



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EVILAINE DE OLIVEIRA PAIVA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO VERDE UBATUBA
EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DE PÓS CERÂMICOS**

RUSSAS

2022

EVILAINÉ DE OLIVEIRA PAIVA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO VERDE UBATUBA
EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DE PÓS CERÂMICOS

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

2022

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)

P167e Paiva, Evilaine de Oliveira.

Estudo das propriedades físicas do pó do Granito Verde Ubatuba em função dos parâmetros de processamento de pós cerâmicos / Evilaine de Oliveira Paiva. – 2022.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

1. Rochas ornamentais. 2. Resíduos. 3. Granito Verde Ubatuba. 4. Propriedades Físicas. I. Título.

CDD 620

EVILAINE DE OLIVEIRA PAIVA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DO GRANITO VERDE UBATUBA
EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DE PÓS CERÂMICOS

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: 14/07/2022

BANCA EXAMINADORA

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

Rafaella Cavalcante Regis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Paulo Henrique Roberto Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, por acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e por me dar a capacidade de superar todos os obstáculos ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço a minha mãe querida, Maria Ivonete, por todo suporte, acolhimento e incentivo durante essa etapa. Uma mulher guerreira que sempre batalhou para me dar o melhor que pudesse. À senhora, todo o meu amor e gratidão!

Aos meus queridos sobrinhos, Emerson Nunes, José Eduardo Oliveira e Emilly Lara Nunes, por serem meus momentos de diversão e distração em meio a todos os momentos tensos que passei durante a graduação. À vocês, todo meu amor e carinho!

Aos meus amigos de graduação, Larisse Oliveira e Paulo Henrique por estarem comigo em todos os momentos de frustrações, reclamações e vitórias. À vocês, todo meu respeito e carinho!

Agradeço aos meus colegas de faculdade, em especial os que criei grande vínculo de amizade, o nosso “Magote”, com quem compartilhei os melhores e piores momentos durante a graduação vocês sempre farão parte da minha história.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cândido Lobo, por toda disposição, paciência e colaboração. Além disso, obrigada por toda confiança à mim depositada e por acreditar na minha capacidade para conclusão deste trabalho.

À Rafaella Regis, minha “coorientadora”, por todo ensinamento, paciência e disposição para realização deste trabalho.

Enfim, a todos vocês que fizeram parte dessa etapa decisiva da minha vida, minha mais sincera gratidão!

RESUMO

O setor de rochas ornamentais apresenta a cada ano um crescimento exponencial. Por outro lado, essa atividade tem gerado grandes quantidades de resíduos provenientes das fases de beneficiamento destes materiais, motivando assim, a necessidade de minimizar os impactos ambientais causados e propor um melhor destino a estes rejeitos. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a potencialidade do rejeito do granito Verde Ubatuba como matéria-prima para produção de peças sinterizadas por meio do pó através da investigação de suas propriedades físicas. O resíduo foi caracterizado através da densidade real do grão solto. Com o objetivo de analisar a influência da carga de compactação na temperatura de sinterização, as peças foram compactadas à quatro cargas diferentes a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN e, sinterizadas à três temperaturas A – 1130 °C, B – 1140 °C e C – 1150 °C. Em seguida, foram realizadas as análises de retração linear, absorção de água, densidade específica aparente e de porosidade para os três conjuntos. Os ensaios permitiram concluir que à temperatura de 1130 °C e 1140 °C demonstrou insuficiência em sua saturação, pois a curva de gresificação mostrou que a absorção de água diminui com o aumento da retração linear, ou seja, para que haja uma diminuição da porosidade, se faz necessário maior carga de compactação, tendo assim, maior consumo de energia. Já à temperatura de 1150 °C os resultados obtidos na curva de gresificação apresentaram uma alta retração linear e baixa absorção de água, fazendo assim a curva ser satisfatória. Analisando a porosidade, os resultados mostraram que não houve variação estaticamente significativa, pois a amplitude de desvios-padrões se intercepta, o que mostra que os corpos de prova atingiram uma saturação de compactação e que a porosidade não depende da carga de compactação, sendo dependente somente da temperatura de sinterização.

Palavras-chaves: rocha ornamental; resíduo; granito Verde Ubatuba; propriedades Físicas.

ABSTRACT

The dimension stone sector presents exponential growth every year. On the other hand, this activity has generated large amounts of waste from the processing stages of these materials, thus motivating the need to minimize the environmental impacts caused and propose a better destination for these wastes. Therefore, the present work aims to analyze the potential of the Verde Ubatuba granite tailings as a raw material for the production of sintered parts through the powder through the investigation of its physical properties. The residue was characterized through the real density of the loose grain. To analyze the influence of the compaction load on the sintering temperature, the pieces were compacted at four different loads a) 20 kN, b) 40 kN, c) 60 kN and d) 80 kN, and sintered at three temperatures A – 1130° C, B - 1140°C and C - 1150°C. Then, analyzes of linear shrinkage, water absorption, apparent specific density of the sintered parts and porosity were carried out for the three sets. The tests allowed to visualize results to conclude that in the temperature of 1130 °C and 1140 °C it presented insufficiency in its saturation, since the gresification curve showed that the water absorption decreases with the increase of the linear shrinkage, that is, to be a reduction of the porosity, a higher compaction load is required, thus having a higher energy consumption. At the temperature of 1150 °C, the results obtained in the gresification curve showed a high linear shrinkage and low water absorption, making the curve satisfactory. Analyzing the porosity, the results showed that there was no statistically significant variation, since the amplitude of the standard deviations intersects, which shows that the specimens reached a saturation of compaction and that the porosity does not depend on the compaction load, being dependent only the sintering temperature.

Keywords: ornamental rock; residue; ubatuba green granite; physical properties.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

Simone de Beauvoir

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modificações e principais produtos da indústria de rochas.....	20
Figura 2 – Aparência do granito verde Ubatuba.....	23
Figura 3 – Esquema do processo de sinterização.....	24
Figura 4 – Compactação uniaxial a frio.....	25
Figura 5 – (a) Partículas soltas (b) Estágio inicial (c) Estágio intermediário (d) Estágio Final.....	26
Figura 6 – Fluxograma da metodologia experimental.....	28
Figura 7 – (a) Rejeito coletado no tamanho inicial. (b) Rejeito coletado após primeira etapa de quebra. (c) Rejeito triturado.....	29
Figura 8 – Análise granulométrica de peneiras compostas por malhas de: (a) Peneira 9,50 mm. (b) Peneira 4,75 mm. (c) Peneira 600 μm . (d) Peneira 75 μm	30
Figura 9 – Balança de precisão.....	30
Figura 10 – Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas.....	31
Figura 11 – Máquina de ensaio universal EMIC.....	32
Figura 12 – Peças verdes compactadas com cargas de: a) 20 KN, b) 40 KN, c) 60 KN e d) 80 KN.....	32
Figura 13 – Mufla elétrica.....	33
Figura 14 – a) Picnômetros no processo de fervura; b) Picnômetros no processo de resfriamento.....	34
Figura 15 – Estufa de secagem.....	36
Figura 16 – Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2.....	37
Figura 17 – Peças sinterizadas a temperatura de A - 1130 °C, B- 1140 °C, C - 1150 °C e carga de compactação dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80.....	39
Figura 18 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizados a 1130 °C.....	47
Figura 19 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizados a 1140 °C.....	48
Figura 20 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizados a 1150 °C.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas utilizadas e pressões geradas.....	31
Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova utilizados para o processo de sinterização.....	33
Tabela 3 – Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 21 °C e K20 0,9998.....	43
Tabela 4 – Densidade específica aparente dos grãos do pó de granito sinterizado a 1130 °C, 1140 °C e 1150 °C.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de Gresificação da sinterização a 1130 °C.....	41
Gráfico 2 – Curva de Gresificação da sinterização a 1140 °C.....	41
Gráfico 3 – Curva de Gresificação da sinterização a 1150 °C.....	42
Gráfico 4 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1130 °C.....	44
Gráfico 5 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1140 °C.....	45
Gráfico 6 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1150 °C.....	46

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Densidade real do grão à temperatura t.....	34
Equação 2 – Densidade do solo à 20 °C.....	35
Equação 3 – Retração linear.....	35
Equação 4 – Absorção de água.....	36
Equação 5 – Densidade específica aparente.....	36
Equação 6 – Porosidade aparente.....	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo geral.....	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Rochas ornamentais	18
2.2 Materiais Cerâmicos.....	19
2.2.1 <i>Classificação</i>	20
2.3 Resíduos Sólidos.....	20
2.4 Granito.....	22
2.5 Processamento da matéria-prima	23
2.5.1 <i>Análise granulométrica</i>	24
2.5.2 <i>Adição de ligante</i>	24
2.5.3 <i>Compactação</i>	25
2.5.4 <i>Sinterização</i>	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Metodologia.....	28
3.2 Fabricação dos corpos de prova.....	29
3.2.1 <i>Coleta e britagem do material</i>	29
3.2.2 <i>Granulometria</i>	30
3.2.3 <i>Pesagem do material</i>	30
3.2.4 <i>Compactação dos corpos de prova</i>	31
3.2.5 <i>Sinterização dos corpos de prova</i>	32
3.3 Caracterização física.....	34
3.3.1 <i>Densidade real do grão solto</i>	35
3.3.2 <i>Retração Linear</i>	36
3.3.3 <i>Absorção de água</i>	37
3.3.4 <i>Densidade específica aparente das peças sinterizadas</i>	38
3.3.5 <i>Porosidade Aparente</i>	38
3.3.6 <i>Microscopia Óptica</i>	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Análise visual da sinterização.....	39
4.2 Análise das propriedades físicas	40

4.2.1 Curva de Gresificação	40
4.2.2 Porosidade aparente.....	42
4.2.2.1 Densidade real do grão solto.....	43
4.2.2.2 Densidade específica aparente das peças sinterizadas.....	43
4.2.3 Microscopia Óptica.....	46
5 CONCLUSÕES.....	49
6 REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das áreas mais importantes da indústria brasileira e é considerada uma das cadeias produtivas que mais crescem, tanto econômica quanto socialmente. Ao longo dos anos, novas tecnologias consolidaram o setor e aceleraram seu desenvolvimento. Como tal, traz questões ambientais discutidas por diversas entidades e instituições, pois é o setor que tem maior impacto ambiental em todo o planeta devido ao alto consumo de recursos naturais e minerais, gerando grande quantidade de resíduos sólidos (BATISTA, 2022).

A indústria de rochas ornamentais vem cada vez mais crescendo ao longo dos anos. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, as exportações registraram, no primeiro trimestre de 2022, um faturamento de US\$ 281,7 milhões (ABIROCHAS, 2022). A lavra e o beneficiamento, que são etapas da produção de rochas ornamentais, produzem em todas as etapas, uma grande quantidade de resíduos sólidos, com perdas de material que atingem faixas de 65% a 75%, em média. Logo, existe uma significativa preocupação com a quantidade de rejeitos gerados e o impacto que podem causar no meio ambiente (CAMPOS *et al.*, 2009).

