



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 1 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID27960>



Caracterização de resíduo de lavra de granito para fins geotécnicos

Characterization of granite mining waste for geotechnical purposes

Albert Jonatha Batista¹; Maria Del Pilar Durante Ingunza²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: albert.batista.064@ufrn.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6873-0742>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: maria.ingunza@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-7559>

Resumo: A geração de resíduos é parte de todo processo de produção. Entre os setores de produção, a indústria de mineração se destaca em modelos ambientais sustentáveis devido ao grande volume de resíduos produzidos. Rochas cristalinas, em particular granitos, se destacam devido à sua resistência mecânica e características estéticas. O objetivo deste estudo foi realizar uma caracterização geológica/geotécnica de resíduos de mineração de granito para fins geotécnicos. Amostras de resíduos de mineração de granito foram coletadas em diferentes pontos de disposição de resíduos. As seguintes caracterizações foram realizadas: física (massa específica aparente, absorção aparente e porosidade aparente), microscopia óptica e eletrônica de varredura e caracterização mecânica (ensaio de resistência à compressão uniaxial). Todas as amostras analisadas exibiram índices físicos e valores médios compatíveis com os recomendados pelas normas internacionais. Aspectos texturais, tais como concentrações aleatórias de moscovita, formando agregados, podem explicar o comportamento mecânico das amostras. Adicionalmente, com base nos resultados obtidos, os resíduos coletados podem ser usados no riprap de projetos hidráulicos e de construção que cruzam cursos de água e rodovias.

Palavras-chave: Rocha ornamental; Caracterização mecânica; Obras geotécnicas.

Abstract: Waste generation is part of any production process. Among productive sectors, the mining industry stands out in environmentally sustainable models due to the large volume of waste produced. Crystalline rocks, particularly granites, are highlighted due to their high mechanical strength and esthetic characteristics. The aim of this study was to perform a geological/geotechnical characterization of granite mining waste for geotechnical purposes. Samples of granite mining waste were collected at different waste disposal points. The following characterizations were performed: physical (apparent specific gravity, apparent absorption and apparent porosity), optical and scanning electron microscopy and mechanical characterization (uniaxial compressive strength test). All the samples analyzed exhibited physical indices and average values compatible with those recommended by international standards. Textural aspects, such as random muscovite concentration, forming aggregates, can explain the mechanical behaviour of the samples. In addition, based on the results obtained, the waste collected can be used in the riprap of hydraulic and construction projects that cross water courses and roadways.

Keywords: Granite; Mining Waste; Geotechnical characterization.

1. Introdução

A geração de resíduos é parte de qualquer processo produtivo. Atualmente, dentre os setores produtivos, a indústria mineradora, devido ao grande volume de resíduos gerados é destaque nos modelos de sustentabilidade ambiental.

Dentro dos resíduos de mineração, destacam os resíduos de lavra de rochas ornamentais, considerados como resíduos sólidos de extração (estéreis) e normalmente compostos por blocos ou fragmentos de rocha.

As rochas ornamentais, definidas como materiais rochosos naturais utilizados para exercer uma função estética (ABNT NBR 15012, 2013) apresentam diversas aplicações principalmente nas áreas de arquitetura, construção e arte. As rochas cristalinas, particularmente os granitos, destacam como rochas ornamentais devido à elevada resistência mecânica e as características estéticas.

De acordo com Montani (2020) em 2019 a produção mundial de granito como rocha ornamental foi de 89,50 milhões de toneladas /ano (57% da produção mundial total). No Brasil a situação não é diferente. Nos últimos anos, em função do aumento da demanda por insumos minerais, houve um grande crescimento da atividade mineradora, resultando num aumento da produção de resíduos da mineração. Segundo o IBRAM (2021) o faturamento da produção mineral brasileira no primeiro trimestre do ano de 2021 foi de US\$ 70 bilhões, sendo 95% maior que o faturamento da produção apurada do primeiro trimestre do ano de 2020.

Regionalmente, neste mesmo ano, o estado do Rio Grande do Norte (nordeste brasileiro) produziu 200.000 toneladas de rochas ornamentais, dentro da categoria de rochas cristalinas (granitos e mármore em sua maioria), ocupando a sexta posição no ranking de produtores de rochas ornamentais no país (Chiodi Filho, 2021).

No âmbito da construção civil é inegável que a crescente demanda por agregados gera preocupação ambiental (Akbulut e Gurer, 2007). Neste sentido, trabalhos recentes confirmam o uso sustentável de resíduos de rochas cristalinas com fins geotécnicos (Gautam et al, 2018^a; Akbulut e Gurer ,2007, Agyeman e Ampadu (2015), Deboucha et al. (2019) e Ahmed, Abdelhafez e Ahmed (2020) e Suliman e Alkherret, 2020). Notadamente, Bussièrè (2007) destaca a viabilidade de uso de resíduos de rochas duras to improve the mechanical characteristics of tailings impoundments.

