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

3.2.5.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com as preconizações contidas na NBR 15270-3. Para os testes as amostras foram pesadas em uma balança de precisão e, após pesagem, foram inseridas secas a uma estufa a 110 °C no período de 24 h. Em seguida, foram submersas em água destilada por 24 h. Foi retirada a água em excesso e a fim de quantificar a água absorvida as amostras foram pesadas novamente. O valor foi obtido através da equação 4.

$$AA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

AA(%) = absorção de água percentual;

Mu = massa úmida do corpo (g);

Ms = massa seca do corpo (g).

3.2.5.4 Densidade específica aparente das peças sinterizadas

A densidade específica aparente é a razão entre a massa do corpo de prova seco sinterizado e seu volume aparente, que pode ser influenciado tanto pela temperatura de sinterização quanto pelos materiais constituintes da amostra. Os corpos de prova foram pesados por meio de uma balança analítica (ver figura 8) e para o volume foi utilizado um paquímetro manual. Para a determinação da densidade específica aparente utilizou-se a equação 5.

$$DEA = \frac{M}{V} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

DEA = densidade específica aparente das peças sinterizadas (g/mm³);

M = massa do corpo de prova após sinterização (g);

V = volume do corpo de prova após sinterização (mm³).

3.2.5.5 Porosidade aparente

O ensaio de porosidade aparente foi para obtenção do quociente entre o volume de poros abertos e o volume total do corpo de prova. Após a pesagem da determinação da absorção de água, as amostras foram submersas em um recipiente com água destilada por meio de um dispositivo provido de uma sexta com balança, a fim de serem pesados para então determinação da porosidade aparente através da equação 6.

$$PA = \frac{(1 - DEA)}{D_t} * 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

PA = porosidade aparente expressas em percentual;

D_t = Densidade real dos grãos;

DEA = Densidade específica aparente das peças sinterizadas.

3.2.5.6 Microscopia Óptica

As micrografias foram feitas na Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, utilizando o microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2 do Laboratório de Microscopia, ilustrado na figura 13.

Figura 13 - Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise das propriedades químicas

4.1.1 Fluorescência de Raios-X

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de Fluorescência de Raios-x para o granito Corumbá.

Tabela 3 - Composição química do pó de granito Corumbá obtida por FRX.

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

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir da análise destes dados, observa-se que 99,9% da matéria-prima é composta por SiO₂, K₂O, NaAlSi₃O₈, Fe₂O₃ e CaO. O alto teor de sílica (SiO₂) obtido é típico de rochas ígneas graníticas e está associado a parte cristalina quartzo, o que provavelmente é responsável pela parte estruturante do corpo.

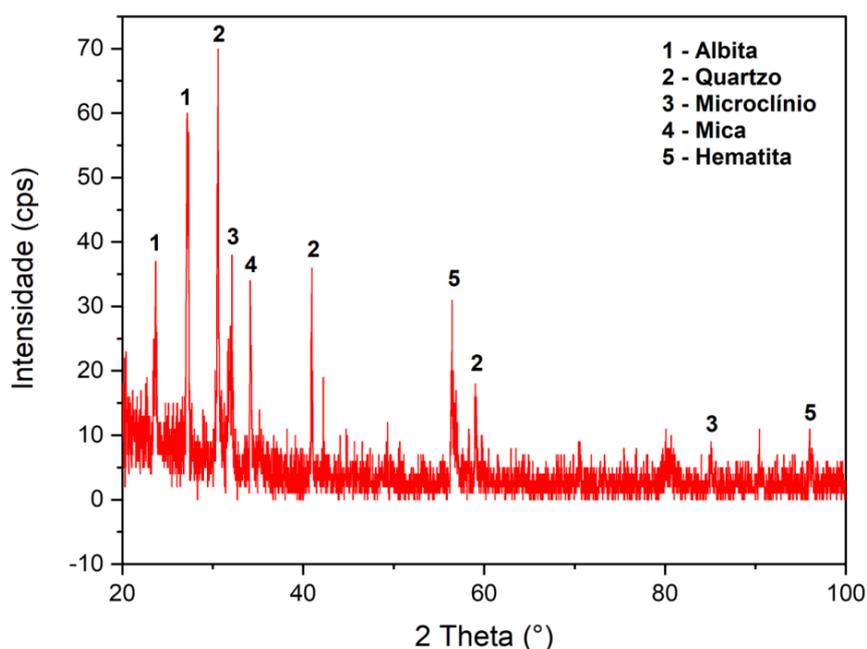
Já a presença de hematita (Fe₂O₃) pode estar relacionada à coloração marrom-avermelhada dos corpos de prova, pois assemelha-se ao processo de oxidação do ferro presente no composto.

Os óxidos alcalinos (K₂O) e alcalino-terroso (CaO) estão provavelmente relacionados aos constituintes desse tipo de granito e promovem a fase líquida. O que é de grande importância, pois atuam como agentes fundentes durante o processo de sinterização, favorecendo o fechamento dos poros. Outro composto que também desempenha a função de fundente é a albita (Na(AlSi₃O₈)), que é um feldspato que pode ser formadora da fase vítrea da amostra.

