

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO NORTE

JOANNA PRISCILA DE SOUSA PAIVA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE NOVO DEPÓSITO MINERAL DE
VERMICULITA EM SÃO TOMÉ-RN**

NATAL
2024

JOANNA PRISCILA DE SOUSA PAIVA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM NOVO DEPÓSITO MINERAL DE
VERMICULITA EM SÃO TOMÉ-RN**

Relatório técnico-científico apresentado ao Programa de Pós-graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Júlio César de Pontes

NATAL
2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento a todos que contribuíram para a realização desse estudo. Sem o apoio, orientação e encorajamento de diversas pessoas, essa conquista não seria possível.

Agradeço ao meu orientador Mário Tavares pela sua orientação ao longo de todo o processo de pesquisa. Sua paciência e compromisso em me ajudar a desenvolver e aprimorar meu trabalho foram inestimáveis. Agradeço por sua disponibilidade e pelo incentivo constante, que foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

Gostaria também de agradecer aos membros da banca de avaliação por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho. Agradeço pelas sugestões construtivas e pelas contribuições valiosas que ajudaram a aprimorar a qualidade desse estudo.

Não posso deixar de agradecer à minha família e aos meus amigos, em especial Letícia e Carlos, que sempre me apoiaram ao longo desta jornada. Seu incentivo e compreensão foram fontes inesgotáveis de motivação para superar os desafios enfrentados e alcançar este importante marco na minha vida acadêmica. O apoio de vocês foi fundamental para o meu desenvolvimento e crescimento pessoal e profissional durante esse período.

Por fim, quero expressar minha gratidão a todos os professores, pesquisadores e profissionais que contribuíram indiretamente para a minha formação ao compartilharem seus conhecimentos e trabalhos por meio de artigos, livros e palestras. Agradeço a professora Luciana e Anny, pois suas contribuições científicas foram valiosíssimas para a continuidade dessa pesquisa. Sinto-me profundamente grata também por todo o apoio recebido por Fonseca.

Obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso desse estudo, e que este trabalho possa contribuir para o avanço do conhecimento dos recursos minerais do meu estado e inspirar futuras pesquisas.

RESUMO

O uso da vermiculita surge como um importante instrumento ao conceito de sustentabilidade, por se tratar de um mineral tem sido amplamente utilizado em diversas áreas, apresentando grande relevância especialmente na agricultura. A vermiculita é usada principalmente na forma expandida e suas propriedades únicas, como leveza, capacidade de retenção de água e resistência ao fogo, com aplicabilidade em diferentes setores. Na construção civil, é aplicada em isolamentos térmicos, acústicos e em concretos leves. Tem uso no tratamento de água, na indústria química e materiais refratários. Na agricultura, é usada como componente de substratos e adubo, melhorando o crescimento das plantas. O presente estudo tem por objetivo fazer uma apresentação da ocorrência da Vermiculita Boqueirão, no estado do Rio Grande do Norte. Foi realizada a caracterização tecnológica do minério a partir de um depósito recém-descoberto e ainda não catalogado no município de São Tomé (RN). A coleta de dados foi realizada diretamente do depósito mineral, onde foram coletadas as amostras do minério. Foram realizados ensaios físicos e químicos, como Espectrometria por Fluorescência de Raio-X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e ensaios granulométricos e de esfoliação. Por fim, são mostrados os resultados referentes a utilização da Vermiculita Boqueirão como condicionador de solo. O enfoque deste trabalho é a apresentação de relatório técnico envolvendo a análise de dados pertinentes ao modo de ocorrência, especificações do minério, potencialidade de reserva mineral, dados de mercado, inovações tecnológicas, novas oportunidades de investimentos e fortalecimento da competitividade dos produtos norte-rio-grandense no mercado. O relatório técnico apresentado para a empresa da Vermiculita Boqueirão é aprofundado nesse trabalho, e culmina no produto tecnológico, a fim de fornecer orientações e recomendações para a caracterização desse minério. Em um momento em que a vermiculita começa a ganhar mais atenção por parte dos especialistas, esse estudo fortalece a convicção a respeito de sua importância e contribui para a catalogação desse mineral no setor minerário industrial do Rio Grande do Norte.

Palavras-chave: Vermiculita, caracterização tecnológica, recursos minerais, minerais industriais, Faixa Seridó.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Mapa de localização do depósito de Vermiculita no município de São Tome/RN. 4
- Figura 2- Mapa geológico da área de estudo. As principais litofácies observadas e ampliadas no canto inferior direito do mapa são pertencentes a Formação Jucurutu que estão em contato com rochas do Complexo Caicó através de uma zona de cisalhamento. 15
- Figura 3- – Aspecto micáceo observado na Vermiculita Boqueirão, cor amarronzada e textura sedosa característica. 18
- Figura 4– Contato superior das rochas calcissilicáticas (acima na imagem) com a vermiculita (sequência inferior). Observa-se que nos contatos onde a vermiculita apresenta um brilho perolado são aqueles correspondentes a escarnitos com maiores teores de scheelita 19
- Figura 5- Afloramento de Vermiculita (A) da Fazenda Boqueirão com (B) *boudins* de quartzo, indicativo de atividade tectônica. A área de estudo está dentro de uma zona de cisalhamento. 20
- Figura 6– As rochas ultramáficas estão na base da sequência litológica da área de estudo. A alteração hidrotermal dessas rochas forma a vermiculita. 20
- Figura 7- – Contato entre as rochas de biotita-gnaiss da Fm. Jucurutu com a Vermiculita Boqueirão. Esse contato inferido pode ter sido formado por condições de dobramento, uma vez que a área está inserida em uma região de deformação tectônica. O caimento medido em campo foi de 010/59SE. 21
- Figura 8– Perfil litológico representativo da Frente de Lavra 5 mostrando os principais contatos entre as rochas calcissilicáticas scheelíferas e a vermiculita como produto de alteração hidrotermal das rochas máficas/ultramáficas. Estão também esquematizados no perfil as rochas gnaissicas e os *boudins* de quartzo observados. (Autor: Fonseca Rebelo, 2022). 22
- Figura 9– (A) Estrutura lamelar típica das vermiculitas em ampliação 100x. (B) Ampliação na face lamelar onde é possível identificar a superfície de alteração..... 26
- Figura 10– (A) Amostra AM1 e amostra AM2 (B) após processo de expansão (vermiculita esfoliada). 30
- Figura 11– Contraste observado da área de vegetação nativa com a área de recuperação onde foi utilizada a Vermiculita Boqueirão combinada com carbonato de cálcio e magnésio. 31
- Figura 12– Crescimento de vegetação após a utilização da Vermiculita Boqueirão. Os resultados permitiram obter um solo mais solto e propício para que as raízes das plantas crescessem com mais facilidade. 32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vértices da área de estudo e suas respectivas coordenadas X e Y.	3
Tabela 2- – Aplicação da vermiculita em cada uso específico que estão disponíveis no mercado.	10
Tabela 3– Exemplos de depósitos brasileiros com seus respectivos contextos geológicos e processos de formação associados.	12
Tabela 4– Resultados das análises químicas da Vermiculita da Fazenda Boqueirão e da composição básica, segundo a <i>Vermiculite Association</i>	23
Tabela 5– Composição química das principais vermiculitas comerciais brasileiras e internacionais reconhecidos no mundo.	25
Tabela 6– Classificação Granulométrica, segundo os padrões Internacional, Americano e Brasileiro.	27
Tabela 7– Análise granulométrica para os R.O.M. Os resultados obtidos foram realizados via úmido e seco.	28
Tabela 8– Resultados dos teores de vermiculita de acordo com cada fração granulométrica nos concentrados média a fina e fina a super fina.	28
Tabela 9– Teor e Rendimento resultantes da análise física das amostras esfoliadas.	29
Tabela 10– Percentagem da granulometria retida simples das amostras esfoliadas.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	LOCALIZAÇÃO.....	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1.	VERMICULITA.....	5
2.1.1	ESFOLIAÇÃO DA VERMICULITA	6
2.1.2	APLICAÇÕES	8
2.1.3	PANORAMA MUNDIAL DE RESERVAS E PRODUÇÃO DE VERMICULITA ..	11
2.2.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	13
2.2.1. FAIXA SERIDÓ	
	13	
3.	METODOLOGIA.....	15
4.	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA VERMICULITA BOQUEIRÃO	17
4.1.	MAPEAMENTO GEOLÓGICO.....	17
4.2.	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (EDX)	23
4.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	26
4.4.	GRANULOMETRIA.....	27
4.5.	ESFOLIAÇÃO	29
4.6.	VERMICULITA FINA BOQUEIRÃO NA FORMA DE CONDICIONADOR DE SOLO.....	31
5.	CONCLUSÕES.....	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO

