

Influência das variáveis de processamento nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmicas à base de subproduto do granito Corumbá

Rafaella Cavalcante Regis ^{1*}, Cândido Jorge de Sousa Lobo ¹, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira ², Yara Amorim de Figueiredo ², Halisson de Souza Pinheiro ³

¹ Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Avenida Felipe Santiago 411, 62.900-000, Russas, Ceará, Brasil

² Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Av. Mister Hull s/n, 60.455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

³ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Campus das Auroras, Rua José Franco de Oliveira s/n, 62.790-970, Redenção, Ceará, Brasil.

*rafaellacavalcanter@gmail.com; +55 (85) 99917-3889

Resumo:

Este trabalho analisou as propriedades físicas e mecânicas de peças sinterizadas de rejeito do granito Corumbá, oriundo da indústria de rochas ornamentais, produzidas em diferentes cargas de compactação e patamares de sinterização. Os resíduos foram caracterizados por difração de raios X e fluorescência de raios X. Os corpos de prova foram compactados a 20, 40, 60 e 80 kN e sinterizados nas temperaturas de 1130, 1140, 1150 e 1200 °C. As amostras sinterizadas a 1140 °C apresentaram melhor vitrificação e menor perda de forma, sendo então adotada para realização dos ensaios subsequentes. As peças foram avaliadas quanto à variação volumétrica, porosidade, dureza Rockwell B e compressão diametral. Os resultados obtidos permitiram concluir que não houve variação estatisticamente significativa da dureza e compressão diametral com a variação da pressão de compactação, sendo estas vinculadas exclusivamente à temperatura de sinterização.

Palavras-chave: rocha ornamental; rejeito; Granito Corumbá; cerâmica; propriedades físicas e mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

A indústria das rochas ornamentais tem aumentado vertiginosamente ao longo dos anos. No âmbito mundial, este setor econômico progrediu de 1,8 milhão de toneladas por ano, na década de 1920, para um cenário atual de 145 milhões de toneladas por ano [1].

Estima-se que durante o ano de 2020, no Brasil, o setor de rochas ornamentais movimentou cerca de US\$ 987,4 milhões e foram produzidas 2,16 milhões de toneladas do produto. Os primeiros meses de 2020 foram marcados por um baixo desempenho motivado pela pandemia de Covid-19, entretanto, no segundo semestre do ano observou-se uma expressiva recuperação [2]. No ano de 2021 o setor de rochas ornamentais soma US\$ 1,34 bilhão e foram produzidas 2,40 milhões de toneladas do produto. Quando comparado ao ano de 2020, o faturamento teve aumento de 35,5% e 11,4% para o volume dessas exportações, evidenciando recordes históricos.

No entanto, simultâneo a esse crescimento decorre o acúmulo de subprodutos, muitas vezes descartados indevidamente no ambiente, proporcionando danos ambientais irreparáveis. De acordo com [3], os resíduos gerados nas marmorarias correspondem a aproximadamente 30% do total consumido. Quando avaliado esse percentual em concomitância aos dados do ABIROCHAS [2], com um consumo de rochas ornamentais no Brasil de 2,4 milhões de toneladas, pode-se sugerir que foram produzidos 0,72 milhão de toneladas de resíduos neste mesmo ano.

Esses rejeitos, na maioria das vezes ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), são depositados no ambiente em forma de lama abrasiva, pó, cacos, filetes ou retalhos, descartados em depósitos ou ainda aterrando os rios, podendo causar contaminação por lixiviação e outros processos [4].

O beneficiamento dessas rochas ornamentais gera toneladas de refugos, constituídos por fragmentos que quebram ou sobram durante o processamento. Impulsionado pela problemática ambiental da geração dos rejeitos e pela necessidade de encontrar alternativas para seu melhor aproveitamento, surge o interesse em desenvolver estudos para a reciclagem deste subproduto, de modo a oferecer o destino final adequado, minimizando os prejuízos da exploração, reduzindo, deste modo, os impactos ambientais [5]. Diversos estudos apontam algumas soluções possíveis para esse problema, envolvendo o reaproveitamento dos resíduos de granito no setor de material de construção civil e como substitutos das cerâmicas sintéticas [6-9].

