

CARACTERIZAÇÃO MINERAL DO CAULIM ASSOCIADO AO PEGMATITO CRISTO REI, DOMINGOS MARTINS - ES (REGIÃO SUDESTE DO BRASIL)

*MINERAL CHARACTERIZATION OF KAOLIN ASSOCIATED WITH THE CRISTO REI
PEGMATITE, DOMINGOS MARTINS - ES (SOUTHEAST REGION OF BRAZIL)*

**Renzo Dias RODRIGUES^{1,2}, Daniel VALE^{1,2}, Aurélio Fagundes SILVA^{1,3}, Luis Paulo Luzorio
SCOLFORO¹, Ana Paula MEYER², Luiz Carlos BERTOLINO^{1,3}, Mauro Cesar GERALDES¹**

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia, Avenida São Francisco Xavier, 524. Maracanã. Rio de Janeiro - RJ.
E-mails: renzodias10@hotmail.com; aurelio.fagundes@hotmail.com; luispaulo.geologia@gmail.com; mauro.geraldes@gmail.com

²Instituto Federal de Educação do Espírito Santo. Programa de Pós-graduação Lato Sensu em Tecnologias de Produção de Rochas
Ornamentais. Rodovia ES-482, Fazenda Morro Grande. Cachoeiro do Itapemirim – ES.
E-mails: daniel.vale@ifes.edu.br; ana.meyer@ifes.edu.br

³Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Avenida Pedro Calmon, 900. Cidade Universitária. Rio de Janeiro – RJ.
E-mail: lcbertolino@uol.com.br

Introdução

Apresentação e localização da área de estudo

Objetivos e justificativa

Material e métodos

Revisão bibliográfica

Magmatismo associado ao Orógeno Araçuaí

Província Pegmatítica Oriental do Brasil

Ocorrências de halloysita na Região Sudeste do Brasil

Aspectos fisiográficos de Domingos Martins

Pegmatito Cristo Rei

Caracterização mineralógica dos argilominerais

Discussões

Origem e formação dos argilominerais

Considerações finais

Referências

RESUMO - No sudeste do Brasil, inúmeros depósitos de caulinato associados a pegmatitos intemperizados são conhecidos mundialmente através da Província Pegmatítica Oriental do Brasil. O pegmatito Cristo Rei, localizado em Domingos Martins (centro-sul do Espírito Santo), é um exemplo desse contexto, que além da relevância científica, representa uma condição geológica de importância socioeconômica local. Ele apresenta potencial para exploração de minerais-gemas, argilominerais, rochas ornamentais, minerais industriais e minerais com elementos terrenos raros. Este estudo teve como objetivo investigar a variação da composição mineralógica e geoquímica dos argilominerais derivados desse pegmatito, visando compreender mecanismos de formação, evolução e controles geomorfológicos e hidráulicos associados à sua distribuição. Foram aplicadas técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX), permitindo identificar e caracterizar caulinita, halloysita e gibbsita. Os resultados revelam um gradiente evolutivo controlado por relevo, drenagem e estágio de intemperismo: I) caulinita predomina em zonas de drenagem ativa, encostas e fundos de vale; II) halloysita ocorre em áreas com umidade e drenagem sazonal; III) gibbsita é dominante nos topo de morro, com lixiviação e intemperismo avançado; IV) em zonas intermediárias ocorrem fases transicionais. Os dados confirmam um gradiente típico de caulinização controlado pela dinâmica geomorfológica e hidráulica. Conclui-se que o pegmatito Cristo Rei constitui um modelo genético de depósitos de alteração hidrotermal e intempérica, com potencial para prospecção seletiva de argilominerais de alto valor tecnológico e econômico.

Palavras-chave: Argilominerais industriais. Halloysita. Caulinita. Gibbsita. Província Pegmatítica Oriental do Brasil.

ABSTRACT - In southeastern Brazil, numerous kaolin deposits associated with weathered pegmatites are known worldwide through the Eastern Pegmatitic Province of Brazil. The Cristo Rei pegmatite, located in Domingos Martins (south-central Espírito Santo), is an example of this context, which, in addition to its scientific relevance, represents a geological condition of local socioeconomic importance. It presents potential for the exploration of gem minerals, clay minerals, ornamental rocks, industrial minerals, and minerals with rare earth elements. This study aimed to investigate the variation in the mineralogical and geochemical composition of clay minerals derived from this pegmatite, seeking to understand the mechanisms of formation, evolution, and geomorphological and hydrological controls associated with its distribution. Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) techniques were applied, allowing the identification and characterization of kaolinite, halloysite, and gibbsite. The results reveal an evolutionary gradient controlled by relief, drainage, and weathering stage: I) kaolinite predominates in areas of active drainage, slopes, and valley bottoms; II) halloysite occurs in areas with humidity and seasonal drainage; III) gibbsite is dominant on hilltops, with leaching and advanced weathering; IV) transitional phases occur in intermediate zones. The data confirm a typical kaolinization gradient controlled by geomorphological and hydrological dynamics. It is concluded that the Cristo Rei pegmatite constitutes a genetic model of hydrothermal and weathering alteration deposits, with potential for selective prospecting of clay minerals of high technological and economic value.

Keywords: Industrial clay minerals. Halloysite. Kaolinite. Gibbsite. Eastern Pegmatite Province of Brazil.

INTRODUÇÃO

A gênese e a variação composicional dos argilominerais em regiões tropicais montanhosas

constituem objeto de estudo recorrente na mineralogia, pedologia e nanotecnologias, especialmente devido à sua importância econômica, ambiental e aplicação tecnológica (Joussein et al., 2005; Fu et al., 2024; Chen et al., 2025).

Dentre esses argilominerais, destaca-se a halloysita, pertencente ao grupo da caulinita, que ocorre em duas formas estruturais: halloysita 10 Å e halloysita 7 Å, diferenciadas pela presença ou ausência de moléculas de água na região interlamelar.

Sua morfologia varia entre tubular, esferoidal, placoide ou irregular, conforme as condições de formação e as substituições isomórficas na estrutura cristalina.

A forma tubular é a mais valorizada cientificamente e economicamente, resultando da curvatura natural entre as camadas tetraédricas e octaédricas, que gera canais tubulares ocos com diâmetros entre 10 e 150 nm e comprimentos superiores a 3 µm.

Essa estrutura nanotubular possibilita o armazenamento e a liberação controlada de compostos químicos, ampliando suas aplicações em setores diversos, como fármacos, polímeros e remediação ambiental (Souza Santos et al., 2009; Licursi et al., 2023).

Nas últimas duas décadas, o número de publica-

ções científicas sobre a halloysita aumentou exponencialmente, com estudos sobre a estrutura, caracterização mineralógica, aplicações ambientais, nanotecnologia, reforço de polímeros e sistemas de liberação controlada (Churchman et al., 2016). No entanto, ainda persiste uma lacuna importante nos estudos voltados à sua origem, gênese e contexto geológico de formação, especialmente em relação aos processos intempéricos e hidrotermais em rochas ricas em feldspato (Joussein et al., 2005; Inoue et al., 2012; Keeling, 2015; Wilson et al., 2016).

O presente estudo busca justamente preencher essa lacuna, contribuindo com uma abordagem integrada entre geologia, mineralogia e geomorfologia. Ao associar análises mineralógica aos aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos do meio, pretende-se ampliar as informações na base científica disponível sobre os mecanismos de formação da halloysita e sua relação com os processos de caulinização em zonas feldspáticas de pegmatitos em diferentes ambientes de intemperismo.

Apresentação e localização da área de estudo

A área de estudo está situada na comunidade Cristo Rei, localizada na porção centro-oeste do município de Domingos Martins, no centro-sul do estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil (Figura 1A).

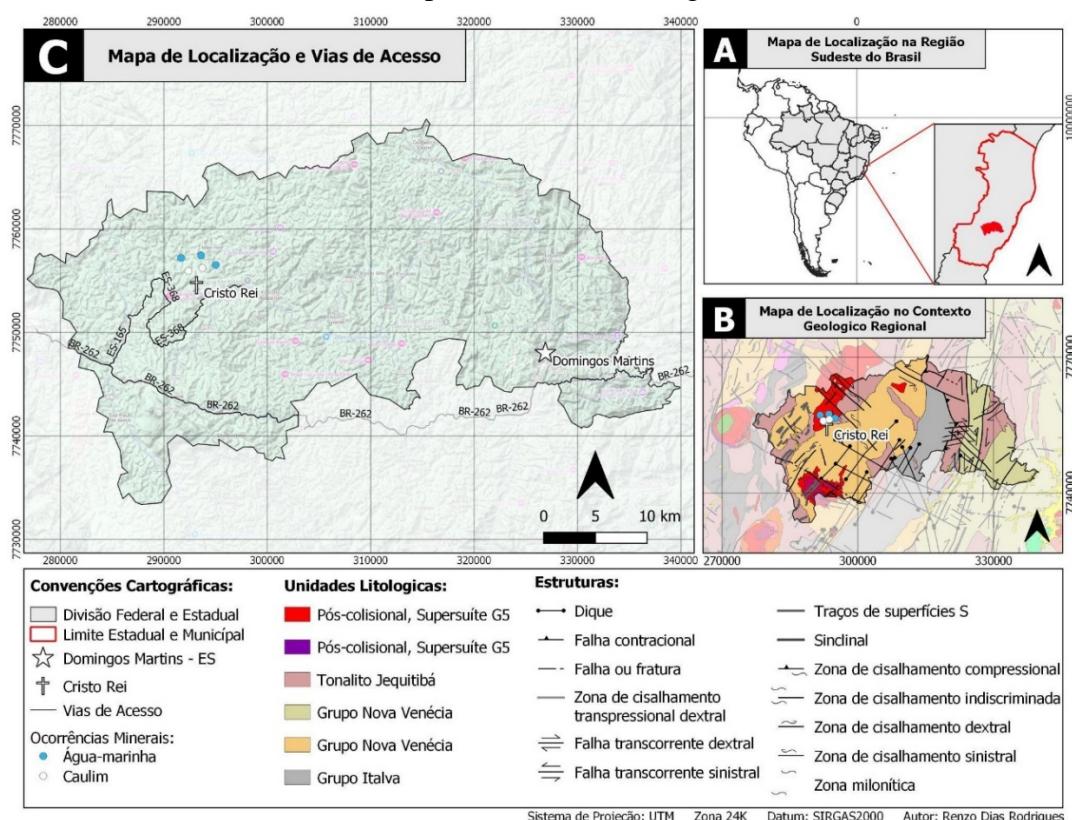


Figura 1 - Apresentação e localização da área de estudo. A) Localização da área de estudo na região Sudeste do Brasil e centro-sul do estado do Espírito Santo; B) Contexto geológico da região, com destaque para as principais unidades litológicas e estruturas associadas; C) Mapa dos limites de Domingos Martins, indicando os acessos e as ocorrências minerais da comunidade Cristo Rei. Base de dados: IBGE, 2023; CPRM, 2018; GOOGLE TERRAIN, 2025.

Esta região insere-se no contexto geológico do Orógeno Araçuaí, que foi configurado por importantes eventos tectônicos e magmáticos do estágio pós-collisional. As ocorrências do pegmatito Cristo Rei, está parcialmente inserida na unidade litológica do Maciço Garrafão, e próximo a outros dois grandes complexos intrusivos, Venda Nova e Pedra Azul, compostos por rochas representantes da Supersuite G5 (Figura 1B) (Vieira et al., 2018).