A vermiculita é um mineral do grupo das micas com propriedades físicas e químicas que a tornam um recurso valioso para diversas aplicações industriais e agrícolas. Esse mineral apresenta uma estrutura laminar, que pode ser expandida por meio de processos térmicos para produzir um produto leve e poroso com diversas aplicações (Hindman, 2009).

O Brasil é um dos maiores produtores de vermiculita do mundo, sendo um dos maiores produtores e exportadores do mundo. No Brasil, a maioria das minas de vermiculita está localizada nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (ANM, 2018).

Os usos da vermiculita são variados, desde a utilização como isolante térmico e acústico, até a sua utilização em processos de filtragem de água e tratamento de efluentes. Na agricultura, a vermiculita é amplamente utilizada como substrato para o cultivo de plantas em vasos, além de ser usada como meio de cultivo em sistemas de hidroponia. A vermiculita tem se mostrado uma alternativa viável e eficaz para diversas aplicações, e sua demanda tende a crescer à medida que a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes para diversos setores aumenta (Hindman, 2009).

Um depósito com boa possibilidade de extração de vermiculita foi descoberto na região do município de São Tomé, próximo à divisa com Caiçara do Rio do Vento (Figura 1). O mineral vem sendo largamente utilizado, além da sua importância como componente nas áreas de construção civil e agricultura, agora também explorado como adsorvente de metais, corantes orgânicos catiônicos, compostos orgânicos fenólicos e no tratamento de efluentes oleosos (Ugarte; Sampaio; França, 2008).

Caso esse depósito já identificado entre em produção, o impacto para o setor mineral do estado pode ser imediato. O Rio Grande do Norte é referência no setor mineral do Brasil, apresentando-se como o quarto maior produtor de recursos minerais do país. São cerca de duas mil jazidas com mais de 30 substâncias minerais no território potiguar, segundo diagnóstico realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A produção no setor representa 20% do Produto Interno Bruto (PIB) do Estado, gerando emprego e renda, principalmente na região do semiárido (Angelim et al., 2007).

Devido à sua versatilidade, a vermiculita é considerada um recurso mineral

importante para diversos setores. Além disso, sua demanda tende a crescer à medida que a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes aumenta. Portanto, o estudo desse mineral e suas possíveis aplicações torna-se cada vez mais relevante (França et al., 2016).

A ideia inicial deste estudo surgiu do objetivo de avaliar o potencial econômico do depósito de vermiculita existente na Fazenda Boqueirão, descoberto no município de São Tomé. O enfoque deste trabalho é predominantemente técnico-científico e visa ressaltar a importância deste mineral como matéria prima de ampla e crescente utilização em prol de uma sociedade desenvolvida.

Além disso, faz-se necessário obter um conhecimento mais aprofundado sobre esse mineral, principalmente devido ao seu crescente uso na indústria da construção civil. Embora com uma vasta aplicabilidade na indústria, a vermiculita ainda é um mineral pouco estudado, principalmente no estado do Rio Grande do Norte, onde suas ocorrências ainda são bastante esporádicas.

Como objetivos específicos desse estudo estabeleceu-se: caracterizar o minério através de estudos químicos e mineralógicos, como espectrômetro de raio-x (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), estudos geofísicos local, análise granulométrica; analisar os dados pertencentes ao modo de ocorrência e especificações do minério; e comparar com dados de mercado, inovações tecnológicas, novas oportunidades de investimentos e verificação da competitividade dos produtos que se encontram no mercado.

A relevância científica e social da pesquisa está fundamentada no caráter de grande interesse econômico que a região da Borborema Potiguar representa para o Rio Grande do Norte, visto que o estado é referência no setor mineral do Brasil. Este trabalho conta como um instrumento de fomentação à pesquisa mineral desse estado, ofertando aos potenciais investidores uma base confiável de estratégias, oferecendo, no longo e médio prazo, a possibilidade de retorno positivo.

Igualmente, o conhecimento geológico institui-se como ferramenta indispensável para o planejamento da ocupação e ordenamento do território em bases sustentáveis, perspectiva que por si só sobressalta a importância desse estudo, especialmente em uma região do Brasil ainda carente de investimentos.

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de abrangência desse estudo está incluída na área correspondente a Folha Lajes SB.24-X-D-VI (Costa; Dantas, 2014). A área é delimitada pelas coordenadas do polígono, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1- Vértices da área de estudo e suas respectivas coordenadas X e Y.

Vértices	X	Y
V1	822941,46	9352332,01
V2	822036,61	9352349,48
V3	822153,40	9352527,92
V4	822247,95	9352832,41
V5	822597,34	9352830,48
V6	822593,70	9353068,76
V7	822939,23	9353073,46

O depósito de vermiculita ocorre em corpos pertencentes a Formação Jucurutu, de idade neoproterozóica, que por sua vez faz parte do Grupo Seridó. Os corpos máfico-ultramáficos mineralizados a vermiculita, localizam-se na região do município de São Tomé, próximo à divisa com Caiçara do Rio do Vento, extremo nordeste da Plataforma Borborema no estado do Rio Grande do Norte. Os principais acessos a essa região, a partir da cidade de Natal, são as rodovias federais BR-226 e BR-304, além da rodovia estadual RN-023. O restante do percurso seguiu uma estrada carroçável até a Fazenda Boqueirão.