Diante do exposto este trabalho se propõe a realizar uma caracterização geológico-geotécnica de resíduos de lavra de granito para fins geotécnicos.

2. Metodologia

O material utilizado na pesquisa foi o resíduo proveniente do processo de lavra de granitos (Figuras 1 e), de uma mineradora localizada no nordeste brasileiro. A região é conhecida nacionalmente pela produção de rochas ornamentais. De acordo com relatórios internos da organização, aproximadamente, 14% de todo material extraído é aproveitado e comercializado, sendo o restante do material descartado. Os principais motivos do descarte de material são: o não atendimento aos critérios estéticos requeridos pelo setor comercial e a ruptura de blocos nas etapas de exploração.

A área de estudo encontra-se inserida, geologicamente, na Província Estrutural de Borborema, localizada no nordeste do Brasil, coincidindo com a Região de Dobramentos Nordeste, desenvolvida no decorrer do Ciclo Brasileiro, sendo constituída pelos litotipos da Suíte Itaporanga, principal evento magmático brasileiro na região. Trata-se de rochas graníticas com abundantes fenocristais de feldspato potássico (CPRM, 2005).



Figura 1 – Vista geral da área de lavra de granito estudada
Fonte: Autores (2021).



*Figura 2 – Detalhe de resíduos de lavra na área de estudo
Fonte: Autores (2021).*

As amostras utilizadas na pesquisa foram coletadas em três pontos distintos de descarte de resíduos de uma única jazida, sendo chamados de ponto de coleta 1, 2 e 3.

A fim de alcançar os objetivos propostos, realizaram-se as seguintes caracterizações: caracterização física, caracterização microscópica (optical microscopy and scanning electron microscopy) e caracterização mecânica.

2.1. Caracterização física

A caracterização física consistiu na determinação da massa específica aparente, absorção aparente e porosidade aparente das amostras de acordo com a norma brasileira (ABNT NBR 15845-2, 2015).

Vale ressaltar que as normas ABNT NBR 15844 (2015) e ASTM C-615 (2003), que apresentam requisitos de granitos para revestimento, foram utilizadas como parâmetros comparativos nesta pesquisa, pois a literatura utiliza-as com o mesmo objetivo.

Nesta etapa utilizou-se oito corpos de prova para cada ponto de coleta, totalizando vinte e quatro corpos de prova. Os mesmos foram nomeados de CP 01 a 08 para o Ponto de Coleta 1, CP 09 a 16 para o Ponto de Coleta 2 e CP 17 a 24 para o Ponto de Coleta 3.

2.2. Caracterização por petrografia óptica

Foram elaboradas e descritas 6 lâminas delgadas (duas para cada ponto de coleta estudado) seguindo a norma ABNT NBR 15845-1 (2015), tendo como objetivo principal a determinação do grau de alteração das rochas estudadas. Foi utilizada a metodologia descrita Stoops et al. (1979), aplicável a rock fragments, que propõe uma série de alteration patterns para definição do grau de alteração das amostras com base na micromorphological description.

2.3. Caracterização morfoestrutural (MEV)

Foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), usando um dispositivo HITACHI TM-3000, com o objetivo de comprovar as informações obtidas na avaliação petrográfica, mais especificamente em aspectos morfoestruturais .

2.4. Caracterização mecânica

O ensaio para determinar a resistência a compressão uniaxial das rochas (ABNT NBR 15845-5, 2015) em concordância com a norma americana (ASTM C – 170, 2009) é um dos ensaios mais usados na caracterização de rochas ornamentais. Os resultados obtidos permitem uma boa estimativa das propriedades da rocha. Para avaliação de rochas com estrutura maciça esta norma estabelece no mínimo a realização de 10 corpos de prova, cúbicos, com dimensões das arestas entre 70 mm e 75 mm, ou cilíndrico, com diâmetro entre 70 mm e 75 mm e relação base/altura 1:1. O ensaio deve ser executado com o auxílio de uma prensa hidráulica (Figura 3). A força deve ser aplicada a uma taxa menor que 0,5 MPa/s, até ocorrer a ruptura do corpo de prova.



Figura 3 – Determinação da resistência à compressão uniaxial
Fonte: Autores (2021).

Para obter o resultado da resistência à compressão uniaxial, aplica-se o valor da força de ruptura na Fórmula 1.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Where σ_c is fracture stress under compression in megapascals (MPa), P the maximum breaking force in kilonewtons (kN) and A the area of the test specimen surface submitted to loading in square meters (m²).

As amostras coletadas em campo tiveram suas dimensões reduzidas, para elaboração dos corpos de prova (Figura 4). Foram moldados corpos de prova cúbicos com arestas de 7 cm (Figura 5).