Os resíduos produzidos que poluem o meio ambiente é um assunto bastante discutido no contexto ambiental. Com isso, surge a necessidade de encontrar alternativas para o seu melhor aproveitamento, empregando a reutilização desse material, de modo a oferecer um final adequado, diminuindo danos em todas as suas etapas de produção (MIRANDA, 2021).

Existem diversos estudos para aplicabilidade desses rejeitos em materiais alternativos, sendo alguns deles indicando a fabricação de materiais incorporando a lama abrasiva do desdobramento de granitos a novos produtos e processos, como por exemplo, utilização desses rejeitos em produtos para a construção civil (tijolos a base de cimento), em composições de cerâmica vermelha (telhas e tijolos), na formulação de argamassas industriais, dentre outros (BABISK, 2009).

Desta forma, este trabalho analisa e estuda o comportamento físico de cerâmicas obtidas a partir do rejeito do granito Verde Ubatuba. O processamento cerâmico do pó é utilizado para fabricar corpos de prova submetidos à caracterização tecnológicas e ensaios físicos.

1.1 Objetivo geral

O trabalho proposto tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos do granito Verde Ubatuba, através do estudo de suas propriedades físicas em função dos parâmetros de processamento de pós cerâmicos.

1.2 Objetivos específicos

- 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

Neste capítulo são apresentados e discutidos temas de essencial importância para o entendimento e compreensão deste trabalho de pesquisa, através de revisão bibliográfica sobre definições e exposição de dados que estão ligados ao contexto envolvido no material de estudo. Os temas abordam as rochas ornamentais, importância dos resíduos sólidos, definições do granito estudado, e o processo de fabricação a partir do pó.

2.1 Rochas ornamentais

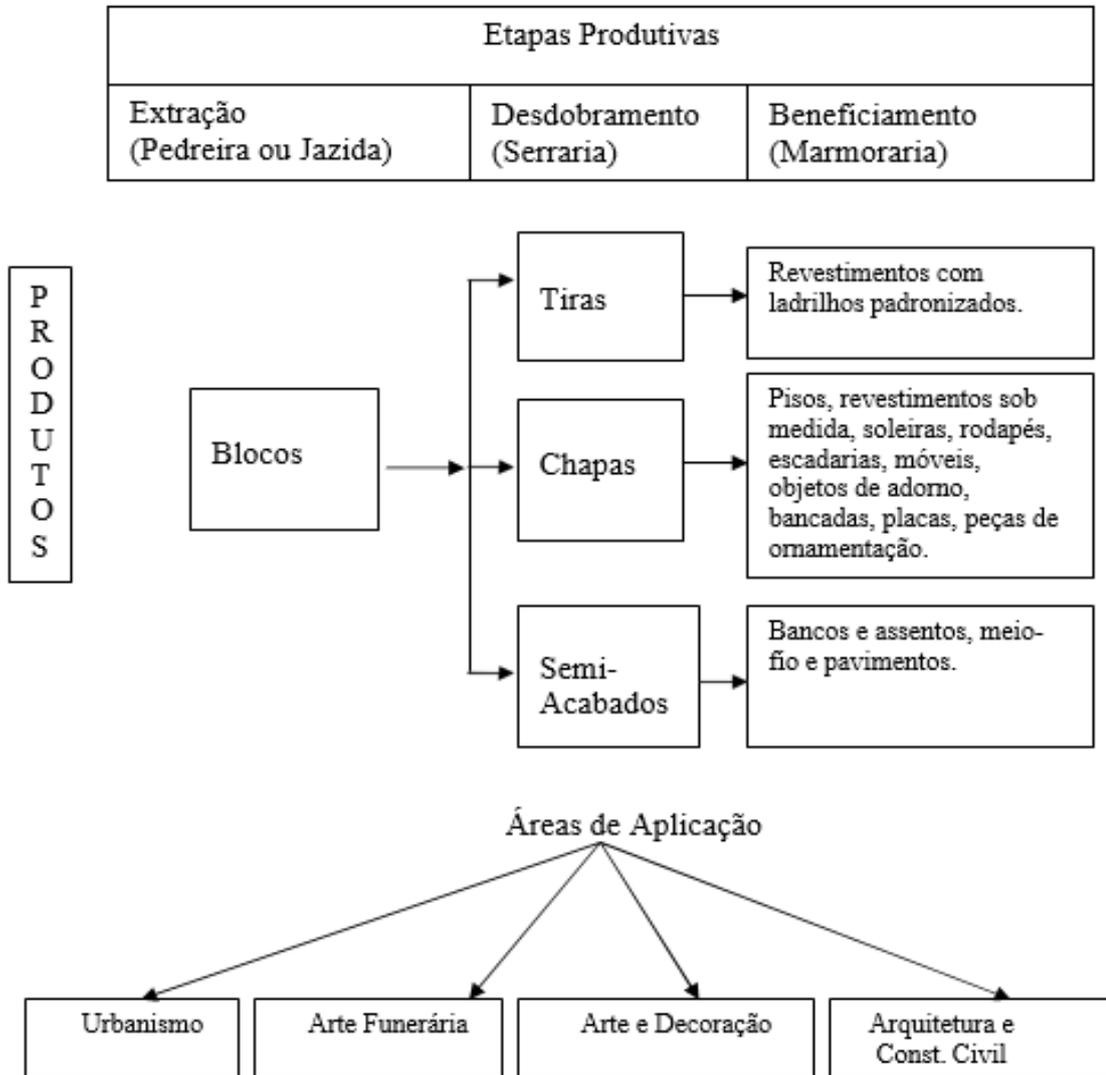
As rochas ornamentais abrangem diversos tipos de rochas que, quando extraídas em formato de blocos ou placas, podem ser aplicadas em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, mobiliário, arte funerária e decoração.

Do ponto de vista comercial, são basicamente divididas em granito e mármore. Sendo que o granito geralmente inclui rochas formadas a partir de minerais de silicato, enquanto o mármore contém rochas compostas por minerais de carbonato. São materiais diferentes na parte física, mecânica e química, extraídos da natureza e utilizados em seu estado natural (ABIROCHAS, 2009).

No Brasil, as pesquisas sobre rochas ornamentais começaram a se difundir após a constatação da necessidade de valorização das matérias-primas para exportação e da demanda por mercados consumidores estrangeiros. Atualmente, o mercado nacional também necessita de um conhecimento mais detalhado das propriedades das rochas utilizadas como materiais de construção, não apenas focando nas propriedades estéticas (SOSSAI, 2006).

O processo produtivo das rochas ornamentais percorre por três etapas: extração, desdobramento e beneficiamento. Na Figura 1, ilustra-se essas etapas pelas quais passam as rochas ornamentais, que vai desde a matéria-prima ao produto final.

Figura 1 – Modificações e principais produtos da indústria de rochas.



Fonte: Villaschi Filho e Pinto, 2000 apud Spínola (2003).

2.2 Materiais Cerâmicos

Materiais cerâmicos são geralmente uma combinação de elementos metálicos e não metálicos que formam óxidos, nitretos e carbetos. Além de serem mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes severos que metais e polímeros.

O Brasil é o segundo maior consumidor de material cerâmico do mundo, com aproximadamente 70 bilhões de peças produzidas por ano, onde a área civil é responsável por 40% dos resíduos que se acumulam nos aterros, gerando grandes problemas ambientais (STHOHER *et al.*, 2017).

Segundo Cabral (2009) os materiais cerâmicos apresentam uma série de características que evidenciam o crescimento da utilização desses materiais, nas quais pode-se destacar: beleza, durabilidade, resistência, facilidade de instalação e higienização, baixa condutividade elétrica e térmica, não propagação de chamas e insensibilidade à luz.

2.2.1 Classificação

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (2022) o setor cerâmico é amplo e heterogêneo o que induz em segmentos em função de diversos fatores como matéria-prima, propriedades e áreas de utilização: Dessa forma, a seguinte classificação, em geral, é adotada.

Cerâmica vermelha: materiais com coloração avermelhada utilizados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, lajes, argilas) e também utensílios de uso doméstico.

Cerâmica Branca: conjunto bem diversificado, materiais de corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor.

Materiais de Revestimento: em forma de placas usados na construção civil para revestimentos em paredes, pisos, bancadas e piscinas. Recebem nomes como: azulejo, pastilha, porcelanato, grês, lajota, etc.

Materiais Refratários: tem como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura. Dessa forma, é classificado quanto à matéria-prima: mulita, aluminoso, grafita, carbono, etc.

Abrasivos: processos semelhantes aos da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico. Os Produtos mais conhecidos são o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício.

Cimento: constituído de propriedades pozolânicas, misturado a água cria uma pasta.

2.3 Resíduos sólidos

A rápida industrialização e o crescimento populacional são fatores determinantes para o aumento descontrolado de resíduos sólidos, este ganhando muita importância para o processo de reutilização. O desenvolvimento industrial tem como objetivo aumentar a produção, e está diretamente conectado ao consumo de energia e geração de resíduos. A reutilização é uma das melhores soluções, pois além de gerar uma grande economia no país,

possui uma grande possibilidade de diminuição desses resíduos (JUNIOR, 2011).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) define os resíduos sólidos como:

Um material nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A norma enquadra ainda a classificação dos resíduos sólidos em classe I, classe II, onde se subdividem em classe II A e classe II B. Os resíduos classe I que se denominam perigosos se destacam por suas características de inflamabilidade, reatividade, corrosividade, toxicidade e patogenicidade, apresentando riscos à saúde humana, provocando aumento da mortalidade e riscos ao meio ambiente, quando manuseados de forma inadequada. Os de Classe II que se subdividem-se em classe II A os não-inertes sendo resíduos potencialmente biodegradáveis ou combustíveis e os classes II B inertes sendo os resíduos considerados inertes e não combustíveis.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais aponta para um montante de aproximadamente 76,1 milhões de toneladas de resíduos coletados no ano de 2020. Sendo, entre as cinco regiões brasileiras, o Nordeste o segundo, com 16,5 milhões de toneladas no ano em quesito quantidade coletada, estando atrás apenas da região Sudeste, que possui os maiores centros urbanos do país (ABRELPE, 2021).

O ato ou efeito de se introduzir novas tecnologias com o objetivo de reduzir ou eliminar desperdício dos recursos naturais limitados, é denominado redução. O reaproveitamento é a reintrodução no processo produtivo, de produtos não mais utilizados para consumo, visando recuperá-los e introduzi-los novamente no mercado. A denominação de reciclagem consiste na reintrodução, no processo produtivo, dos resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, para que possam ser reinventados, gerando um novo produto. Tendo o objetivo de evitar seu encaminhamento para os lixões, evitando gerar mais poluição ao meio ambiente (CRUZ, 2002).