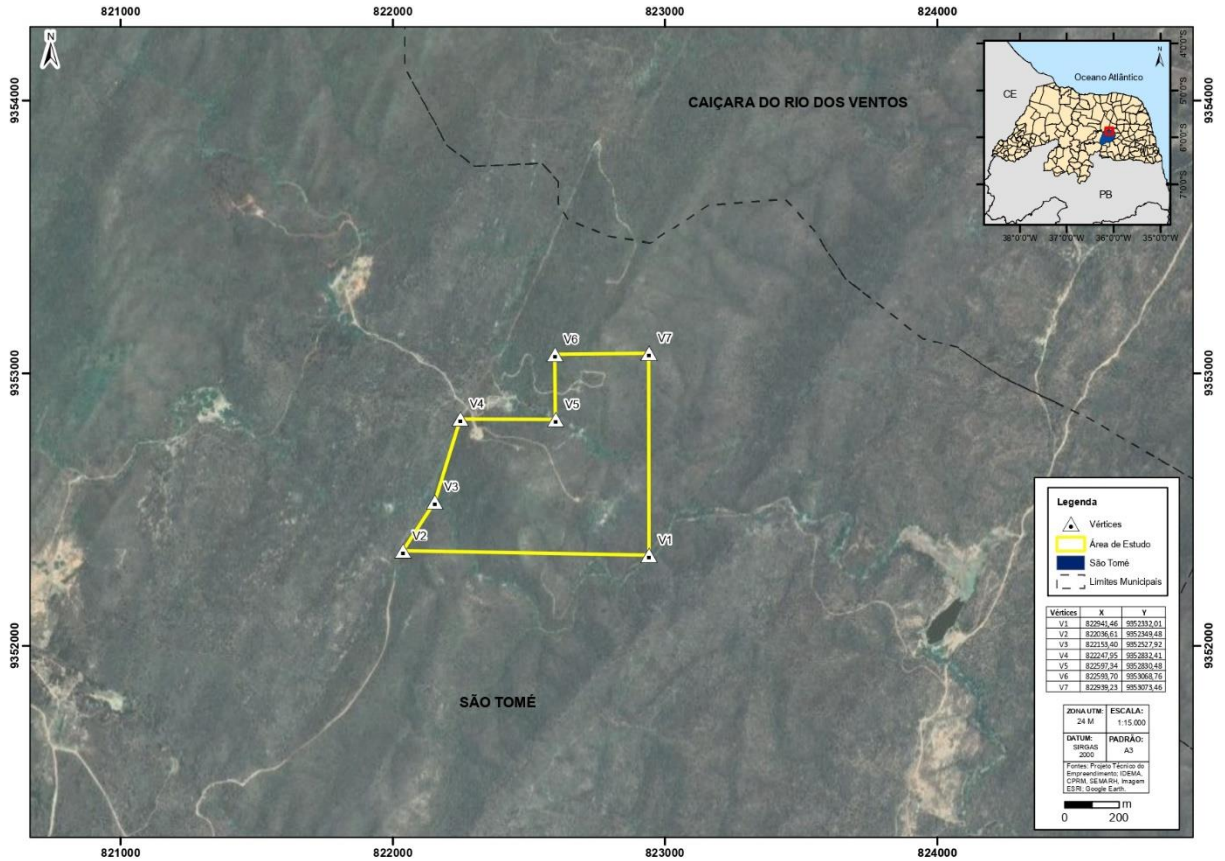


Figura 1- Mapa de localização do depósito de Vermiculita no município de São Tomé/RN.

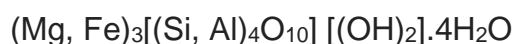
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. VERMICULITA

Descoberta pela primeira vez em 1824 por Thomas H Webb, em Massachusetts (EUA), a Vermiculita foi um mineral que se destacou pela sua capacidade de esfoliação. Começou a ser comercializada em 1915 no Colorado (EUA) e atualmente serve a mais de 200 aplicações industriais (Silva, 2006).

Vermiculita, na verdade, é o termo geológico dado a um grupo de minerais laminares hidratados que são silicatos de alumínio-ferro-magnésio, constituindo cerca de 19 variedades. A estrutura básica é idêntica a das micas e talco, um filossilicato tipo 2:1, ou seja, uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. A principal diferença entre as micas, a exemplo da moscovita e biotita, e a vermiculita é o fato de que as micas apresentam átomos de potássio em sua constituição e ausência de moléculas de H₂O, enquanto a vermiculita apresenta em sua estrutura intercamada cátions e moléculas de água e magnésio, diferenciando-se também do talco (Schulze, 2005).

Devido aos elementos oriundos da formação original da mica e mudanças químicas ocorridas durante o intemperismo e troca iônica, a vermiculita apresenta variação no que se refere a sua composição química. Hindman (2009) propôs uma fórmula química comum para vermiculitas com base na análise de mais de 60 vermiculitas, na qual a fórmula química simplificada é representada por:



A vermiculita é um mineral derivado de alteração supergênica das micas (Navarro et al., 2017). Suas características são típicas dos filossilicatos, apresentando clivagem basal perfeita, cores que variam de incolor, castanho, verde ou preto, além da sua capacidade de se esfoliar, como foi mencionado anteriormente. Muitas de suas características físicas e óticas são semelhantes às biotitas, entre elas sua baixa dureza entre 1,5 a 2,5 na escala Mohs e peso específico entre 2,2 e 2,8 (Hindman, 2009). Essas propriedades são importantes para a identificação e classificação desse mineral.

A vermiculita tem origem supergênica (intemperismo químico) e/ou hidrotermal, a partir da ação da água e temperatura, produzida da alteração ou substituição de

flogopita, biotita e clorita, entre outras micas, oriundas de rochas vulcânicas (Navarro et al., 2017).

Este mineral ocorre em categorias macroscópicas e microscópicas, podendo ser encontrado em quatro tipos de rochas: ultramáficas e máficas; gnaisse e xisto; rochas carbonáticas; e rochas graníticas (Ugarte; Sampaio; França, 2008). Bassett (1961) sugere, através de pesquisa experimental e bibliográfica, que a formação da vermiculita ocorre predominantemente por processos supergênicos.

Nascimento (2008) mostra que há possíveis variações nos óxidos constituintes da vermiculita, e suas propriedades também podem ser modificadas de acordo com esse conteúdo. A presença de outros minerais ou maiores concentrações de alguns óxidos pode causar mudanças na composição química da vermiculita. Essa é uma característica atrelada majoritariamente aos minerais pré-existentes como dos principais fatores para as diferenças nos conteúdos de óxidos.

Ugarte, Sampaio e França (2008) afirmam que alteração na biotita é uma das formas de surgimento da vermiculita, uma vez que possui uma grande concentração de óxido de ferro. Devido aos altos teores de óxido de ferro, é possível observar algumas ocorrências de vermiculita com coloração avermelhada, por vezes dourada ou prateada, na vermiculita, contrastando com a tradicional coloração marrom clara ou escura (Barros, 2018).

A vermiculita é considerada um excelente isolante que, quando aplicado a outros materiais ou componentes, aprimora suas propriedades devido às suas características químicas, mineralógicas e estruturais. Além disso, não é tóxica, não inflamável, pode absorver líquidos, atua como lubrificante em altas temperaturas e oferece isolamento térmico e acústico (Cintra; Paiva; Baldo, 2014).

Na indústria da construção civil, é amplamente utilizada para proporcionar conforto térmico, no entanto, sua alta absorção de água dificulta o uso em outras áreas. Outros aspectos agregam mais ao seu valor comercial, como a baixa condutividade térmica, baixa densidade, alta refratariedade comparativa, inércia química durável e segurança ambiental, torna-se apropriada para ser aplicada em muitas áreas, inclusive na construção civil.