4.1.2 Difração de Raios-X

O difratograma de raios-x apresentado na figura 14 refere-se à análise do material estudado. Examinou-se que os picos de difração característicos das composição mineralógica refere-se ao quartzo, microclínio, albita, hematita e mica. O maior pico de intensidade ocorre em aproximadamente $2\theta = 30,60^\circ$ referente à fase quartzo, o qual é justificado por apresentar um alto teor de sílica em sua composição.

Figura 14 - DRX da amostra de granito.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2 Análise da sinterização

Com o objetivo de obter uma melhor análise e conferência dos resultados, foram confeccionados dois lotes para sinterização. Tendo em vista que o forno utilizado se trata de uma mufla antiga, conforme figura 15, durante o processo ocorreram alguns problemas operacionais.

Com isso, observou-se que apesar da temperatura máxima e aplicada ser de 1200°C , o forno chegou a apresentar temperatura máxima de 1140°C no primeiro

lote. As peças foram alocadas diretamente na base do forno, no qual anteriormente foi higienizado com o auxílio de uma vassoura pequena. Observou-se que as peças que foram alocadas no fundo da mufla apresentaram melhor sinterização e a maioria foram desprendidas com facilidade, com exceção de três que estavam posicionadas em uma parte deteriorada do piso.

No segundo lote as peças foram alocadas igualmente ao primeiro e o forno chegou a apresentar temperatura de 1170 °C. As peças apresentaram-se visualmente melhor sinterizadas e a maioria apresentaram dificuldades de desprender do piso do forno, o qual acarretou em uma perda e contaminação dessas peças.

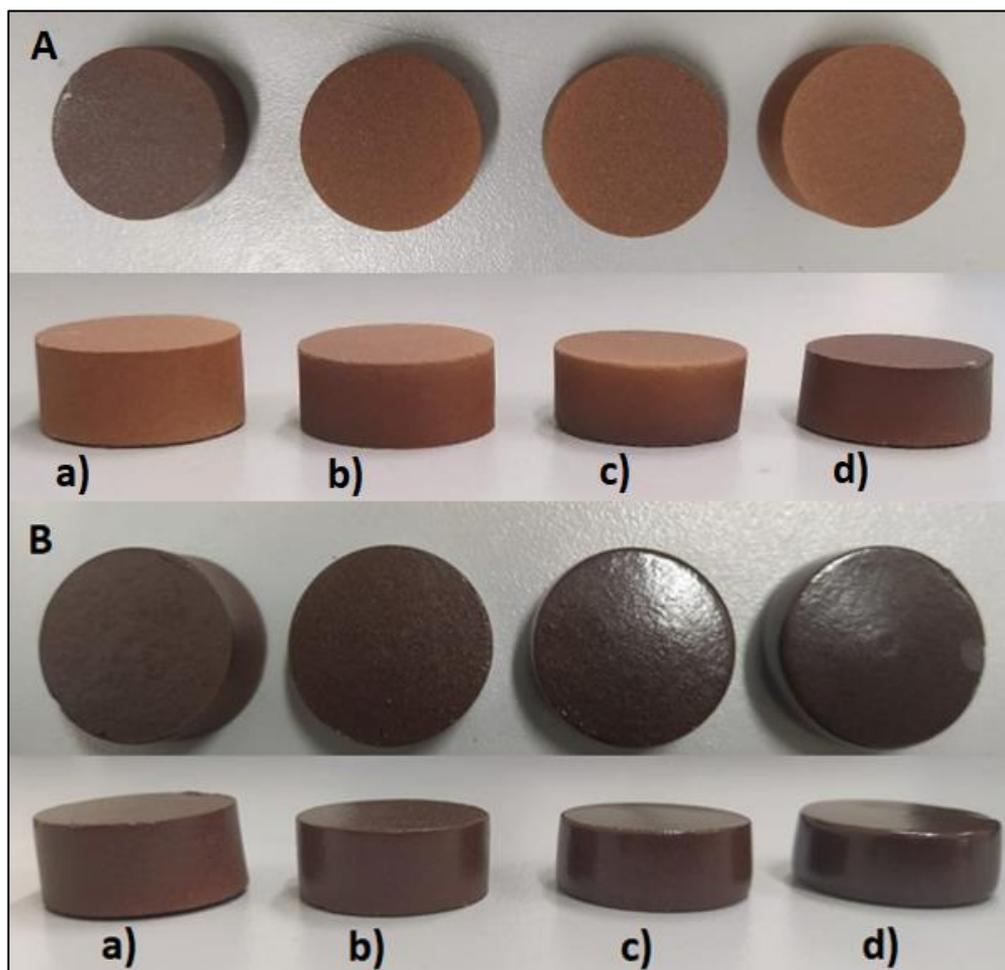
Figura 15 - Visualização externa e interna do Mufla Quimis.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

As amostras que foram alocadas a mesma profundidade ao final do forno foram analisadas e demonstrou uma maior uniformidade na superfície, sendo observado menos poros superficiais, o que sugere uma melhor sinterização desses CP. Na figura 16 visualizamos as amostras pós sinterização.

Figura 16 - Peças sinterizadas a temperatura de A – 1140 °C, B – 1170 °C e carga de compactação a) CP-20 b) CP-40, c) CP-60 e d) CP-80.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Pode-se visualizar uma mudança de coloração com o aumento da temperatura, a 1140 °C resultaram em cores avermelhadas e foscas. À temperatura de 1170 °C apresentaram tons de marrom e brilhante. A coloração se dá, possivelmente, pela presença de óxidos corantes em sua composição, já o aspecto brilhoso refere-se às características de vitrificação.

