

## ESTUDOS PETROGRÁFICOS E GEOQUÍMICOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DO MIGMATITO COMPLEXO CAMBORIÚ PARA POTENCIAL REMINERALIZADOR DE SOLO

*PETROGRAPHIC AND GEOCHEMICAL STUDIES OF MINING TAILINGS FROM MIGMATITE  
CAMBORIÚ COMPLEX TOWARDS SOIL REMINERALIZING POTENTIAL*

**Sara de Oliveira RODRIGUES<sup>1</sup>, Daniel Augusto Bozoti PASIN<sup>1</sup>, Marcelo SALOMÃO<sup>1</sup>,  
Luiz Carlos BERTOLINO<sup>2</sup>, Éder de Souza MARTINS<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro – RJ. E-mails: sararodrigues.geo@gmail.com; danpasin@hotmail.com; salomao.mss@gmail.com

<sup>2</sup>Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Avenida Pedro Calmon, 900 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ. E-mail: lcbertolino@uol.com.br

<sup>3</sup>Embrapa Cerrados. BR-020, km 18, s/n, Brasília – DF. E-mail: eder.martins@embrapa.br

### Introdução

Localização da área de estudo

Contexto geológico regional

Geologia local

Metodologia

Resultados

Descrição petrográfica

Difração de raios X

Fluorescência de raios X

pH de abrasão

Resultado do critério remineralizador do solo

Conclusões e recomendações

Agradecimentos

Referências

**RESUMO** - A remineralização é um processo de renovação de solos agrícolas a partir da aplicação de rochas silicáticas moídas ricas em bases, onde ocorre a disponibilização de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, formam novas fases minerais funcionais e contribui para o incremento do pH do solo. Os remineralizadores de solos podem ser gerados tanto a partir do desenvolvimento de novas jazidas como na coprodução da mineração em atividade. Este é o caso dos materiais da mineradora que explora o migmatito do Complexo Camboriú, onde foram coletadas amostras para estudos petrográficos e geoquímicos, visando a determinar seu potencial como remineralizador de solo. Os resultados confirmaram que a rocha foi submetida a metamorfismo de fácies anfíbolito superior, com presença de fluidos. As análises químicas revelaram teores significativos de elementos alcalinos e alcalino-terrosos, essenciais na definição de remineralizadores de solos, como o potássio, magnésio e cálcio. O estudo petrográfico e geoquímico dessas amostras, indicam um potencial para utilização do rejeito na agricultura, evidenciada pela presença de minerais com potencial para serem intemperizados na escala de tempo de ciclos de culturas agrônomicas. Essa evidência é confirmada a partir dos resultados apresentados neste artigo, cumprindo com os requisitos estabelecidos pelo MAPA, apresenta como soma de base (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO) valores de 3,3 a 17,98% e K<sub>2</sub>O de 0,78 a 8,2%. Já as amostras ricas em biotita e hornblenda mostraram um potencial para o desenvolvimento de fertilizantes naturais. Assim, a utilização dos rejeitos da mineradora pode contribuir para a economia regional e uma maior sustentabilidade da mineração e da agricultura.

**Palavras-chave:** Remineralização. Migmatito. Sustentabilidade.

**ABSTRACT** - Remineralization is a process of renewing agricultural soils through the application of ground silicate rocks rich in bases, where the necessary nutrients for plant development are made available, new functional mineral phases are formed, and it contributes to increasing soil pH. Soil remineralizers can be generated both from the development of new deposits and from co-production of active mining. This is the case of the materials of the mining company that explores the migmatite of the Camboriú Complex, where samples were collected for petrographic and geochemical studies, to determine its potential as a soil remineralizer. The results confirmed that the rock underwent upper amphibolite facies metamorphism, with the presence of fluids. Chemical analyses revealed significant levels of alkaline and alkaline-earth elements, essential in defining soil remineralizers, such as potassium, magnesium, and calcium. The petrographic and geochemical study of these samples indicate a potential for the use of tailings in agriculture, evidenced by the presence of minerals with potential to be weathered in the time scale of agronomic crop cycles. This evidence is confirmed by the results presented in this article, complying with the requirements established by MAPA, presenting as base sum (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO) values from 3.3 to 17.98% and K<sub>2</sub>O from 0.78 to 8.2%. Thus, the use of mining rejects can contribute to regional economy and greater sustainability of both mining and agriculture.

**Keywords:** Remineralization. Migmatite; Sustainability.

## INTRODUÇÃO

Os fertilizantes sintéticos solúveis de com- majoritariamente produzidos em países de clima  
posição NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) são temperado, situados no hemisfério norte. O Brasil  
São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 43, n. 1, p. 89 - 99, 2024

se tornou um dos maiores consumidores destes fertilizantes do mundo e altamente dependente desses insumos. De acordo com o Boletim de Logística CONAB (2021), o país registrou recordes de importação de fertilizantes, atingindo 41,6 milhões de toneladas por ano, equivalente a 15 bilhões de dólares americanos anuais, o que impacta em sua balança comercial. Rússia, Ucrânia e China compõem os principais países fornecedores para o Brasil. Os dois primeiros são responsáveis por cerca de 20% do fornecimento de fertilizantes, enquanto o terceiro exporta 14% do utilizado no Brasil. A importação de fertilizantes desses três países gera 5,6 bilhões de dólares americanos anuais para a economia brasileira (COMEXSTAT, 2021).

Remineralização é uma prática que objetiva ‘rejuvenescer’ os solos agrícolas por meio da adição de material proveniente de rochas silicáticas moídas, contribuindo para o manejo da fertilidade do solo.

O uso de rochas silicáticas moídas para remineralização foi proposta inicialmente por Missoux (1853), que identificou uma adição de nutrientes às condições do solo, formando novas fases minerais. Essas fases vão alterando a composição química do solo a longo prazo, aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC) e o seu pH, diminuindo a perda de nutrientes e estimulando a atividade biológica do solo e das raízes das plantas (Martins et al., 2023).

A remineralização pode trazer diversos benefícios à geodiversidade pedológica brasileira, uma vez que esses insumos agrícolas estão disponíveis amplamente no país, favorecendo a logística e permitindo seu barateamento. A

aplicação desta prática agrícola possibilita o aumento na produção agrícola e evita impactos ambientais e de saúde causados pelos fertilizantes químicos, contribuindo, inclusive, para um caráter de sustentabilidade por meio da utilização dos rejeitos da mineração (Swoboda et al., 2022).