2.1.1 ESFOLIAÇÃO DA VERMICULITA

A vermiculita em sua forma expandida adquire características que tornam seu consumo comercial significativo em vários tipos de indústria. Algumas dessas propriedades são: baixa elasticidade, baixa densidade, alta área superficial, porosidade, alta capacidade de adsorção e absorção devido à sua carga superficial negativa (Ugarte; Sampaio; França, 2008). É durante o processo de expansão que a vermiculita adquire características como baixa densidade e baixa condutividade térmica.

A evaporação da água formada dentro da vermiculita é necessária para sua expansão. O processo de aquecimento provoca a perda de massa devido à evaporação da água presente em seu interior, ocasionando o aumento de volume e formação de poros que são preenchidos de ar. É necessário que a vermiculita seja aquecida a uma temperatura entre 800 e 1000 °C, o que a faz expandir aproximadamente de 6 a 20 vezes seu tamanho inicial (Nascimento, 2008) (Campo; Rosario; Moreno; Molina, 2009). Uma vez submetida a temperaturas de expansão superiores a 1000 °C, a vermiculita pode ser convertida em clinoenstatita, causando a perda da propriedade de isolamento térmico (Hornbostel, 1991).

O potássio é um elemento químico influente nas características da vermiculita. A expansão do material será aumentada se o teor for maior que 1%. Amostras com teores de potássio inferiores a 1% tem uma presença maior do mineral vermiculita e uma taxa de expansão menor. Para valores de aproximadamente 5% de potássio, apresentam uma redução na quantidade do mineral vermiculita e um aumento na taxa de expansão. Amostras que se enquadram nessa última categoria, mostram mais de uma fase/mineral, sendo a mica comumente encontrada juntamente com a vermiculita, formando uma fase intermediária chamada hidrobiotita, que geralmente apresenta uma taxa de expansão maior (Marcos; Rodriguez, 2010) (Hiller; Marwa; Rice, 2013).

A presença de minerais de mica e e/ou hidrobiotita associados com a vermiculita proporcionam uma taxa de expansão maior, pois atuam como barreiras que impedem a fuga de vapor de água gerado pelo aquecimento da vermiculita, forçando a separação das camadas octaédricas e tetraédricas, e conseqüentemente expandindo a vermiculita (Hiller; Marwa; Rice, 2013).

As vermiculitas com baixo teor de potássio apresentam baixa taxa de expansão.

No entanto, vermiculitas com mais de uma fase constituinte apresentam maior taxa de expansão. Conclui-se que para haver uma taxa de expansão maior, a vermiculita deve apresentar teores de potássio entre 3% e 5%, onde significa que há associações de mica e/ou hidrobiotita (Hiller; Marwa; Rice, 2013).

A partir desse processo térmico de expansão, a vermiculita adquire a forma de uma minhoca ou sanfona, resultando em um material de alta porosidade, aumento da área superficial específica, absorção de água, isolamento termo acústico, resistência ao fogo, baixa densidade (0,15-0,25 g/cm³), baixa condutividade térmica e não-tóxica, podendo ser utilizada como solvente de metais pesados, como agregados leves na construção civil e condicionadores de solo (Nascimento, 2008) (Gellert, 2010). Estas propriedades permitem o seu uso, de forma isolada ou em conjunto com outros materiais, em uma ampla variedade de aplicações.

2.1.2 APLICAÇÕES

Descoberta a mais de 50 anos nos Estados Unidos, a Vermiculita ficou consagrada como principal produto, na produção de argamassas de proteção passiva e isolamento térmico. Aqui no Brasil, vem sendo utilizada há cerca de 40 anos, em vários mercados além da construção civil como, agricultura, siderurgia, refratários, freios, entre outros.

Segundo França et al., (2016), a vermiculita expandida é leve e de fácil manuseio, tem propriedades de isolamento acústico e capacidade de absorver e reter uma vasta gama de líquidos. Esse material é utilizado na fabricação de freios automotivos, isolamento térmico de paredes e telhados, produtos da construção civil, rações para animais, horticultura e muitas outras aplicações industriais.

A vermiculita é um material não abrasivo, inodoro, não se decompõe, nem promove irritações na pele, possui propriedades isolantes, tanto térmica como acústica, e é um material não carcinogênico. Suas propriedades de superfície, em particular, área superficial, hidrofobicidade, porosidade e carga superficial negativa, fazem dela um material recomendado para uso como material absorvente e carreador.

A vermiculita pode ainda ser aplicada na fabricação de embalagens industriais para controle da umidade, devido à sua baixa elasticidade e altas propriedades de absorção e adsorção. Além disso, sua densidade baixa, cujos valores na forma natural

variam entre 800 a 1.000 kg/m³ e na forma expandida ficam na faixa de 80 a 140 kg/m³, favorecem ainda mais essa utilização (Ugarte; Sampaio; França, 2008).

Segundo Reis (2002), a vermiculita é um mineral que apresenta inúmeras aplicações na construção civil, indústria de manufaturados, agricultura, horticultura e meio ambiente. Mais especificamente: isolante térmico, concreto leve e isolante de som, painéis e divisórias, portais a prova de fogo, agricultura hidropônica, condicionador de solos, fertilizantes, pesticidas, e absorvedores de óleo, graxas e metais pesados, O uso de vermiculita expandida em argamassas leves, está cada vez mais difundido, uma vez que, as suas características químicas, mineralógicas e microestruturas, conferem propriedades relevantes (Tabela 2).

Outro aspecto que contribui para a predileção na escolha do mineral vermiculita nas edificações é o fato de ser um material sustentável, apresentando poucos prejuízos ao meio ambiente em sua produção e em sua degradação.

Tabela 2- – Aplicação da vermiculita em cada uso específico que estão disponíveis no mercado.

USO	
CONSTRUÇÃO CIVIL	a) Em função de seu baixo peso específico: como carga de estruturas e unidades pré-fabricadas, blocos de concreto, concreto leve, como amortecedor de som, argamassa com gesso; b) Como isolante acústico: assoalhos, isolantes em paredes laterais de forros e divisória; c) Como isolante térmico: câmaras de armazenagem a frio e confecção de tijolos refratários.
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	Excelente isolante térmico em pastilhas de freio
INDÚSTRIA METALÚRGICA	Proteção de estruturas de aço; esfriamento dentro de peças forjadas e isolantes de peças que trabalham em baixas temperaturas;
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA	Isolamento em fornos de carvão coque e como cobertura isolante para metais líquidos
COMBATE A INCÊNDIOS	Confecção de materiais (roupas, máscaras, escudos, portas corta- fogo) considerados retardantes de fogo, sistema de extinção de incêndios (usada como pulverizador tipo spray)
HORTICULTURA	Componente e condicionador do substrato para plantio de mudas para reflorestamento, cultura de fumo e flores, veículo para fertilizantes e pesticidas e hidroponia
INDÚSTRIA QUÍMICA	Elementos filtrantes, carga para aumento na viscosidade de óleos e carga para produção de texturas em pinturas e revestimentos
ALIMENTAÇÃO ANIMAL	Veículo em rações peletizadas
ECOLOGIA	Prevenção de danos à atmosfera, auxiliando no controle de poluição por gases e efluentes, acondicionantes de lixo nuclear e outros rejeitos tóxicos e coletor de petróleo em grandes derramamentos em lagos e mares

Silva (2006)

2.1.3 PANORAMA MUNDIAL DE RESERVAS E PRODUÇÃO DE VERMICULITA

Os depósitos brasileiros e mundiais de vermiculita ocorrem principalmente dentro das zonas de complexos máficos, ultramáficos e carbonatitos (Ugarte; Sampaio; França, 2008), como exemplo disso estão as reservas em Libby (EUA), com depósitos metamórficos máficos/ultramáficos, e Palabora (África do Sul), com depósito carbonatito, ambas consideradas as maiores reservas do mundo (ANM, 2018).