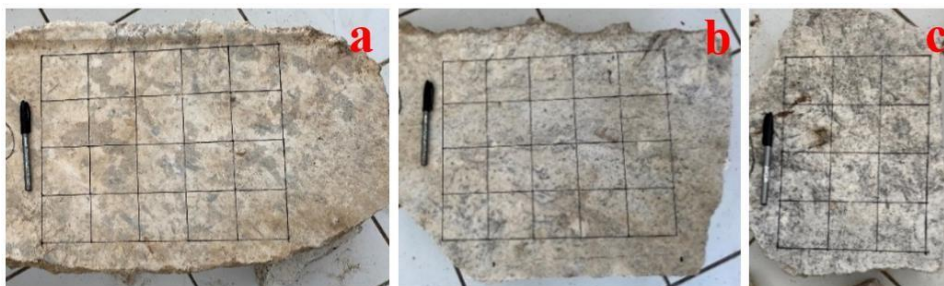


Figura 4 – Amostras coletadas em campo: (a) Ponto de Coleta 1 (b) Ponto de Coleta 2 e (c) Ponto de Coleta 3
Fonte: Autores (2021).



Figura 5 – Detalhe de corpos de prova cúbicos, medindo 7 cm de arestas para realização do ensaio resistência a compressão uniaxial das rochas
Fonte: Autores (2021).

Para cada ponto de coleta foram moldados 12 corpos de prova, totalizando trinta e seis corpos de prova.

3. Resultados

3.1. PCaracterização física

A Figura 6 apresenta os valores de massa específica aparente (g/cm^3) dos corpos de prova ensaiados. Os valores médios obtidos para as amostras de granitos estudadas variaram de $2,63\text{g}/\text{cm}^3$ a $2,64\text{g}/\text{cm}^3$. O valor médio mínimo aceitável de massa específica aparente de granitos é de $2,56\text{ g}/\text{cm}^3$ (ABNT NBR 15844) e de $2,55\text{ g}/\text{cm}^3$ (ASTM C-615). Com isso, Todas as amostras estudadas possuem valores de massa específica aparente de acordo com os valores das normas.

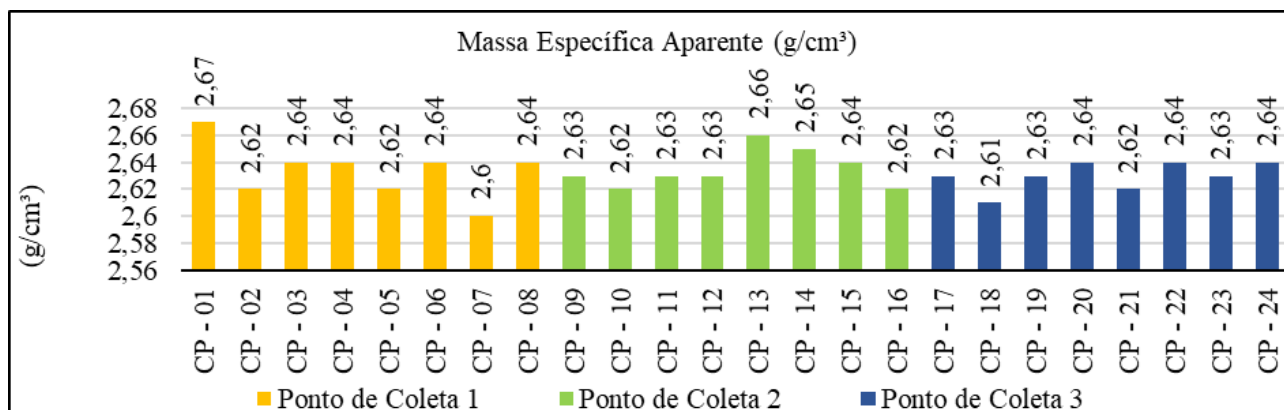


Figura 6 – Valores de massa específica aparente (g/cm^3) das amostras estudadas
Fonte: Autores (2021).

A Figura 7 apresenta os valores de absorção de água (%) dos corpos de prova ensaiados. Os valores médios obtidos para as amostras de granitos estudadas variaram de 0,17 % a 0,24%. Sendo o valor médio máximo aceitáveis de absorção de água para granitos de 0,4 % (ABNT NBR 15844 e ASTM C-615), todas as amostras estudadas possuem valores de absorção de água de acordo com os valores requisitados.