No mesmo contexto geotectônico, destaca-se a presença do contexto geoconômico da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB) que reúne diversos corpos pegmatíticos sob influência de diferentes estágios hidrotermal, de intemperismo, condições climáticas e geomorfológicas, com inúmeras ocorrências de depósitos de caulinita associados (Correia-Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 2011).

As ocorrências do pegmatito Cristo Rei configuram-se em faixas estruturais de direção NE-SW cruzando várias propriedades rurais da comunidade, ocorrendo tanto na forma de depósitos primários, formados *in situ*, quanto como depósitos secundários, resultantes do retrabalhamento e acúmulo mecânico de material alterado.

A área apresenta alto potencial mineral, destacando-se pelas ocorrências de depósitos de minerais gemológicos, argilominerais, rochas ornamentais exóticas, minerais industriais e elementos de terras raras.

Essas ocorrências encontram-se inseridas em um ambiente de clima tropical, caracterizado por relevo acidentado, rede de drenagem densa e espessa cobertura de solo, condições que favorecem o desenvolvimento de perfis de alteração caulinítica em zonas feldspáticas associadas ao grande corpo pegmatito da região.

O acesso à comunidade Cristo Rei se dá pela BR-262, rodovia federal que liga Vitória (ES) ao interior do estado de Minas Gerais, com acesso secundário por estradas vicinais pavimentadas e

trechos não pavimentados até o local das ocorrências minerais associadas ao pegmatito (Figura 1C). **Objetivos e justificativa**

O presente artigo tem como objetivo geral estudar a caracterização geológica e mineralógica dos argilominerais derivados do pegmatito Cristo Rei, com ênfase na identificação, distribuição e origem dos argilominerais em diferentes ambientes de alteração hidrotermal e intempérica.

Os objetivos específicos são: a) Mapeamento geológico, petrográfico, mineralógico e pedológico da área de estudo, com foco na identificação dos corpos pegmatíticos e zonas de alteração associadas; b) Caracterização mineralógica e microestrutural dos principais argilominerais presentes no caulinita (caulinita, halloysita e gibbsita) via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX); c) Avaliar os controles geomorfológicos, litológicos e hidrológicos na distribuição espacial dos argilominerais, associando relevo, disponibilidade hídrica e estágios de intemperismo.

Apesar do crescente número de publicações voltadas às aplicações tecnológicas e ambientais aplicadas a argilominerais, em especial a halloysita, observa-se uma lacuna de informações de estudos voltados à sua gênese, processos de formação e contexto geológico de ocorrência. A maior parte da literatura concentra-se em aspectos tecnológicos, deixando em segundo plano as investigações sobre os ambientes de formação, condições geoquímicas, tipos de rocha fonte e evolução do intemperismo que levam ao desenvolvimento desses argilominerais. Essa carência é particularmente notável em países tropicais, como o Brasil, onde inúmeros depósitos de caulinita associados a zonas de alteração de pegmatitos permanecem subexplorados, pouco caracterizados cientificamente e muitas das vezes sendo desperdiçados na forma de rejeito de lavras em pegmatitos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de investigação de estudo foi dividida em etapas de: (i) Revisão bibliográfica e levantamento de informações sobre a situação atual da exploração dos pegmatitos na região; (ii) Mapeamento geológico de campo com descrição morfológica, petrográfica, pedológica e mineralógica dos depósitos; (iii) Caracterização mineral e microestrutural dos argilominerais associados ao pegmatito; (iv) Interpretação dos dados e elaboração do texto final, resumos e artigos para

publicação das informações obtidas.

As informações e localização de ocorrências referentes a caulinita e gemas na região da comunidade Cristo Rei foram obtidos no relatório da folha geológica de Domingos Martins e no Mapa Geológico do Espírito Santo (Féboli, 1993; Vieira et al., 2015).

Durante as expedições de campo, foram realizadas a visita em 28 pontos na região dessas ocorrências, onde foram realizadas a descrição

dos aspectos de campos, afloramentos, petrografia macroscópica de rochas associadas, caracterização mineralógica e magmáticas de afloramentos e amostragem das rochas e minerais. Para as análises laboratoriais foram selecionadas cinco amostras de caulin dos pontos mais representativos para este atual estudo (Cal20, Cal21, Cal22, Cal24 e Cal26).

As amostras de campo coletadas para as análises foram encaminhadas para o Setor de Caracterização Tecnológica (SCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro – RJ, onde foram realizadas a preparação, caracterização mineralógica e microestrutural das amostras através de análises via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX).

Para o método de MEV utilizou cerca de 5mg da amostra de campo seca em estufa a 60 °C durante 24 horas. Após seca, a amostra foi

colocada em um *stub* com fita dupla-face e metalizada por prata durante 250 segundos no equipamento SCD 005 da Bal-Tec. Esta amostra foi analisada no Hitachi modelo TM3030plus Tabletop Microscope, utilizando varredura nas condições de 15 kV no modo *backscattered electron images* (BSE) com o objetivo de gerar imagens de alta resolução da morfologia.

A análise via DRX foi realizada no equipamento Bruker-AXS D8 Advanced Eco do tipo silicon drift LynxEye XE, utilizando as seguintes condições: 40 kV e 25 mA de energia, passo de 0,01° 2θ, tempo de passo de 1 segundo, detector linear sensível à posição e intervalo de análise de 3 a 70° 2θ. A interpretação qualitativa de espectro dos difratogramas foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados relacional PDF 4+ (ICDD, 2014), no software Bruker Diffrac.EVA.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem por objetivo apresentar, de forma breve, o enquadramento geológico regional e local da área de estudo. São abordados os principais aspectos litológicos, estruturais e evolutivos associados ao magmatismo pós-colisional do Orógeno Araçuaí. Inclui-se também uma síntese do contexto geotectônico e econômico dos depósitos de recursos minerais associados à PPOB. Além disso, apresenta-se uma revisão sobre as ocorrências de halloysita na região Sudeste do Brasil, destacando registros e estudos recentes sobre sua gênese, distribuição e potencial econômico. Por fim, descrevem-se os principais aspectos fisiográficos da região de estudo, como o relevo, drenagem, clima, vegetação e cobertura pedológica, que atuam como condicionantes essenciais nos processos de alteração em pegmatitos e na formação dos argilominerais.

Magmatismo associado ao Orógeno Araçuaí

A área de estudo está inserida no contexto geotectônico da Província Mantiqueira, na qual é constituída por longas faixas associadas ao arco magmático continental com extensão superior a 3.000 km sentido NNE-SSW ao longo da Costa Atlântica. A região é conhecida por sistemas de orógenos que datam do Neoproterozoico ao Cambriano. Dentre os principais orógenos que integram esse contexto destacam-se os sistemas de Orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília e Dom Feliciano (Heilbron et al. 2004). A configuração atual dessas faixas é resultado da colisão entre os cráticos São Francisco (Brasil) e Congo (África),

evento que culminou em intenso magmatismo, deformação e metamorfismo na região (Heilbron et al. 2004; Pedrosa-Soares et al., 2007).

Nesse sistema, encontra-se o Orógeno Araçuaí, evento responsável pela configuração da atual Faixa Araçuaí. O magmatismo associado aos ambientes tectônicos deste orógeno favoreceu, em diferentes momentos, a geração de líquidos magmáticos residuais e a formação de sistemas estruturais que controlaram a migração magmática e a cristalização de inúmeros corpos pegmatíticos na região (Heilbron et al. 2004; Alkimin et al. 2007; Pedrosa-Soares et al. 2007, 2011).

Os diferentes estágios magmáticos que marcaram a evolução do Orógeno Araçuaí são reconhecidos por múltiplas intrusões de idade neoproterozoica-cambriana. Autores definiram esses eventos magmáticos de acordo com os regimes tectônicos em: pré-colisional (~630-580 Ma), sin-colisional (~580-560 Ma), tardi-colisional (~560-530 Ma) e pós-colisional (~530-480 Ma). Esses deram origem às associações de rochas ígneas intrusivas presentes ao longo da Faixa Araçuaí categorizadas em Supersuites G1, G2, G3, G4 e G5. (Wiedemann et al., 2002; De Campos et al., 2004, 2016; Pedrosa-Soares et al., 2007, 2011).

A Supersuite G5 (~530-480 Ma), que constitui o contexto principal de fonte promissora para o pegmatito da área de estudo, ocorreu predominantemente no estágio pós-colisional. Essa Supersuite é caracterizada pelo seu magmatismo bimodal,

manifestado principalmente por grandes *plútôns* elípticos inversamente zonados, compostos por núcleos de rochas máficas envolvidos por bordas félscicas e que exibem fortes evidências de mistura de magmas de diferentes fontes. Esse tipo de magmatismo está associado a inúmeras ocorrências de pegmatitos portadores de berilo, topázio, turmalina, caulim, minerais terras raras, estratégicos e industriais (Wiedemann-Leonardos et al., 2002; De Campos et al. 2004, 2016; Pedrosa-Soares et al. 2011).

O Maciço Garrafão, integrante do grupo da Supersuite G5, trata-se de um extenso batólito com cerca de 120 km² de área, cujas bordas apresentam zoneamento parcial composto por rochas granodioríticas, tonalíticas, quartzo-dioríticas e gabroicas. Seu núcleo é predominantemente formado por monzogranitos e sienogranitos, e ao longo de sua extensão ocorrem estruturas resultantes da mistura de diferentes magmas. Nessa unidade são relatadas ocorrências de inúmeros corpos pegmatíticos, entre eles o pegmatito Cristo Rei (Féboli, 1993; Scolforo, 2025).

Província Pegmatítica Oriental do Brasil

A área estudo, também está inserida sobre o contexto geoeconômico da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB), onde 90% de seus limites se concentram dentro da Faixa Araçuaí, que abrange todo o estado do Espírito Santo, parte nordeste do estado de Minas Gerais, sul da Bahia e noroeste do Rio de Janeiro, ocorrendo numa faixa com aproximadamente 150.000 km² com trend direcional de NNE para SSW (Correia-Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 2011).

Na literatura, a PPOB tem limites definidos e redefinidos em diferentes trabalhos, como o de Paiva (1946), Putzer (1976), Schobbenhaus et al. (1984), Sá et al. (2022), e outros (Figura 2A). Ela é também dívida em 11 distritos de acordo com as suas mineralizações, geoquímica, tipo morfológico, sistema estrutural, rocha fonte e encaixantes, sendo eles: Araçuaí, Ataléia, Conselheiro Pena, Espera Feliz, Padre Paraíso, Pedra Azul, São José da Safira, Caratinga, Malacacheta, Santa Maria de Itabira e Espírito Santo. (Correia Neves et al. 1986, Pedrosa-Soares et al. 2011).