Em face deste contexto, o estudo da aplicabilidade desses produtos contribui para a prática do desenvolvimento sustentável, além de permitir a formulação de novos materiais por análises da caracterização dos materiais e avaliação de propriedades físicas e mecânicas [10, 11].

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

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Material e caracterização

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

Foram utilizados retalhos de chapas nº 2 do granito Corumbá, e o material passou por britagem secundária em um britador de pequeno porte com o objetivo de obter partículas de ~10 mm. Para se ter a quantidade de amostra necessária, foi realizada moagem em moinho de disco orbital da fabricante Marconi, modelo MA 360, pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil I da Universidade Federal do Ceará do Campus Russas, por período suficiente para a redução das dimensões das partículas até atingir tamanho inferior a 200 mesh, cuja abertura da malha é de 75 μm .

A amostra foi submetida à análise química e mineralógica no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, por espectrometria de fluorescência de raios X, em um equipamento da Rigaku, modelo ZSX mini II e por difração de raios X usando um difratômetro do tipo Rigaku tendo como fonte de radiação $\text{K}\alpha$ do elemento Cobre (Cu), $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ operando com uma voltagem de 40 KV e uma corrente de 30 mA. A escala de varredura (em 2θ) utilizada foi de 20° a 100° , com uma velocidade de varredura de $0,02^\circ$ e tempo de medida de cada ponto de 1 s.

2.2. Métodos

Neste trabalho a água destilada foi utilizada como ligante na seguinte proporção: 1 mL de água para cada 10 g do pó do granito. Após a adição do ligante, a pasta foi misturada manualmente até a homogeneização e uniformidade da umidade em todo o volume, procurando obter uma mistura livre de aglomerados. Essa proporção foi definida com o objetivo de proporcionar uma suficiente resistência mecânica para o manuseio das peças e garantir sua integridade após a remoção da matriz. O pó foi peneirado em malha 200 mesh, misturado com água e homogeneizado manualmente.

Em seguida, foram preparados corpos de prova (discos) submetidos à compressão uniaxial utilizando uma matriz de aço de seção circular com diâmetro interno de aproximadamente 25 mm, sujeitos às cargas de compressão de 20, 40, 60 e 80 kN. A carga foi exercida por meio de uma máquina de ensaio universal EMIC com capacidade máxima de até 300 kN, presente no laboratório de Engenharia Mecânica da UFC Campus de Russas, a uma taxa de 2 mm por minuto, levando em consideração as observações da NBR 5739 (Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). Para cada carga foram compactados quatro corpos de prova para as seguintes pressões de compactação: 20 kN gerando uma pressão de aproximadamente 40,67 MPa, 40 kN gerando uma pressão de aproximadamente 81,53 MPa, 60 kN gerando uma pressão de aproximadamente 122,29 MPa e 80 kN gerando uma pressão de aproximadamente 163,05 MPa.

As amostras foram compactadas em formato cilíndrico com altura média de 11 mm. A Fig.1 apresenta uma peça moldada por compressão uniaxial em seu estado verde (peças produzidas após a compactação).

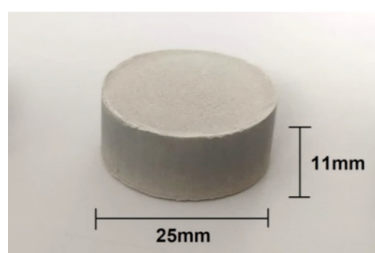


Figura 1: Peça a verde

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

O processo de sinterização foi realizado às temperaturas de 1130, 1140, 1150 e 1200 °C, em mufla elétrica, modelo Linn Elektro Therm, equipada com um sistema de controle de temperatura e tempo, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará, campus Russas. Os corpos de provas foram sinterizados a uma taxa de aquecimento de aproximadamente 5 °C/min e tempo de permanência de 120 minutos ao atingir as respectivas temperaturas (patamar de sinterização). Subsequente à sinterização, as amostras foram resfriadas naturalmente dentro do próprio forno até a temperatura ambiente.

A Tab.1 indica a quantidade de corpos de prova produzidos de acordo com as especificações da carga de compactação e temperatura de sinterização.