A produção mundial de vermiculita, em 2021, foi de 464.000 t/ano tendo como maiores produtores a África do Sul (160.000 t), os Estados Unidos (100.000 t) e o Brasil (60.000 t), respectivamente. O Brasil dobrou sua produção comparado com o ao ano anterior (2020) que foi de 50.000 t, figurando-se como o 3º maior produtor mundial. O aumento se deve à crescente demanda global por vermiculita, especialmente nos setores de construção e agricultura, que devem impulsionar a produção e a exploração de novas reserva. Além do Brasil, outros países produtores de vermiculita são China, Egito, Uganda, Zimbábue e Bulgária (USGS, 2022).

A exploração de vermiculita no Brasil começou na década de 50 em São Paulo, e veio a atingir uma maior expressão a partir de 1971 com a entrada em operação da mina de São Luiz de Montes Belos (GO) (MME, 2009).

O Brasil detém 14,1% das reservas mundiais de vermiculita, ocupando a terceira posição no cenário mundial (MME, 2021). As reservas nacionais se concentram em cinco estados. A primeira posição é ocupada por Goiás (69,75%), seguido pela Paraíba (17,31%), Bahia (12,07%), Piauí (0,84%) e Pernambuco (0,03%) (Freitas; Paula; Cavalhares, 2019).

Em 2017, o consumo aparente de vermiculita no Brasil diminuiu em torno de 60% devido à queda na produção nacional e mais uma vez não foram registradas nenhuma importação neste ano. O consumo aparente correspondeu a 25.000 t, destinado principalmente para a agricultura e construção civil. As exportações praticamente se mantiveram no mesmo patamar do ano anterior. Foram exportadas 32 mil toneladas, e os principais países de destino das exportações foram EUA (26%), Emirados Árabes Unidos (20%), México (11%), França (8%) e Luxemburgo (7%) (Freitas; Paula; Cavalhares, 2019).

Os depósitos de vermiculita no Brasil e no mundo estão localizados principalmente em zonas que compreendem complexos máficos, ultramáficos e carbonatitos, a exemplo do depósito de Libby (EUA), considerado o maior do mundo, e o depósito de Phalaborwa (África do Sul), respectivamente. Existem outros pequenos depósitos formados por rochas como dunitos, piroxenitos, peridotitos, bem como rochas máficas cortadas por pegmatitos, sienitos e rochas graníticas (Simandi; Birkett; Paradis, 1999).

Os depósitos brasileiros podem ser classificados em dois tipos distintos (Tabela 3). O primeiro é derivado da alteração da mica flogopita em carbonatitos, que são rochas ígneas com baixo teor de sílica. O segundo tipo é derivado da alteração da biotita em complexos metamórficos máficos e ultramáficos serpentinizados, expostos a intemperismo e altas temperaturas.

Tabela 3– Exemplos de depósitos brasileiros com seus respectivos contextos geológicos e processos de formação associados.

DEPÓSITOS	CONTEXTO GEOLÓGICO	FORMAÇÃO
Cerrado III (GO)	Peridotitos e piroxenitos hidrotermalizados	hidrotermalismo de anfibólios
Engenhoca I (GO)	Peridotitos e piroxenitos hidrotermalizados	hidrotermalismo de anfibólios
Paulistana (PI)	Ultramáficas metamorfizadas	intemperismo de flogopitas
Aurimamã (PE)	Biotitos e gnaises com pegmatitos feldspáticos	intemperismo de biotitas
Catalão (GO)	Complexo carbonatítico	intemperismo de flogopitas

Silva (2006).

De acordo com relatórios do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a vermiculita no Rio Grande do Norte está associada a rochas ultramáficas do Complexo Seridó (Figura 2), localizados na região central do estado, e compostas principalmente por peridotitos e piroxenitos. Os depósitos de vermiculita são encontrados em lentes e camadas dentro dessas rochas, sendo que a espessura e a qualidade da vermiculita variam de acordo com a localidade.

A mineração de vermiculita no Rio Grande do Norte tem sido realizada por empresas locais em uma escala relativamente pequena. No entanto, há um potencial para a expansão da mineração, especialmente considerando a crescente demanda

por vermiculita em todo o mundo. É importante que a mineração seja realizada de forma responsável e sustentável, levando em consideração os impactos ambientais e sociais.

Embora a vermiculita não seja uma *commodity* de ocorrência tão representativa no Rio Grande do Norte, os depósitos existentes podem fornecer uma fonte local de material para aplicações específicas em construção, agricultura e outros setores.

2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.2.1. FAIXA SERIDÓ

O foco deste estudo está inserido no contexto da Faixa Seridó, que pertence ao Domínio Rio Grande do Norte. Esse é um dos seis Domínios Tectônicos (Médio Coreaú, Ceará Central, Rio Grande do Norte, Zona Transversal, Pernambuco-Alagoas e Sul) da Província Borborema (Almeida et al., 1981) (Brito Neves; Brito; Van Schmus, 2000). Os limites dos domínios geológicos são definidos por estruturas do tipo *strike-slip*, que conectam blocos com histórias evolutivas distintas (Amaral et al., 2012). Esses terrenos foram submetidos a diversos eventos metamórficos e de deformação em diferentes ambientes tectônicos, resultando em um sistema complexo de associações litológicas e depósitos minerais de origens diversas (Neves, 2013) (Van Schmus; Kozuch; Brito Neves, 2011). Além disso, a conexão da Província Borborema com o continente africano é um fator importante, evidenciado por associações litológicas, metalogenéticas e estruturais (Cordani et al., 2013).

A Faixa Seridó apresenta embasamento gnáissico-migmatítico de idade paleoproterozoica (Complexo Caicó) sobreposto pelas rochas do Grupo Seridó, de idade neoproterozoica, e intrusões graníticas associadas ao Ciclo Brasileiro (Van Schmus et al., 2003). O Complexo Caicó é constituído por ortognaisses e augen-gnaisses com assinatura geoquímica calcialcalina de alto potássio de afinidade meta-peraluminosa (Medeiros et al., 2012). Análises Sm-Nd indicam idades de até 2.8 Ga, enquanto idades no modelo de U-Pb em zircão mostram idades de 2.2 Ga, o que sugere esta unidade litológica como oriunda da reciclagem de uma crosta mais antiga (Hollanda et al., 2011).