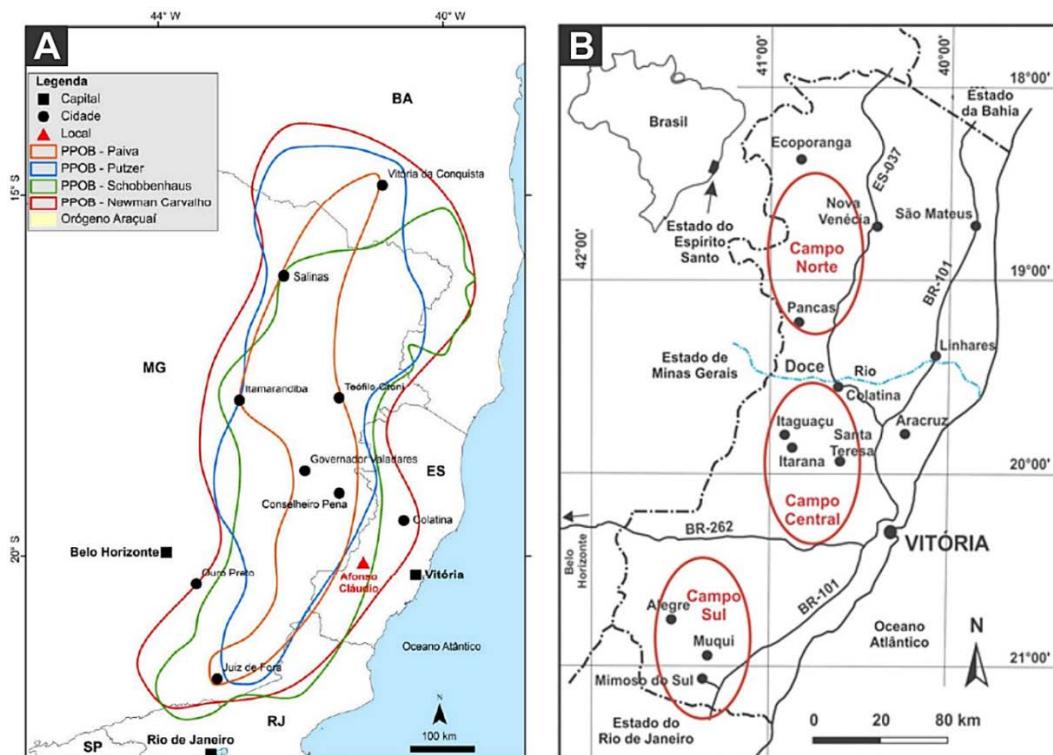


Figura 2 - A) Mapa de localização da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, reunindo os limites propostos na literatura. B) Localização dos três campos pegmatíticos do Distrito Espírito Santo. Fonte: adaptado de Sá et al. (2022) e Chaves et al. (2023).

É no distrito do Espírito Santo que está inserido o pegmatito de Cristo Rei. Localizado exclusivamente no estado do Espírito Santo, os limites das ocorrências são divididos na literatura em três campos pegmatíticos principais: Sul,

Central e Norte (Figura 2B) (Chaves et al., 2023). No campo central e onde está localizado o pegmatito Cristo Rei.

Os pegmatitos do distrito Espírito Santo apresentam mineralogia principal composta por

quartzo, feldspato potássico, albita e micas, além de fases acessórias como turmalina, topázio, berilo, fosfatos e outros. Destacam-se pelo potencial em minerais industriais (quartzo, feldspatos, muscovita), ocorrência de minerais-gema (berilo, turmalina, topázio, ametista, crisoberilo), enriquecimento em elementos como Li, Be, Ta, Nb e terras raras, rochas ornamentais e zonas intemperizadas com formação de caulim. A diversidade mineralógica e o enriquecimento em elementos incompatíveis conferem ao distrito importância estratégica para exploração de recursos industriais, gemológicos, elementos terras raras e argilominerais (Correia Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 2011; Chaves et al., 2023).

Ocorrências de halloysita na região sudeste do Brasil

Os depósitos de caulim brasileiros podem ser agrupados em dois grandes tipos: caulim sedimentar e caulim primário. A halloysita está associada principalmente aos depósitos primários, originados pela alteração de pegmatitos, granitos, rochas vulcânicas e anortositos. Nesses contextos, é comum a formação de assembleias mineralógicas compostas por caulinata e halloysita, registradas em diversas regiões do país (Wilson et al., 2006; Souza Santos et al., 2009).

É importante ressaltar que a halloysita tubular não foi identificada em grandes depósitos sedimentares, como os da Bacia Amazônica. Por outro lado, os depósitos de caulim primários localizados nas regiões Sudeste, especialmente aqueles associados a pegmatitos e granitos, tem ocorrências de halloysita tubular, geralmente em associação com caulinata e gibbsita (Wilson et al., 2006; Souza Santos et al., 2009; Licursi, 2022).

Na Província Pegmatítica Oriental do Brasil, a halloysita tem sido estudada com maior frequência, sobretudo em pegmatitos submetidos a intensa alteração hidrotermal e intempérica, que resultaram em depósitos argilominerais como caulinata e halloysita. As principais ocorrências estão documentadas em municípios de Minas Gerais, como Mar de Espanha, Juiz de Fora, Bicas, Pequeri, Cataguases e Poços de Caldas (Souza Santos et al., 2009). No Rio de Janeiro, ela tem sido encontrada nas localidades de Rio Bonito, Cantagalo, São Gonçalo, Porciúncula, Petrópolis, Magé, Valença e Araruama. Já no estado de São Paulo, destacam-se Capão Bonito, Embu-Guaçu, Itapecerica da Serra e Paraibuna (Salgado Campos, 2020; Licursi et al., 2023). No Espírito Santo, embora haja carência de estudos

detalhados sobre os depósitos de caulim, existem indícios consistentes de ocorrências halloysita tubular, uma vez que o estado compartilha fatores geológicos e climáticos similares, como a presença de numerosos pegmatitos, clima tropical úmido e relevo montanhoso sob intenso intemperismo (Souza Santos et al., 2009; Salgado Campos, 2020; Licursi et al., 2023).

Em grande parte dessas ocorrências, a halloysita é encontrada em conjunto com caulinata, gibbsita, quartzo, muscovita, biotita, feldspato e goethita, compondo assembleias mineralógicas mistas, formadas tanto por minerais primários quanto por argilominerais de formação secundária.

A presença de halloysita em perfis com transição entre zonas cauliníticas e bauxíticas evidencia que a evolução do sistema mineral pode variar de acordo com o avanço do intemperismo (Licursi et al., 2023).

Essas evidências reforçam o alto potencial de ocorrência da halloysita nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, onde se concentram pegmatitos pertencentes à Província Pegmatítica Oriental do Brasil.

Nesses ambientes, a combinação entre fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos favorece a formação de halloysita de alta pureza com morfologia tubular bem desenvolvida, de grande potencial tecnológico e econômico (Licursi et al., 2023).

Aspectos Fisiográficos de Domingos Martins

A região de Domingos Martins, especialmente na área da comunidade Cristo Rei, está inserida no domínio geomorfológico do Planalto da Pedra Azul (Figura 3A), que integra parte da rota turística da Região das Montanhas Capixabas (IBGE, 2023). É caracterizada por um relevo fortemente dissecado e altitudes que variam entre aproximadamente 280 a 1.900 metros. O relevo predominante é montanhoso, com presença de morros altos, topos convexos, encostas íngremes, escarpas e vales encaixados, os quais formam diferentes compartimentos geomorfológicos na região.

A rede de drenagem local é do tipo dendrítica, composta por diversas nascentes e córregos encachoirados que se distribuem ao longo das encostas e vales. Esses corpos hídricos alimentam diretamente o Rio Jucu Braço Norte, um dos principais afluentes da Bacia Hidrográfica do Rio Jucu (Figura 3B). Este sistema fluvial segue em direção ao litoral do Espírito Santo, desaguando na região costeira de Vila Velha (AGERH, 2022).

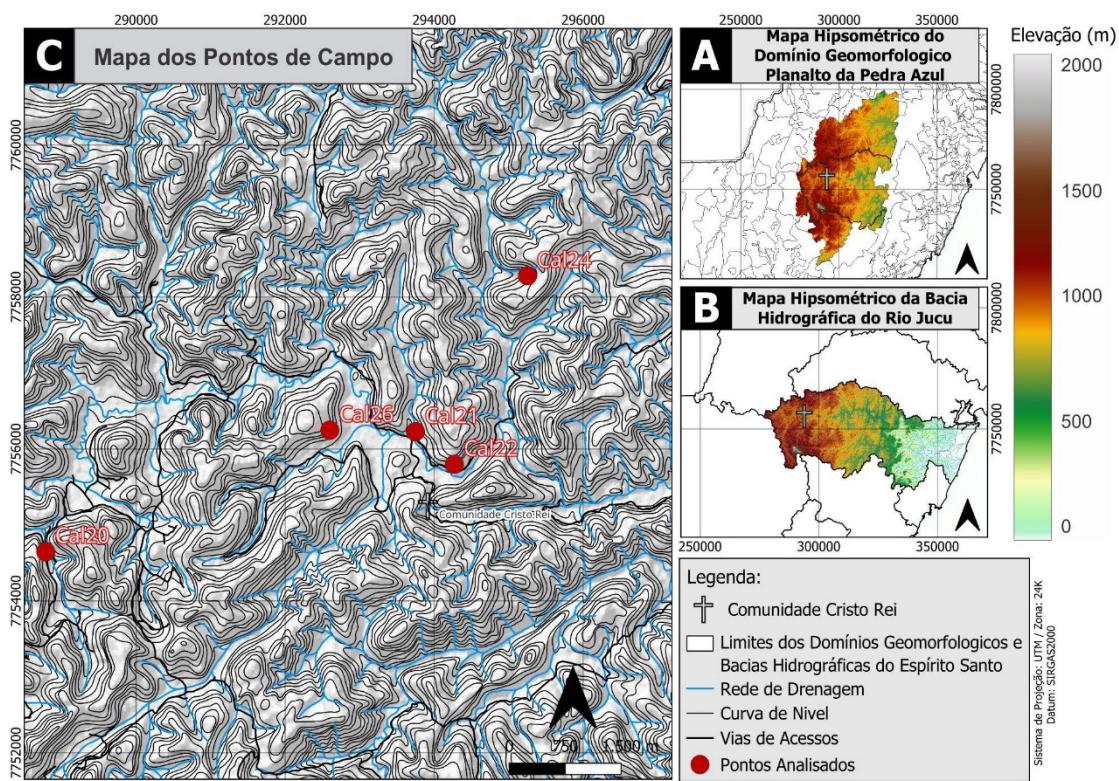


Figura 3 - Representação dos aspectos fisiográficos e pontos de campo. A) Mapa Hipsométrico do Domínio Geomorfológico Planalto da Pedra Azul; B) Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Jucu; C) Mapa com os pontos analisados na região do pegmatito Cristo Rei. Base de dados: CPRM, 2018; IBGE, 2023; AGERH, 2022; ALOS PALSAR, 2011.

O clima local é classificado como temperado oceânico, com temperaturas médias anuais inferiores a 20 °C, verões amenos com médias em torno de 22 °C e invernos mais frios, cujas médias giram em torno de 14 °C. A precipitação anual ultrapassa os 1.700 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, mas ligeiramente mais intensas nos meses de verão.