A Instrução Normativa nº 05/2016 do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA; BRASIL, 2016) estabelece especificações e garantias mínimas para os materiais remineralizadores. Quanto à natureza física, o MAPA determina ser *filler*, pó ou farelado. A soma de base (Ca, MgO, K<sub>2</sub>O) deve ser igual ou superior à 9%. O teor de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) deve ser igual ou superior a 1%. Fica vedada a produção, importação e comercialização de remineralizadores que contenham SiO<sub>2</sub> livre superior à 25%. Os elementos potencialmente tóxicos presentes no produto não poderão ultrapassar os teores estabelecidos: Arsênio (As) – 15 ppm, Cadmio (Cd) – 10 ppm, Mercúrio (Hg) – 0,1 ppm e Chumbo (Pb) – 200 ppm. O potencial Hidrogeniônico (pH) de abrasão deve ser declarado pelo registrante.

O objetivo do presente trabalho é determinar o potencial como remineralizador do rejeito pertencente à mineradora em questão - pseudônimo “X”. Para isso, foram realizados geoquímicos e petrográficos do Migmatito do Complexo Camboriú, principal litotipo explorado.

#### **Localização da área de estudo**

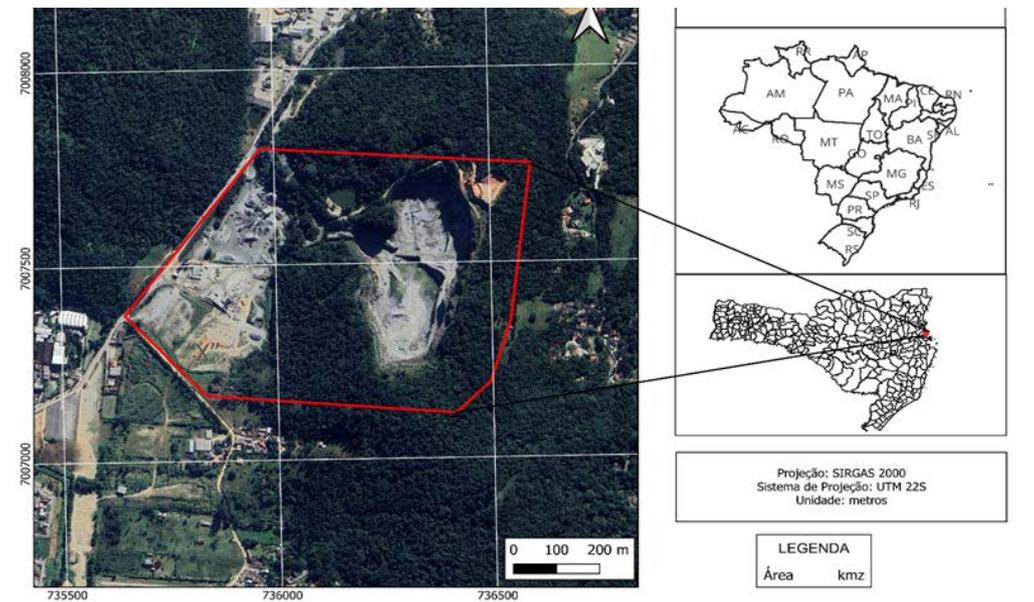
A área de estudo está situada na região Morro do Boi, no município de Camboriú, na porção leste do Estado de Santa Catarina (Figura 1), em uma área de 211,6 km<sup>2</sup>.

### **CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL**

A área está inserida na porção sul do Sistema Orogênico Mantiqueira (SOM), denominado de Cinturão Dom Feliciano (Heilbron et. al., 2004). O SOM é um dos principais orógenos neoproterozoicos formados durante o desenvolvimento do Gondwana Ocidental. O SOM dispõe-se paralelo à costa sudoeste do Brasil, estendendo por cerca de 3.000 km, desde Montevideú (Uruguai) ao sul do estado da Bahia. Exibe orientação NNE-SSW e compreende os cinturões Dom Feliciano (Uruguai e sul do Brasil), Ribeira (estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro) e Araçuaí (estados do Espírito Santo, leste de Minas Gerais e sul da Bahia) (Heilbron & Machado, 2003).

O Cinturão Dom Feliciano é resultante da colagem de domínios oceânicos e fragmentos continentais entre os crátons Rio de La Plata, Congo e Kalahari (Chamale JR. et al., 2011). A evolução do Cinturão Dom Feliciano envolveu a superposição de três eventos orogênicos denominados Passinho (0,89 - 0,86 Ga), São Gabriel (0,77 - 0,68 Ga) e Dom Feliciano (0,65 - 0,54 Ga). Os dois primeiros eventos envolveram o fechamento do oceano Charrua, com a geração inicial de um arco intraoceânico (Passinho) e, posteriormente, de um arco continental (São Gabriel).

Esse oceano separava as áreas continentais representadas pelo Cráton Rio de La Plata e a

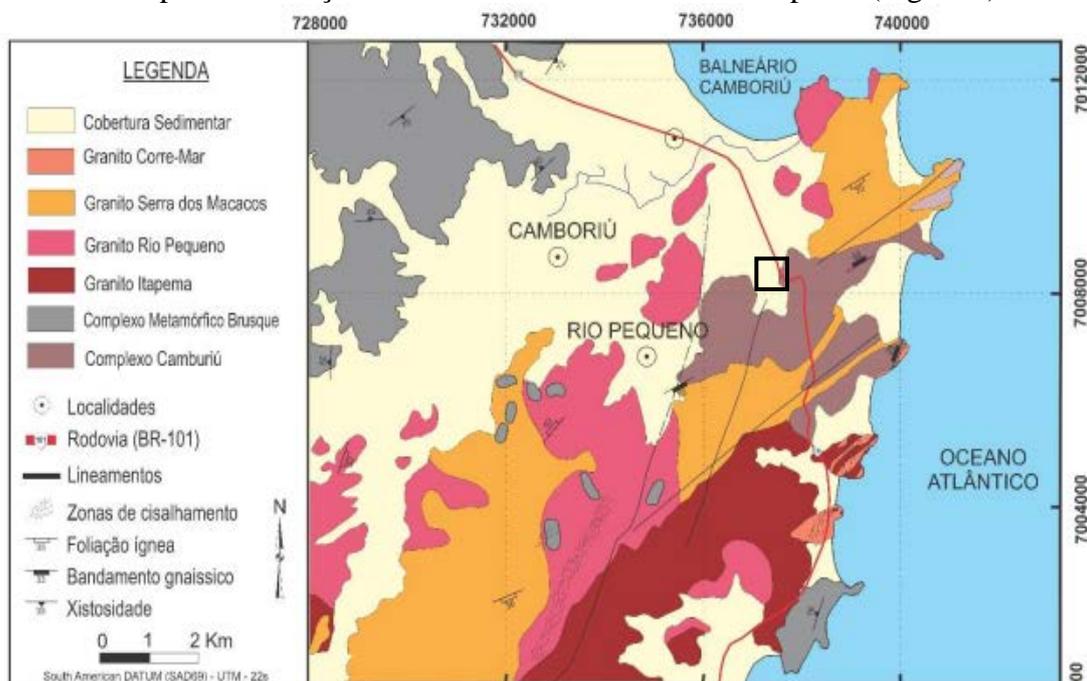


**Figura 1** – Localização da área de estudo e delimitação da área da mineradora (modificado de Google Earth, a partir de IBGE, 2021).

a microplaca continental Nico Perez. No terceiro evento (Dom Feliciano) ocorreu o fechamento do Oceano Adamastor em decorrência da colisão entre os crátons Rio de La Plata e Kalahari (entre 650 - 620 Ma), com condições metamórficas de alta temperatura e pressão intermediária. Neste momento de grande espessamento crustal, a partição da deformação no cinturão possivelmente controlou a sua evolução final, com a passagem para uma tectônica de escape, responsável pela nucleação de zonas de cisalhamento transcorrentes de escala crustal.