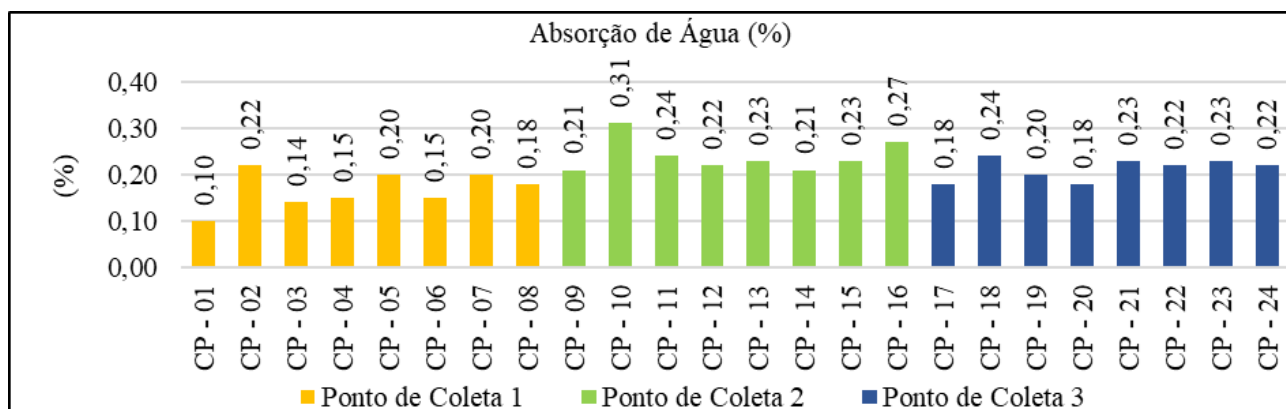


Figura 7 – Valores de absorção de água (%) das amostras estudadas
Fonte: Autores (2021).

A Figura 8 apresenta os valores de porosidade aparente (%) dos corpos de prova ensaiados. Os valores médios obtidos para as amostras de granitos estudadas variaram de 0,44 % a 0,63%. De acordo com a norma brasileira, o valor médio máximo aceitável de porosidade aparente de granitos é de 1,0 % . Com isso, as amostras estudadas possuem valores de porosidade aparente de acordo com os valores requisitados.

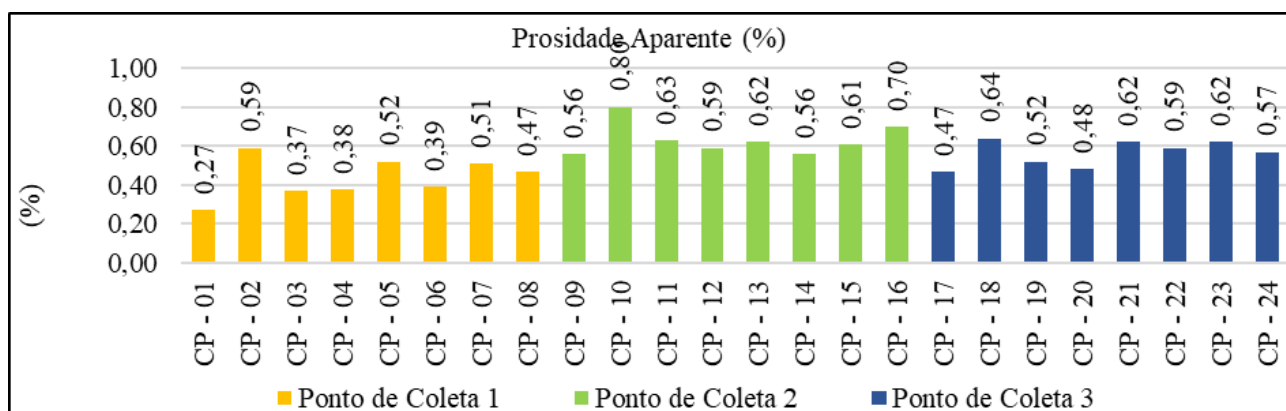


Figura 8 – Valores de porosidade aparente (%) das amostras estudadas
Fonte: Autores (2021).

3.2. Caracterização mecânica

A Figura 9 apresenta os valores de resistência à compressão uniaxial (MPa) dos corpos de prova ensaiados. Os valores médios obtidos para as amostras de granitos estudadas foram de 86 MPa, 132 MPa e 104 MPa, para cada ponto de coleta respectivamente. Os valores médios mínimo aceitáveis de resistência à compressão uniaxial de granitos são de 100 MPa para a norma brasileira e 131 MPa para a norma americana . Assim, o valor do Ponto de Coleta 1 foi abaixo em ambos requisitos, o do Ponto de Coleta 3 foi inferior ao valor requisitado pela ASTM C-615 (2003) e superior ao requisitado pela ABNT NBR 15844 (2015), já o do Ponto de Coleta 2 foi superior em ambos requisitos.