Tabela 1. Quantidade de corpos de prova para os testes de sinterização

Temperatura de sinterização	Carga de compactação			
	20 kN	40 kN	60 kN	80 kN
1130 °C	1	1	1	1
1140 °C	1	1	1	1
1150 °C	1	1	1	1
1200 °C	1	1	1	1

Após realizar a escolha da temperatura ótima de sinterização, foram produzidos 10 corpos de prova para cada carga de compactação nesta temperatura e passaram a ser denominados de CP-20 (corpos de prova compactados a 20 kN), CP-40 (corpos de prova compactados a 40 kN), CP-60 (corpos de prova compactados a 60 kN) e CP-80 (corpos de prova compactados a 80 kN).

O ensaio de variação volumétrica foi usado para avaliar a retração dimensional volumétrica dos corpos de prova após estes serem submetidos a algum processo de sinterização. Para garantir medidas precisas, o ensaio foi realizado com o auxílio de paquímetro digital calibrado, efetuando as medidas após a secagem em temperatura ambiente durante 48 horas e depois de submetidos à sinterização. O ensaio foi realizado em todas as peças (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) e calculado por:

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

onde VV é a variação volumétrica, V_o é o volume inicial do corpo de prova (verde) e V_f volume final do corpo de prova (após sinterização).

Para determinação do nível de porosidade do objeto de estudo, foi calculada inicialmente a densidade real dos grãos (equação 2) de acordo com a norma técnica do DNER-ME 093/94 [12], no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC e, para determinação da densidade específica aparente (DEA) utilizou-se como base a NBR ISO 10545-3 [13].

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} * 100 \quad (2)$$

onde D_t é a densidade real do solo à temperatura t , P_1 é a massa do picnômetro vazio e seco, em g, P_2 é a massa do picnômetro com amostra, em g, P_3 é a massa do picnômetro com amostra e água, em g, e P_4 é a massa do picnômetro com água, em g.

Em seguida, a porosidade de todas as peças (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80) foi calculada por:

$$PA(\%) = \frac{(1-DEA)}{D_t} * 100 \quad (3)$$

onde PA é a porosidade aparente expressa em percentual, D_t é a densidade real do grão e DEA é a densidade específica aparente das peças sinterizadas.

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado utilizando duas amostras referentes a cada característica estudada (CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80). As medidas dos ensaios foram feitas em um durômetro Sussen Wolpert, tipo Testor HT1, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará. A norma tomada como referência foi a ABNT NBR NM ISO 6508-1, Materiais metálicos: Ensaio de dureza [14]. Para a realização do ensaio de dureza Rockwell B foram feitas cerca de cinco indentações por amostra, o ensaio determina a resistência à penetração de um metal duro submetido a uma carga de 100 kgf e tempo de penetração de 10 s.

Tendo em vista que na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (American Society for Testing and Materials) não existe nenhuma norma que fundamente especificamente ensaios de compressão diametral em materiais cerâmicos, foi feita uma adaptação da norma NBR 7222:2010 (Argamassa e concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos) [15].

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

Considerou-se em todos os corpos de prova uma relação espessura/diâmetro (L/d) entre 0,2 e 0,5, atendendo à proporção estabelecida por Stanley [16].

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (4)$$

onde $f_{t,D}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, F é a carga máxima obtida no ensaio (kN), L é a espessura do corpo de prova (mm) e d é o diâmetro do corpo de prova (mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos materiais

A Tab. 2 apresenta os resultados da análise de fluorescência de raios X para o granito Corumbá, em percentual mássico, na forma de óxidos.

Tabela 2. Composição química do pó de granito Corumbá

Componentes	Massa (%)
SiO ₂	88,13
K ₂ O	6,37
Al ₂ O ₃	2,05
Na ₂ O	0,81
Fe ₂ O ₃	2,15
CaO	0,38

De acordo com a análise da Tab.1, observa-se que a matéria-prima é essencialmente constituída por SiO₂, K₂O, NaAlSi₃O₈, Fe₂O₃ e CaO, perfazendo 99,9%.

Os altos teores de SiO₂ obtidos são típicos de rochas ígneas graníticas. O SiO₂, associado à fase cristalina quartzo, atua como material não-plástico, favorecendo a trabalhabilidade da massa, diminuindo o tempo de secagem e a retração linear [17].

A presença do óxido de ferro (Fe₂O₃) é muito provavelmente a responsável pela cor marrom-avermelhada característica das peças após a sinterização. Os óxidos com essas propriedades são denominados de cromóforos [18].