Na porção nordeste do estado de Santa Catarina existem duas expressivas feições tectônicas:

a zona de cisalhamento Itajaí-Pirambó, que delimita o Cráton Luiz Alves, e a Zona de Cisalhamento Major Gercino. Essas feições possuem direção NE – SW e cinemática dextral, separando os domínios. Entre essas duas zonas de cisalhamento está o Terreno Tijucas (setentrional), que foi submetido a movimentos tectônicos que favoreceram a formação de rochas metamórficas de médio a alto grau, denominadas de Complexo de Brusque, Complexo Granulítico Santa Catarina e Complexo de Camboriú, onde são observadas associações de gnaisses, migmatitos e granitos cálcio-alcálico. A área da pesquisa está inserida neste último Complexo (Figura 2).



**Figura 2** – Mapa geológico da região de Camboriú. O polígono de contorno preto corresponde à área do estudo (Modificado de UFRGS, 2000).

## GEOLOGIA LOCAL

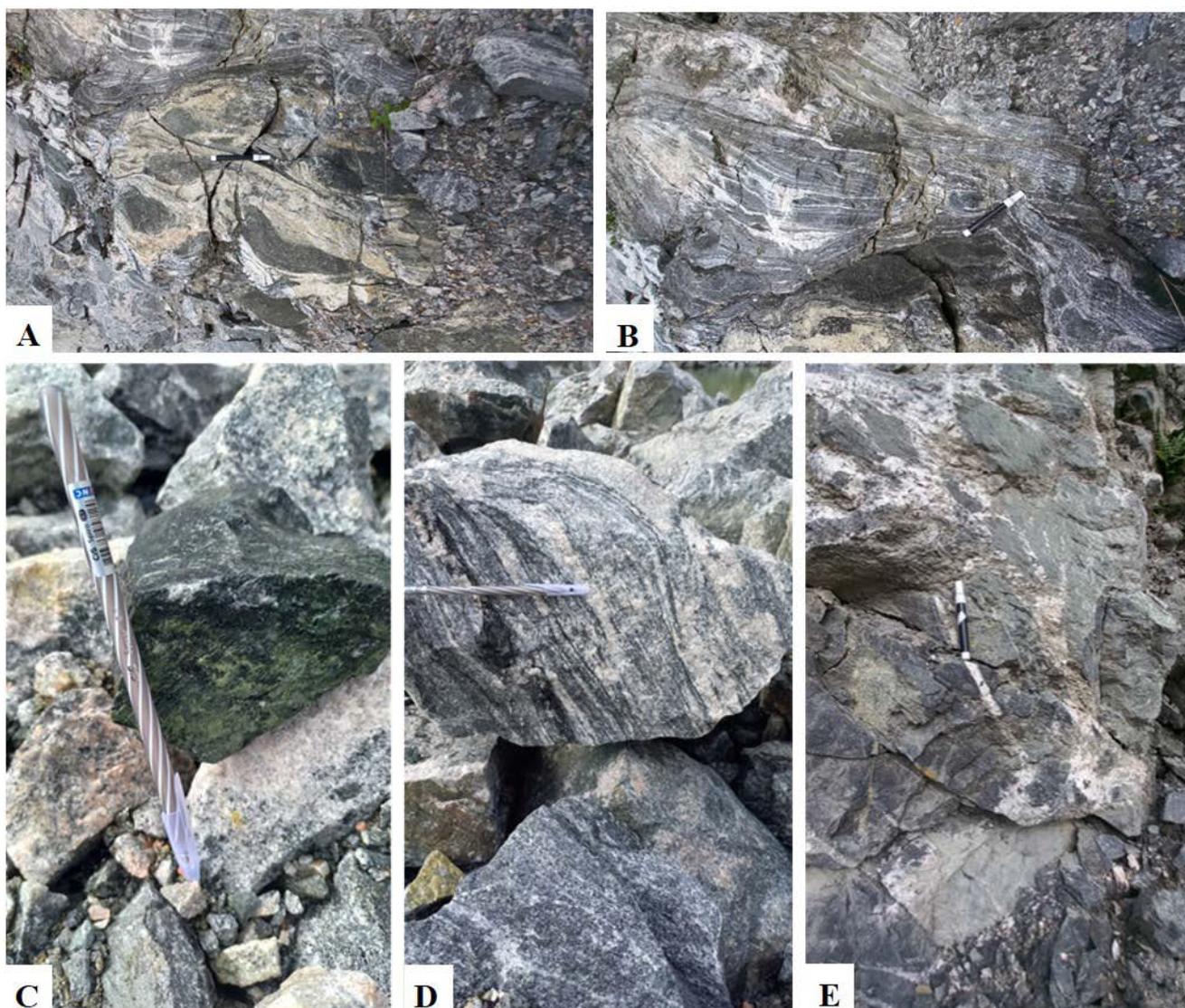
O Complexo Camboriú é composto por migmatitos, ortognaisses intercalados com anfibolitos, e pequenas porções de gnaisses pelíticos e de rochas calciossilicáticas. Os ortognaisses, tonalíticos exibem uma textura maciça, enquanto os gnaisses, granodioríticos, apresentam uma foliação bem marcada.

O metamorfismo exibe feições de fusão parcial, com geração de grandes volumes de neossoma. Amós (2019), utilizando o geotermobarometria em alumínio e hornblenda proposto por Schmidt (1992), estimou uma temperatura entre 703 e 744°C e uma pressão de 3.4 a 4.2 kbar, indicando uma fácies anfibolito superior ao migmatito. Não há uma idade determinística para o Complexo Camboriú. Peternell et al. (2000) e Lopes (2008) propuseram as idades paleoproterozoicas de 2,7 Ga e 2,1–2,0 Ga, respectivamente.