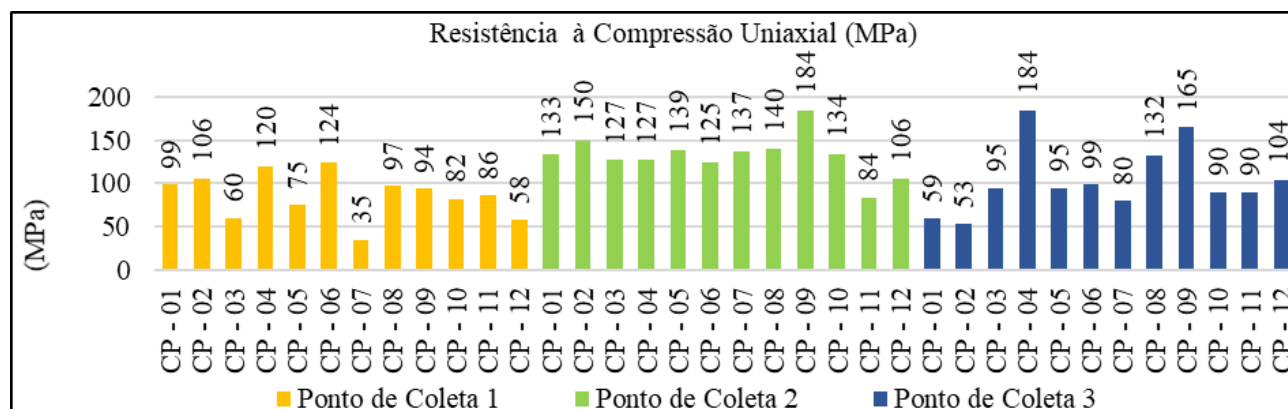


Figura 9 – Valores de resistência à compressão uniaxial (MPa) das amostras estudadas
Fonte: Autores (2021).

3.3. Caracterização petrográfica

A análise petrográfica identificou as amostras como correspondentes a rochas graníticas com granulometria média a grossa, inequigranulares, com cristais euédricos a subédricos, apresentando como mineralogia principal: Quartzo, Feldspato Plagiocásio, K-feldspato e mica Muscovita (Figura 10). Como acessórios destacam a apatita e a horblenda verde (Figura 11).

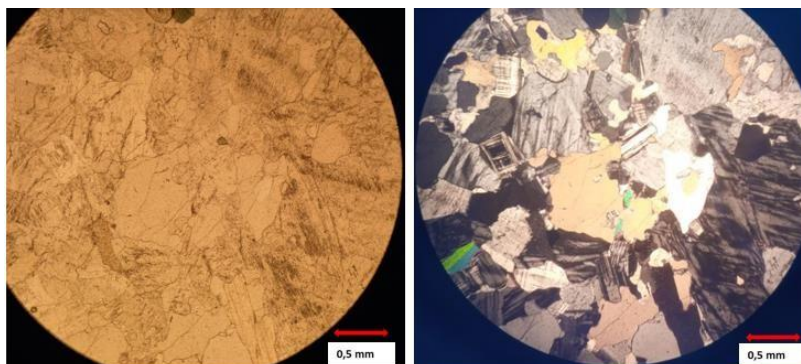


Figura 10 – Microfotografia do aspecto geral. À esquerda, niveaus paralelos, à direita niveaus cruzados (luz polarizada), mostrando a composição mineralógica principal: quartzo, feldspatos (microclínio e plagioclasas) e micas. Se observa quantidade menor de micas em relação ao Ponto de coleta 1
Fonte: Autores (2021).

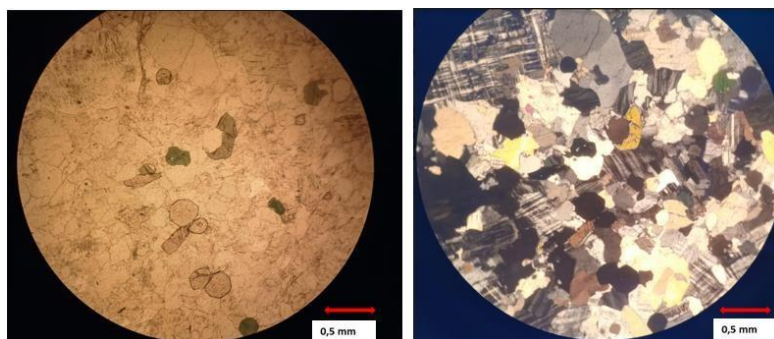
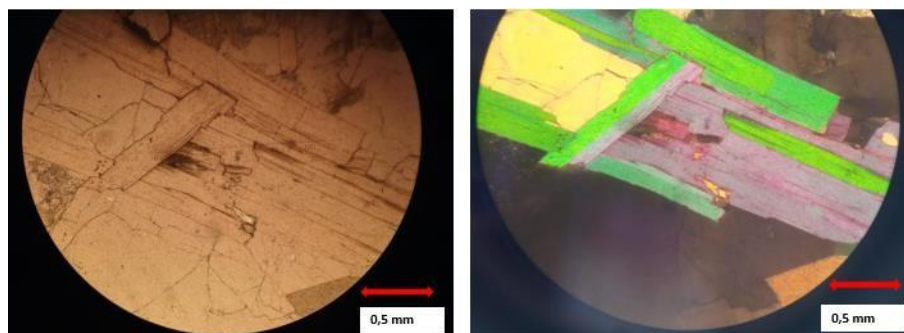