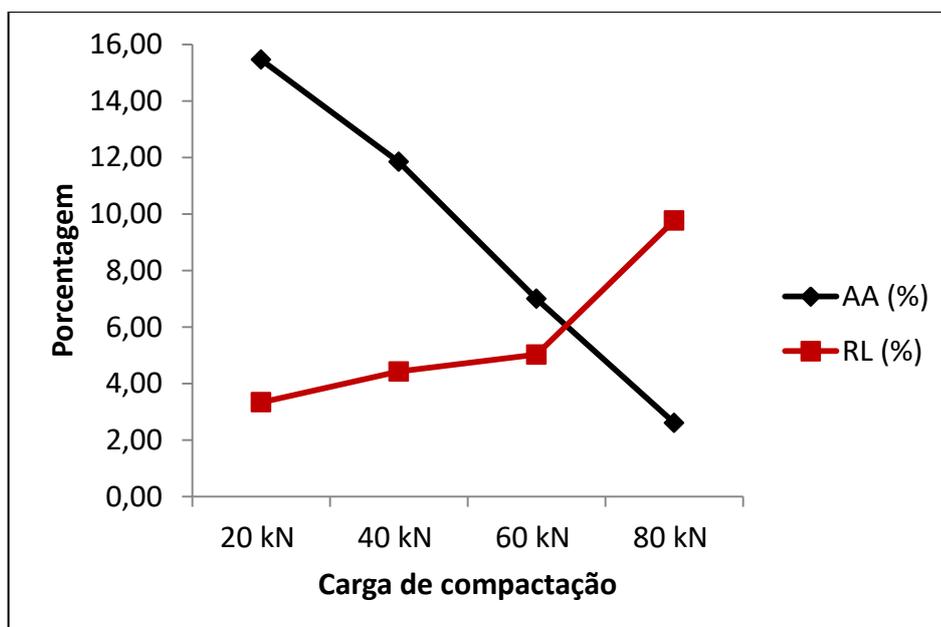
4.3 Análise das propriedades físicas

4.3.1 Curva de Gresificação

Após a sinterização das amostras a 1140 °C e 1170 °C foram feitas as análises de retração linear e absorção de água para determinar as curvas de gresificação das respectivas amostras.

Para a temperatura de 1140 °C, a partir da curva de gresificação (gráfico 1) demonstrou um comportamento típico, ou seja, quanto maior é a retração linear, menor a absorção de água.

Gráfico 1 - Curva de Gresificação da sinterização a 1140 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

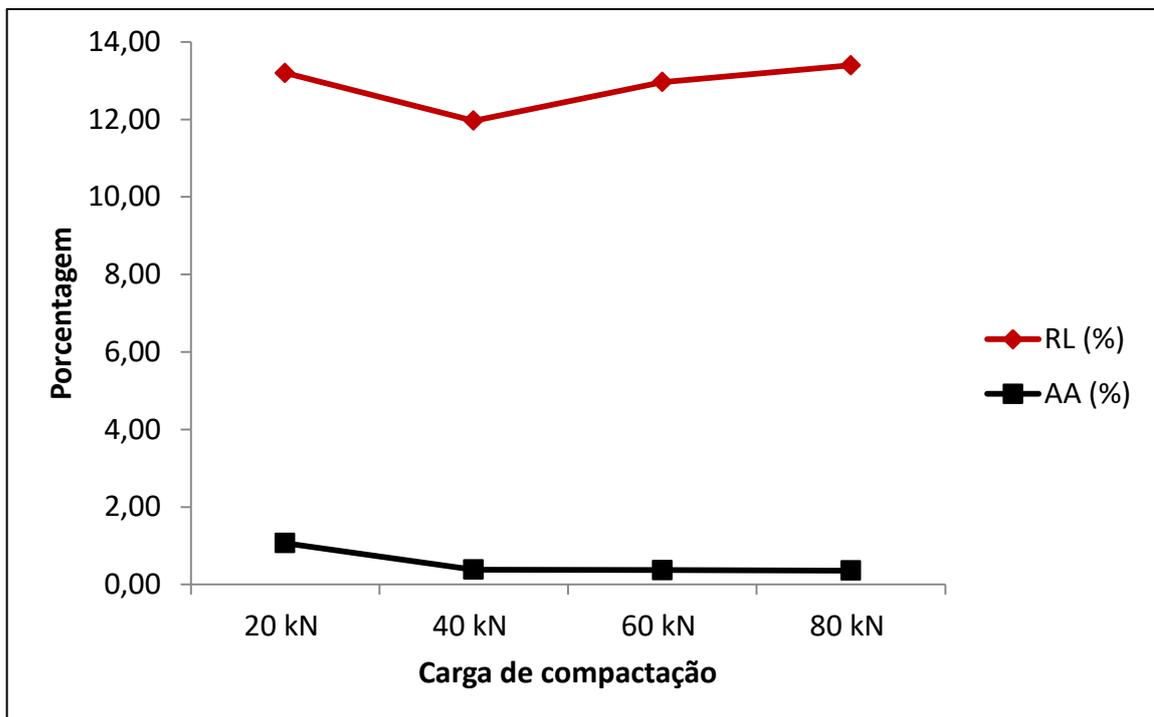
Percebe-se que nessa temperatura as maiores retrações lineares ocorrem na ordem crescente de carga de compactação, os menores valores foram para 20 kN, 40 kN e 60 kN, tendo respectivamente os resultados de 3,33%, 4,42% e 5,02%, e o maior valor na compactação de 80 kN que obteve 9,77% de RL. O resultado mais expressivo ocorreu paralelo a menor taxa de absorção de água (em torno de 2,61%).