O migmatito é predominantemente estromático,

apresentando dobras e deformação simétrica, com cisalhamento paralelo a subparalelo às dobras (Figura 3). As estruturas são separadas por veios graníticos e pegmatíticos que disfarçam o contato entre os litotipos (Lopes, 2008). Os mesossomas estão distribuídos homoganeamente no afloramento, composto por plagioclásio, quartzo e níveis milimétricos de biotita e anfibólio. Os leucossomas são constituídos por plagioclásio, quartzo e feldspato potássico. Os melanossomas estão concentrados em finas camadas locais, preenchidas por biotita.

O anfibolito ocorre concordante ao bandamento principal do migmatito, apresentando estrutura maciça centimétrica. Os leucossomas ocorrem de forma aleatória, em bolsões isolados, com cristais bem formados de titanita e hornblenda, interpretados como minerais peritéticos, de acordo com os critérios estabelecidos por Sawyer (2008).



**Figura 3** – Migmatitos do Complexo Camboriú: A) Resíduo + Leucossoma; B) Leucossomas *in situ*; C) Anfibolito; D) Ortognaisse com bandamento contínuo e lente de anfibolito; E) Veios leucocráticos com cristais de titanita e hornblenda.

## METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida em três etapas: de campo, laboratorial e de integração. A primeira etapa constituiu na coleta de sete amostras do migmatito, sendo cinco amostras da rocha sã (SC-01, SC-02, SC-03, SC-04 e SC-05) e duas amostras do rejeito da mineradora (SC-06 e SC-07, com granulometria de areia média e *filler*, respectivamente). As cinco amostras de rocha sã foram selecionadas de acordo com as variações granulométricas e o índice de cor apresentado, todas aflorantes na área do empreendimento.

A segunda etapa abrangeu a realização de análises petrográficas, de microsonda eletrônica, por difração de raios X, por fluorescência de raios X e determinação do pH. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório Geológico de Processamento de Amostras da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (LGPA/UERJ), para a confecção da lâmina petrográfica. As lâminas foram analisadas, a fim de identificar a presença de minerais com K<sub>2</sub>O.

As análises por DRX foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica no Centro de Tecnologia Mineral (LMCT/CETEM) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, onde foi realizada a redução da granulometria, peneiramento, quartejamento, pesagem do pó de rocha (três gramas) e identificação das amostras e suas referências para o uso. O método do pó foi executado em equipamento Bruker- D8, radiação Cu K $\alpha$  (40 kV/25 mA), com passo de 0,01° 2 $\theta$ , tempo de contagem de 92 segundos por passo com detector linear sensível à posição, coletados de 5 a 80° 2 $\theta$ . A interpretação qualitativa de

espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados relacional PDF 4+ (ICDD, 2014) em software Bruker Diffrac.

As análises por FRX foram realizadas LMCT/CETEM, por meio de espectrômetro por comprimento de onda, modelo Axios Max – Panalytical. Foram pesados 5 g de cada amostra e, posteriormente, determinada a perda por calcinação em duplicatas em mufla a temperatura de 1000°C.

A medição do potencial hidrogeniônico foi feita por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão na proporção 1:2,5 (Manual de Métodos de Análise de Solo – Embrapa, 2017). Para a calibração do pHmetro foi usada solução com pH 4,00 e pH 7,00.

A análise do pH foi executada no LMCT/CETEM. Foram selecionados 10 g da amostra já moída, adicionando-se 25 ml de água Mili-Q, agitando-se como o bastão de vidro e repousando por 1 hora. Em seguida, agitou-se a solução ligeiramente e mergulhou os eletrodos na suspensão homogeneizada e procedeu a leitura. Os resultados determinam se uma solução aquosa é ácida, básica ou possui caráter neutro.

A identificação e a quantificação dos elementos químicos foram realizadas por Microsonda Eletrônica Raman Horiba-Jobin Yvon, LabRam 800 de alta resolução, 3 lasers de excitação (532, 633 e 785 nm), acoplado a um microscópio óptico petrográfico com platina de resfriamento/aquecimento (-180/+600C), do LMCT/CETEM.

A terceira etapa envolveu a integração das informações laboratoriais com as descrições petrográficas e de campo.

## RESULTADOS

Os resultados das análises petrográficas e químicas estão descritas a seguir.

### Descrição Petrográfica

Foram analisadas cinco lâminas do Complexo Camboriú (SC-01, SC-02, SC-03, SC-04 e SC-05), cada uma representando uma variação composicional/granulométrica do migmatito. A tabela 1 apresenta as características principais de cada amostra coletada. As figuras 4 a 8 ilustram as características petrográficas das amostras.

### Difração de Raios X

Os difratogramas de raios X indicaram a presença de quartzo, biotita, microclina,

ortoclásio, albita, sanidina, hornblenda, augita, titanita e caulinita. Nas amostras SC-01, SC-02, SC-05 predominaram a presença de quartzo. Na amostra SC-04 o mineral mais abundante foi a biotita.

E na amostra SC-03 o difratograma identificou a abundância de hornblenda. Em todas as amostras há presença da caulinita, indicando alteração do K-feldspato, do ortoclásio, da microclina e da albita. E, em menor quantidade, registrou-se a presença de titanita e augita (amostra SC-05) e vermiculita (amostra SC-06).

Tabela 1 - Descrição das amostras analisadas.

Amostra	Rocha	Granulometria	Textura	Minerais Essenciais
SC-01	Gnaiss Granítico	Média a grossa	Granoblástica	quartzo, anortoclásio, plagioclásio, sericita, microclina, hornblenda, ortoclásio e sanidina
SC-02	Biotita Gnaiss	Grossa	Diablástica	quartzo, biotita, anortoclásio, hornblenda, plagioclásio e piroxênio
SC-03	Anfibólio Gnaiss	Média	Nematoblástica	hornblenda, piroxênio, quartzo, plagioclásio e a biotita
SC-04	Biotita Gnaiss	Média a grossa	Nematoblástica	biotita, quartzo, plagioclásio, hornblenda e piroxênio
SC-05	Anfibólio Biotita Gnaiss	Média	Nematoblástica	quartzo, piroxênio, hornblenda e a biotita