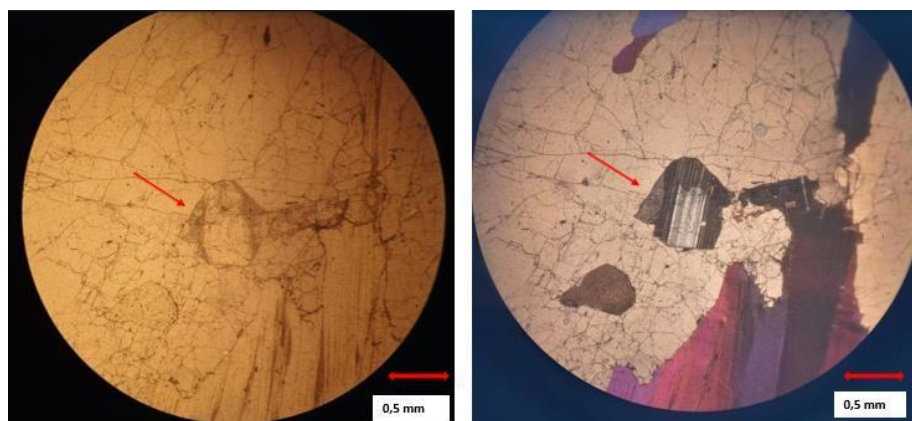
Figura 11 – Microfotografia do aspecto geral. À esquerda, niveaus paralelos, à direita niveaus cruzados (luz polarizada), mostrando os minerais acessórios: apatita, com seções basais isotrópicas e horblenda verde
Fonte: Autores (2021).

Não há orientação preferencial dos minerais, mas se observam concentrações de cristais de muscovita distribuídos de forma heterogênea, dispersos (Figura 12).



*Figura 12 – Microfotografia de micas. À esquerda, nicois paralelos, à direita nicois cruzados (luz polarizada), mostrando concentração de cristais de muscovita lamelares, euédricos a subédricos.
Fonte: Autores (2021).*

Quanto ao grau de alteração, é visível nos feldspatos plagioclásicos onde se observam principalmente nas bordas processos de argilização. Em algumas amostras de feldspatos se observam micas de alteração devidas a processos de alteração tipo sericitização (Figura13).



*Figura 13 – Microfotografia de plagioclásio alterado, identificado pela seta vermelha. À esquerda, nicois paralelos, mostrando bordas de cor castanha indicando o processo de argilização. À direita, nicois cruzados (luz polarizada), se observam micas de alteração indicando um processo de sericitização.
Fonte: Autores (2021).*

De acordo com a metodologia proposta por Stoops et al. (1979) o grau de alteração das amostras estudadas é definido como grau de alteração incipiente (levemente alteradas) no qual, de 2.5 a 25 % dos minerais (feldspatos) estão alterados. Os processos de alteração se identificam exclusivamente como processos de argilização e sericitização. Não há sinais de alteração na forma de fraturas ou fissuras nem na forma de porosidade secundária.

3.4. Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de SEM obtidas (Figuras 14 e 15) confirmam as observações realizadas na petrografia óptica. De maneira geral se observa uma textura cristalina compacta, própria das rochas estudadas destacando superfícies de fratura devidas à elaboração dos corpos de prova. Não se observam sinais de alteração estrutural tais como porosidade secundaria ou fissuração. As microfotografias mostram diferente distribuição dos cristais

de micas. Na Fig. 14 podem se observar lamelas de micas mostrando detalhe de clivagem (14d). A Fig. 15 mostra as lamelas de mica com planos de clivagem perpendiculares à superfície do corpo de prova.