Esse comportamento deve-se a maior compactação, conseqüentemente a melhor alocação dos grãos, formando menos poros no corpo de prova a verde

tornando um corpo mais denso e com superfície mais uniforme. Paralelo a compactação também pode-se atribuir esse comportamento à sinterização das peças, pois a partir da sinterização ocorre a diminuição do percentual de peso de partículas e parte da massa de granito se transforma em um líquido viscoso que completa os poros existentes e após resfriamento forma uma estrutura sólida e densa.

Para os corpos de prova sinterizados a 1170 °C verifica-se valores altos de retração linear, variando de 11,96% a 13,40% o que se deve, provavelmente, a uma maior da sinterização das peças. Acredita-se que ocorra um aumento da retração com a maior carga de compactação e temperatura, já os níveis de absorção de água são bem menores, o que reforça a ideia de um material mais denso. O gráfico 2 mostra os resultados obtidos a temperatura de sinterização de 1170 °C.

Gráfico 2 - Curva de Gresificação da sinterização a 1170°C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2 Porosidade aparente

4.3.2.1 Densidade real do grão solto

A partir do ensaio feito em laboratório, foi determinada a densidade real do pó do granito Corumbá para as análises das propriedades físicas. Os valores obtidos na determinação da densidade real estão expressos na tabela 4.

Tabela 4 - Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 24°C e K20 0,9998.

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

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observando a tabela percebe-se que as amostras 1 e 2 obtiveram o valor de $\Delta\bar{\delta}$ maior que 0,009, sendo descartados feito um novo ensaio com uma 3ª amostra que resultou em um $\Delta\bar{\delta} = 0,009$ que está dentro do admissível pela norma utilizada, sendo assim, considerado satisfatório e escolhido para a densidade real dos grãos. De acordo com os cálculos a densidade real dos grãos soltos do pó do granito Corumbá é de 2,73 g/cm³.

4.3.2.2 Densidade específica aparente das peças sinterizadas

A partir da aferição de altura e diâmetro dos corpos de prova após sinterização, obteve-se, através da fórmula de volume de um cilindro, o valor do volume aparente dos CP. Esses valores foram necessários para, juntamente com as massas dos CP, obter os resultados de densidade específica aparente apresentados na tabela 5.

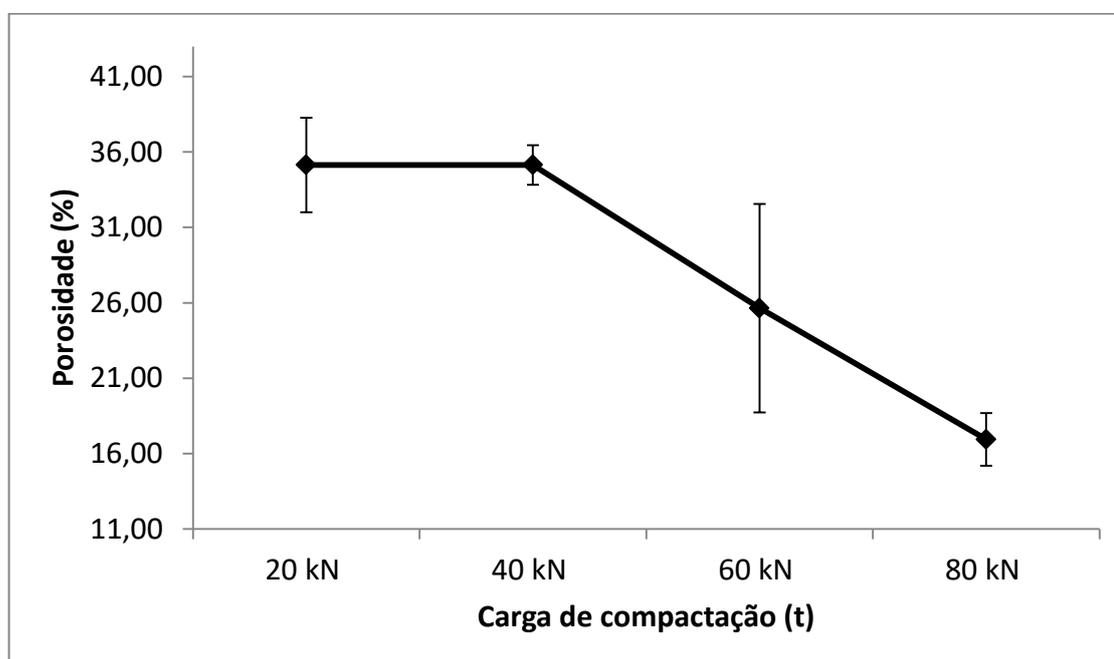
Tabela 5 - Densidade específica aparente dos grãos do pó de granito sinterizado a 1140 °C e 1170 °C.