O resíduo de corte de granito (RCG) é proveniente de processos de beneficiamento de rochas ornamentais. Em sua grande maioria, são descartados de forma inapropriada, causando

poluição. Visando pela problemática ambiental da geração de rejeitos e pela necessidade de encontrar alternativas melhores de aproveitamento, surge o interesse de desenvolver estudos para reutilização deste subproduto. O resíduo do granito possui alto teor de sílica, podendo ser aproveitado para produção de lâ de vidro, outras aplicações típicas proveniente do corte são as argamassas, concretos asfálticos, blocos e revestimentos cerâmicos, cerâmicas vermelhas e telhas (ALVES *et al.*, 2015).

2.4 Granito

O termo granito é utilizado para determinar um conjunto de rochas silicáticas granulares e compactadas, sendo empregado como material de revestimento. Assim, para a indústria, os granitos são rochas graníticas, formadas por minerais constituídos de micas, anfibólios, quartzos, feldspatos, sendo esses dois últimos os que compõem a maior parte (ABIROCHAS, 2020).

O quartzo possui uma temperatura elevada de fusão, sendo duro e quimicamente não reativo. Ele contribui para o processo de dilatação e viscosidade da fase líquida que aparece durante a sinterização, além de desempenhar grande resistência (LUZ, 2008).

Os feldspatos desempenham o papel de fundentes já que proporcionam as primeiras fases líquidas que aparecem durante o processo de sinterização. Portanto, eles são responsáveis pelo processo de densificação em primeiro lugar, o que ajuda a reduzir a porosidade do porcelanato, conferindo-lhe as propriedades desejadas (RODRIGUEZ *et al.*, 2004).

O granito verde Ubatuba, material estudado neste trabalho, é um tipo comum de granito cuja coloração é intensa, porém, quando exposto a luz, partículas verdes são destacadas, conforme ilustrado na figura 2. Possui na sua composição três tipos de minerais, como: quartzo, mica e feldspato (RAMIREZ, 2021).

Figura 2 – Aparência do granito verde Ubatuba.



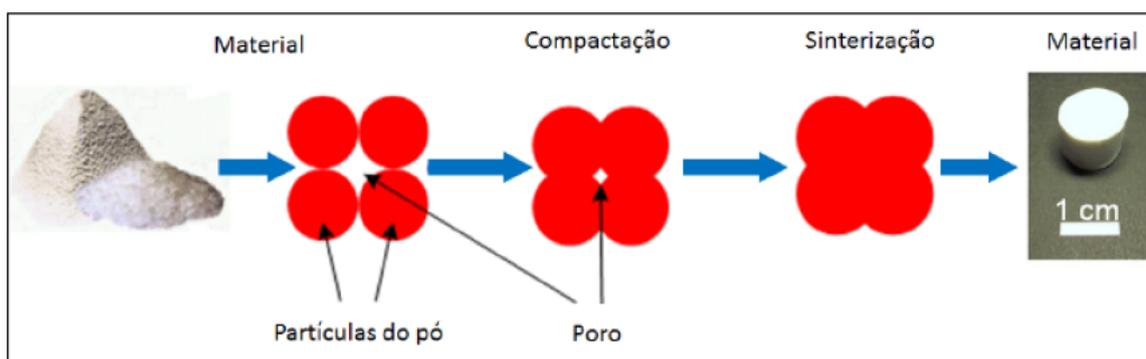
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

2.5 Processamento da matéria-prima

O processamento da matéria-prima, bem como os parâmetros do processo de fabricação, influencia significativamente as características técnicas do produto resultante, que vai desde o processo de análise da composição química e mineral dos agregados, até as etapas de compactação e sinterização. Um método comum de processamento de matéria-prima corresponde a técnica da metalurgia do pó e envolve a prensagem do pó em um molde de metal, em seguida, a consolidação da peça por aquecimento controlado (LIMA,2021).

Lima ainda afirma que o processo de fabricação da matéria-prima consiste nas etapas fundamentais: produção e obtenção do pó, mistura caso queira obter composições químicas específicas, compactação, sinterização e operações de acabamento, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Esquema do processo de sinterização.



Fonte: Souza (2014).

2.5.1 Análise granulométrica

A granulometria é um estudo das dimensões das partículas e tem como função determinar o tamanho do produto e suas partículas. O tamanho da partícula é influenciado por compactação na densidade, plasticidade, resistência e porosidade. O método mais comum de determinação é o peneiramento, feito com ajuda de peneiras que possuem diversas aberturas de malha (LIMA, 2021).

Analisar as dimensões das partículas é de extrema importância pois permite deduzir indicações preciosas, sobre os tipos de partículas e sobre as rochas que lhe deram origem. A análise granulométrica consiste em fazer o que é necessário, determinar as partículas e estudar sua distribuição (DIAS, 2004).

2.5.2 Adição de ligante

Os ligantes são basicamente polímeros termofixos que adicionados ao pó cerâmico, cria uma homogeneidade e uniformidade. É um procedimento de extrema importância que antecede o processo de compactação e sinterização. O ligante mais utilizado nesse tipo de estudo, é a própria água destilada, em uma proporção desejada para que o processo de homogeneização e uniformidade seja alcançado (MIRANDA, 2021).

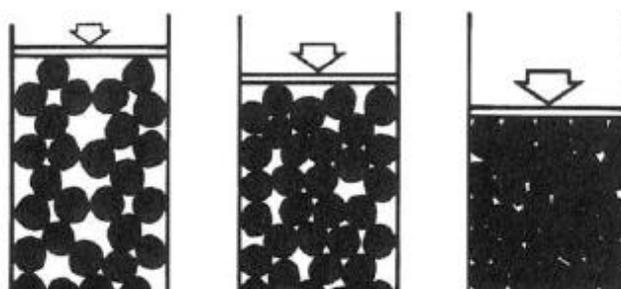
2.5.3 Compactação

A compactação é definida como o aumento da densidade do material em um mesmo volume com a redução da sua porosidade. Isso ocorre quando a matéria-prima é submetido a compressão, expulsando o ar dos poros e rearranjando as partículas.

Prensagem de um material destaca-se como sendo o processo mais utilizado para a conformação cerâmica de revestimento. Tendo como uma das principais vantagens a alta precisão dimensional dos produtos que são fabricados por este tipo de processo. O objetivo dessa operação é promover a junção das partículas, aumentando sua densidade, reduzindo sua porosidade, obter peças uniformes, de acordo com geometria e dimensão estabelecida (SUDÉRIO, 2005 *apud* CABRAL, 2009).

O processo normalmente utilizado para a fabricação dos materiais se dá por compactação uniaxial da mistura em uma matriz rígida de efeito simples. Esse processo ocorre a uma determinada temperatura e pressão. Obtendo como principais defeitos os poros, micro trincas, possíveis alterações no material e gradiente de densidade ao longo da altura do componente (GOMES, 2009). A figura 4 ilustra o processo de compactação uniaxial a frio.

Figura 4 – Compactação uniaxial a frio.



Fonte: Regis (2021).

2.5.4 Sinterização

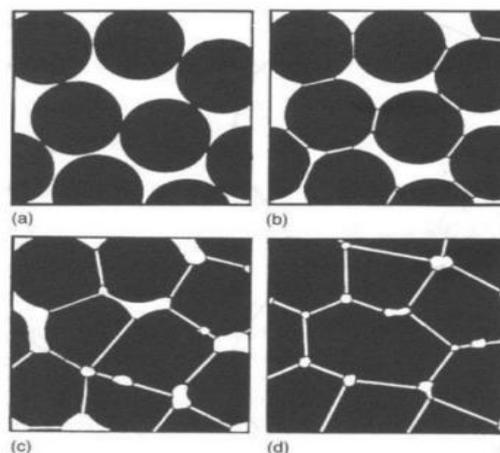
O processo de sinterização pode ser definido como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de um determinado material entrem em contato inicialmente, ganhando resistência mecânica. A sinterização é utilizada na fabricação de peças metálicas, cerâmicas e compósitos metal-cerâmica, sendo a parte integrante e importante da metalurgia do pó e tecnologia cerâmica, que são responsáveis pela fabricação de produtos metálicos e cerâmicos a partir dos pós obtidos (SILVA; JÚNIOR, 1998).

Silva e Júnior (1998) ainda afirmam que existem dois tipos de sinterização: a sinterização por fase líquida e a sinterização por fase sólida. Na fase líquida possui a formação de líquido na estrutura, surgindo de uma reação entre componentes ou da fusão, sendo esse tipo de sinterização mais rápido e que tem o fechamento dos poros mais fácil. Já na fase sólida possui um deslocamento por transportes das partículas inteiras, sem a presença de líquido na sua estrutura. Para o acontecimento de qualquer tipo de sinterização ocorre a diminuição da energia livre superficial do conjunto de partículas. Durante esse processo a porosidade da estrutura é fechada, fazendo com que o material seja deslocado até completar os espaços vazios, onde como esse tipo de material é deslocado faz com que indique o tipo de sinterização presente.

O aspecto estrutural da peça sinterizada consiste na relação de processos, na qual inclui porosidade residual, distribuição e tamanho médio dos grãos, homogeneidade e uniformidade estrutural; características do pó utilizado; e também condições de sinterização, tais como temperatura, atmosfera e tempo (LIMA, 2021).

Ainda de acordo com Lima (2021) esses processos possuem diversas vantagens e desvantagens. Vantagens de reduzir ao mínimo as perdas de matéria-prima; facilidade de controle da composição química desejada; eliminação ou redução de usinagem; bom acabamento superficial; produtos que apresentam alta pureza. Já as desvantagens é que limita a forma geométrica da peça; obriga a execução de grandes lotes de produção; limita o tamanho da peça. A figura 5 ilustra o esquema das etapas do processo de sinterização.

Figura 5 – Esquema das etapas do processo de sinterização: (a) Partículas soltas (b) Estágio inicial (c) Estágio intermediário (d) Estágio Final.



Fonte: Lee (1994).