Os óxidos alcalinos K₂O e Na₂O e alcalino-terroso CaO são os elementos que promovem a formação da fase líquida. A importância destes agentes fundentes na massa cerâmica está relacionada com sua capacidade de garantir o ponto de fusão em temperaturas mais baixas durante o processo de sinterização e auxiliar no fechamento da porosidade. A albita, Na(AlSi₃O₈), é um feldspato que também desempenha a função de fundente formadora da fase vítrea [19].

O difratograma de raios X da amostra de resíduo de granito estudado é mostrado na Fig.2. Verifica-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (COD 01-089-8951), microclínio (COD 00-001-0705), albita (COD 00-010-0357), hematita (COD 01-088-2359) e mica (COD 00-007-0330). Pode-se observar que para 2θ = 27,30° ocorre uma grande intensidade de pico relativo à fase albita. O pico de maior intensidade ocorre a aproximadamente 2θ = 30,60° relativo à fase quartzo, cujo resultado já era esperado por apresentar em sua composição grande percentual de SiO₂.

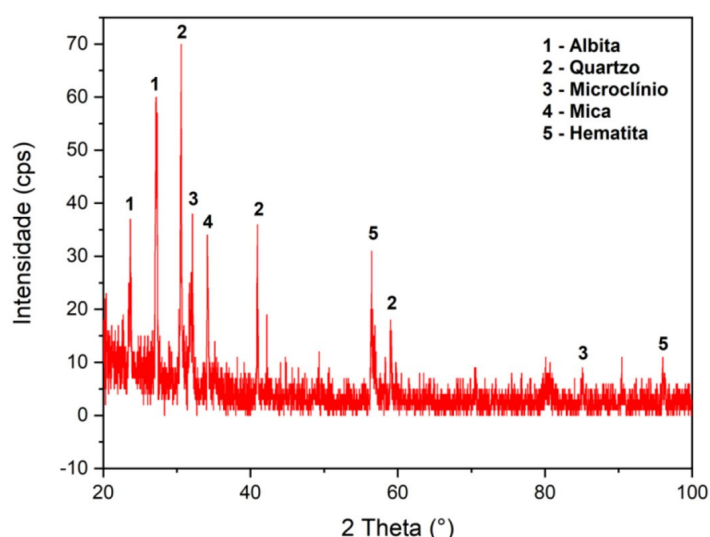


Figura 2. Difratograma de raios X da amostra do granito Corumbá.

3.2. Análise visual e temperatura ótima de sinterização

Foram testados corpos de provas de diferentes cargas de compactação (20, 40, 60 e 80 kN) a quatro temperaturas de sinterização: 1130, 1140, 1150 e 1200 °C, conforme Fig.3.