Carga de compactação	1140 °C		1170 °C	
	Média (g/cm ³)	SD	Média (g/cm ³)	SD
20 kN	1,77	0,0856	2,35	0,0362
40 kN	1,94	0,0360	2,44	0,0325
60 kN	2,03	0,1888	2,32	0,0260
80 kN	2,27	0,0475	2,29	0,1039

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para análise do grau de porosidade dos corpos de prova, utilizou-se a base de dados da densidade real dos grãos e da densidade específica aparente, tabela 4 e 5, respectivamente. O gráfico 3 mostra os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas a 1140 °C.

Gráfico 3 - Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1140 °C.



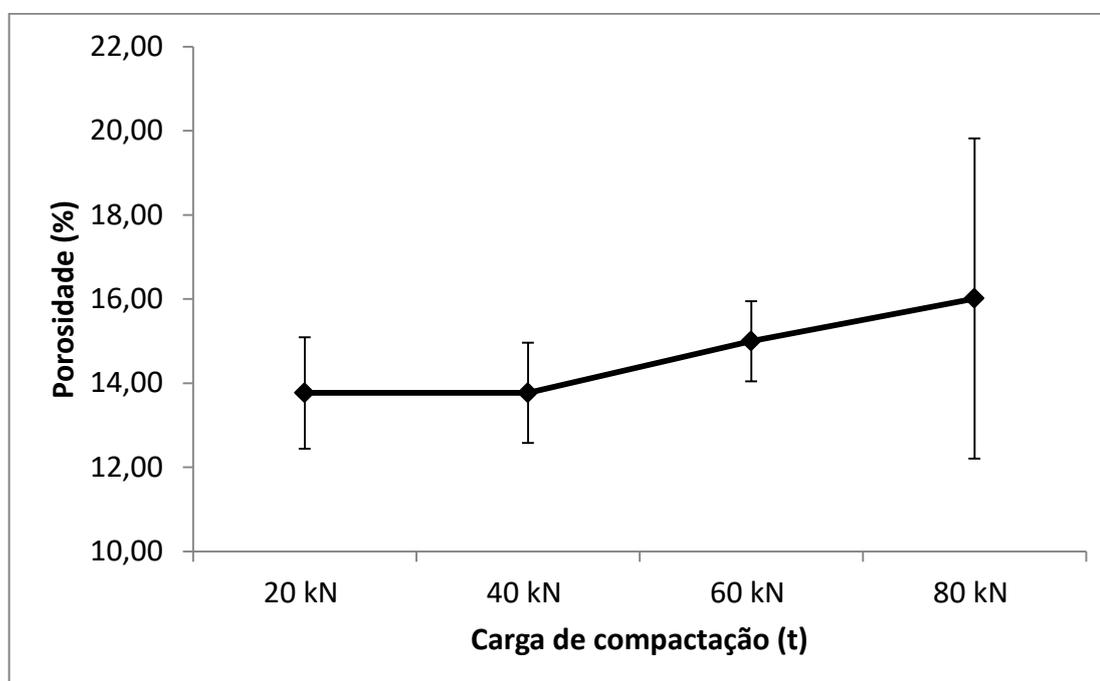
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir do gráfico 3, pode-se analisar que para essa temperatura a pressão de compactação influencia no grau de porosidade, pois a porosidade demonstrou um comportamento de diminuição com o aumento da carga de compactação. As

cargas de 60 kN e 80 kN demonstraram menor porosidade que as de 20 kN e 40 kN, contudo, analisando entre 60 kN e 80 kN, onde as amplitudes de desvio padrão se interceptam.

Pode-se afirmar que para esse material e essa temperatura de sinterização é preferível compactar com a carga de 60 kN, pois precisaria de menos esforços para obter valor de porosidade similar com a carga sequente. No gráfico 4 estão expressos os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas a 1170 °C.

Gráfico 4 - Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1170 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