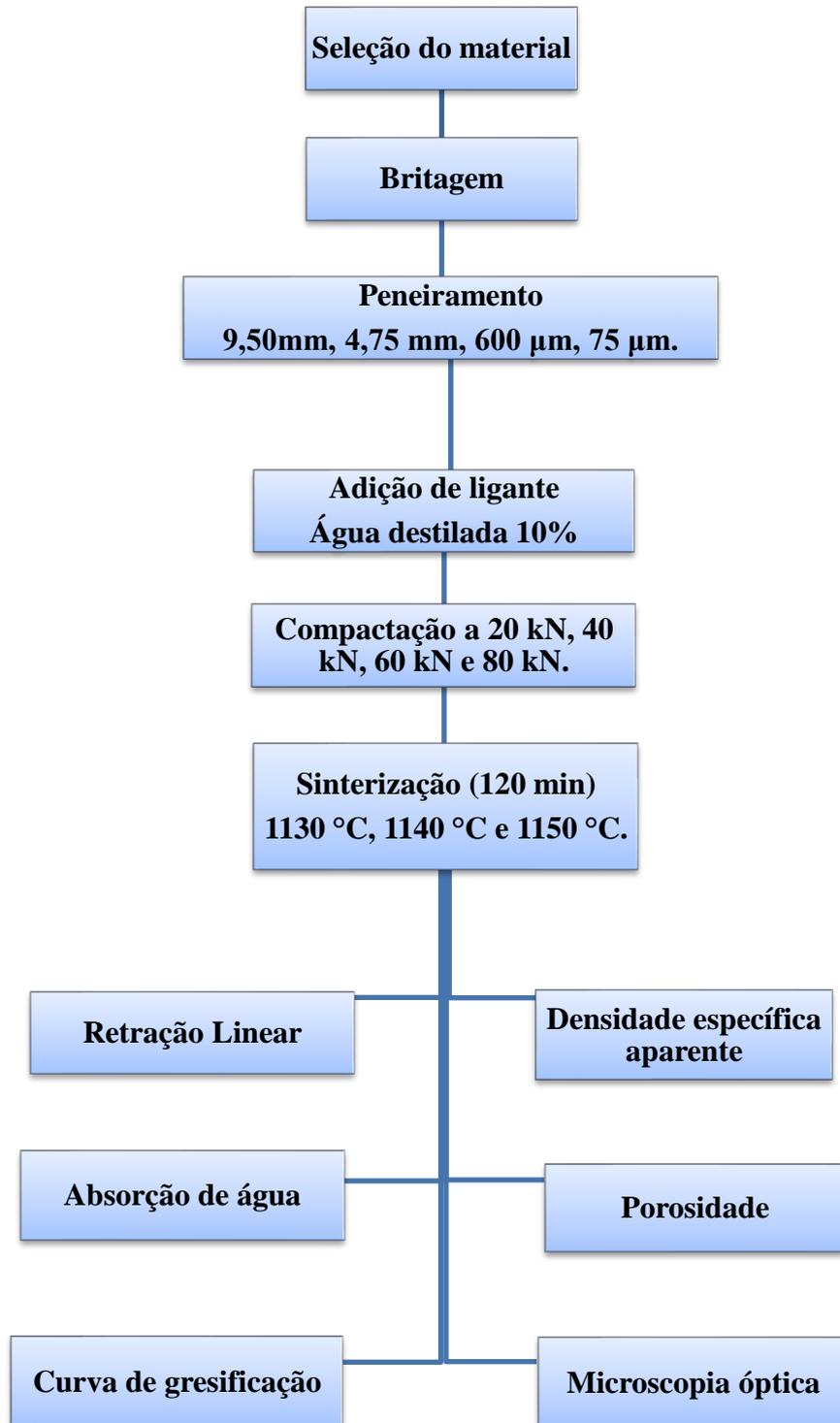
3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas as etapas metodológicas utilizadas na confecção dos corpos de prova cerâmicos e seus métodos de caracterização.

3.1 Metodologia

A figura 6 ilustra um fluxograma da metodologia experimental do estudo.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia experimental.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

3.2 Fabricação dos corpos de prova

3.2.1 Coleta e britagem do material

O material utilizado para esse estudo foi gentilmente fornecido pela empresa W C Mármores e Granitos, localizado na cidade de Russas, no interior do Estado do Ceará. O rejeito do granito presente nesse trabalho de pesquisa é conhecido comercialmente de granito verde Ubatuba.

O rejeito coletado não apresentava tamanho adequado para sua utilização como pó, sendo necessário a redução do tamanho das suas partículas. Foi inicialmente feita a quebra dos blocos para um tamanho médio de 40 mm. Posteriormente, foram sujeitos ao processo de trituração, reduzindo-os para um diâmetro médio de 4 mm. Esse processo foi feito no Laboratório de Materiais de Construção na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, em Fortaleza.

A figura 7 ilustra o rejeito no tamanho em que foi coletado, após a etapa de quebra dos torrões ou blocos e após o processo de trituração com o uso de um britador de mandíbulas.

Figura 7 – (a) Rejeito coletado no tamanho inicial. (b) Rejeito coletado após primeira etapa de quebra. (c) Rejeito triturado.

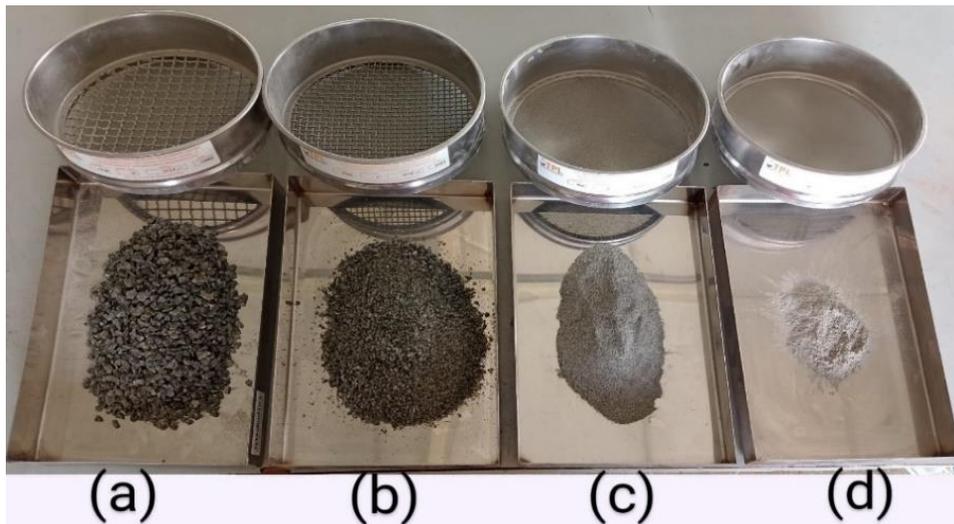


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.2 Granulometria

Após o processo de trituração, o material foi submetido à separação por granulometria, que trata-se do peneiramento a seco do rejeito em conjuntos de peneiras compostas por malhas de 9,50 mm, 4,75 mm, 600 μm e 75 μm , conforme a figura 8 ilustra.

Figura 8 – Análise granulométrica de peneiras compostas por malhas de: (a) Peneira 9,50 mm. (b) Peneira 4,75 mm. (c) Peneira 600 μm . (d) Peneira 75 μm .



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.3 Pesagem do material

Para a confecção dos corpos de prova, cada uma das amostras foram pesadas numa balança analítica, como ilustrado na figura 9, obtendo em média 10 g de pó do granito.

Figura 9 – Balança de precisão



Fonte: Lima (2021).

3.2.4 Compactação dos corpos de prova

Após o processo de pesagem, foi adicionado ao material 1 ml de água destilada como ligante. Com a adição do ligante, a pasta foi misturada manualmente até atingir homogeneização e uniformidade da umidade em todo o volume.

Posteriormente, foram preparados corpos de prova submetidos a pressão uniaxial utilizando uma matriz de aço de seção circular com diâmetro interno de 25 mm aproximadamente, assim ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Matriz metálica para compactação das peças cerâmicas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para o processo de compactação se fez uso da máquina de ensaio universal, da marca EMIC de capacidade 300 KN, como ilustrado na figura 11, máquina esta presente no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, campus Russas, a uma velocidade de 2 mm por minuto. As cargas utilizadas estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Cargas utilizadas e pressões geradas

Cargas	Pressão gerada
20 KN	40,64 MPa
40 KN	81,53 MPa
60 KN	122,29 MPa
80 KN	163,05 MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

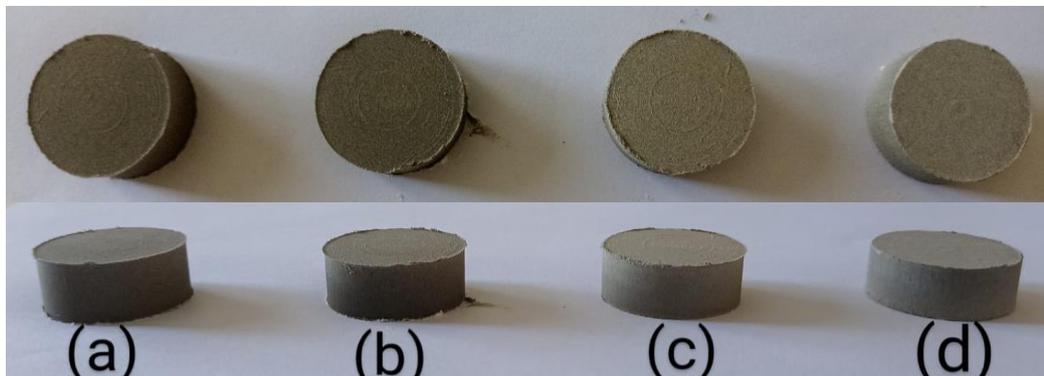
Figura 11 – Máquina de ensaio universal EMIC.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por fim, as amostras foram compactadas em formato cilíndrico com altura média de 11 mm, produzindo os “compactados verdes”, como ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Peças verdes compactadas com cargas de: a) 20 KN, b) 40 KN, c) 60 KN e d) 80 KN.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2.5 Sinterização dos corpos de prova

O processo de sinterização foi realizado em forno elétrico Linn Elektro Therm, como ilustra a figura 13, no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, campus Russas. Os corpos de prova foram sinterizados em três etapas: a primeira remessa com 20 unidades atingiu temperatura de 1130 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min, a segunda remessa atingiu temperatura de 1140 °C e a terceira e última remessa atingiu

temperatura de 1150 °C, ambos com o tempo de permanência no grau de sinterização de 120 minutos e desaquecimento lento da mufla para evitar possíveis fraturas nas peças.

Figura 13 – Mufla elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A tabela 2 apresenta a distribuição de corpos de prova que foram utilizados e avaliados de acordo com a pressão de compactação e temperatura de sinterização.

Tabela 2 – Quantidade de corpos de provas utilizados para o processo de sinterização.

Identificação	Temperatura de sinterização	20 kN	40 kN	60 kN	80 kN
		A	1130 °C	5	5
B	1140 °C	5	5	5	5
C	1150 °C	5	5	5	5

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

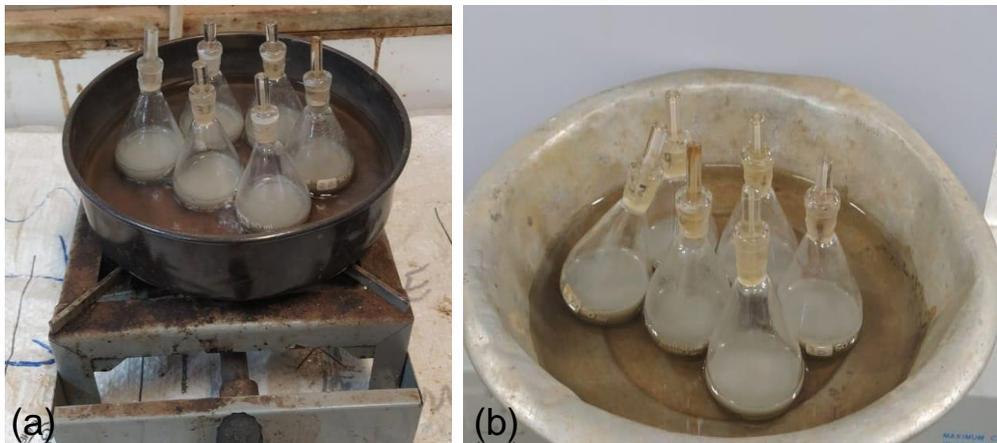
3.3 Caracterização física

3.3.1 Densidade real do grão solto

O procedimento para determinação da densidade real dos grãos segue as indicações da norma técnica do DNER-ME 093/094, realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará, campus do Pici. Para o ensaio, utilizou-se picnômetro com capacidade de 50 ml, com pesagens do material na balança analítica.