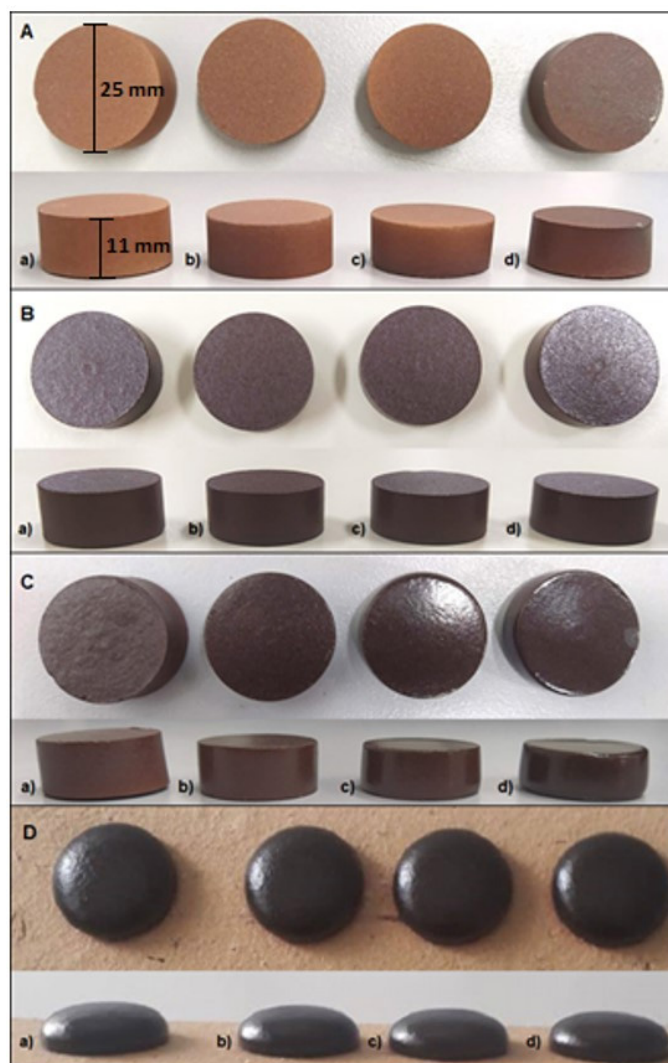


Figura 3. Peças sinterizadas à temperatura de A: 1130 °C, B: 1140 °C, C: 1150 °C, D: 1200 °C e carga de compactação a) 20 kN b) 40 kN, c) 60 kN e d) 80 kN

O aumento da temperatura de sinterização culminou em: aumento do brilho da superfície e tendência de arredondamento das bordas dos CP. Essas características podem ter sido ocasionadas pela vitrificação da superfície da peça, resultado da gradual transformação da estrutura cristalina da albita em fase vítrea e consequente fusão dos componentes.

Pode-se perceber que à medida que aumenta a temperatura a intensidade das cores mais escuras aumenta, chegando aos tons de marrom escuro, possivelmente devido à presença de óxidos corantes. De acordo com Roveri et al. [20] a 1000 °C inicia a liberação de Fe^{2+} , que por oxidação passa a Fe^{3+} responsável pela cor vermelha e, acima de 1100 °C, o Fe^{3+} começa a ser reduzido novamente, gerando a cor marrom avermelhada.

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

A Fig.4 exibe os grupos de corpos de prova sinterizados a 1140 °C, submetidos às cargas de compactação de 20, 40, 60 e 80 kN.

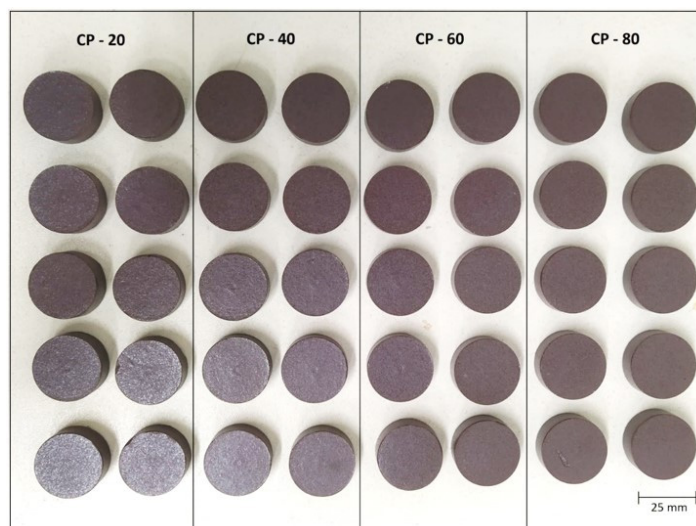


Figura 4. Corpos de prova sinterizados a 1140 °C

3.3. Propriedades físicas

A Fig.5 mostra os resultados do percentual da variação volumétrica dos CP com seus respectivos desvios padrão, em função da média dos volumes das peças verdes (V_0) e do volume pós-sinterização (V_f) das 10 amostras sinterizadas de cada carga de compactação.

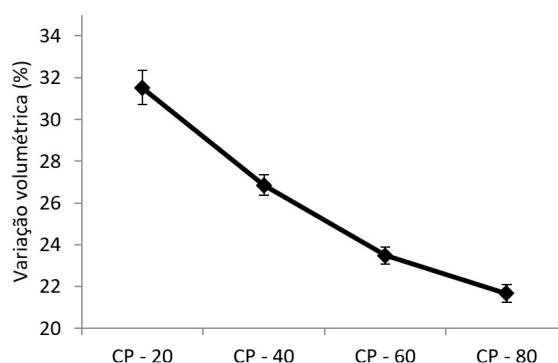


Figura 5. Variação volumétrica (%) das amostras a diferentes cargas de compactação

Observando a Fig.5 nota-se que há a tendência de diminuição da variação volumétrica à medida que aumenta a carga de compactação nas peças verdes, até chegarem ao patamar de saturação. Para menores cargas de compactação são necessários trabalhos adicionais para se obter o patamar de saturação de porosidade a temperaturas adequadas.