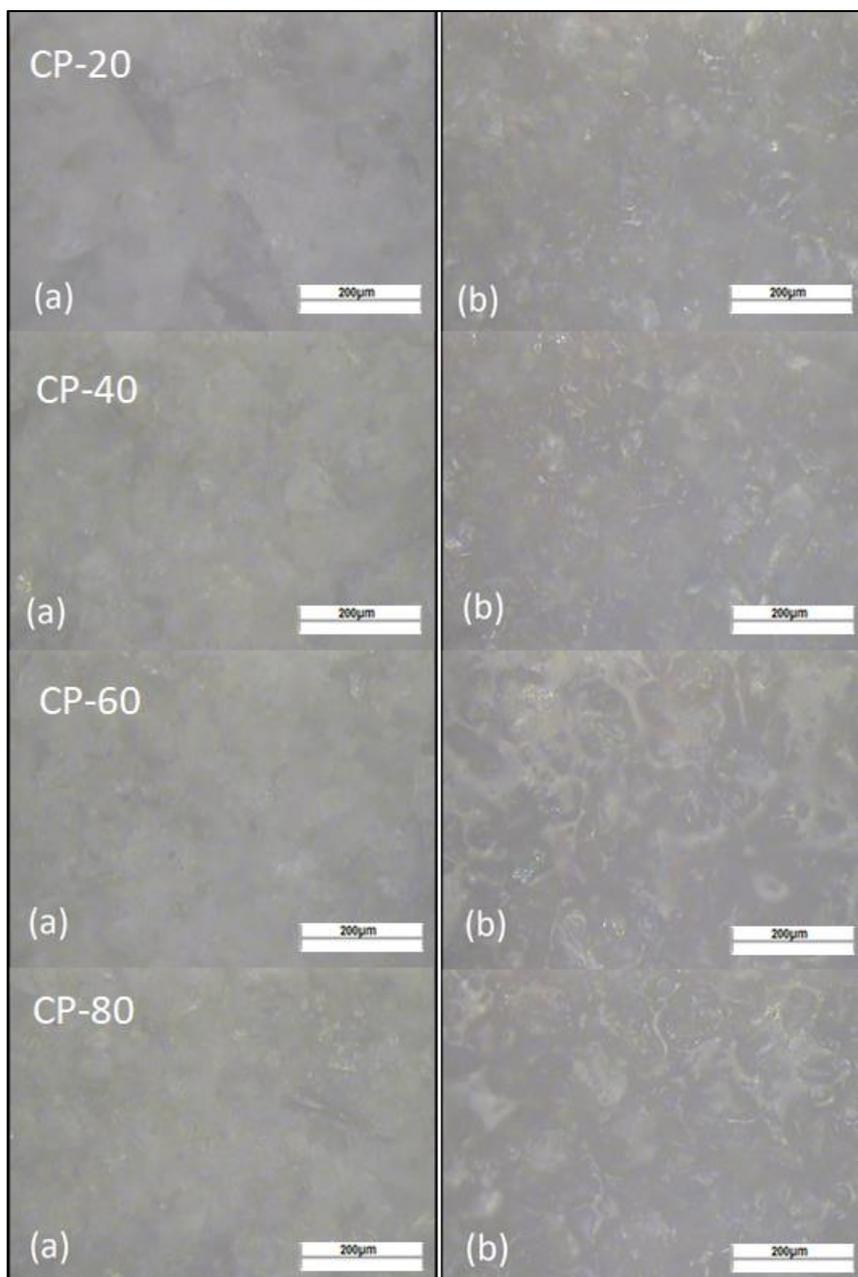
De acordo com o gráfico 4, analisando os seus desvios padrão, onde todas as amplitudes se interceptam entre si, pode-se constatar que a pressão de compactação não infere no grau de porosidade. Isto significa que o material atingiu um patamar de saturação da sinterização, onde o material se expande eliminando grande parte dos poros existentes na superfície do corpo de prova.

Isso indica que, para essa temperatura, a carga de compactação é indiferente no resultado, podendo-se escolher a menor pressão de compactação de processamento, pois o consumo de energia gera menor o custo de fabricação.

4.3.1 Microscopia Óptica

A análise óptica dos corpos cerâmicos em estudo contribui para uma maior compreensão do comportamento das propriedades em função da variação da carga de compactação nas peças a verde e no aumento da temperatura de sinterização nas peças. A figura 17 mostra as análises feitas nos CP sinterizados a 1140 °C.

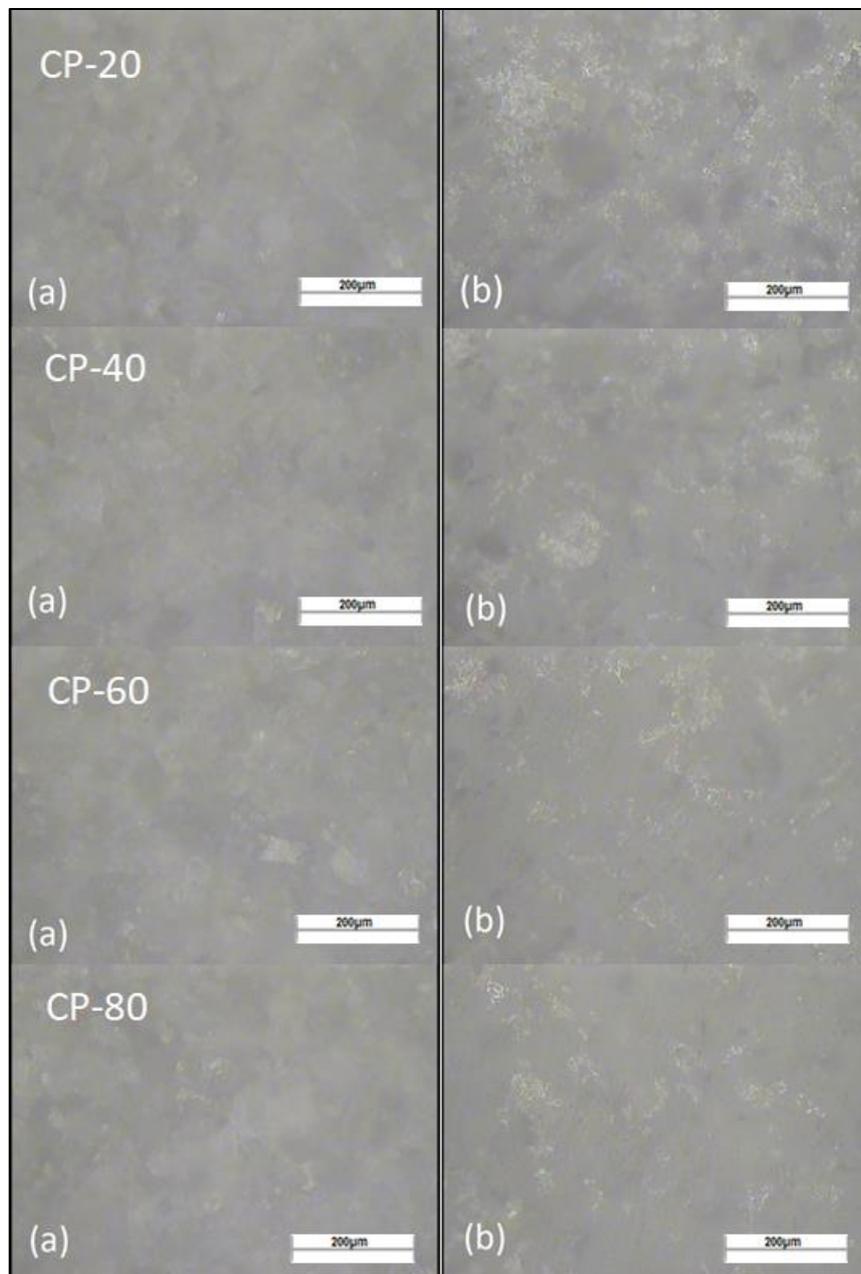
Figura 17 - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1140 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A figura 17 mostra um comportamento semelhante entre as peças a verde (a) nos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80, já nas peças sinterizadas (b) observa-se o aumento dos grãos, ocorrendo uma variação atípica nos CP-60, que também pode ser verificado a partir dos resultados da porosidade, onde essa amostra apresentou um alto valor de desvio-padrão. A figura 18 mostra as análises feitas nos CP sinterizados a 1170 °C.