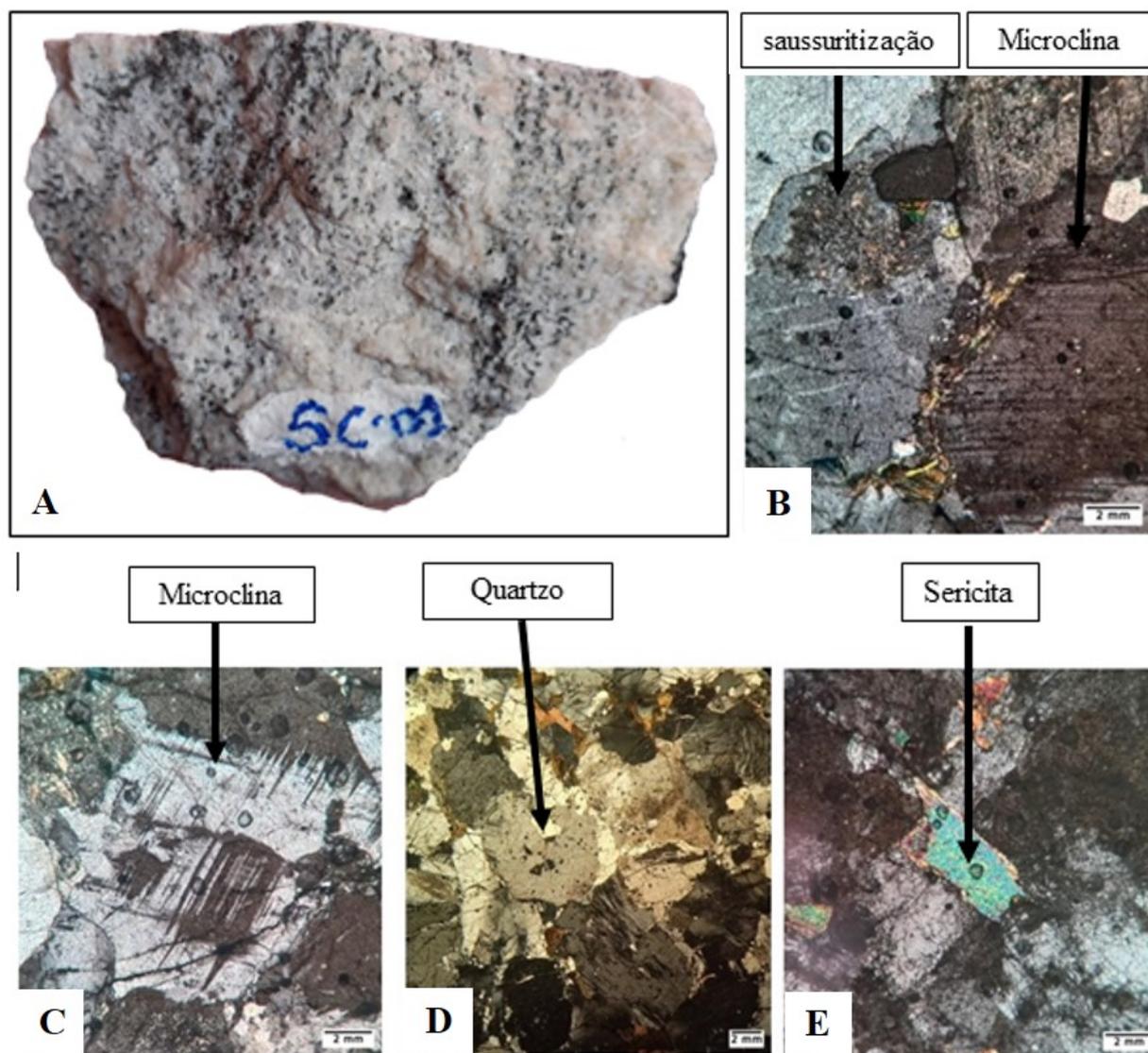


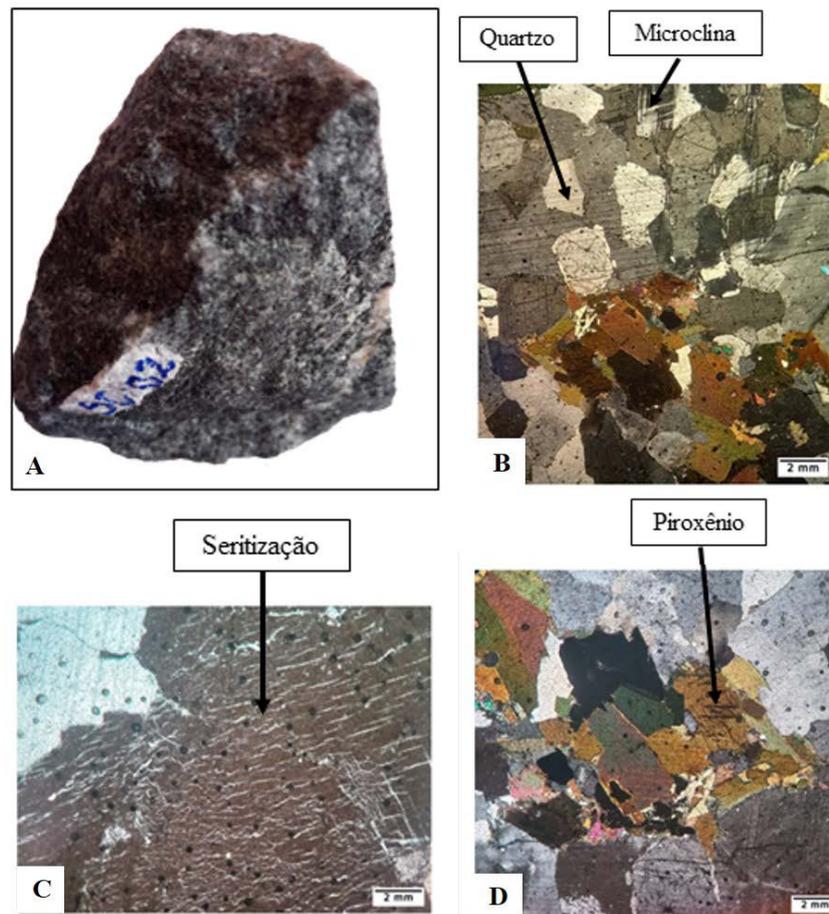
Figura 4 – A) Amostra SC-01 (Gnaiss granítico). B-E: fotomicrografias da lâmina petrográfica. B) Percolação de carbonato e processo de saussuritização no plagioclásio; C) Sericitização e fraturas no feldspato; D) Diversas fraturas nos quartzos e plagioclásios; E) Sericita.