Esta faixa totaliza cerca de 16.000 km² de área, e segue um *trend* de direção preferencial NNE-SSW (Santos et al., 2014). Segundo Jardim de Sá (1994), essa faixa

é composta por rochas do Grupo Seridó, que pode ser formado pela unidade basal de paragneisses, com intercalações de mármore e rochas calcissilicáticas da formação Jucurutu, uma intermediária composta por metaconglomerados e quartzitos da formação Equador e uma unidade superior essencialmente constituída por micaxistos chamada de formação Seridó.

2.2.1.1. Formação Jucurutu

As rochas da Formação Jucurutu são representadas predominantemente por biotita gnaisses por vezes contendo anfibólio, e níveis de mármore que podem se estender de metros a quilômetros. Apresentam também intercalações de rochas calcissilicáticas, quartzitos, anfibolitos, metaultramáficas e formações ferríferas. Lentes de rochas metaultramáficas foram cartografadas na porção mais basal dos paragneisses dessa formação (Angelim *et al*, 2007) (Dantas, 2017).

As rochas das formações ferríferas bandadas foram cartografadas espacialmente associadas (ou com ocorrências próximas) às rochas calcissilicáticas, mármore e rochas metaultramáficas. As porções mais basais da Formação Jucurutu que se associam a essas formações ferríferas também apresentam, eventualmente, níveis de gnaisses quartzosos e quartzitos (Dantas, 2017).

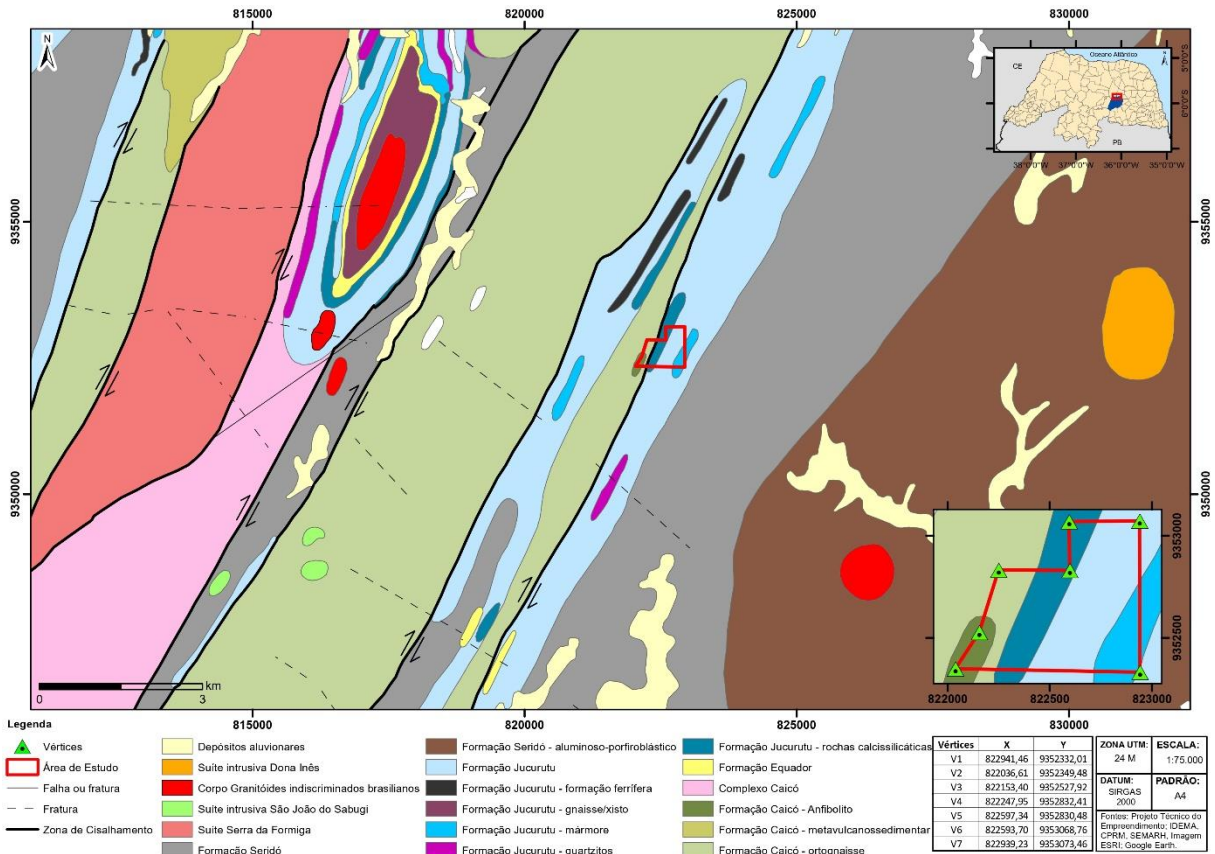


Figura 2- Mapa geológico da área de estudo. As principais litofácies observadas e ampliadas no canto inferior direito do mapa são pertencentes a Formação Jucurutu que estão em contato com rochas do Complexo Caicó através de uma zona de cisalhamento.

3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho inclui revisão bibliográfica sobre o tema estudado, realização do mapeamento no local do depósito, aquisição de amostras de rochas para análise química através do método de espectrometria por fluorescência de raio-x (FRX), microscópio eletrônico de varredura (MEV), análise granulométrica e, por fim, a realização de um experimento do uso da vermiculita estudada como condicionador de solo. Posteriormente, houve o tratamento dos dados e elaboração de artigo científico.

A pesquisa bibliográfica focou em trabalhos prévios existentes sobre a vermiculita, focando em suas características, gênese de depósitos e aplicabilidade, além de exemplos de depósitos mundiais e brasileiros. Para o contexto geológico da área de estudo, foram utilizadas cartas geológicas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) na escala 1:100.000, correspondentes à folha Lajes (Costa; Dantas, 2014),

as quais serviram de base cartográfica para as subsequentes interpretações. Através da leitura de publicações sobre o tema pesquisado foi desenvolvida a análise que fundamentou a interpretação dos resultados obtidos, os quais deram origem ao presente relatório da pesquisa.

A aquisição dos dados na área de estudo foi realizada durante a atividade de mapeamento geológico, situada na Fazenda Boqueirão. Foram coletadas 6 amostras nas ocorrências de vermiculita nos afloramentos para posterior análise litoquímica.

Parte das amostras da rocha coletadas foram enviadas para preparo e análise química de multielementos no laboratório SGS Geosol Laboratórios Ltda. Para a determinação dos principais elementos constituintes da composição química das amostras, foram utilizadas por esse laboratório: (i) pacote analítico com os dez óxidos principais determinados por análise química de Espectrometria por Fluorescência de Raio-X (fusão por tetraborato de lítio) e Determinação de Perda ao Fogo por Gravimetria LOI (*Loss on ignition*), realizado pelo método de calcinação a 1000°C; (ii) determinação de carbono (C) e/ou enxofre (S) totais por Infravermelho LECO PB-000007/o; (iii) Fluorescência de Raio-X a partir de pó prensado; e (iv) determinação de flúor por íon específico.