A Fig.6 indica a média dos volumes dos CPs verdes e pós-sinterização.

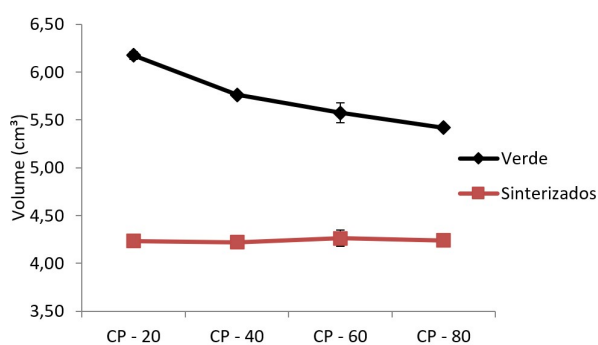


Figura 6. Volume das peças verdes e sinterizadas

Analisando a Fig.6 percebeu-se uma tendência de diminuição do volume nas peças verdes à medida que aumenta a carga de compactação. Porém, quando sinterizados, os corpos de prova atingem aproximadamente o mesmo volume final, apresentando densidade média de $2,35 \text{ g/cm}^3$ para todas as pressões. Esse fato pode estar associado à presença de óxidos fundentes na composição, o que favorece a densificação dos corpos de prova por processos de união das partículas e redução de porosidade que ocorrem por difusão dos átomos.

Além disso, a pouca umidade residual e a água destilada (ligante) utilizada durante a confecção dos corpos de prova foram perdidas logo no início da sinterização por possuir baixo ponto de ebulição (100°C), influenciando diretamente na variação volumétrica das amostras. Em função da presença de elementos fundentes a baixas temperaturas de ebulição, a fase vítrea líquida tende a preencher o volume dos poros deixados por esses elementos evaporados, provocando assim uma retração tridimensional da peça, reduzindo a porosidade e o volume da peça sinterizada.

Determinou-se que a densidade real dos grãos soltos do pó de granito Corumbá é de $2,73 \text{ g/cm}^3$. A densidade calculada está próxima dos valores disponíveis na literatura para o pó do granito, que corresponde em média a $2,67 \text{ g/cm}^3$ [21]. A Fig.7 mostra os resultados do percentual de porosidade das peças sinterizadas.

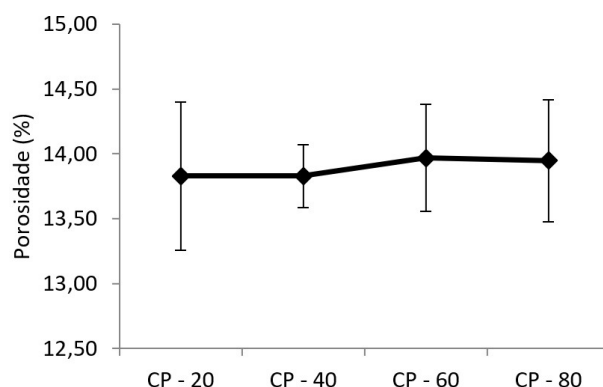


Figura 7. Determinação da porosidade (%)

Analisando a Fig.7 é possível perceber que, de modo geral, a pressão de compactação não interfere significativamente no grau de porosidade, pois as amplitudes do desvio padrão estabelecem um parâmetro concomitante entre as amostras. Isto significa que o material atinge o grau de saturação da compactação e eliminação dos poros a menores esforços e utilizando menos energia. Esta característica é desejável para materiais que demandem baixa absorção da estrutura, pois indica que quanto menor a pressão de compactação de processamento, menor será o consumo energético e, consequentemente, menor o custo de fabricação.

Este fato pode ser corroborado novamente tendo em vista os resultados da densidade média serem iguais independentemente da carga de compactação, apresentando desvio padrão de ordem de milésimos.