Figura 18 - Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1170 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A figura 18 apresentou o mesmo comportamento das peças a verde (a). Já a as fotomicrografias das peças sinterizadas (b) observou-se uma maior uniformidade na redução do tamanho dos poros. Isso ocorre pela formação da fase líquida de partículas argilosas que preenchem os poros, ocorrendo a vitrificação. O que se pode sugerir que para a temperatura de 1170 °C ocorreu uma melhor sinterização.

Como constatado nas fotomicrografias e nos resultados, para a sinterização a 1140 °C a porosidade diminuiu com o aumento da carga de compactação. Já em 1170 °C a porosidade não altera, pois as amplitudes de desvios-padrão desta se interceptam, impossibilitando uma conclusão sólida acerca da variação.

Contudo, apesar dos resultados serem coerentes com os que foram mostrados na micrografia, para não se chegar a conclusões errôneas. Com isso, deve-se ser feitas mais análises para estabelecer parâmetros da porosidade acerca da carga de compactação, pois esse fator tem uma grande importância tecnológica, que além de facilitar o processo de secagem da amostra e evita o aparecimento de defeitos nas peças.

5. CONCLUSÕES

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

O granito Corumbá é essencialmente composto por quartzo, responsável pela estrutura do corpo e, os feldspatos albita e microclínio, usados como fundentes formadores da fase líquida. A presença desses fundentes possibilitou que a sinterização ocorresse em temperaturas mais baixas ($<1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que sugere um menor custo energético na produção. A tonalidade crescente de cor (marrom avermelhada) indica muito provavelmente o resultado da presença de óxido de ferro presente na massa cerâmica.

Os corpos de prova submetidos à temperatura de 1140°C apresentaram baixa sinterização, sendo observada uma coloração avermelhada clara e de aspecto visual fosco. À temperatura de 1140°C , observou-se uma coloração marrom escura e a vitrificação das peças devido ao aspecto brilhoso, o que indica melhor sinterização.

Determinou-se que a densidade real dos grãos soltos do pó do granito Corumbá é de $2,73\text{ g/cm}^3$. Já a densidade específica aparente das peças sinterizadas à temperatura de $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ é a) $1,77\text{ g/cm}^3$, b) $1,94\text{ g/cm}^3$, c) $2,03\text{ g/cm}^3$ e d) $2,27\text{ g/cm}^3$. À temperatura de $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ a DEA foi a) $2,35\text{ g/cm}^3$, b) $2,44\text{ g/cm}^3$, c) $2,32\text{ g/cm}^3$ e d) $2,29\text{ g/cm}^3$. Com isso, verificou-se que os corpos de prova apresentaram variação de densidade com o aumento da pressão de compactação.

A porosidade foi determinada a partir dos resultados de densidade e demonstrou que a temperatura de $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi insatisfatória, pois necessitou de maior energia de compactação para que diminuísse a porosidade. Já à $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ a porosidade não é alterada significativamente com o aumento da pressão de compactação. Isso significa que o material atingiu uma boa sinterização e um grau de saturação da porosidade, eliminando os poros a menores esforços de compactação, e assim, utilizando menos energia.

A partir das análises da curva de gresificação à temperatura de $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ a

pressão de compactação influenciou na curva. E para a temperatura de 1170 °C a pressão de compactação não influenciou.