Uma outra parte foi submetida a análise de Espectrometria por Fluorescência de Raio-X (FRX) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no laboratório de instrumentação pertencente ao PPgUSRN do Instituto Federal do Rio Grande do Norte. A utilização do MEV possibilitou melhorar o entendimento da forma de ocorrência, textura e inter-relações da vermiculita. Isto é viável em função da possibilidade oferecida pelo equipamento para a observação e análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais, ofertadas a alta e à grande profundidade de foco, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico. Para o uso do MEV, utilizou-se o equipamento MEV Vega-3 LMU TESCAN, enquanto que o Espectrômetro de Raios-X utilizado corresponde ao equipamento de bancada EDX 720 Shimadzu.

Para a análise granulométrica, foram enviadas quatro amostras para a Brasil Minérios S/A. A realização do teste para identificação do tamanho das partículas da vermiculita expandida consistiu em quarterar as amostras antes de submeter ao processo de piroexpansão. Executou-se o ensaio de massa específica aparente e em seguida o processo de queima para a piroexpansão. Com o material já em

temperatura ambiente, foi colocado nas peneiras granulométricas dispostas no agitador de peneiras. Terminado o processo, anotou-se o peso do material retidos nas peneiras e calculado a distribuição granulométrica para a amostra.

Foi realizado um experimento para a utilização da vermiculita fina em uma área degradada próximo a encosta do bota fora da frente de lavra na Fazenda Boqueirão. O método consistiu na aplicação da vermiculita junto a carbonato de cálcio 30% (CaO) e magnésio 19% (MgO), a fim de ser aplicado como condicionador de solo. Os testes foram realizados em uma área com vegetação nativa, assim como em solo aparentemente infértil. O experimento teve como finalidade analisar o comportamento e uso desse mineral em relação a acidez e compactação do solo, retenção de água e poder de troca catiônica (CTC).

4. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA VERMICULITA BOQUEIRÃO

A caracterização mineralógica da vermiculita foi realizada através de estudos de análise física, geoquímica e experimental em amostras representativas desse depósito. Uma maior atenção foi dada aos aspectos geológicos relativos à composição da rocha mineralizada, cujas características e propriedades muitas vezes apresentam implicações com os processos de beneficiamento. O conhecimento das propriedades físico-químicas dos minerais apresenta-se como meta principal nesse projeto, uma vez que fatores relacionados ao tipo de estrutura dos principais minerais como textura, tamanho médio das partículas, porosidade, natureza das impurezas, entre outras, são fundamentais para a avaliação inicial do potencial exploratório do depósito.

4.1. MAPEAMENTO GEOLÓGICO

O mapeamento geológico foi a etapa do desenvolvimento do trabalho que consistiu em entender e representar as características e a distribuição das rochas, estruturas geológicas e minerais da área de estudo. Foi realizada a coleta de dados em campo, como observações das relações espaciais entre as unidades geológicas, medições e amostragem. Essas informações iniciais foram essenciais para a compreensão da complexidade e evolução da vermiculita no local.

A vermiculita existente na Fazenda Boqueirão apresenta propriedades físicas muito parecidas com as das micas, por exemplo, a clivagem inerente a essa classe de minerais, que se separam em lamelas flexíveis sem elasticidade. Suas cores variam do bronze ao amarelo-amarronzado, por vezes com brilho perolado e textura mais sedosa (Figura 3). O depósito é principalmente friável, pode ser encontrado em profundidades não muito grandes e atualmente não é explorado.

A principal característica que a distingue a vermiculita de outras micas (moscovita) é a sua capacidade de expandir-se quando são submetidas a temperaturas acima de 900°C, onde a água de hidratação contida entre suas placas se transforma em vapor, e transforma-se em flocos.



Figura 3- – Aspecto micáceo observado na Vermiculita Boqueirão, cor amarronzada e textura sedosa característica.

As unidades litológicas visitadas na Fazenda Boqueirão são pertencentes à Formação Jucurutu. É importante ressaltar que nesta formação estão presentes os principais depósitos de scheelita da região, que se hospedam nas calcissilicáticas. Além dessas ocorrências, tem-se também as formações ferríferas associadas a fácies biotita-anfibólio gnaiss, em geral na base da unidade, e as metavulcânicas. É possível também destacar as espessas faixas de mármore intercalados na Formação Jucurutu.

Na área de estudo, foram visitados afloramentos referentes às litofácies superiores da sequência correspondentes às rochas calcissilicáticas que apresentam

os escarnitos mineralizados com scheelita (Figura 4). Em seguida, observou-se uma região cisalhante com as rochas bastante influenciadas por esse controle estrutural, indicados pela existência de *boudins* de quartzo (Figura 5). A vermiculita se encontra no contato inferior das calcissilicáticas conforme é mostrado na Figura 8. De acordo com as análises químicas realizadas nos escarnitos do depósito, observou-se que rochas calcissilicáticas ricas na mineralização de scheelita influenciam na textura e qualidade da vermiculita. A vermiculita nesses contatos apresentou-se mais fina e com aspecto sedoso.



Figura 4– Contato superior das rochas calcissilicáticas (acima na imagem) com a vermiculita (sequência inferior). Observa-se que nos contatos onde a vermiculita apresenta um brilho perolado são aqueles correspondentes a escarnitos com maiores teores de scheelita





Figura 5- Afloramento de Vermiculita (A) da Fazenda Boqueirão com (B) *boudins* de quartzo, indicativo de atividade tectônica. A área de estudo está dentro de uma zona de cisalhamento.

Na base da sequência litológica, encontra-se todo o horizonte de vermiculita, associados com as ultramáficas (Figura 6). Como já mencionado anteriormente, as rochas ultramáficas aparecem na Formação Jucurutu e aqui são a rocha fonte para a alteração hidrotermal a qual as vermiculitas estão associadas. Os principais depósitos mundiais e brasileiros ocorrem majoritariamente dentro de zonas de complexos máficos e ultramáficos. Exemplo disso são os depósitos de Libby (Estados Unidos), uma das maiores reservas do mundo (Ugarte; Sampaio; França, 2008).



Figura 6– As rochas ultramáficas estão na base da sequência litológica da área de estudo. A alteração hidrotermal dessas rochas forma a vermiculita.

O depósito de vermiculita da Fazenda Boqueirão apresenta características de origem tectono-hidrotermal de sequência vulcânica. A formação do depósito

vermiculítico teria origem hidrotermal a partir da alteração das partes máficas-ultramáficas da sequência. Apresenta um *trend* NE/SW geral com presença de dobramentos fechados que colocam a unidade de paragnaisse em contato com a vermiculita em algumas partes da mina. Medidas tiradas em campo indicam 010/59SE (Figura 7).



Figura 7- – Contato entre as rochas de biotita-gnaisse da Fm. Jucurutu com a Vermiculita Boqueirão. Esse contato inferido pode ter sido formado por condições de dobramento, uma vez que a área está inserida em uma região de deformação tectônica. O caimento medido em campo foi de 010/59SE.