A umidade relativa do ar tende a ser elevada. (INCAPER, 2024). A vegetação natural da re-

gião corresponde à Floresta Atlântica Montana, é composta por espécies arbóreas de grande porte, elevada biomassa e importante papel na regulação hídrica para lixiviação de elementos e proteção dos solos contra processos erosivos. Atualmente, essa cobertura florestal encontra-se fragmentada, em decorrência da expansão de áreas agropecuárias, da ocupação urbana e da exploração dos recursos naturais (Silva et al., 2013).

PEGMATITO CRISTO REI

A distribuição espacial dos pontos de campo utilizados nas análises laboratoriais (Cal20, Cal21, Cal22, Cal24 e Cal26), representando na Figura 3C, abrange desde topos de morros e encostas íngremes até fundos de vale com diferentes regimes de drenagem e disponibilidade hídrica.

Essa variação permitiu a coleta de dados em distintos ambientes de intemperismo, essenciais para a caracterização mineralógica e geoquímica dos argilominerais.

A disposição geográfica dos locais amostrados serviu de base para a análise integrada dos fatores geomorfológicos, como relevo, drenagem e exposição dos afloramentos, influenciando diretamente a composição dos depósitos de argilominerais presentes no caúlim.

O relevo da comunidade Cristo Rei, onde aflora o pegmatito, caracteriza-se por intenso processo intempérico, resultando em uma espessa cobertura de solo que, por vezes, dificulta a exposição direta do corpo pegmatítico (Figuras 4A e B).

A rede de drenagem é composta por diversas nascentes e córregos encachoeirados (Figuras 4C e D), que cortam o terreno em diferentes direções, favorecendo a erosão, lixiviação e a redistribuição de materiais intemperizados.

O pegmatito aflora em diferentes faixas que cortam a região com direção predominante NE-SW, apresentando distribuição irregular das zonas internas. Em diversas propriedades rurais, observam-se evidências de atividade garimpeira, conduzida por pequenos produtores familiares,

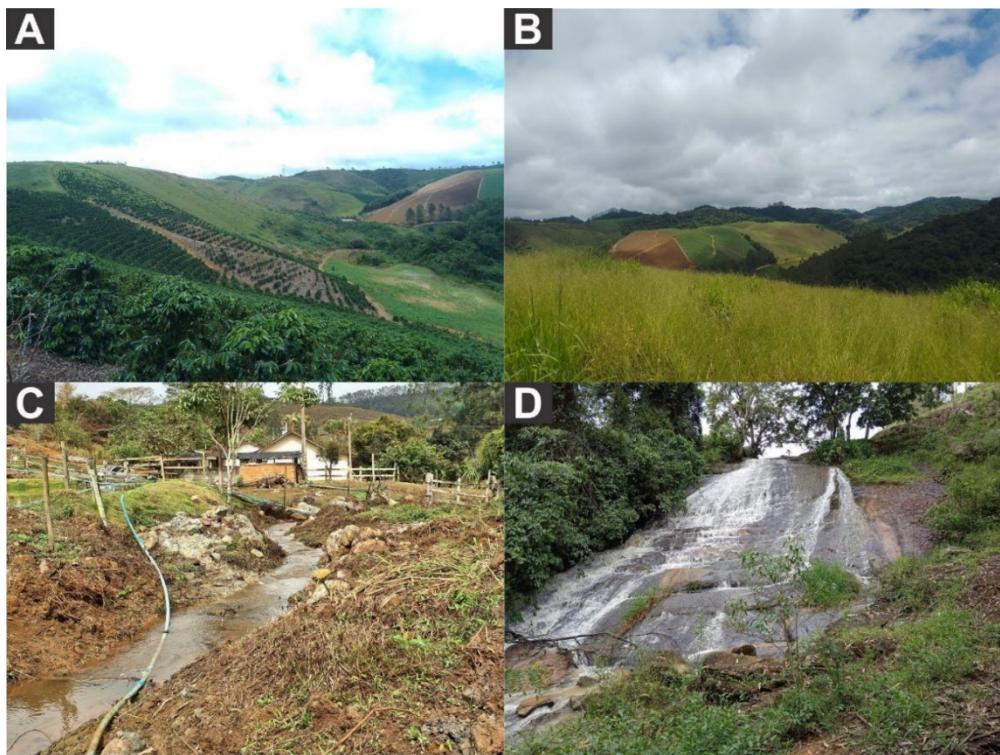


Figura 4 - Aspectos de campo. A) Relevo de mares de morros e morrotes; B) Depósitos em córregos na rede de drenagem; C) Córregos encachoeirados onde podem ser observados os diques pegmatíticos cortando as rochas do Maciço Garrafão.

com a utilização de escavações semi-mecanizadas e túneis artesanais voltados à extração de minerais gemológicos (Figura 5A).

Os depósitos minerais ocorrem sob diferentes

formas, incluindo grandes blocos *in situ* (Figura 5B), em vales e topos de morro, e depósitos secundários em blocos rolados, cortes de estrada e depósitos aluviais.

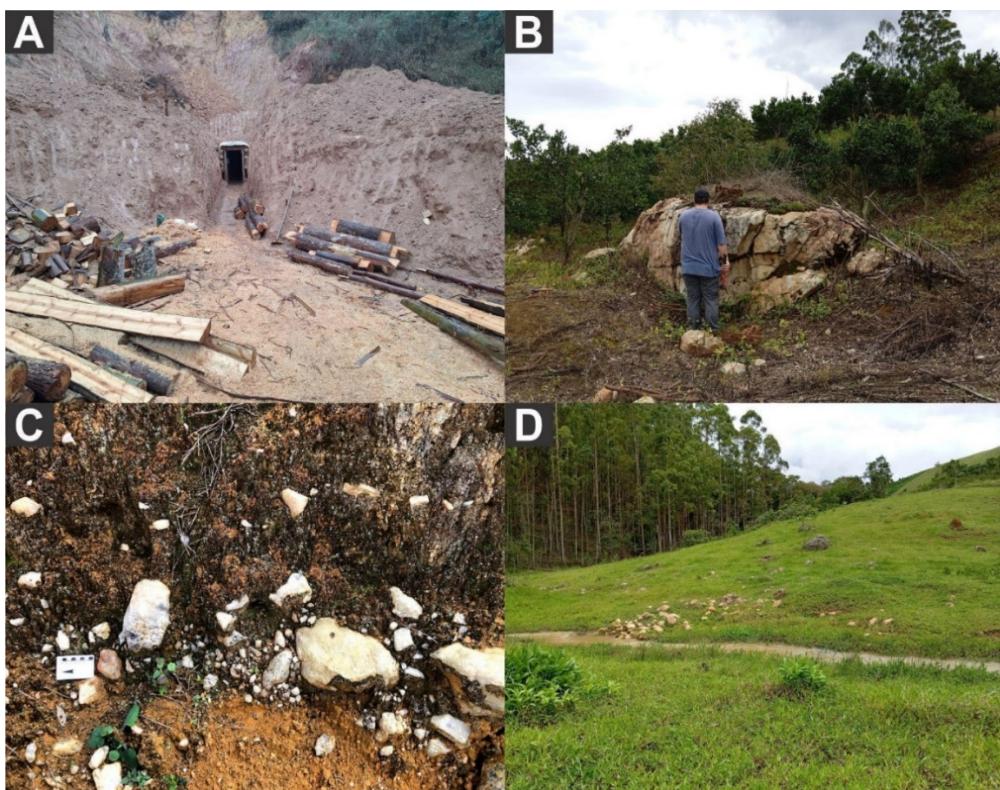


Figura 5 - Registros de afloramentos de campo dos tipos de ocorrências do pegmatito na região. A) Garimpo em túneis; B) Grandes blocos de quartzo leitoso; C) Depósitos mais antigos; D) Depósitos aluvionar atuais.

Em muitas das ocorrências de depósitos primários, observa-se que o pegmatito se apresenta

como um corpo com ramificações irregulares, formando uma estrutura predominante de veio

lenticular.

Em alguns trechos, os veios são mais delgados, enquanto em outros podem apresentar espessamentos pontuais, sugerindo a existência de zonamentos internos e bolsões mineralizados. Já os depósitos secundários são formados por agrupamentos com idades deposicionais distintas, incluindo tanto depósito sedimentar coluvionar (Figura 5C), quanto sedimentos recentes associados a ambientes atuais (Figura 5D).

As ocorrências minerais identificadas até o momento, compreendem variedades de quartzo, incluindo quartzo incolor, quartzo fumê, ametista, quartzo rosa claro e quartzo leitoso. Também se

observa a presença de feldspato potássico, predominantemente na forma de microclina. As micas, representadas por muscovita e biotita, são comuns tanto nas zonas intermediárias quanto nas bordas do corpo pegmatítico. Entre os minerais acessórios, ocorrem água-marinha, columbita-tantalita, zircão e outros.

Também são identificadas ocorrências de minerais secundários, destacando-se os argilominerais formados a partir da alteração de zonas com maior concentração de feldspatos no corpo pegmatítico. A caracterização mineralógica e geoquímica desses argilominerais será abordada em detalhe na seção seguinte.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS ARGILOMINERAIS

Em zonas feldspáticas mais intemperizadas do pegmatito, observa-se a ocorrência de caulim, associado a ambientes de lixiviação e condições geomorfológicas que favorecem a alteração mineral e a mobilização elementar.

As amostras analisadas desses depósitos de caulim mostram a presença de argilominerais como caulinita, halloysita e gibbsita. A formação desses minerais está diretamente relacionada à dinâmica da rede drenagem, relevo e grau de intemperismo que facilitam a remoção diferen-

cial de sílica e bases alcalinas, refletindo diferentes perfis de intemperismo ao longo dos afloramentos.

As imagens dos afloramentos (Figura 6) representam diferentes contextos fisiográficos utilizados como critério metodológico para a coleta das amostras.

A amostra Cal20 (Figuras 6A e B) foi coletada em um afloramento do tipo corte de estrada em encosta de morro, caracterizado por relevo acidentado, forte declividade e alta exposição ao intemperismo físico e químico.