O procedimento do ensaio consiste em inserir as amostras na estufa a 110° C até o peso se manter constante. O primeiro passo consiste em pesar o picnômetro vazio, apresentando o valor de P_1 . O segundo passo consiste em pesar 10 g da amostra dentro do picnômetro, pesando novamente e apresentando o valor de P_2 . Em seguida é adicionado água destilada no picnômetro até cobrir a amostra e levado ao fogo, deixando ferver meia hora para expulsar todo o ar existente entre as partículas, sendo resfriado lentamente até atingir temperatura ambiente, como ilustra a figura 14.

Figura 14 – a) Picnômetros no processo de fervura; b) Picnômetros no processo de resfriamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O terceiro passo consiste em encher o picnômetro que possui a amostra, de água destilada e pesá-lo, apresentando o valor de P_3 . Por fim, o último e quarto passo consta em descartar toda amostra do picnômetro, lavar o frasco e enchê-lo de água destilada, pesando novamente o conjunto e alcançando o valor de P_4 . Dessa forma, com os quatro valores é possível obter a densidade real, de acordo com a 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 do ensaio é considerado eficaz quando o valor alcançado pelas amostras não ultrapassa 0,009. Sendo necessário fazer fator de correção de temperatura, com referência a temperatura de 20 °C que se ajusta de acordo com 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).

3.3.2 Retração Linear

O ensaio de retração linear determina a variação dimensional da amostra prensada (moldada por compressão), que ocorre após a sinterização da mesma. Neste trabalho foi avaliada a retração linear das peças nas temperaturas 1130 °C, 1140 °C e 1150 °C.

A determinação dos valores foi baseada na norma 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).

3.3.3 Absorção de água

O procedimento do ensaio para a determinação da absorção de água consiste em inserir os corpos de prova dentro da estufa a 110 °C por 24 horas e logo em seguida pesa-los, como ilustra a figura 15. Após essa etapa os corpos de prova foram submersos em água destilada por 24 horas. Depois desse procedimento, foram enxutos com ajuda de uma flanela e pesados novamente para apresentar sua massa úmida.

Figura 15 – Estufa de secagem



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A determinação dos valores foi baseada na norma NBR 15270-3, como mostra na equação 4.

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

Onde:

AA(%) = absorção de água percentual;

M_u = massa úmida do corpo (g);

M_s = massa seca do corpo (g).

3.3.4 Densidade específica aparente das peças sinterizadas

Para a determinação da densidade específica aparente, os corpos de prova depois de sinterizados foram pesados em uma balança analítica, resultando na sua massa, e com ajuda de um paquímetro digital foram realizadas as medições das dimensões e calculado seus volumes. Sendo utilizado a equação 5, para calcular esses valores.

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

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).

3.3.5 Porosidade aparente

Para determinação da porosidade aparente, foram necessárias as medidas obtidas no ensaio de densidade real dos grãos e densidade específica aparente, como calculado pela 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.

3.3.6 Microscopia Óptica

O procedimento da determinação das micrografias foi realizado por meio do microscópio óptico Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2 no laboratório de microscopia da Universidade Federal do Ceará, campus Russas, como ilustra a figura 16.

Figura 16 – Microscópio óptico Olympus GX41 com iluminador LG-PS2.



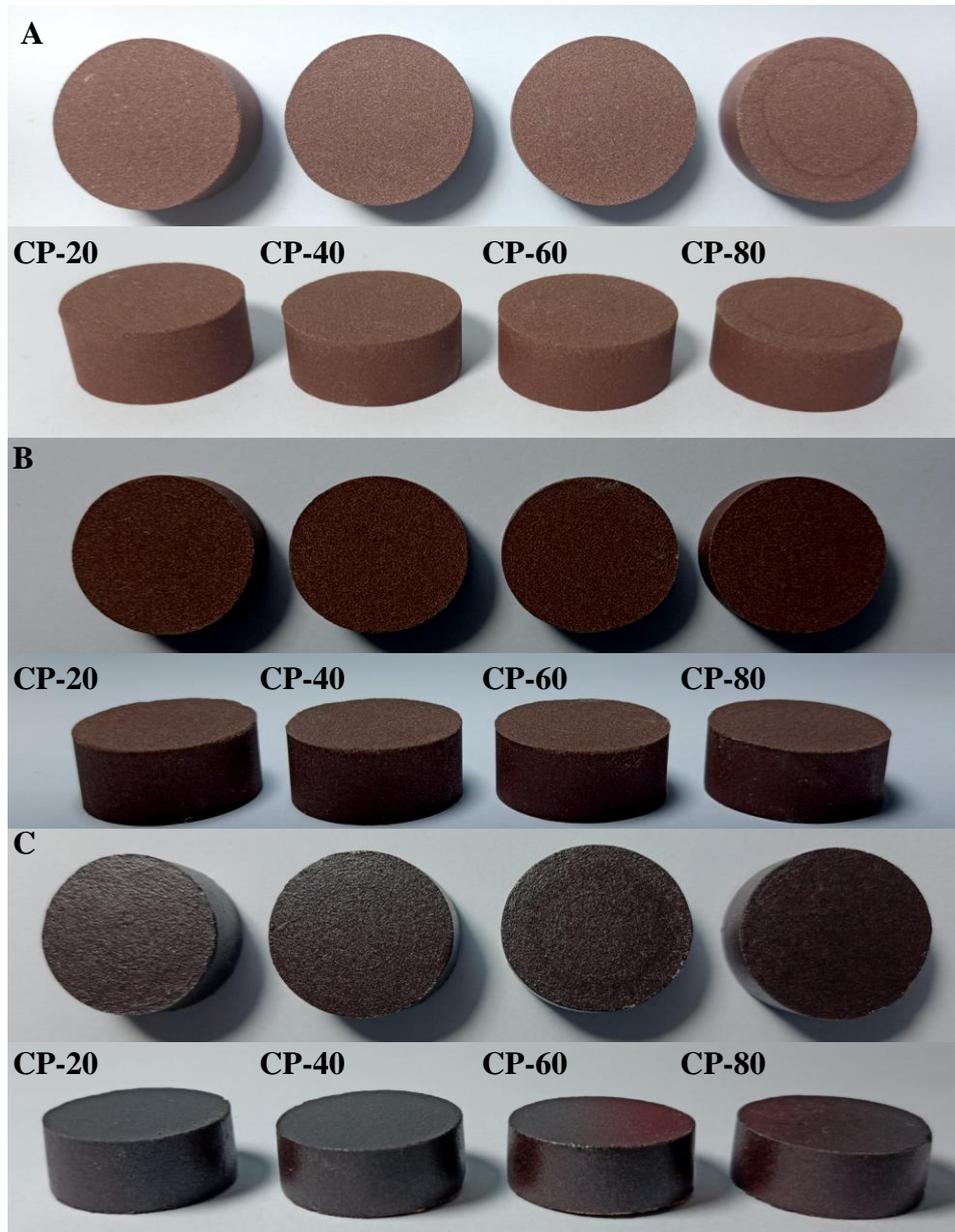
Fonte: Miranda (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise visual da sinterização

Para uma melhor análise dos resultados, foram fabricados três lotes de corpos de provas e colocados sob processo de sinterização com temperaturas de 1130 °C, 1140 °C e 1150 °C, como apresenta a figura 17.

Figura 17 – Peças sinterizadas a temperatura de A – 1130 °C, B – 1140 °C, C – 1140 °C e carga de compactação dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Com o aumento da temperatura de sinterização a cada lote fabricado, resultou em: aumento no brilho em toda dimensão do corpo de prova e tendência de arredondamento das bordas. Esses fenômenos podem ter ocorrido devido a vitrificação na dimensão da peça, resultado da gradual transformação da estrutura cristalina da albíta em fase vítrea (CABRAL, 2009).

Além disso, pode-se visualizar que as cores vão se tornando mais intensas e escuras com o aumento da temperatura. À temperatura de 1130 °C tem como resultado uma tonalidade de marrom claro e superfície fosca. À temperatura de 1140 °C apresenta uma coloração de marrom bem escuro. À temperatura de 1150 °C também apresenta em sua coloração um marrom bem intenso, mas com uma superfície brilhosa e os cantos da peça rapidamente arredondados.

Segundo Teixeira *et al.* (2012) a coloração se dá pela presença de óxidos corantes em sua formulação, que com o aumento da temperatura no processo de sinterização dar espaço a uma cor mais escura, o marrom.

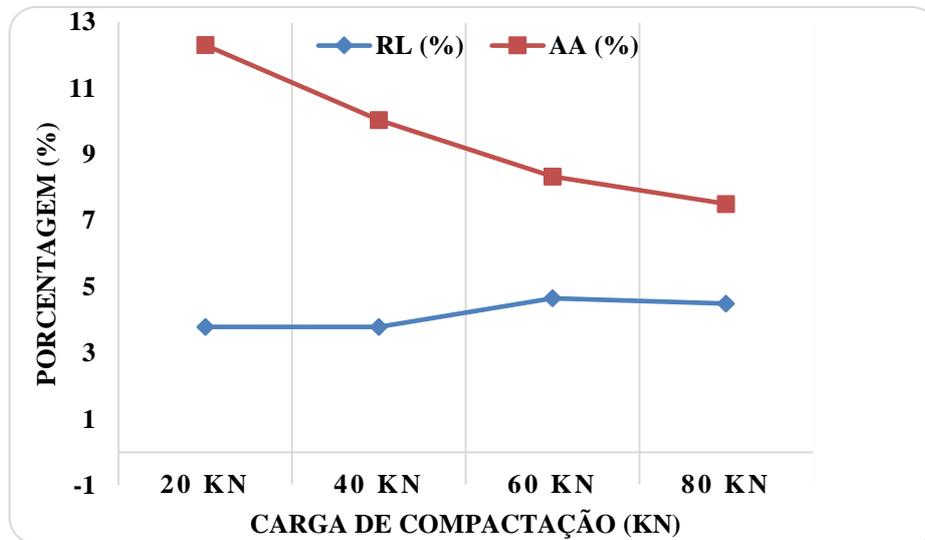
4.2 Análise das propriedades físicas

4.2.1 Curva de Gresificação

A curva de gresificação é a representação gráfica simultânea das variações da retração linear (RL) e absorção de água (AA) da peça com a temperatura de sinterização. Logo, foram feitas análises de retração linear e absorção de água nos corpos de provas sinterizados a 1130 °C, 1140 °C e 1150 °C.