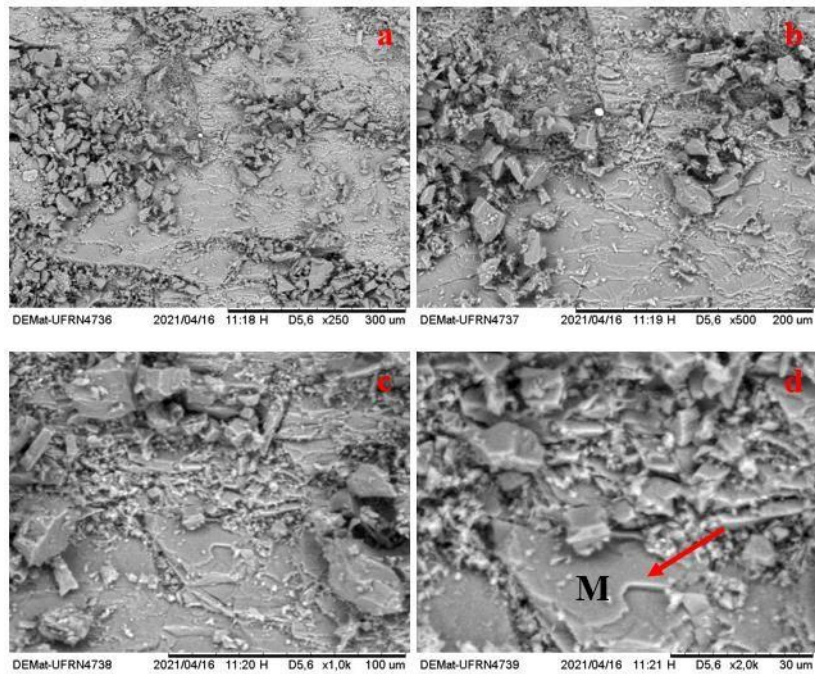


Figura 14 – Imagens MEV do ponto de coleta 1. Aumentos: (a) x250, (b) x500, (c) x1000 e (d)x2000
Fonte: Autores (2021).

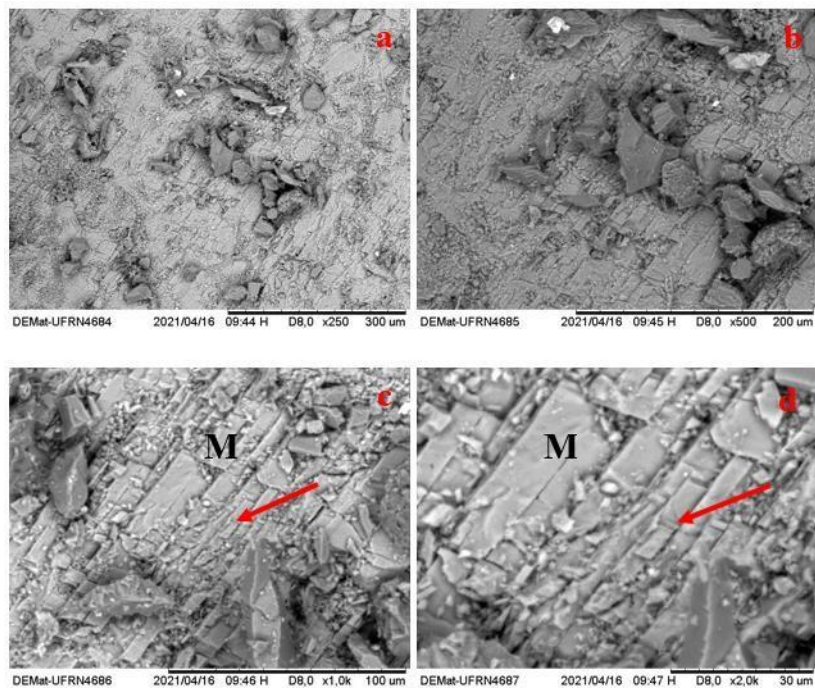


Figura 15 – Imagens MEV do ponto de coleta 2. Aumentos: (a) x250, (b) x500, (c) x1000 e (d)x2000.
Fonte: Autores (2021).

A mineralogia se aponta como fator principal para explicar os resultados do comportamento mecânico, mais do que composicionalmente, através de aspectos texturais e estruturais. Assim, a alteração de feldspatos, devido ao grau incipiente, não parece ser significativa, mas a concentração aleatória de moscovita formando agregados, apresentando-se em concentrações de até 1cm de espessura em algumas amostras, se aponta como fator fundamental para explicar este comportamento (Fig 16). Mais especificamente, a posição das lâminas de micas nos corpos de prova, evidenciando uma propriedade fundamental neste tipo de silicatos, a clivagem, deve com certeza haver influenciado no menor desempenho mecânico de alguns corpos de prova, de forma que, em aqueles corpos de prova com lâminas de moscovita orientadas perpendicularmente ao esforço aplicado os resultados de resistência a compressão serão melhores que naqueles com lamina de moscovita paralelas a subparalelas ao esforço aplicado.



Figura 16 – Agregado micáceo em corpo de prova
Fonte: Autores (2021).

4. Conclusões

Essa pesquisa realizou uma caracterização de resíduos de lavra de granito segundo sua composição mineralógica, microestrutural, índices físicos e resistência mecânica através da compressão unidirecional, para fins geotécnicos.