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

3.5. Propriedades mecânicas

A Fig.8 ilustra os resultados da dureza Rockwell B para as amostras CP-20, CP-40, CP-60 e CP-80 na temperatura de sinterização de 1140°C . Verifica-se que os valores de dureza obtidos para as amostras se mantiveram bem próximos mesmo com o aumento da pressão de compactação, o que sugere ainda a possível equivalência da resistência mecânica, sendo esta avaliada posteriormente.

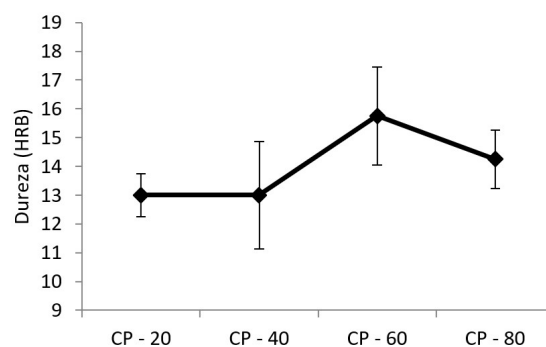


Figura 8. Dureza Rockwell B para temperatura de sinterização a 1140 °C

Analisando os dados da Fig.8, pode-se verificar que, à medida que se aumentou a carga de compactação das amostras, ocorreu uma estabilidade da dureza Rockwell B. Isto significa que, para as mesmas condições do ensaio realizado, estatisticamente a pressão de compactação não interfere na dureza, corroborando novamente os resultados propostos das propriedades físicas.

Quanto ao ensaio de compressão diametral, o grupo de amostras demonstrou um comportamento esperado de fratura descrito por Stanley [16]. Ao término do ensaio, todas as peças fraturaram no plano diametral de simetria da peça, ou seja, a propagação da trinca ocorreu ao longo do seu diâmetro no sentido longitudinal, obtendo o formato de duas semicircunferências, conforme mostra a Fig.9.



Figura 9. Amostra fraturada após ensaio de compressão diametral

A Fig.10 mostra os resultados da resistência à tração por compressão diametral à temperatura de 1140 °C.

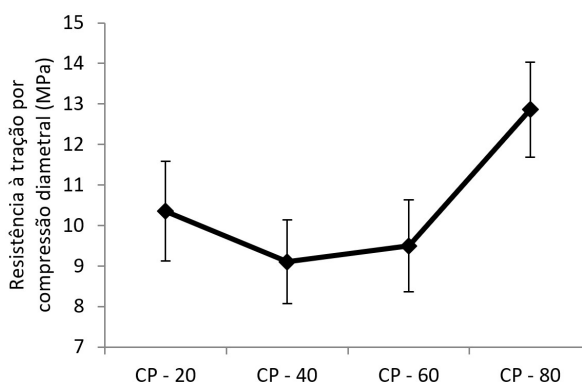


Figura 10. Resistência à compressão diametral para temperatura de sinterização de 1140 °C

Para essa temperatura de sinterização, as variações da resistência à tração por compressão diametral se mantiveram estatisticamente constantes com o aumento da carga de compactação das peças verdes, provavelmente devido à minimização dos vazios (porosidade) no interior do material

durante o processo de sinterização. Este comportamento das peças já era esperado, pois a dureza também se manteve constante com o aumento da carga de compactação.

A curva para os resultados de resistência à compressão diametral de peças sinterizadas a 1140 °C revela um comportamento constante entre os CP-20, CP-40 e CP-60. Porém, à mesma temperatura, nota-se uma pequena variação no CP-80. Alguns fatores podem ter sido determinantes neste resultado do CP-80, como: quantidade de corpos de prova que culminou em um alto desvio padrão; capacidade de carga da máquina muito superior às dimensões reduzidas dos corpos de prova ensaiados, cujas pequenas variações de ordem equivalentes à própria resolução da máquina podem causar imprecisão de modo significativo nos resultados da compressão diametral.

Além disso, é característica dos materiais cerâmicos a dificuldade de se manter um padrão em sua estrutura devido à grande variabilidade de suas propriedades. Portanto, apesar de apresentar um acréscimo de resistência à compressão diametral no CP-80, de modo geral, levando-se em consideração os resultados dos demais ensaios, observou-se uma tendência de estabilidade de resistência das peças sinterizadas à medida que a pressão de compactação é aumentada.