### Fluorescência de Raios X

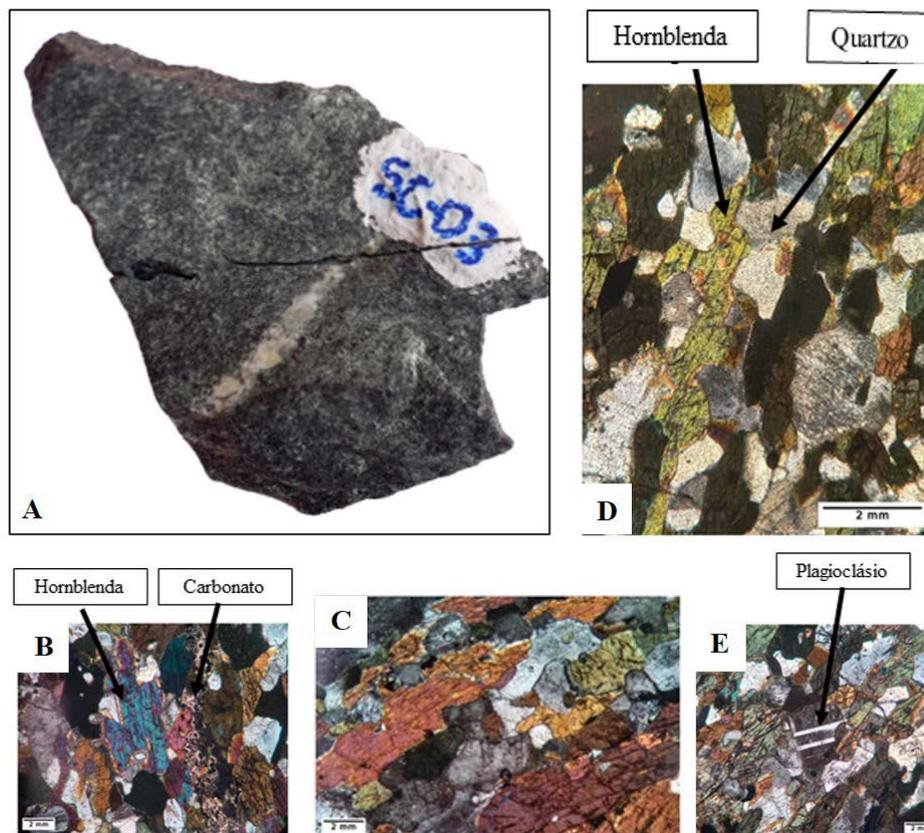
Os resultados mostraram teores de sílica variando entre 48,90% e 73,00%. Os elementos básicos, como CaO, K<sub>2</sub>O e MgO apresentaram percentagens menores (abaixo de 11,00%). O FeO também apresenta comportamento semelhante, com uma variação entre 1,60 e 12,40% (Tabela 2).

### pH de Abrasão

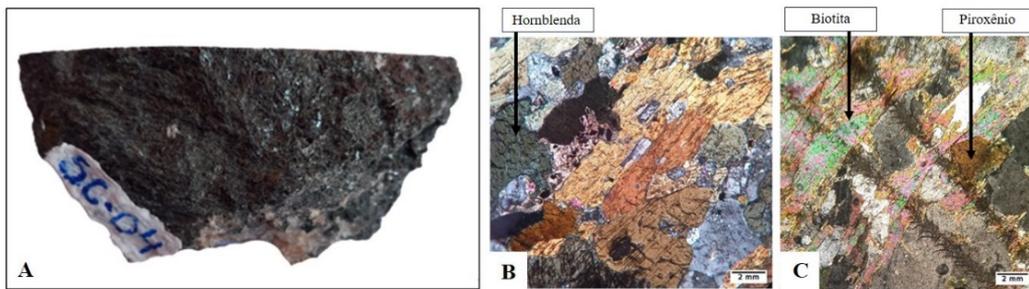
De acordo com a teoria ácido-base de Arrhenius, as amostras coletadas apresentaram valores de pH próximos à região de basicidade (>7,0). Tais valores refletem da abundância de íons alcalinos, sódio (Na), potássio (K) e cálcio (Ca), encontrados em feldspatos, mica, anfibólios e piroxênios (Tabela 3).



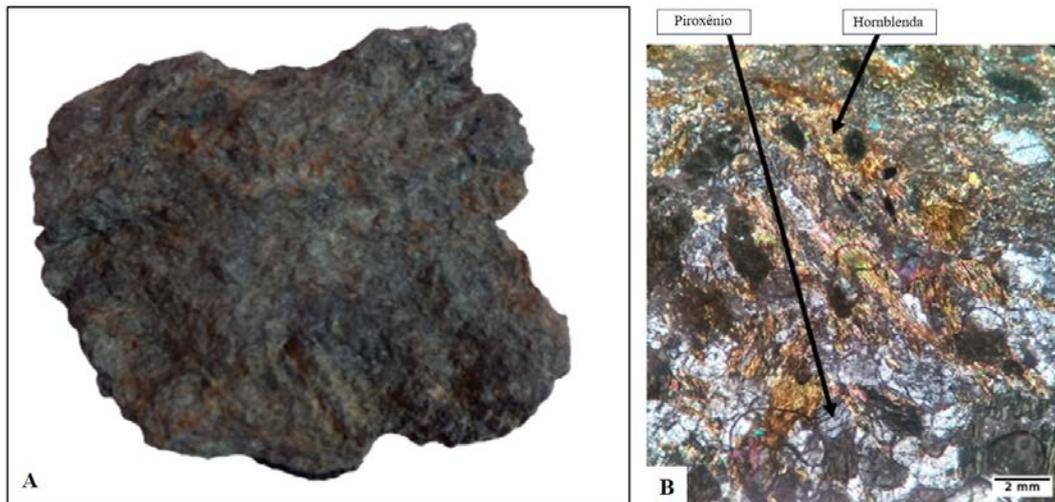
**Figura 5** – A) Amostra SC-02 (Biotita gnaiss). B a D) Fotomicrografias da lâmina petrográfica. B) Quartzo, microclima e piroxênio com macla; C) Sericitização no plagioclásio; D) Piroxênio fraturado.



**Figura 6** – A) Amostra SC-03 (Anfibólio gnaiss). B a E: fotomicrografias da lâmina petrográfica. B) Hornblenda zonada com percolação de carbonatos nas fraturas; C) Hornblenda com fraturas; D) Hornblenda orientada; E) Presença de plagioclásio.



**Figura 7** – A) Amostra SC-04 (Biotita gnaiss). B e C: fotomicrografias da lâmina petrográfica: B) Biotita orientada; C) Biotita e piroxênio com fratura.



**Figura 8** – A) Amostra SC-05 (Anfibólio biotita gnaiss). B: fotomicrografia da lâmina petrográfica, com piroxênio e hornblenda.