Como a sinterização a temperatura de 1140 °C não foi satisfatória a nível de redução de porosidade, a curva de gresificação se comportou de uma maneira normal, ou seja, quanto maior a absorção de água, menor a retração linear. Já a curva de gresificação para os corpos de prova sinterizados a 1170 °C os níveis de absorção de água e de retração linear se mantiveram em patamares constantes, significando que houve uma saturação a essa temperatura na curva gresificação.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho constituiu a caracterização de cerâmicas a partir do Rejeito do granito Corumbá e afim e desenvolver novos estudos, assim como propor a continuação ou aplicação do presente trabalho, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a sinterização em outras temperaturas a fim de determinar a temperatura ótima de sinterização;
- Verificar outras cargas de compactação se existe interferência na porosidade final das peças sinterizadas.
- Analisar a influência da granulometria do resíduo de granito sobre as propriedades físicas em massas cerâmicas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS. **Balço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2019**. ABIROCHAS, 2019. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/balancos>>. Acesso em 27 jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS. **Balço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2020**. ABIROCHAS, 2020. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/balancos>>. Acesso em 02 jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS. **Notas sobre as exportações e importações de rochas ornamentais no período janeiro-maio de 2021**. ABIROCHAS, 2021. Disponível em: <<https://abirochas.com.br/exportacoes-brasileiras-de-rochas-continuam-crescendo/>>. Acesso em 12 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9623: Materiais de moldagem termofixos – Determinação da contração e pós contração em corpos de prova moldados por compressão e injeção em formas de barra**, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio**, 2005.

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

CAMPOS, Antônio Rodrigues de; CASTRO, Nuria Fernández; VIDAL, Francisco W. Hollanda; BORLINI, Mônica Castoldi. **Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental**. In: Anais do XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste & VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. p. 9-18. Fortaleza: CETEM/MCT, 2009.

CARANASSIOS, A.; STELLIN JUNIOR, A. **Extração de rochas ornamentais**. *Brasil Mineral*. São Paulo, n. 89, p. 30-34, jun. 1991.

CHIODI FILHO, C. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2017**. São Paulo: ABIROCHAS, 2017. 13 p. (Informe n.01/2017).

CREMONEZI, Alcides et al., 2009. **A METALURGIA DO PÓ: alternativa econômica com menor impacto ambiental**.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 093: Determinação da densidade real**. São Paulo: DNER, 1994.

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

GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini et al. **Rochas aglomeradas: uma alternativa tecnológica e ambiental para a utilização dos resíduos de rochas ornamentais.** 2021.

JESUS, Soraia de Oliveira. **Análise do comércio internacional de rochas ornamentais na Bahia no período de 1997 a 2019.**

JÚNIOR, RAFAEL BERNARDINO DA SILVA. **Protótipos de blocos cerâmicos pré-sinterizados a base de zircônia obtidos por prensagem isostática a frio.** 2015. Tese de Doutorado. Centro Universitário de Volta Redonda.

LIMA, Samille Kricia Bezerra de. **Reaproveitamento de cinzas de madeira para a produção de cerâmica vermelha e estudo das propriedades mecânicas e tecnológicas pós sinterização.** 2021.

Lira, C. & Pina, P. 2009. **Automated grain shape measurements applied to beach sands.** Journal of Coastal Research, 56(2):1527-1531.

Lira, C. & Pina, P. 2011. **Granulometry on classified images of sand grains.** Journal of Coastal Research, 64(2):1697-1701.

LOBO, Cândido Jorge de Sousa. **Estudo sobre a utilização do rejeito do granito rosa iracema como matéria-prima na fabricação de funis de saída da fição a rotor na indústria têxtil.** 2009.

MARCON, Douglas Bortolote; PEITER, Carlos César; FERNÁNDEZ CASTRO, N. **Utilização de fio diamantado na lavra de granitos comerciais.** In: Jornada de Iniciação Científica, Rio de Janeiro: CETEM, jul. 2012.

MOYA, M.M. e SUSLICK, S.B. **Avaliação preliminar do setor de rochas ornamentais no Brasil.** XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1992.

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

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

PONCIANO, Victor Moza; GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini. **Inventário do ciclo de**

vida de rochas ornamentais: levantamento, tratamento e descrição dos dados da extração. 2013.

PRADO, A. C. A., et al. **Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha.** *Cerâmica*, v. 54, p. 466-471, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000400013>. Acesso em: 19 de Ago. 2021.

REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing.** New York. John Wiley, 1995. 658p.

ROCHA, Cezar Henrique; SOUSA, José. **Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação Cachoeiro de Itapemirim-ES.** *Enciclopédia Biosfera*, v. 6, n. 09, 2010.

ROCHA, Silmara Faico; GADIOLI, Mônica Castoldi Borlini. Estudo comparativo entre dados de inventários de ciclo de vida de rochas ornamentais (2011-2012 X 2015-2016) evidenciando os insumos da serragem e polimento. 2017.

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da; BOLONINI, Thiago Motta. **Polimento de rochas ornamentais, aspectos tribológicos.** 2016.

SOUSA, Antonio Augusto Pereira de et al. **Gestão ambiental nas indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais do estado da Paraíba.** 2007.

SOUZA, Davi Vargas de; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; CASTRO, Nuria Fernández. **Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais.** 2012.