4. CONCLUSÕES

O granito Corumbá é essencialmente composto por quartzo, responsável pela estrutura do corpo, e os feldspatos albita e microclínio, usados como fundentes formadores da fase líquida. A intensa presença de fundentes na composição química permitiu a sinterização em temperaturas mais baixas (<1200 °C), o que implica menor custo energético. A cor escura (marrom avermelhada) é muito provavelmente resultado da presença de óxido de ferro na massa cerâmica.

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

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

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

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

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

Uma possível aplicação para estas peças cerâmicas seria na indústria da construção civil, especialmente na fabricação de peças ornamentais devido ao aspecto visual brilhante e esteticamente agradável. A destinação adequada dos rejeitos de granito seguido de seu beneficiamento proporciona inúmeras vantagens ao meio ambiente e à inovação dos setores industriais.

REFERÊNCIAS

- [1] ABIROCHAS, 2018. O setor brasileiro de rochas ornamentais. Brasília: Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.
- [2] ABIROCHAS, 2021. Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2020. informe 01/2021. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.
- [3] Buyuksagis I S, Uygunoglu T, Tatar E, 2017. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. Construction and Building Materials 154, 1, 734–742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.014>

-
- [4] Lobo C J S, 2009. Estudo sobre a utilização do rejeito granito rosa Iracema como matéria-prima na fabricação de funis de saída da fiação a rotor na indústria têxtil. Fortaleza: Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, UFC.
- [5] Dhanapandian S, Gnanavel B, 2009. Studies on granite and marble sawing powder wastes in industrial brick formulations. Asian Journal of Applied Sciences 2, 4, 331-340. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2009.331.340>
- [6] Almeida K S, Soares R A L, Matos J M E, 2020. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: Revisão bibliográfica. Revista Matéria 25, 1, 1-14. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0893>
- [7] Taguchi S P, Santos J C, Gomes T M, Cunha N A, 2014. Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. Cerâmica 60, 354, 291-296. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000200020>
- [8] Tchadjé L N, Ranjbar N, Djobo J N Y, Tchakouté H K, Kenne B B D, Elimbi A, Njopwouo D, 2016. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. Ceramics International 42, 2, 3046-3055. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.091>
- [9] Torres P, Fernandes H R, Olhero F, Ferreira J M F, 2009. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. Journal of the European Ceramic Society 29, 1, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.045>
- [10] Pinheiro H S, Nogueira R E F Q, Lobo C J S, Xavier L C P, Carneiro F O M, 2019. Peças cerâmicas fabricadas usando pó de granito com adição dos produtos da combustão do carvão mineral: Caracterização mecânica. Revista Matéria 24, 1, 1-18. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0700>
- [11] Cavalcanti L F M, Oliveira F M C, Melo E B, Fernandes A C G, 2017. Granito azul Sucuru: Caracterização tecnológica por meio do aproveitamento do material. Revista Principia 33, 11-20. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n33p11-20>
- [12] DNER, 1994. ME 093: Determinação da densidade real. São Paulo: Departamento Nacional de Estradas De Rodagem.
- [13] NBR ISO 10545-3, 2020. Placas cerâmicas: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] NBR 6508-1, 2008. Materiais metálicos: Ensaio de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] NBR 7222, 2011. Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] Stanley P, 2001. Mechanical strength testing of compacted powders. Manchester: The Manchester School of Engineering, University of Manchester. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-5173\(01\)00782-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-5173(01)00782-7)
- [17] Monteiro S N, Vieira C M F, 2003. Influência da temperatura de queima na microestrutura de argilas de Campos dos Goytacazes, RJ. Cerâmica 49, 6 – 10. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132003000100003>
- [18] Cabral D, 2009. Uso de rejeitos do granito *rain forest* para a produção de revestimentos cerâmicos com baixa absorção de água. Fortaleza: Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará.
- [19] Riella H G, Franjndlich E U C, Durazzo M, 2002. Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. Cerâmica Industrial 3, 7, 33-36.
- [20] Roveri C D, Zanardo A, Moreno M M T, 2007. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP. Cerâmica 53, 328, 436-441. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132007000400016>
- [21] Alencar C R A, 2013. Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: Rochas ornamentais. Cachoeiro de Itapemirim, ES: Instituto Euvaldo Lodi.