**Tabela 2** - Resultados qualitativos e quantitativos das análises por fluorescência de raios X.

Lâmina Petrográfica	Feixes	Composição química (%)	Mineral
SC – 03 (EDS /WDS)	Feixe (001)	43,40% de ferro (Fe) e 56,60% de enxofre (S)	Sulfeto
	Feixe (002)	0,74% de óxido de cálcio (CaO), 5,05% de óxido de sílica (SiO <sub>2</sub> ) e 94,21% de óxido de ferro (FeO)	Hematita
	Feixe (003)	0,68 de óxido de cálcio (CaO), 2,53% de óxido de magnésio (MgO), 0,70% de óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 3,28% de óxido de sílica (SiO <sub>2</sub> ) e 92,81% de óxido de ferro (FeO)	
	Feixe (004)	85,75% de cálcio (Ca), 12,68% de carbono (C), 0,73% de óxido de manganês (Mn) e 0,85% de óxido de ferro (FeO)	Carbonato de Cálcio
	Feixe (005)	1,79% de óxido de cálcio (CaO), 9,62% de óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O), 22,98% de óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 64,23% de sílica (SiO <sub>2</sub> ), 1,39% de óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	Piroxênio com composição química diferente
	Feixe (006)	12,52% de óxido de cálcio (CaO), 1,26% de óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O), 9,36% de óxido de magnésio (MgO), 10,66% de óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 44,08% de sílica (SiO <sub>2</sub> ), 1,36% de óxido de potássio (K <sub>2</sub> O), 1,25% de óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	
	Feixe (001)	12,47% de óxido de cálcio (CaO), 1,41% de óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O), 9,54% de óxido de magnésio (MgO), 9,92% de óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), 44,73% de óxido de sílica (SiO <sub>2</sub> ), 1,26% de óxido de potássio (K <sub>2</sub> O), 1,46% de óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> ) e 19,20% de óxido de ferro).	Hornblenda
	Feixe (002)	71,98% de trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) e 28,02% de óxido de ferro (FeO).	Pirita
	Feixe (003)	72,90% de tri óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) e 27,10% de óxido de ferro (FeO).	
SC – 04 (EDS /WDS)	Feixe 1	MgO (15,02%), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (16,50%), SiO <sub>2</sub> (39,90%), K <sub>2</sub> O (10,54%), TiO <sub>2</sub> (1,22%) e FeO (16,83%).	Biotita

**Tabela 3 - Resultados numéricos do pH de abrasão.**

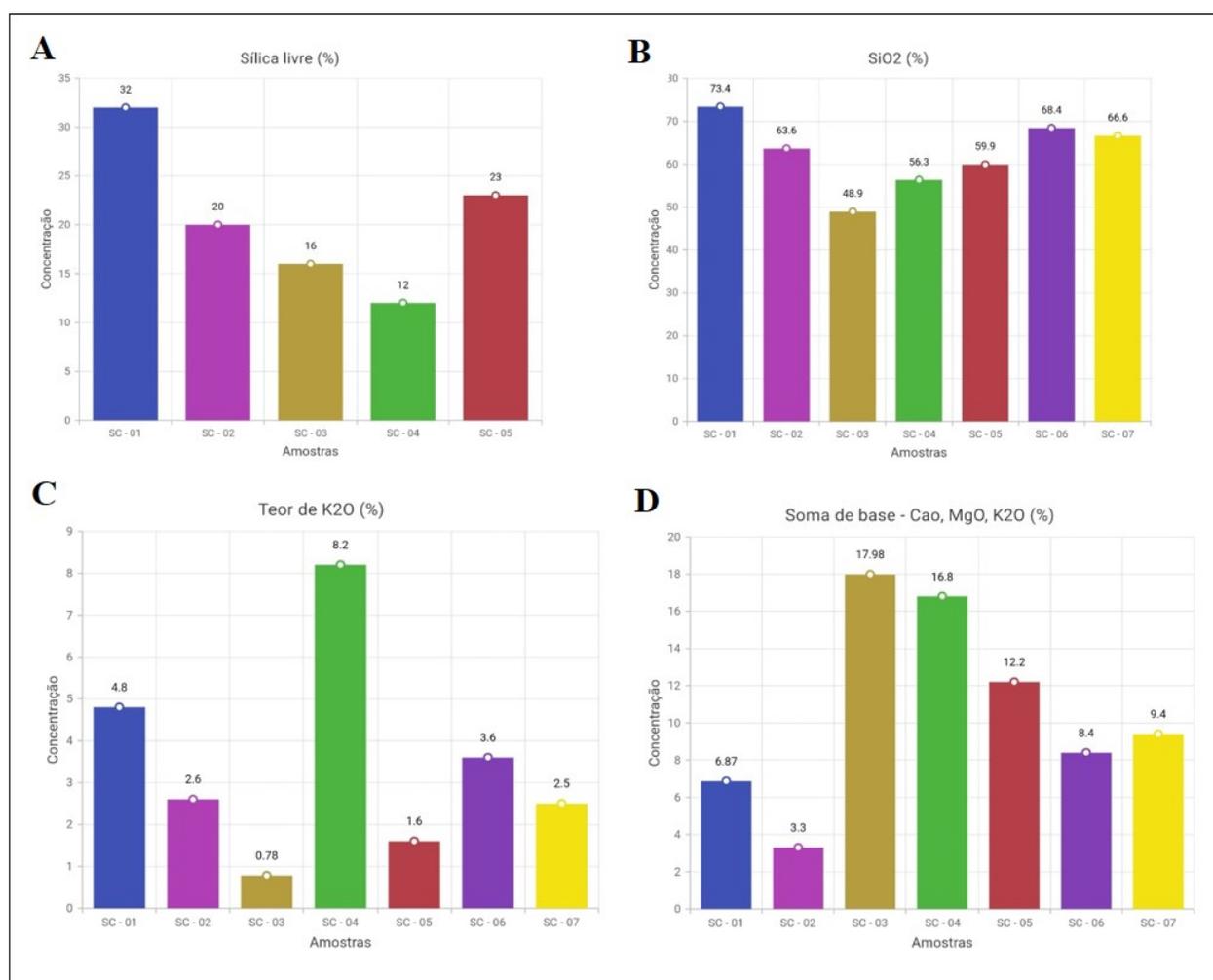
Amostras	SC - 01	SC - 02	SC - 03	SC - 04	SC - 05	SC - 06	SC - 07
pH	8,86	9,13	8,91	9,29	9,10	8,95	8,93

### RESULTADO DO CRITÉRIO DE REMINERALIZADOR DO SOLO

Todas as amostras foram analisadas pelo critério de remineralizador de solos em relação ao limite máximo de sílica livre à soma de bases e ao teor mínimo de  $K_2O$ . Todas as amostras, exceto a SC -01, exibiram valores de sílica livre (quartzo) abaixo de 25%. Quanto à soma de bases, as amostras SC - 03, SC - 04, SC - 05 e SC - 07 possuem valores acima de 9%. Em relação ao teor mínimo de  $K_2O$  (1%), somente a amostra SC-03 não alcançou o valor mínimo

(Figura 9).

A análise integrada indica que os litotipos das amostras SC-02, SC-04, SC-05, SC-06 e SC-07 exibem características como potenciais remineralizadores. E, considerando o modelo de desenvolvimento de remineralizador de solos a partir de combinações de materiais com composição bem diferentes, as amostras SC-03 e SC-04 exibem conteúdos (somadas) de bases e de potássio favoráveis.