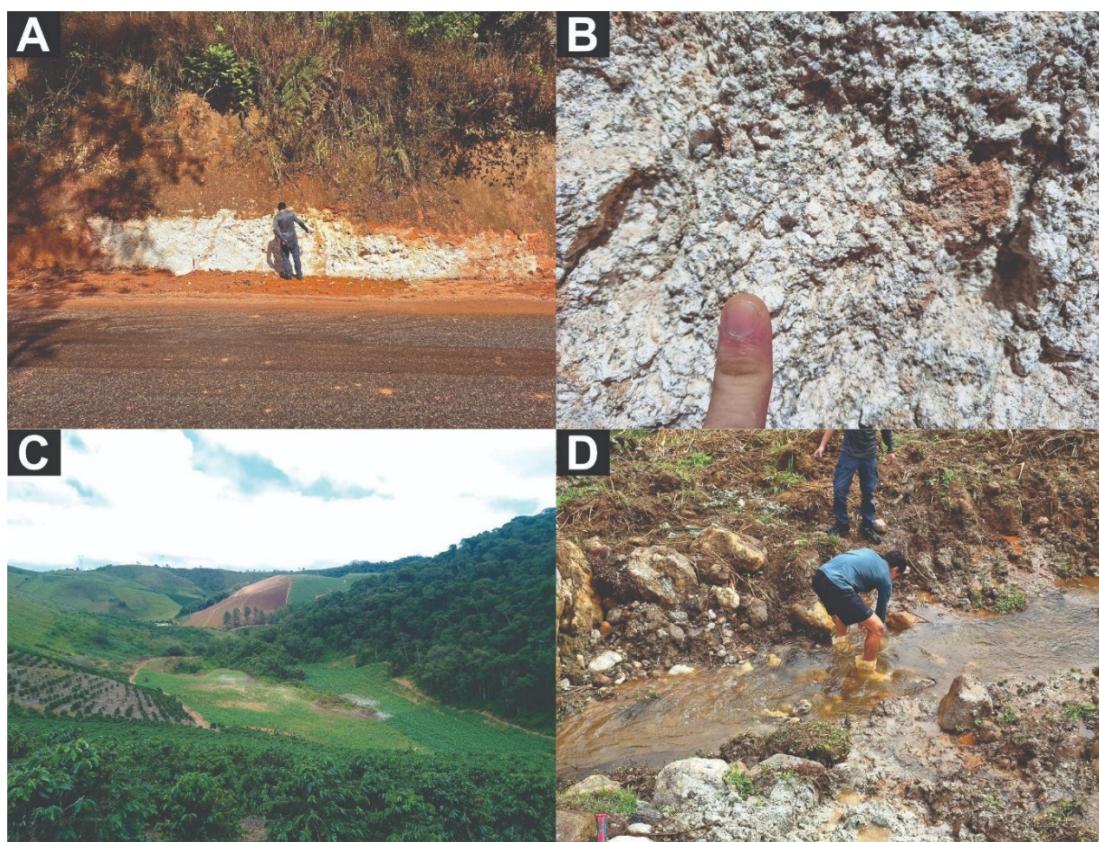


Figura 6 – Registros de afloramentos e coleta de campo de argilominerais na região do pegmatito Cristo Rei. A) Afloramento do tipo corpo de estrada; B) Amostra coletada; C) Exposição de caulim em fundo de vale, observada nas manchas brancas no solo no centro da imagem; D) Depósito em rede de drenagem.

A amostra Cal24 (Figura 6C) foi obtida em um depósito localizado em fundo de vale, onde predominam condições de maior retenção de umidade e menor energia de escoamento superficial.

A amostra Cal21 (Figura 6D) foi coletada na drenagem de um vale, em área com declividade moderada e com escoamento hídrico ativo, o que indica um regime de intemperismo intermediário.

Por fim, a amostra Cal26 (ver Figura 5A) também foi coletada em um afloramento situado em morro, com topografia acentuada e condições favoráveis à percolação de água e estágio avançado de intemperismo.

A Figura 7A, representa a amostra Cal21 em MEV, onde observa-se uma textura predominantemente lamelar, com placas espessas e alongadas dispostas de forma entrelaçada, formando um arranjo tridimensional. Sobre a superfície das lâminas, há partículas menores, finamente cristalizadas, aderidas às bordas e interstícios. Essa combinação de formas pode indicar um processo de recristalização ou preenchimento secundário por outros argilominerais. A disposição paralela das lâminas é compatível com a presença de caulinita bem ordenada, enquanto os agregados

menores podem estar associados a quartzo ou feldspato residuais.

Na Figura 7B, também se observa a continuidade da estrutura lamelar, porém com evidências de fraturamento e desagregação parcial das placas. Há camadas quebradas e dobradas, o que indica fragilidade mecânica, típica de caulinita ou mica intemperizada. As bordas irregulares e a presença de grãos finos entre as lâminas sugerem possível presença de mica residual parcialmente transformada em caulinita. A textura entrelaçada também indica um ambiente de alteração inicial, onde ainda se preservam feições texturais da rocha original.

O difratograma da Figura 7 C apresenta picos principais em 7,19 Å (caulinita), 10,37 Å (mica), 4,23 Å e 3,35 Å (quartzo), 3,57 Å (caulinita) e 3,28 Å (feldspato potássico). A coincidência entre os picos experimentais e os padrões de referência confirma essa associação mineralógica mista, composta por minerais primários, como quartzo, feldspato e mica (biotita/muscovita), e minerais secundários, como a caulinita, caracterizando um grau de alteração inicial a intermediário.

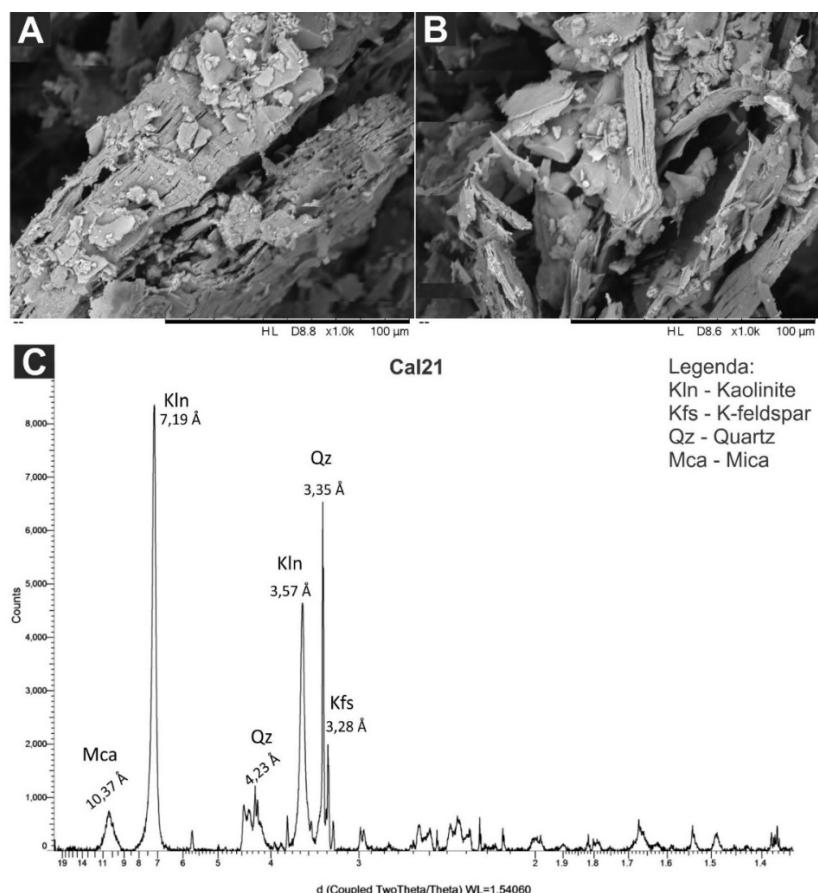


Figura 7 - Representação da amostra Cal21. A) MEV mostrando partículas lamelares maiores (estrutura tipo “livro”) recobertas por finos cristais aglomerados. B) Presença de estruturas fragmentadas com empacotamento foliar típico de caulinita e micas residuais. C) DRX com picos em 7,19 Å e 3,57 Å indicando caulinita, além de presença de mica, quartzo e feldspato potássico.

A Figura 8A, referente a amostra Cal22, mostra uma estrutura composta por placas bem desenvolvidas e de morfologia tabular. Essas partículas planas e com bordas definidas sugerem a presença de argilominerais bem cristalizados.

Entre essas lâminas maiores, há partículas menores com aparência tubular, fibrosa ou mais irregular, preenchendo espaços interlamelares ou agregando-se nas bordas das placas principais. A textura é compacta, porém com zonas visíveis de porosidade, o que sugere ambientes com variação na taxa de hidratação.

Na Figura 8B observa-se uma estrutura semelhante à da imagem anterior, porém com predominância de partículas menores e fragmentadas. A desagregação parcial das lâminas pode estar relacionada à ação de processos intempéricos mais avançados. A associação entre placas bem definidas e fragmentos menores é característica

de ambientes onde ocorre a substituição parcial de caulinita por halloysita, além da possível presença de gibbsita como produto de extrema lixiviação.

O difratograma da Figura 8C indica picos em 7,13 Å (caulinita), 9,98 Å (halloysita/mica), 3,57 Å (caulinita), 3,32 Å (quartzo), 4,48 Å e 2,33 Å (gibbsita/fases amorfas) e picos menores em 1,99 Å e 1,48 Å (minerais acessórios).

A boa correspondência entre os picos experimentais e os padrões de caulinita, halloysita e gibbsita confirma a presença simultânea desses argilomineral. A sobreposição de picos entre caulinita e halloysita, com destaque para o pico de 9,98 Å, sugere a presença desta última em forma hidratada. Dessa forma, a Cal22 é composta por caulinita bem cristalizada, gibbsita e halloysita, indicando um estágio intermediário de intemperismo.

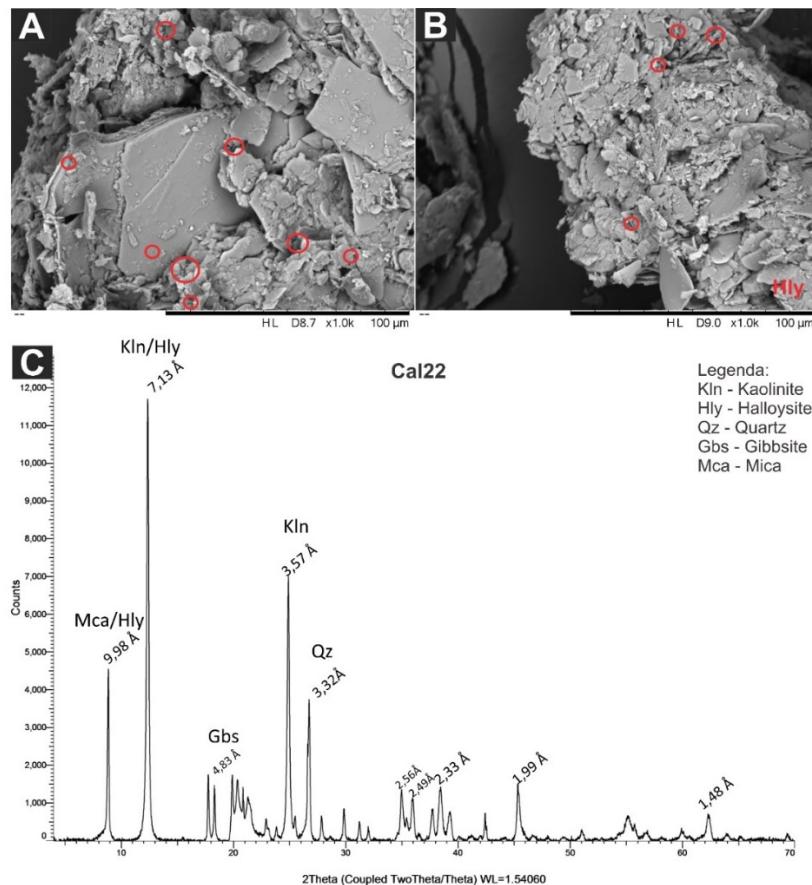


Figura 8 - Representação da amostra Cal22. A) MEV mostrando placas de caulinita de tamanho maior, associadas a partículas finas; B) Aglomerados de cristais foliares em matriz densa; C) DRX com picos principais em 7,13 Å, 3,57 Å, 9,98 Å, 3,32 Å, indicando a predominância de caulinita com presença de gibbsita e halloysita. Nota: Destaque em vermelho para ocorrência da halloysita nanotubular.