Na temperatura de 1130 °C, a partir da curva de gresificação (gráfico 1) demonstrou um comportamento esperado, ou seja, quanto maior é a retração linear, menor será a absorção de água.

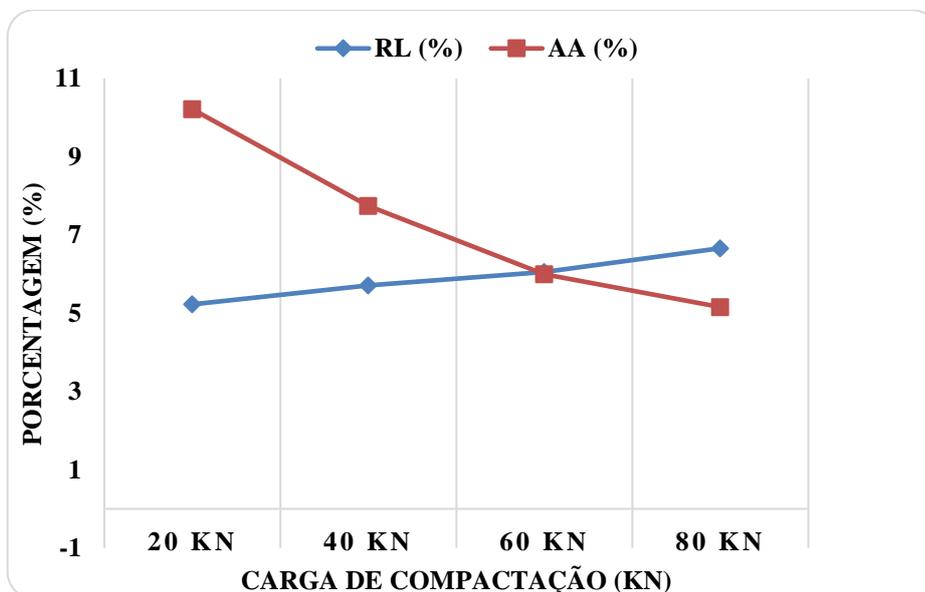
Gráfico 1 – Curva de Gresificação da sinterização a 1130 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

À temperatura de 1140 °C, a partir da curva de gresificação (gráfico 2), assim como na temperatura de 1130 °C, também apresentou um comportamento esperado, ou seja, uma tendência de aumento na retração linear e menor absorção de água.

Gráfico 2 – Curva de Gresificação da sinterização a 1140 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

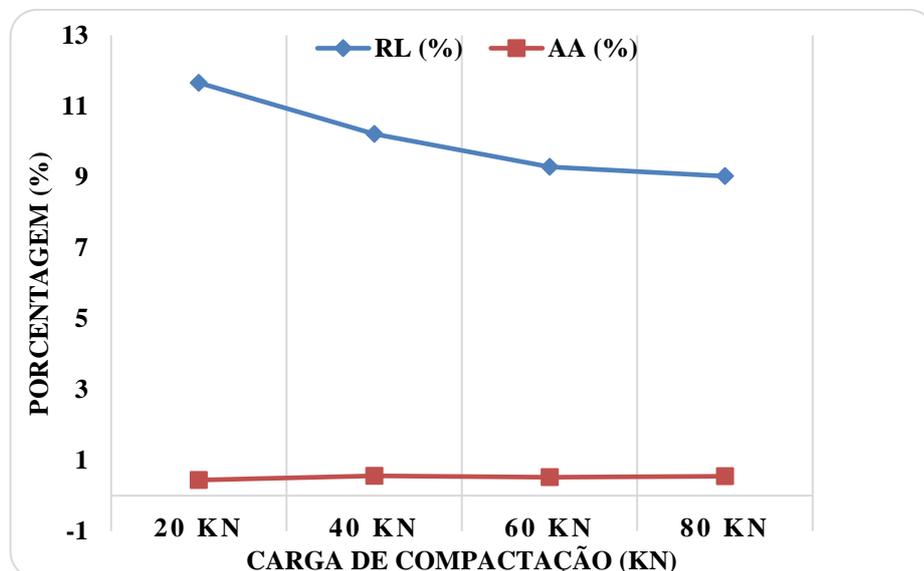
Percebe-se nessa temperatura as maiores retrações lineares ocorrem na ordem crescente de carga de compactação, obtendo os resultados de 5,23% para carga de 20 kN, 5,71% para carga de 40 kN, 6,05% para carga de 60 kN e 6,66% para carga de 80 kN.

Esse comportamento está relacionado, ao aumento da fase líquida que preenche os poros abertos, provocando um melhor empacotamento das partículas, resultando em retração dos corpos à medida que se aumenta a temperatura de sinterização (CABRAL, 2009).

Na temperatura de 1150 °C percebe-se valores altos de retração linear o que se deve, provavelmente, a uma maior sinterização das peças. Porém, estes volumes diminuem com o aumento da carga de compactação, com valores de 11,66% para carga de 20 kN, 10,21% para carga de 40 kN, 9,28% para carga de 60 kN e 9,02% para carga de 80 kN.

Já a análise de absorção de água é bem menor, o que dá uma ideia de material mais denso. O gráfico 3 mostra os resultados obtidos a temperatura de sinterização de 1150 °C.

Gráfico 3 – Curva de Gresificação da sinterização a 1150 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.2 Porosidade aparente

4.2.2.1 Densidade real do grão solto

Para a determinação da densidade real do pó do granito Verde Ubatuba, foi feito ensaio em laboratório para as análises das propriedades físicas. Os valores obtidos na determinação da densidade real estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Densidade real dos grãos do pó de granito, correção a 21°C e K20 0,9998.

AMOSTRA	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	δ	$\Delta\delta$	δ	K20	$\delta -20^\circ$
1	29,22	39,21	85,91	79,70	2,643				
	40,80	51,00	98,23	91,23	2,615	0,028	ERRO	0,9998	#####
	41,67	51,74	98,23	91,23	3,280				
2	40,17	50,22	96,12	89,53	2,905				
	44,64	54,84	101,96	95,27	2,906	0,001	2,91	0,9998	2,90
	40,53	50,66	98,77	92,23	2,822				

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analisando a tabela percebe-se que a amostra 1 obteve o valor $\Delta\delta$ maior que 0,009, sendo descartado e feito um novo ensaio com uma segunda tentativa que resultou em um $\Delta\delta = 0,001$ estando dentro do admissível pela norma utilizada, sendo assim, considerado satisfatório para determinar a densidade real dos grãos. De acordo com os cálculos a densidade real dos grãos soltos do pó do granito verde Ubatuba é de 2,90 g/cm³.

4.2.2.2 Densidade específica aparente das peças sinterizadas

Para a determinação da densidade específica aparente das peças sinterizadas, houve uma comparação de altura e diâmetro dos corpos de prova após a sinterização, através da fórmula de volume de um cilindro, resultando no valor do volume aparente dos CP. Valores necessários que, juntamente com as massas dos CPs, obtiveram os resultados de densidade específica aparente apresentados na tabela 4.

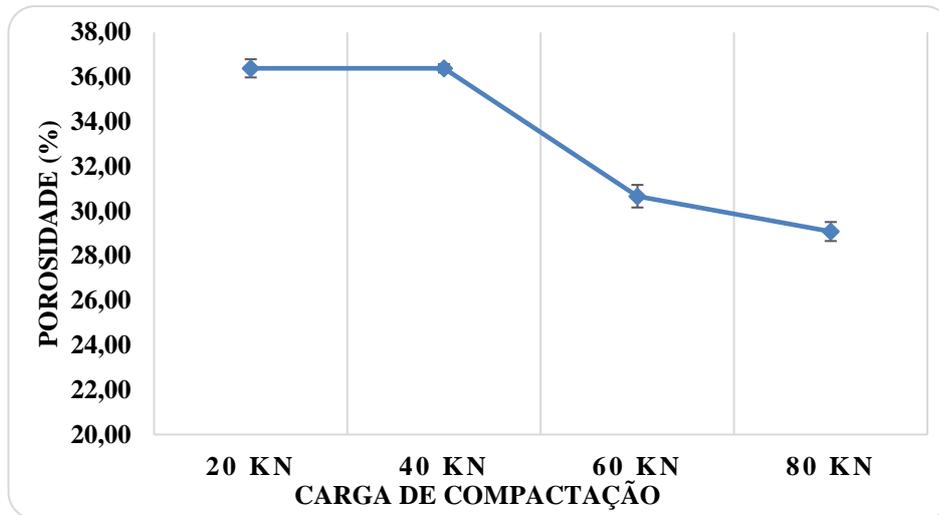
Tabela 4 – Densidade específica aparente dos grãos do pó de granito sinterizado a 1130°C, 1140°C e 1150°C.

Carga de Compactação	1130 °C		1140 °C		1150 °C	
	Média (g/cm ³)	SD	Média (g/cm ³)	SD	Média (g/cm ³)	SD
20 KN	1,84	0,0118	1,93	0,0087	2,36	0,0133
40 KN	1,95	0,0073	2,03	0,0100	2,33	0,0134
60 KN	2,01	0,0147	2,11	0,0820	2,33	0,0294
80 KN	2,06	0,0123	2,14	0,0296	2,33	0,0053

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para determinar o grau de porosidade dos corpos de prova, utilizou-se como base de dados a densidade real dos grãos e da densidade específica aparente, tabela 3 e 4, respectivamente. O gráfico 4 mostra os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas à 1130 °C.

Gráfico 4 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1130 °C.

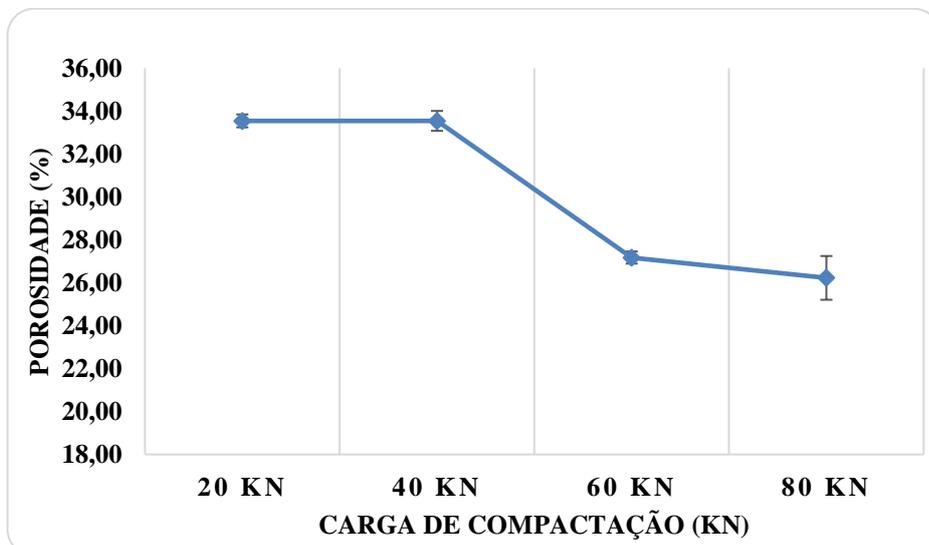


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Percebe-se que para essa temperatura que a pressão de compactação influencia no grau de porosidade, pois a porosidade diminui à medida que a carga de compactação aumenta. As cargas de 60 kN e 80 kN apresentam menor porosidade que as de 20 kN e 40 kN. Podendo afirmar que para esse tipo de material e temperatura de sinterização é preferível compactar com a carga de 60 kN, pois necessitaria de menos esforços para obter um valor de porosidade similar com a carga seguinte.