Todas as amostras analisadas, possuem valores unitários de índices físicos (massa específica aparente, absorção aparente e porosidade aparente) e valores médios condizentes com os valores sugeridos pelas normas brasileira (ABNT NBR 15844) e americana (ASTM C – 615).

Com relação aos valores de resistência à compressão, as amostras coletadas no ponto de coleta 2 obtiveram valor médio de resistência mecânica superior ao sugerido pelas normas ABNT NBR 15844:2015 e ASTM C – 615:2003. As amostras coletadas no ponto de coleta 1 obtiveram valor médio de resistência mecânica inferior ao sugerido pelas normas ABNT NBR 15844:2015 e ASTM C – 615:2003. As amostras coletadas no ponto de coleta 3 obtiveram valor médio de resistência mecânica superior ao sugerido pela norma ABNT NBR 15844:2015 e inferior ao sugerido pela ASTM C – 615:2003.

As amostras estudadas apresentam grau de alteração incipiente segundo a metodologia proposta por Stoops et al. (1979) o qual não explica as variações nos resultados do desempenho mecânico das amostras. Assim, aspectos texturais, tais como a concentração aleatória de moscovita formando agregados, são apontados como fundamentais para explicar este comportamento. Além disto, a orientação dos agregados de micas em relação ao esforço recebido deve haver influenciado no menor desempenho mecânico de alguns corpos de prova, evidenciando a influência de características estruturais, tais como a clivagem dos filossilicatos.

De acordo com os resultados obtidos, os resíduos coletados podem ser utilizados, possivelmente, em enrocamento de obras hidráulicas e construção de trechos, que cruzam cursos de água, de estradas de rodagem.

Referências

- AGYEMAN, Stephen; AMPADU, Samuel Ik. *Exploring the techno-economic feasibility of mine rock waste utilisation in road works: The case of a mining deposit in Ghana*. Waste Management & Research, [s. l], p. 1-9, mar. 2015.
- Ahmed, H.M., Abdelhaffez, G.S. & Ahmed, A.A. *Potential use of marble and granite solid wastes as environmentally friendly coarse particulate in civil constructions*. Int. J. Environ. Sci. Technol. (2020). <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03014-2>
- AKBULUT, Huseyin; GURER, Cahit. *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*. Building And Environment, [s. l], v. 42, p. 1921-1930, 2007
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-170: Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone*, 2009. 3 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C-615: Standard Specification for Granite Dimension Stone*. West Conshohocken, 2003. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15844: Rochas para revestimento - Requisitos para granitos*. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia*. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15845-2: Rochas para revestimento Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2015. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15845-5: Rochas para revestimento parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial*. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15845-1: Rochas para revestimento Parte 1: Análise petrográfica*. Rio de Janeiro, 2015. 08 p.
- BUSSIÈRE, Bruno. *Colloquium 2004: hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches*. Canadian Geotechnical Journal, [S.L.], v. 44, n. 9, p. 1019-1052, set. 2007. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t07-040>.
- CHIODI FILHO, Cid. *Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020*. Brasília: Abirochas, 2021. 22 p.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Parelhas, estado do Rio Grande do Norte*. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 26 p.
- DEBOUCHA, Sadek; MAMOUNE, Sidi Mohammed Aissa; SAIL, Yacine; ZIANI, Hocine. *Effects of Ceramic Waste, Marble Dust, and Cement in Pavement Sub-base Layer*. Geotechnical And Geological Engineering, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 3331-3340, 31 Jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-020-01211-x>.
- GAUTAM, Pradeep Kumar; KALLA, Pawan; JETHOO, Ajay Singh; AGRAWAL, Rahul; SINGH, Harshwardhan. *Sustainable use of waste in flexible pavement: a review*. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 180, p. 239-253, ago. 2018a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067>.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Mineração em números – 1º trimestre de 2021*. Brasília: IBRAM, 2021. 02 p.
- MONTANI, Carlo. *XXXI Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2020*. Milão: Marmomachine, 2020. 151 p.

STOOPS, G.; ALTEMÜLLER, H.-J.; BISDOM, E. B. A.; DELVIGNE, T.; DOBROVOLSKY, V. V.; FITZPATRICK, E. A.; PANEQUE, G.; SLEEMAN, J.. *GUIDELINES FOR THE DESCRIPTION OF MINERAL ALTERATIONS IN SOIL MICROMORPHOLOGY*. XXIX Canberra City: Pedologie, 1979. 16 p.

SULIMAN, Manal O.; ALKHERRET, Abdulrazzaq Jawish. *Using Fine Silica Sand and Granite Powder Waste to Control Free Swelling Behavior of High Expansive Soil*. Modern Applied Science, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 53, 28 dez. 2020. Canadian Center of Science and Education. <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v15n1p53>.