**Figura 9** – Resultados do critério remineralizador do solo: A) Teor de sílica total; B) Teor de sílica livre (quartzo); C) Teor de Potássio ( $K_2O$ ); D) Análise da Soma de Base (CaO,  $K_2O$ , MgO).

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos geológicos sobre o migmatito do Complexo Camboriú, por meio de análises químicas de rocha total associadas aos dados das difrações de raios, contribuíram para uma avaliação do rejeito da atividade mineraria visando à aplicação da prática de remineralização de solos. Esta prática oferece uma opção de

negócio mais sustentável, com oportunidades de diminuição da emissão de carbono e até bonificação por menor emissão de  $CO_2$  na atividade associada à mineração.

A geração de migmatitos, comumente relacionada a ambientes orogênicos, envolve muitas variáveis (composição inicial, porcen-

tagem de fusão, grau metamórfico, deformação), permitindo a segregação e a migração de leucossomas. As diferenças de reagentes durante a fusão dão origem a variações nos produtos da migmatização. Portanto, é necessário um estudo aprofundado de suas particularidades locais para o desenvolvimento de um potencial remineralizador de solos.

As amostras utilizadas no presente estudo contêm os minerais titanita e hornblenda, resultado do processo de “*Water flued melting*”, indicando o baixo ponto de fusão estabelecido nos minerais.

Além disso, o desenvolvimento da hornblenda em lugar da actinolita e do plagioclásio mais cálcio classifica o metamorfismo como sendo de fácies anfíbolito, desenvolvido em um alto grau metamórfico. Conclui-se que a gênese do migmatito, de seu protólito e do processo “*Dehydration-melting*” induziram o aumento da temperatura no ponto de fusão, permitindo a quebra dos minerais hidratados como biotita, muscovita e hornblenda. Esses minerais são fundamentais para facilitar a liberação dos nutrientes no solo e por vezes a entrada de K<sub>2</sub>O, Ca e Mg associados.

Os critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para definir o potencial remineralizador de solo, não foram completamente atingidos em algumas amostras, pois estas apresentaram baixo teor na soma de base e do teor de sílica livre (quartzo). Outras amostras superaram o teor de 25%. No entanto, em todas as amostras, o critério K<sub>2</sub>O > 1% está de acordo com o MAPA.

As amostras provenientes do rejeito da mineradora (SC-06 e SC-07) apresentam

potencial para remineralizador, com resultados concordantes com as regras estabelecidas pelo MAPA.

A amostra SC-04 exibe teor elevado de potássio (8,2%), podendo ser um fertilizante natural desse elemento. A amostra SC-03 possui grande concentração de Mg (6,9%) e Ca (10,3%). Estas duas amostras possuem potencial como matéria-prima para realizar misturas visando ao desenvolvimento de insumos para a agricultura.

É importante ressaltar que, em função das variedades composicional, granulométrica e mineralógica de rochas migmatíticas, há uma dificuldade em identificar uma ocorrência com potencial remineralizador de solos de larga escala para atender o mercado agrícola. De qualquer forma, é possível realizar estudos de segregação dos materiais com maior potencial para uso na agricultura.

Recomenda-se que os estudos sejam ampliados para demais rochas metamórficas e outras ocorrências de migmatitos, priorizando regiões agrícolas com alta demanda de fertilizantes, pois há diversos condicionantes na sua evolução geológica que impactam no produto final disponível para o desenvolvimento de remineralizadores de solos.

Além disso, especificamente para o migmatito estudado, recomendam-se rebitagem e repeneiramento, a fim de se obter um material de granulometria *filler*, o qual proporcionará a diminuição da capilaridade e porosidade, permitindo potencialização na concentração de minerais ricos em nutrientes. Este pode ser um processo de beneficiamento para melhorar a qualidade dos materiais para o desenvolvimento de potenciais remineralizadores de solos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à mineradora, que permitiu a amostragem. Ao Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA/UERJ), pela elaboração das lâminas petrográficas. Ao Laboratório de Microsonda da UFRJ que auxiliaram na análise composicional das amostras. Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), pela análise laboratorial.

## REFERÊNCIAS

- AMÓS, M. **Migmatito e a geração de granito no Complexo Camboriú, SC: controle estrutural, condições de fusão da crosta e gênese do Granito Itapema**. 2019. Porto Alegre. 210 p. Tese (Doutorado), Rio Grande do Sul.
- BRASIL. **Instrução Normativa No 6, de 10 de março de 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. Gabinete da Ministra. [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092)
- CHEMALE JR., ANJOS-ZERFASS, G. S., MOURA, A. V. Post-depositional effects on the microstructure and stable isotopes composition of planktic foraminiferal tests from the Miocene of the Pelotas Basin, south Brazilian continental margin. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v. 28, p. 92-104, 2011.
- COMEXSAT. **Exportação e Importação Geral**. 2021. Disp. em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/41075>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- CONAB. **Boletim logístico dez. 2021**. Disp. em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4486-importacao-de->

- fertilizantes-e-recorde-e-chega-a-41-6-milhoes-de-toneladas. Acesso em: 30 ago. 2022.
- HEILBRON, M., MACHADO, N., SIMONETTI, T., DUARTE, B. A Palaeoproterozoic orogen reworked within the Neoproterozoic Ribeira belt, SE Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4, Short Papers, p. 186-189. Actas...São Paulo: 2003.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SILVA, L.C.; CAMPOS NETO, M.C.; TROUW, R.A.J. A evolução tectônica da Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Coords.), **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 203-234, 2004.
- LOPES, A.P. **Geologia do Complexo Camboriú – Santa Catarina**. São Paulo, 2008. 118 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MARTINS, É.S.; MARTINS, E.S.; HARDOIM, P.R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário, EPAMIG**, v. 11, n. 321, p. 26-39, 2023.
- MISSOUX, M. Sur l'emploi de la poudre des roches granitiques comme excitant de la vegetation. **Comptes rendus de l'Académie des Sciences**, v. 36, p. 245, 1853.
- PETERNELL, M.; BITENCOURT, M.F.; KRUHL, J.H. Macro- and Microstructures as indicators of the development of syntectonic granitoids and their host rocks in the Camboriú region, Santa Catarina, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, p. 3, p. 738-750, 2000.
- SAWYER, E.W. **Atlas of Migmatites**, v. 9. 386 p., 2008.
- SCHMIDT, M.W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: em experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 110, n. 2, p. 304-310, 1992.
- SWOBODA, P.; DÖRING, T.F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022.
- UFRGS. **Mapeamento geológico 1:25000 de parte da Folha Camboriú (MI2894/2), SC**. Porto Alegre. 1 v., 3 mapas. Curso de Geologia, 2000.

*Submetido em 8 de dezembro de 2023  
Aceito para publicação em 13 de março de 2024*