No gráfico 5 estão apresentados os valores do percentual de porosidade das peças sinterizadas a 1140 °C. Percebe-se um comportamento semelhante a temperatura de 1130 °C, apresentando menor porosidade à medida que a carga de compactação vai aumentando.

Gráfico 5 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1140 °C.

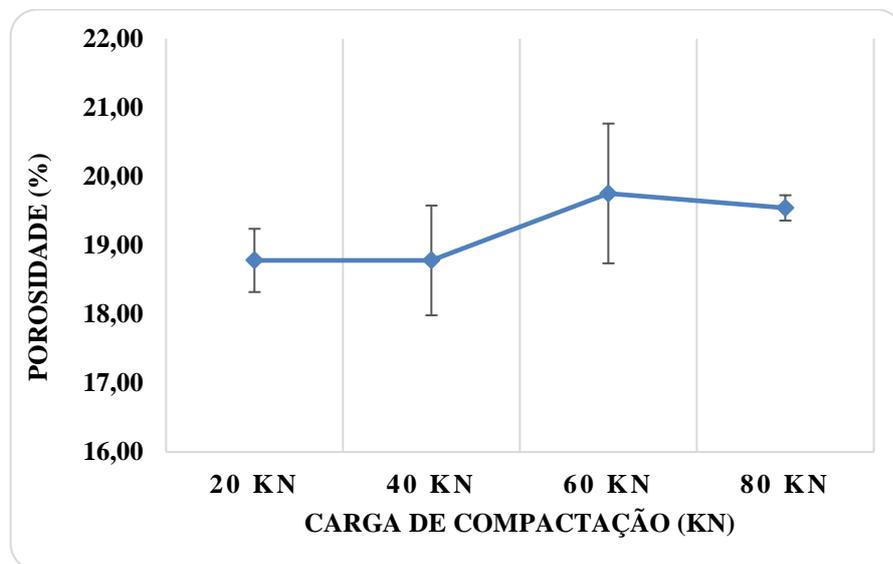


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No gráfico 6, é possível perceber que para essa temperatura a pressão de compactação não interfere significativamente no grau de porosidade, pois todas as amplitudes interceptam entre si. Isto significa que o material atingiu o grau de saturação da compactação e eliminação dos poros em menores esforços e menor energia.

À temperatura de 1150 °C, a carga de compactação é indiferente no resultado, podendo-se escolher a menor carga de compactação de processamento, gerando assim, menor consumo de energia e custo de fabricação dos corpos de prova.

Gráfico 6 – Determinação da porosidade (%) das peças sinterizadas a 1150 °C.

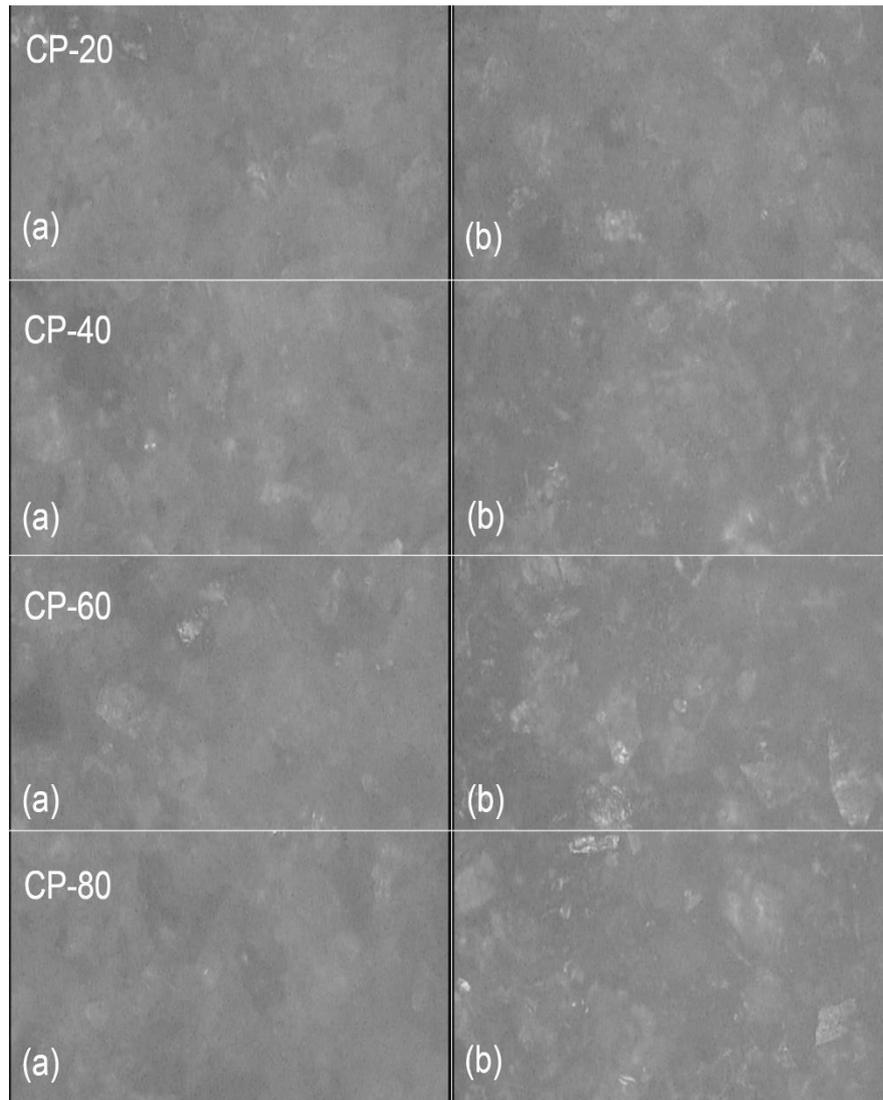


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.3 Microscopia Óptica

Os corpos de prova em análise eram foscos, amorfos e maciços, logo as imagens obtidas não tiveram resolução nítida. Nas fotomicrografias da figura 18 tiveram como objetivo uma ampliação de 200 vezes.

Figura 18 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1130 °C.



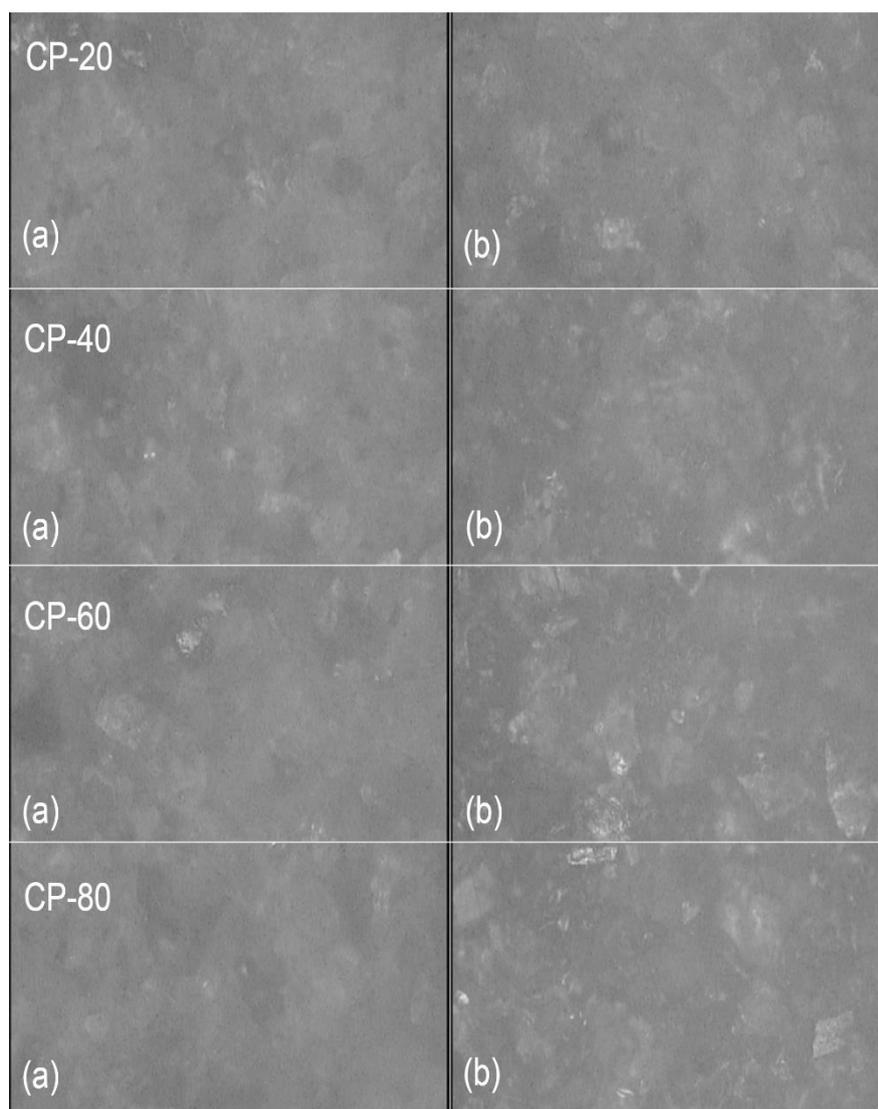
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para uma maior compreensão do comportamento das propriedades em função da variação de carga de compactação nas peças à verde e no aumento da temperatura de sinterização nas peças, foi feito o ensaio de microscopia óptica dos corpos de prova.

A figura 18 apresenta um comportamento semelhante entre as peças a verde (a) nos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80, onde mostra aparentemente a mesma quantidade de poros. Já nas peças sinterizadas (b) têm-se um aumento dos grãos.

A figura 19 apresenta as análises feitas nos corpos de prova sinterizados a 1140 °C.

Figura 19 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1140 °C.