A Figura 9A, representante da amostra Cal24, exibe uma microestrutura complexa composta por agregados finamente cristalizados. Observam-se placas finas e deformadas, dispostas em feixes paralelos ou levemente entrelaçados, o que sugere um alto grau de ordenamento cristalino,

comum em argilominerais como a halloysita em morfologias fibrosas ou tubulares.

Entre os agregados, há presença de partículas menores que recobrem as superfícies ou se alojam nos interstícios, caracterizando um ambiente de deposição com intensa neoformação de argilo-

minerais. A textura indica uma boa retenção de umidade e possível plasticidade do material.

A Figura 9B, destaca lamelas isoladas recobertas por partículas finas. Essa associação indica a presença de minerais com estrutura lamelar típica de micas, sendo recobertos por outros argilominerais mais finos, possivelmente partículas nanométricas de halloysita, quartzo ou gibbsita.

O difratograma da amostra Cal24 (Figura 9C) apresenta picos principais bem definidos, destacando-se reflexões em 7,16 Å (caulinita/halloysita) e 9,92 Å (halloysita/mica) em sua fase hidratada. Também são observados picos em 4,45 Å, 2,56 Å, 2,34 Å, 1,66 Å e 1,49 Å, compatíveis com reflexões típicas de caulinita e halloysita. A presença de gibbsita é indicada pelo pico em 4,83 Å. Além disso, reflexões em 3,57 Å, 3,32 Å e

1,99 Å correspondem ao quartzo e micas.

A presença simultânea dos picos em 9,92 Å e 7,16 Å, somada à morfologia tubular observada em MEV, confirma a ocorrência conjunta de halloysita hidratada associada a caulinita, sugerindo um ambiente de transição mineralógica, marcado pela retenção parcial de água interlamelar. A boa correspondência entre os picos experimentais e os padrões morfológicos, evidencia uma associação mineralógica, composta por argilominerais (caulinita e halloysita), mica (moscovita), óxidos de alumínio (gibbsita) e quartzo residual.

Essa composição reforça o caráter intemperizado e evoluído do material, formado sob forte lixiviação, acúmulo de umidade e estágio intermediário de intemperismo.

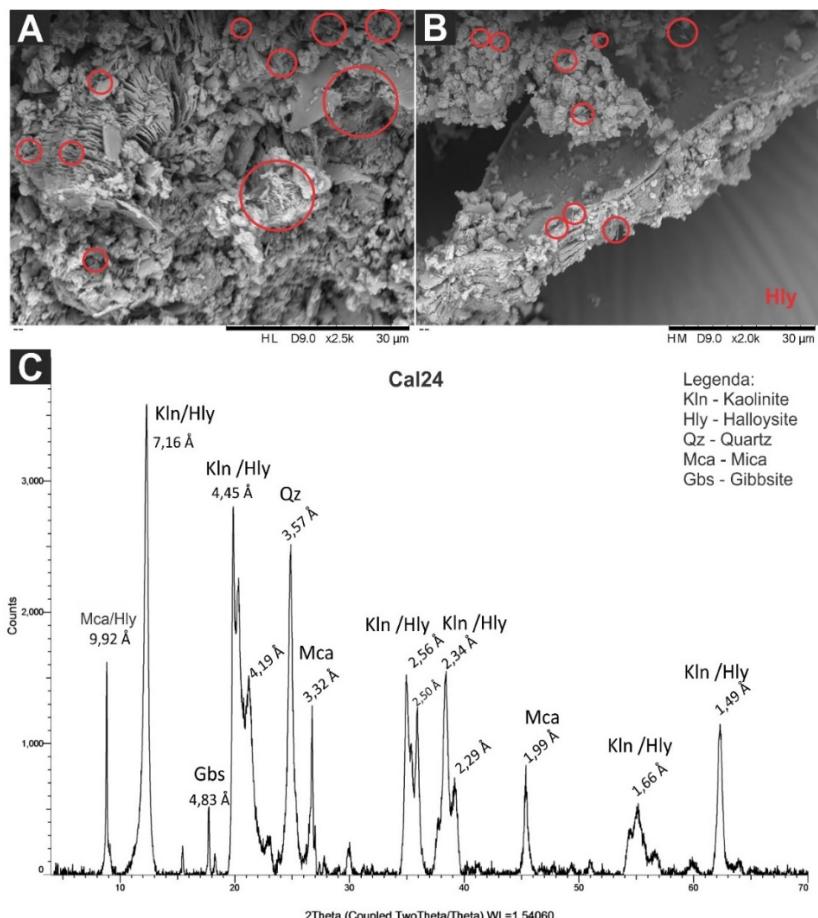


Figura 9 - Representação da amostra Cal24. A) MEV exibindo morfologias aciculares e lamelares; B) Cristais lamelares revestidos por partículas finas. C) DRX com picos em 9,92 Å, 7,16 Å, 4,83 Å, 4,45 Å, 3,57 Å e 3,32 Å, identificando caulinita, halloysita, gibbsita, quartzo e mica. Nota: Destaque em vermelho para ocorrência da halloysita nanotubular.

A figura 10A representa a amostra Cal20, destaca uma textura lamelar bem desenvolvida, com placas alongadas dispostas paralelamente, formando um arranjo do tipo “livro”. Entre essas lamelas, é possível notar a presença de partículas finas e arredondadas, que podem representar fases secundárias.

Na figura 10B, mostra a mesma amostra com

textura mais granular e porosa, com partículas de forma irregular e bordas mal definidas. Essa morfologia sugere uma fase mineral com menor grau de cristalização ou possível recristalização, associada a ambientes em estágio de intemperismo mais avançado.

O difratograma da Figura 10C, correspondente à análise DRX, revela picos bem definidos

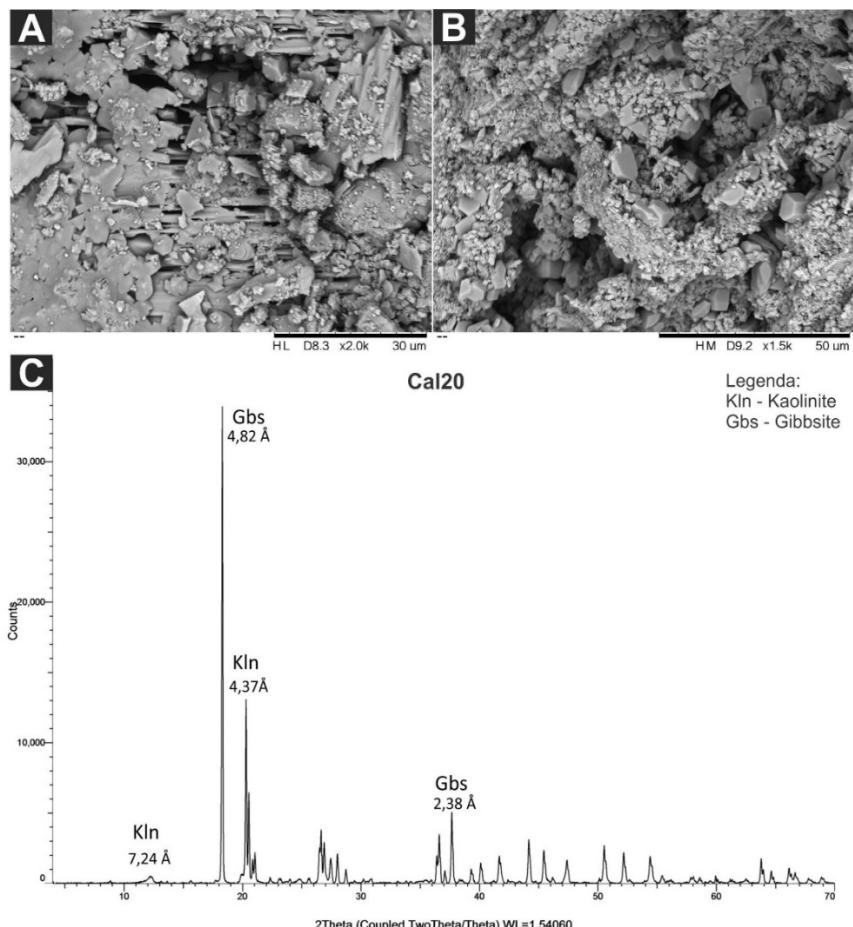


Figura 10 - Representação da amostra Cal20. A) Imagem de MEV da amostra Cal20 mostrando partículas lamelares bem desenvolvidas, dispostas em camadas paralelas e cobertas por agregados finos. B) Textura caótica com partículas finas recobrindo cristais maiores, indicando intensa ação intempérica. C) Difratograma de DRX, com picos em 7,24 Å, 4,82 Å, 4,37 Å e 2,38 Å, característicos de gibbsita e caulinita.

que indicam a presença dos argilominerais caulinita e gibbsita. Os principais picos identificados são: 4,82 Å e 2,38 Å (gibbsita); 7,24 Å e 4,37 Å (caulinita). A nitidez e intensidade dessas reflexões sugerem que a amostra é composta majoritariamente por fases cristalinas dominantes, principalmente caulinita e gibbsita.

A figura 11A, representante da amostra Cal26, mostra agregados arredondados com superfícies externas rugosas e recobertas por partículas finas. O aspecto geral é granular e maciço, indicando possível consolidação parcial ou formação de pseudomorfos de argilominerais sobre a superfície de estruturas minerais pré-existentes. A textura observada sugere um ambiente de intemperismo avançado com formação de agregados de argilominerais, além de eventuais fases amorfas ou mal cristalizadas.

A figura 11B mostra detalhes das partículas componentes dos agregados. Observam-se cristais bem definidos, com formas pseudo-hexagonais, que se assemelham a gibbsita bem desenvolvida.

Essas partículas apresentam superfície lisa e bordas retas, indicando alto grau de cristalinidade

e crescimento mineral em boas condições. Entre os cristais maiores, há partículas menores com morfologia irregular, provavelmente formadas por fases secundárias ou fragmentos.

Essa distribuição indica um processo de nucleação mineral intensa, compatível com ambientes altamente lixiviados e de intemperismo extremo.

O difratograma da amostra Cal26 (Figura 11C) apresenta os seguintes picos principais: 4,38 Å e 4,83 Å (gibbsita); 7,16 Å e 2,99 Å (caulinita); além de outros picos menores que correspondem a reflexões secundárias compatíveis com gibbsita, caulinita e eventuais impurezas minerais. A forte coincidência dos picos com os padrões conhecidos confirma uma composição simples, com gibbsita como mineral majoritário e caulinita em menor proporção. A ausência de reflexões atribuíveis a moscovita ou quartzo reforça a interpretação de um material altamente intemperizado. Dessa forma, a Cal26 representa um estágio extremo de intemperismo, típico de topos de morro com intensa lixiviação e enriquecimento residual em alumínio.

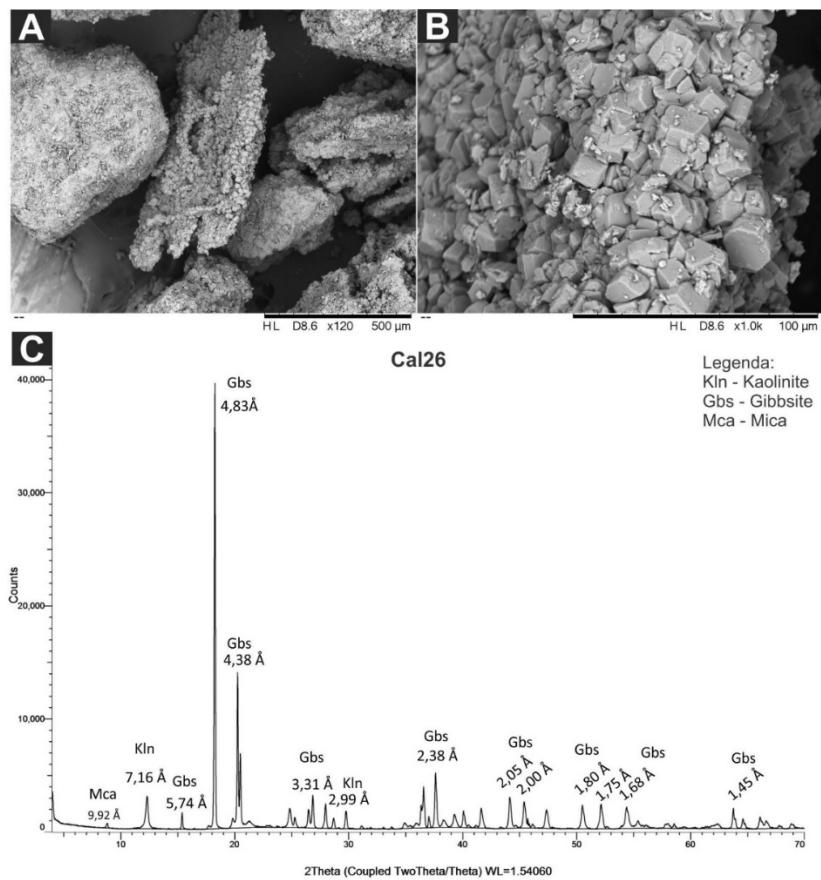


Figura 11 - Representação da amostra Cal26. A) MEV com macro agregados formados por partículas microcristalinas, textura granular dominante; B) Cristais euédricos de Gibbsita bem desenvolvidos. C) DRX com picos principais em 4,83 Å, 4,38 Å e 7,16 Å com predominância de gibbsita e presença de caulinita.

DISCUSSÕES

O estudo identificou diferentes tipos de associações minerais nos depósitos de caulinita, os quais refletem nas dinâmicas de intemperismo e ambientes geomorfológicos. Foram reconhecidos depósitos primários, formados *in situ* pela alteração direta de feldspatos em zonas feldspáticas do pegmatito, especialmente em topes de morros e encostas.

Foram reconhecidos também depósitos secundários como materiais retrabalhados, transportados por processos de erosão e deposição, resultando em acumulações eluviais, coluviais ou aluviais, encontradas em encostas suaves, fundos de vale e áreas de drenagem próximas às ocorrências dos depósitos fonte. A partir da caracterização das cinco amostras representativas (Cal20, Cal21, Cal22, Cal24 e Cal26), foi possível estabelecer um gradiente mineralógico diretamente condicionado às características topográficas e ao estágio evolutivo do intemperismo químico.

A variação composicional dos argilominerais caulinita, halloysita e gibbsita reflete uma transição entre ambientes de drenagem ativa, retenção hídrica, fundo de vale e topes de morro,

estabelecendo um modelo composicional com os diferentes estágios de alteração caulinítica.

Essa variação local é coerente com as ocorrências descritas na literatura para o Sudeste do Brasil, onde depósitos primários associados à alteração intempérica e hidrotermal de pegmatitos e granitos apresentam halloysita em associação com caulinita e gibbsita, compondo um sistema mineral evolutivo.

Estudos realizados em municípios de Porciúncula, São Gonçalo, Cantagalo, Petrópolis, Valença, Magé, Araruama e Rio Bonito (RJ); Mar de Espanha, Juiz de Fora, Bicas, Pequeri, Cataguases e Poços de Caldas (MG); Capão Bonito, Embu-Guaçu, Itapecerica da Serra, Paraibuna e Mogi das Cruzes (SP); e São Bento do Sul (SC), identificaram perfis de alteração mineralógica semelhantes aos observados no pegmatito Cristo Rei, com ocorrência significativa de halloysita nanotubular nas frações finas, especialmente em zonas de saprolito feldspático úmido e mal drenado (Wilson et al., 2006; Souza Santos et al., 2009; Salgado Campos, 2020; Licursi et al., 2023).

Em todas essas áreas, predominam condições

climáticas tropicais, relevos montanhosos e substratos rochosos ricos em feldspato, que favorecem a lixiviação, mobilidade elementar e a reorganização dos elementos majoritários (Al, Si), promovendo a formação e preservação da halloysita.

As similaridades geológicas, mineralógicas, geomorfológicas e climáticas reforçam a aplicabilidade desse modelo genético em escala regional e destacam o potencial do Espírito Santo

como província promissora para depósitos cauliníticos com ocorrência de halloysita.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre as amostras analisadas, contemplando os ambientes topográficos de coleta, aspectos morfológicos observados por MEV, os minerais identificados por DRX, e o respectivo estágio de intemperismo atribuído a cada ponto analisado.

Tabela 1 - Compilação de dados obtidos da caracterização química e mineralógica do caulim associado aos depósitos do pegmatito Cristo Rei.

Amostra	Ambiente Topográfico	Mineralogia principal (DRX)	Morfologia (MEV)	Estágio de Intemperismo
Cal21	Drenagem ativa em vale	Caulinita + quartzo + feldspato + mica	Lamelas bem organizadas paralelamente; fraturas nas lamelas com partículas finas entre intercamadas.	Inicial
Cal22	Encosta de vale com drenagem intermitente	Caulinita + halloysita + gibbsita	Lamelas espessas com partículas finas arredondadas e tubulares	Intermediário
Cal24	Fundo de vale com acúmulo de umidade	Caulinita + halloysita + gibbsita + quartzo + mica	Mistura de lamela e agregado fino granulares, tubulares e fibrosos.	Intermediário a Avançado
Cal20	Encosta de morro	Caulinita + gibbsita	Lamelas deformadas e dobradas; agregados porosos de gibbsita recobrindo fragmentos lamelares.	Avançado
Cal26	Topo de morro	Gibbsita + caulinita	Agregados arredondados com superfície rugosa; cristais euédricos de gibbsita.	Extremo

A amostra Cal21 representa o estágio inicial de intemperismo em ambiente de drenagem ativa. Sua mineralogia é composta por uma associação de minerais primários (quartzo, feldspato e mica) e minerais secundários (caulinita). As imagens de MEV confirmam uma textura lamelar entrelaçada e parcialmente fraturada, com evidência de intemperismo incipiente. Os dados de DRX corroboram essa interpretação com os picos de caulinita juntamente com mica residual, sugerindo um processo evolutivo incompleto de caulinitização em estágio inicial.

A amostra Cal22 se destaca pela presença simultânea de caulinita, halloysita e gibbsita, o que indica um estágio intermediário de alteração. As micrografias obtidas por MEV evidenciam morfologias mistas, com placas bem desenvolvidas de caulinita e estruturas tubulares compatíveis com halloysita, sugerindo variação nas condições de hidratação ao longo do perfil. O DRX reforça essa interpretação, com picos em torno de 7,13 Å e 9,98 Å, sendo este último indicativo da halloysita hidratada. Essa mineralogia sugere condições de umidade intermitente e drenagem sazonal, favoráveis à formação de nanotubos.

A amostra Cal24, proveniente de um depósito localizado em fundo de vale, apresenta uma

composição mineralógica com caulinita, gibbsita, halloysita e muscovita. As imagens de MEV mostram agregados com morfologia lamelar, granular, tubular e fibrosa, evidenciando cristais recobertos por partículas finas e bordas com sinais de dissolução. Essa associação indica um ambiente com elevada umidade e baixa mobilidade hídrica, que favorece a formação e coexistência de diferentes fases mineralógicas. A análise por DRX corrobora esses dados ao indicar a presença de caulinita bem cristalizada (pico em 7,16 Å), gibbsita (4,83 Å), halloysita (9,92 Å) e traços de muscovita. Esses dados caracterizam um estágio intermediário a avançado de intemperismo, típico de zonas de vale com drenagem constante e retenção hídrica elevada.

Já a amostra Cal20 reflete um estágio mais avançado de intemperismo em ambiente de encosta de morro, sob intensa lixiviação de sílica e enriquecimento residual alumínio. A MEV mostra estrutura lamelar deformada e agregados granulares de gibbsita com bordas irregulares, compatíveis com dissolução progressiva das fases anteriores.

O DRX revela a gibbsita como mineral dominante, com caulinita subordinada, indicando conversão mineral em curso. Esse padrão é típico de ambientes com intensa lixiviação e forte

intemperismo químico, sendo a gibbsita um produto final do intemperismo em ambientes bem drenados e lixiviados.

Por fim, a amostra Cal26 representa o grau extremo de intemperismo, coletada em topo de morro, com predominância de gibbsita e presença subordinada de caulinita. A morfologia cristalina observada por MEV revela cristais euédricos de gibbsita, refletindo condições ideais para o crescimento mineral ordenado. Essa associação indica um ambiente de intemperismo muito avançado, marcado por lixiviação intensa, baixa retenção hídrica e concentração residual de alumínio, típico de ambientes em topo de morro.

Origem e formação dos argilominerais

A formação dos argilominerais associados ao pegmatito Cristo Rei ocorre predominantemente por processos de alteração em zonas ricas em feldspatos, os quais são altamente suscetíveis à hidrólise química em ambientes tropicais úmidos. Nesses contextos, a atuação conjunta de fatores como alta pluviosidade, boa drenagem, relevo acidentado e espessa cobertura de solo favorece uma intensa lixiviação de sílica e a mobilização de elementos alcalinos, criando condições geoquímicas propícias à neoformação de fases secundárias alumino silicáticas de argilominerais.

Minerais primários como feldspatos e micas sofrem intensa hidrólise ácida, o que desencadeia a liberação progressiva de cátions (K^+ , Na^+), sílica e a concentração residual de alumínio. Esse processo conduz, inicialmente, à formação da caulinita, um argilomineral comum nos estágios iniciais de intemperismo. Em ambientes com maior retenção hídrica e flutuações sazonais de umidade, forma-se a halloysita, especialmente

em sua fase hidratada (10 Å), caracterizada por morfologia nanotubular e maior conteúdo de água interlamelar. Por fim, sob condições de lixiviação extrema, geralmente em topes de morro e encostas muito intemperizadas, a alteração evolui para a formação de gibbsita, mineral típico de ambientes altamente lixiviados e com baixo teor de sílica disponível.

As evidências obtidas por MEV e DRX confirmam essa transição do sistema mineralógico ao longo de um gradiente topográfico e hidrológico. A caulinita predomina nas fases iniciais de alteração, como observado na amostra Cal21, coletada em área com drenagem ativa. A halloysita aparece de forma mais expressiva em zonas de umidade constante e intemperismo intermediário, como nas amostras Cal22 e Cal24. Já a gibbsita se torna progressivamente dominante nas amostras Cal20 e Cal26, representativas de encostas e topes de morros, onde o intemperismo é mais avançado.