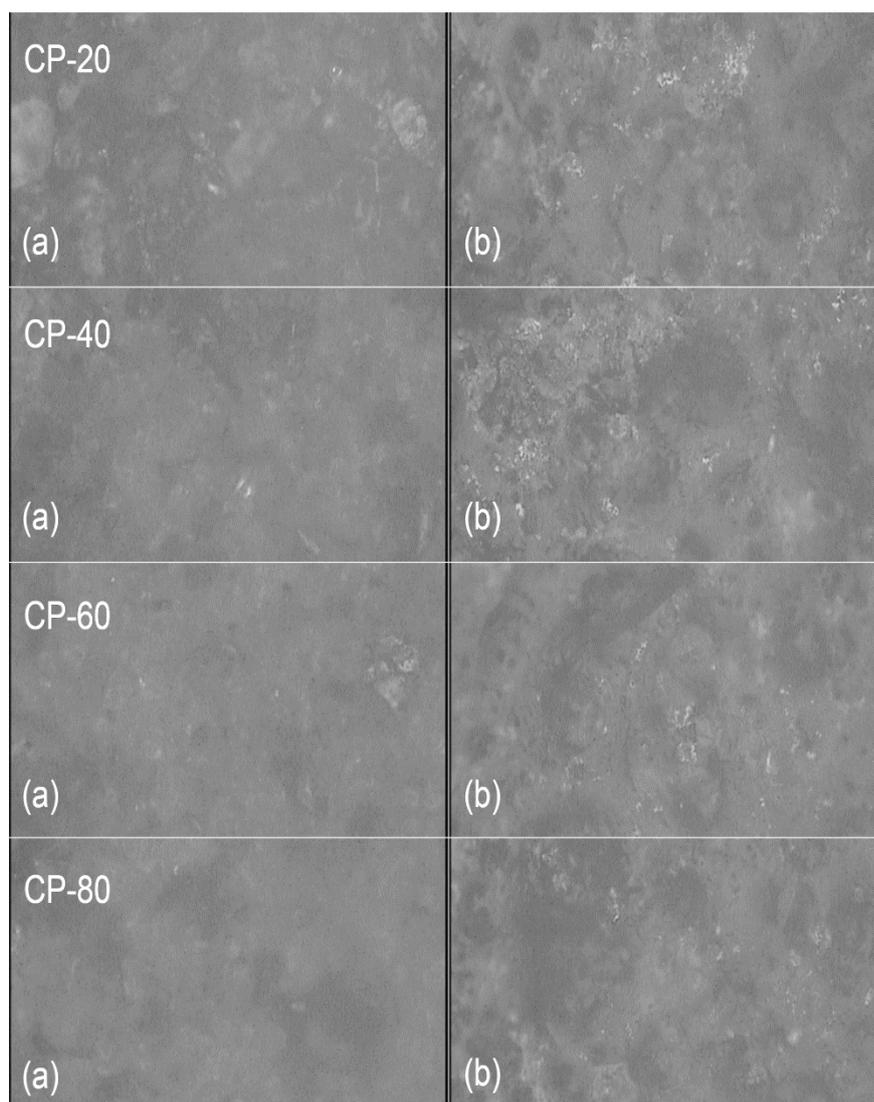


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Percebe-se a mesma semelhança entre as peças a verde (a). Já nas peças sinterizadas (b) houve aumento dos grãos. Comportamento semelhante à das peças sinterizadas a 1130 °C.

A figura 20 mostra as análises feitas nos corpos de prova sinterizados a 1150 °C.

Figura 20 – Micrografias ópticas dos CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80: a) Verde; b) Sinterizado a 1150 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A figura 20 apresenta o mesmo comportamento das peças a verde (a). Já das peças sinterizadas (b) percebe-se uma maior uniformidade na redução dos tamanhos dos poros. Isso se dá pela formação da fase líquida de partículas argilosas que preenchem os poros, ocorrendo a vitrificação (MIRANDA, 2021).

De modo geral, foi possível visualizar o contorno dos grãos nas peças verdes (a) entre as diferentes cargas de compactação, sendo verificada interface entre os grãos antes de ocorrer a difusão das partículas por meio da sinterização. Enquanto que nas peças sinterizadas (b) é verificada a presença de poros pelas regiões escuras das micrografias, cujas partículas fundentes não foram capazes de preencher os vazios nas condições executadas no ensaio.

5 CONCLUSÕES

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

Os corpos de prova submetidos à temperatura de 1130 °C apresentaram baixa sinterização sendo apresentados com uma coloração mais clara e aspecto visual fosco. Na temperatura de 1140 °C apresenta-se uma coloração de marrom mais intenso. Já na temperatura de 1150 °C, observou-se um início da perda de estabilidade dimensional, com os cantos das peças levemente arredondados e o aspecto visual brilhoso.

A densidade real dos grãos soltos do pó do granito verde Ubatuba, através de ensaio laboratorial é de 2,90 g/cm³. Já a densidade específica aparente dos corpos de prova sinterizados à temperatura de 1130 °C é a) 1,84 g/cm³, b) 1,95 g/cm³, c) 2,01 g/cm³ e d) 2,06 g/cm³. À temperatura de 1140 °C a densidade específica aparente foi a) 1,93 g/cm³, b) 2,03 g/cm³, c) 2,11 g/cm³ e d) 2,14 g/cm³. E a densidade específica aparente da temperatura de 1150 °C é a) 2,36 g/cm³, b) 2,33 g/cm³, c) 2,33 g/cm³ e d) 2,33 g/cm³. Assim, observou-se que os corpos de prova apresentam variação de densidade devido ao aumento da carga de compactação.

Para a análise da porosidade utilizou-se como base dados a densidade real dos grãos e a densidade específica aparente, demonstrando que as temperaturas de 1130 °C e 1140 °C necessitaram de mais energia de compactação para que houvesse uma diminuição da porosidade. Já à temperatura de 1150 °C mostra que o material atingiu uma boa sinterização e grau de saturação da porosidade, diminuindo os poros a menores esforços de compactação e utilizando menos energia.

A curva de gresificação mostrou que as temperaturas de 1130 °C e 1140 °C a pressão de compactação influenciou na sua curva. Já a de 1150 °C não houve essa influência na pressão de compactação.

Para os corpos de provas sinterizados à temperatura de 1130 °C e 1140 °C não houve um resultado satisfatório a nível de redução da porosidade, a curva de gresificação se comportou de maneira esperada, ou seja, quanto maior a retração linear, menos será sua absorção de água. Já a curva de gresificação à temperatura de 1150 °C a retração linear e absorção de água se mantiveram em patamares constantes, ou seja, houve uma saturação.

6 REFERÊNCIAS

- ABIROCHAS, Associação brasileira de indústria de rochas ornamentais. **Guia de aplicação de rochas em revestimento**. 2009. São Paulo, 2009.
- ABIROCHAS, Associação brasileira de indústria de rochas ornamentais. **Guia de aplicação de rochas em revestimento**. 2020. Brasília, 2020.
- ABIROCHAS, Associação brasileira de indústria de rochas ornamentais. **Balanco das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de revestimento no 1º trimestre de 2022**. 2022. Brasília, 2022.
- ALVES, Joner Oliveira; JUNCA, Eduardo; ESPINOSA, Denise Croce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. **Resíduo do corte do granito: inovação tecnológica para a destinação final**. São Paulo, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. ISSN – 0366-6913, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 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 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**, 2004.
- 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.
- BATISTA, Marcelo Lopes. **Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável**, 2022.
- BABISK, Michelle Pereira. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcios a partir de resíduos de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.
- CABRAL, Daniel Henrique Pires. **Uso de rejeitos do granito rain forest para a produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará.
- CAMPOS, Antonio 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. Anais: CETEM 2009 – XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste & VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Fortaleza-CE, 2009.

CRUZ, André Luiz Marcelo da. **A reciclagem dos resíduos sólidos urbanor: um estudo de caso.** 2002. 157f. Dissertação (mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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

DIAS, João Alveirinho. **A análise sedimentar e o conhecimentos dos sistemas marinhos.** 2004.

GOMES, Eduardo Rovaris. **Estudo da compactação uniaxial de pós e sua influência na variação de densidade de materiais compósitos particulados de matriz fenólica aplicados como materiais de fricção.** 2009. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LEE, W. E. **Ceramic Microstructures.** 4 ed. United Kingdom: Champman and Hall, 1994.

LIMA, Samille Kricia **Bezerra de. Reaproveitamento de cinzas de madeira para a produção de cerâmica vermelha e estudo das propriedades mecânicas e tecnológicas pós sinterização.** 2021. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

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 fiação a rotor na indústria têxtil.** 2009. 83f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará.

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

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

MELCHIORS, Gilberto. **Caracterização de compósito Nb-20% Cu obtidos por moagem de alta energia e sinterização por fase líquida.** 2011. 39f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MIRANDA, Ana Carolina Braga. **Estudo das propriedades físicas do pó do granito corumbá em função dos parâmetros de fabricação por metalurgia do pó.** 2021. 60f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

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

RAMIREZ, Beatriz. **Granito Verde Ubatuba: vantagens, desvantagens e preço do m²**. Disponível em: <<https://casaefesta.com/granito-verde-ubatuba/>>. Acesso em 19 de maio 2022.

REGIS, Rafaella Cavalcante. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de peças sinterizadas de granito corumbá produzidas por metalurgia do pó**. 2021. 61f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

RODRIGUEZ, Adriana Marin; PIANARO, Sidnei Antônio; BERG, Egon Antônio Torres; SANTOS, Alessandro Hilário dos. **Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grês porcelanato**. Ponta Grossa, 2004.

SILVA, Angelus Giuseppe Pereira da; JÚNIOR, Clodomiro Alves. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização**. 1998.

SOUZA, Marco Antônio de. **Estudo do processo de sinterização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar por forno resistivo e de vitrificação por combustão de gás natural assistido por tocha de plasma tipo arco deslizante**. 2014. 68f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais e Catálise) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2014.

SOSSAI, Fabiano Jerônimo Moreira. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais**. 2006. 101f. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

SUDÉRIO, Vilma Maria. **Estudo do processamento de laminação na fabricação de placas cerâmicas em comparação com outros métodos convencionais**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

STROHER, Ana Paula; KATO, Daniel Seiji; YAMAGUCHI, Natália Ueda; JUNIOR, Osorio Moreira Couto. **Utilização da cerâmica de entulho na substituição de agregado graúdo do concreto**. *Cerâmica Industrial*, v. 22, n. 4, p. 34–46, 2017.

TEIXEIRA, André Luís; BORGES, Diane Carolina Mendes; SILVA, Josué dos Anjos da; FERREIRA, Natália Morona Machado; CARGNIN, Maykon. **Influência dos tipos de matérias-primas e das condições de queima na cor do suporte cerâmico**. 2012.

VILLASCHI FILHO, Arlindo; PINTO, Míriam de Magdala. **Arranjos produtivos e inovação localizada: o caso do segmento de rochas ornamentais no noroeste do Estado do Rio de Janeiro: nota técnica 16**. Rio de Janeiro, 2000. (Estudos Empíricos). Mimeografado. SECEX