A distribuição espacial e a associação mineralógica observada indicam que os argilominerais se organizam de acordo com três principais controles naturais: (i) a litologia, que determina o conteúdo de minerais primários passíveis de alteração; (ii) o relevo, que regula a drenagem e a exposição ao intemperismo; e (iii) a dinâmica hidrológica, que influencia a taxa de lixiviação e a hidratação dos argilominerais.

Essa interação entre variáveis climáticas, geomorfológicas e geoquímicas fundamenta um modelo evolutivo no qual a halloysita atua como uma fase intermediária entre a caulinita e a gibbsita, refletindo as condições transicionais dos ambientes de alteração nos sistemas pegmatíticos intemperizados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pegmatito Cristo Rei configura-se como um modelo geológico representativo de sistemas de alteração caulinítica desenvolvidos sob condições tropicais montanhosas, onde a interação entre fatores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos controla de forma direta a formação, transformação e distribuição dos argilominerais. A caracterização mineralógica e morfológica das amostras permitiu identificar a ocorrência de caulinita, halloysita e gibbsita, organizadas em um gradiente evolutivo determinado por variáveis como relevo, regime de drenagem, disponibilidade hídrica e estágio de intemperismo químico.

A partir da caracterização integrada de cinco amostras representativas (Cal20, Cal21, Cal22,

Cal24 e Cal26), distribuídas entre encostas, topes de morros, drenagens e fundos de vale, foi possível observar a variação composicional dos argilominerais, diretamente condicionada pelas características geomorfológicas, como drenagem, altitude, declividade, exposição à umidade e estabilidade dos perfis.

A caulinita predomina em estágios iniciais de intemperismo, diferentes relevos e locais com boa drenagem, indicando ambientes geoquímicos mais estáveis e com menor taxa de lixiviação de sílica. A halloysita, particularmente na forma hidratada, ocorre em zonas de transição, com umidade contínua, como vales e depósitos de drenagem intermitente, revelando ambientes dinâ-

nicos, favoráveis à formação de estruturas nanotubulares. Por sua vez, a gibbsita torna-se dominante nos topos e encostas mais íngremes, refletindo estágios avançados de intemperismo, com intensa lixiviação e enriquecimento residual em alumínio.

Esse arranjo mineralógico evidencia a existência de uma sequência evolutiva coerente com perfis de alteração desenvolvidos sobre zonas feldspáticas pegmatíticas, sendo importante para a identificação lavras favoráveis à prospecção seletiva de argilominerais. A halloysita nanotubular, em especial, amplia o potencial econômico e tecnológico desses depósitos, com aplicações promissoras em áreas como nanocompósitos,

liberação controlada de princípios ativos, adsorção seletiva, cerâmicas e muitos outros setores.

Além do potencial tecnológico, o presente estudo destaca a viabilidade de aproveitamento econômico sustentável, por meio da lavra seletiva de fases argilosas, da valorização de rejeitos de rochas ornamentais ricos em depósitos de caulim residual, e da mineração artesanal para a geração de renda em comunidades locais.

A presença concomitante de minerais gemológicos, argilominerais, rochas ornamentais, minerais terras raras e minerais industriais no mesmo corpo pegmatítico adiciona um componente multifuncional ao uso dos depósitos, permitindo estratégias de aproveitamento integradas e inclusivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação Lato Sensu em Tecnologia de Produção de Rochas Ornamentais do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) e ao Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio acadêmico e Institucional. Agradecem também ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pelo apoio técnico e laboratorial. Este trabalho contou com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (processo 150990/2023-5), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo 175619/2024-7) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Processo 88887.216590/2025-00), cujos aportes foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALKIMIN, F.F.; PEDROSA-SOARES, A.C.; NOCE, C.M.; CRUZ, S.C.P. Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, v. 15, n. 1, p. 25–43, 2007.
- CARRETERO, M.I. & POZO, M. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical and cosmetic industries Part II. Active ingredients. *Applied Clay Science*, v. 47, n. 3-4, p. 171–181, 2010.
- CHAVES, M.L.S.C.; BARTORELLI, A.; CORNEJO, C. Minerals of the Espírito Santo Pegmatite District, Eastern Brazil. *Mineralogical Record*, v. 54, n. 6, p. 697–742, 2023.
- CHEN, M.; LONG, A.; ZHANG, W.; WANG, Z.; XIAO, X.; GAO, Y.; ZHOU, L.; LI, Y.; WANG, J.; SUN, S.; TANG, M.; PENG, Y.; WANG, H. Recent advances in alginate-based hydrogels for the adsorption-desorption of heavy metal ions from water: A review. *Separation and Purification Technology*, v. 353, 128265, 2025.
- CHURCHMAN, J.G.; PASBAKSH, P.; HILLIER, S. The rise and rise of halloysite. *Clay Minerals*, v. 51, n. 3, p. 303–308, 2016.
- CORREIA-NEVES, J.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; ALKIMIN, H.; GOMIDE, M.P. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, n. 1, p. 106-118, 1986.
- DE CAMPOS, C.P.; MEDEIROS, S.R.; MENDES, J.C.; PEDROSA-SOARES, A.C.; DUSSIN, I.; LUDKA, I.P.; DANTAS, E L. Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 248–268, 2016.
- DE CAMPOS, C.P.; MENDES, J.C.; LUDKA, I.P.; MEDEIROS, S.R.; MOURA, J.C.; WALLFASS, C.M. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. *Journal of the Virtual Explorer*, v. 17, n. 1, p. 35, 2004.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional – GeoBases. “IBGE Geomorfologia ES”, 2023.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional – GeoBases. “AGERH Bacias hidrográficas”, 2022.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional. GeoBases – Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais do Espírito Santo. Vitória: Governo do Estado do Espírito Santo, 2025.
- FÉBOLI, H. N. *Mapa geológico da folha Domingos Martins – escala 1:50.000*. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, (Série SG-24-Y-D-IV-2, Carta Geológica; Folha Domingos Martins). 1993.
- FU, L.; FAN, D.; ZHANG, J.; OUYANG, P.; FAN, J.; YANG, H. Microstructure and properties of halloysite nanotubes and modification methods: A comprehensive review. *Applied Clay Science*, v. 253, 107348, 2024.
- GOOGLE. Google Maps – Terrain. Mountain View, CA: Google, 2025.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS-NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.; JANASI, V.A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (orgs.). *Geologia do Continente Sul-Americano*. São Paulo: Editora Beca, p. 203–234. 2004.
- INOUE, A.; UTADA, M.; HATTA, T. Halloysite-to-kaolinite transformation by dissolution and recrystallization during weathering of crystalline rocks. *Clay Minerals*, v. 47, n. 3, p. 373–390, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Base Cartográfica Contínua do Brasil

- 1:250 000 (BC250), versão 2023. **GeoCiências – Cartas e Mapas. Rio de Janeiro: IBGE**, 2023.
- JOUSSEIN, E.; PETIT, S.; CHURCHMAN, J.; THENG, B.; RIGHI, D.; DELVAUX, B. Halloysite clay minerals — a review. *Clay Minerals*, v. 40, n. 4, p. 383–426, 2005.
- KEELING, J.L. The mineralogy, geology and occurrences of halloysite. In: PASBAKHSH, P.; CHURCHMAN, G. J. (eds.). **Natural Mineral Nanotubes**. Oakville: Apple Academic Press, p. 95–115. 2015.
- LICURSI, E. A. **Caracterização mineralógica de caulins provenientes de pegmatitos das regiões de Porciúncula – RJ e Patrocínio do Muriaé – MG visando a identificação de halloysita**. Rio de Janeiro, 2022. 89 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- LICURSI, E.A.; BERTOLINO, L.C.; SILVA, F.J. Caracterização mineralógica de pegmatitos com ocorrência de halloysita nas regiões de Porciúncula – RJ e Patrocínio do Muriaé – MG, Sudeste Brasileiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 46, p. 1–10, 2023.
- NASA, ALASKA SATELLITE FACILITY DAAC. ALOS PALSAR High Resolution Radiometric Terrain Corrected Product — RTC (2006–2011). 12,5 m, **Alaska Satellite Facility DAAC**, NASA Earthdata, v. 1, 2011.
- PAIVA, G. **Províncias Pegmatíticas do Brasil**. Boletim DNPM/DFPM, v. 78, p. 13–21, 1946.
- PEDROSA-SOARES, A.C.; LOBATO, L.M.; MARTINS, F.; GOMES, R.S.; SILVA, J.P. Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources (SE Brazil). **Geological Society**, v. 350, p. 25–51, 2011.
- PEDROSA-SOARES, A.C.; NOCE, C.M.; ALKMIM, F.F.; SILVA, L.C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 01–16, 2007.
- PUTZER, H. **Metallogenetiche Provinzen in Sudamerika**. Stuttgart: E. Schwerzebart'sche Verlag, 1976.
- SÁ, T., NEWMAN, D., NEWMAN-FERNÁDEZ, J. **Gemas do Espírito Santo: ocorrências e distribuição**. Vitória: UFES, Pesquisas Multidisciplinares em Ciências Exatas, vol. 2. 2022.
- SALGADO CAMPOS, V. M. J. **Prospecção e caracterização mineralógica, química e micromorfológica de ocorrências de caulin da Província Pegmatítica do Rio de Janeiro visando a identificação de depósitos de halloysita**. Rio de Janeiro, 2020. 112 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- SCHOBENHAUS, C. et al. (Coords.). **Geologia do Brasil – Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais**. Brasília: Ministério das Minas e Energia/DNPM, 501 p. 1984.
- SCOLFORO, L.P.L. **A caracterização faciológica do Maciço Garrafão**. Nova Venécia, 119 p. 2025. Trabalho (Conclusão de Curso). Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Nova Venécia, 119 p. 2025.
- SILVA, J.M.C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M.T.; LINS, L.V. **Biodiversidade da Mata Atlântica: problemas, ameaças e perspectivas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2013.
- SOUZA SANTOS, P.R.; TOLEDO, H.A.L.; SOUZA SANTOS, M.L. Argilas especiais – halloysita. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 14, n. 1/2, p. 16–21, 2009.
- VIEIRA, V. S. & DE MENEZES, R. G. (Orgs.). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2015.
- VIEIRA, V.S.; SILVA, M.A.; CORRÊA, T.R.; LOPES, N.H.B.M. **Mapa geológico do estado do Espírito Santo**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.
- WIEDEMANN-LEONARDOS, C.M.; MEDEIROS, S.R.; LUDKA, I.P.; MENDES, J.C.; COSTA-DE-MOURA, J.C. Architecture of Late Orogenic Plutons in the Araçuaí-Ribeira Fold Belt, Southeast Brazil. **Gondwana Research**, v. 5, n. 2, p. 381–399, 2002.
- WILSON, I. & KEELING, J. Global occurrence, geology and characteristics of tubular halloysite deposits. *Clay Minerals*, v. 51, n. 3, p. 309–324, 2016.
- WILSON, M.J.; SOUZA SANTOS, P.R.; BAIN, D.C.; LIMA FILHO, M.I.G.; MORAES, A.C.; CRISPIM, B.C. Kaolin and halloysite deposits of Brazil. *Clay Minerals*, Cambridge, v. 41, n. 3, p. 697–720, 2006.

*Submetido em 18 de outubro de 2025
Aceito para publicação em 19 de novembro de 2025*