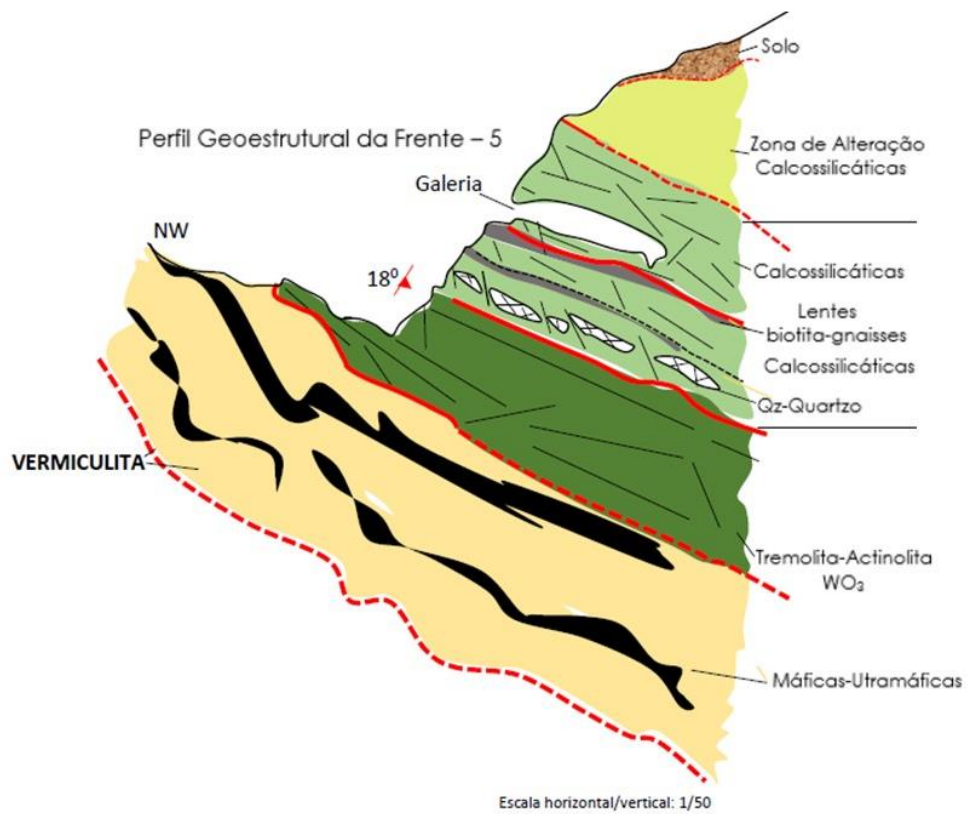


Figura 8– Perfil litológico representativo da Frente de Lavra 5 mostrando os principais contatos entre as rochas calcossilicáticas scheelíferas e a vermiculita como produto de alteração hidrotermal das rochas máficas/ultramáficas. Estão também esquematizados no perfil as rochas gnaissicas e os *boudins* de quartzo observados. (Autor: Fonseca Rebelo, 2022).

4.2. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (EDX)

Houve um tempo que o termo vermiculita era utilizado para descrever todo mineral micáceo e estrutura lamelar que tivesse a capacidade de esfoliação quando aquecido. Estudos químicos e de difração de raios-X conseguiram demonstrar que muitos minerais até então classificados como vermiculita, na verdade, apresentavam camadas interestratificadas de mica-vermiculita e clorita-vermiculita. Essa constatação revela que em uma mesma jazida desse mineral apresenta uma caracterização mineralógica complicada, uma vez que há uma considerável versatilidade na estrutura cristalina (Campos Rosário; Moreno; Molina, 2009).

A análise química feita no ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EDX) obteve as composições químicas da vermiculita natural da Fazenda Boqueirão. A vermiculita é um mineral rico em óxidos, mais comumente magnésio e sílica. As análises foram realizadas em pastilhas prensadas sob vácuo e em termos de óxidos. Na tabela 4 é possível encontrar os resultados obtidos para as análises EDX realizadas nos laboratórios Geosol (VM01, VM02, VM03, VM04) e do IFRN (VM05). É possível comparar com a composição química básica das vermiculitas comerciais de acordo com a *Vermiculite Association*.

Tabela 4– Resultados das análises químicas da Vermiculita da Fazenda Boqueirão e da composição básica, segundo a *Vermiculite Association*.

	VM01	VM02	VM03	VM04	VM05	<i>Vermiculite Association</i>
	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	50,5	49,4	49,1	29,6	37,25	38-46
Al ₂ O ₃	7,92	8,57	14,8	3,55	14,98	10-16
Fe ₂ O ₃	10,7	11,8	9,13	5,65	25,15	6-13
CaO	5,94	7,29	0,86	11,1	2,23	1-5
MgO	18,8	16,3	13,2	21,4	4,65	16-35
MnO	0,15	0,16	0,07	0,13	0,19	0,2-1,12
K ₂ O	0,2	1,24	2,8	0,23	7,66	1-6
P ₂ O ₅	0,09	0,07	0,08	0,03	1,1	0,2-1,2
TiO ₂	0,66	0,72	0,94	0,14	2,63	1-3
Na ₂ O	0,64	0,62	0,83	2,4		0,2-1,2
LOI	5,5	4,22	6,87	26,55		8-16

Analisando os resultados da Tabela 04, os principais óxidos que compõem as

amostras são: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Os resultados aproximam-se bastante das composições apontadas pela *Vermiculite Association*, referentes à composição química das principais vermiculitas comerciais. A maior diferença nota-se no teor de óxido de manganês, o qual nesse estudo apresenta um valor um pouco menor.

As vermiculitas, em geral, apresentam uma grande variação na composição química, dentro de uma mesma jazida ou ocorrência. Essa variação deve-se, entre outros fatores, às diferenças na sua mineralização, alteração das micas, e o seu grau de intemperização. Para exemplificar isso, a Tabela 5 mostra a composição química das vermiculitas comerciais no Brasil e depósitos internacionais reconhecidos. Exceto a vermiculita de Phalaborwa, que está associada a complexos carbonatíticos, os depósitos brasileiros e os estadunidenses são oriundos de complexos ultramáficos.

Tabela 5– Composição química das principais vermiculitas comerciais brasileiras e internacionais reconhecidos no mundo.

	SANTA LUZIA (PB)	SANCRELÂNDIA (GO)	MASSAPÊ (PI)	PHALABORWA (ZA)	CHICARGO (US)	LOUISE (US)
	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	42,80	40,40	45,10	39,37	38,66	38,34
MgO	19,90	18,30	23,60	23,37	20,04	16,38
Al ₂ O ₃	6,80	13,00	10,20	12,08	17,36	12,85
Fe ₂ O ₃	6,70	8,50	5,80	5,45	8,45	8,80
K ₂ O	4,60	3,70	0,50	2,46	4,24	6,63
Na ₂ O	1,00	2,50	0,10	0,80	-	1,72
CaO	0,56	1,40	3,60	1,46	0,75	1,12
MnO	0,11	0,12	-	0,30	0,07	0,14
TiO ₂	0,86	1,00	0,70	1,24	-	1,66
NiO	0,29	0,21	-	-	-	-
BaO	-	-	0,20	-	0,12	-
Cr ₂ O ₃	0,45	0,31	-	-	0,50	0,23
H ₂ O	15,80	10,20	10,20	11,20	8,71	10,66

Ugarte et al., 2008

4.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Através do MEV, observou-se a morfologia da vermiculita na forma natural. As Figuras 9A e 9B apresentam o resultado obtido para a amostra em sua forma natural com ampliação de 500 e 100 vezes, não submetida a expansão. É observado nas imagens a estrutura lamelar característico da vermiculita.

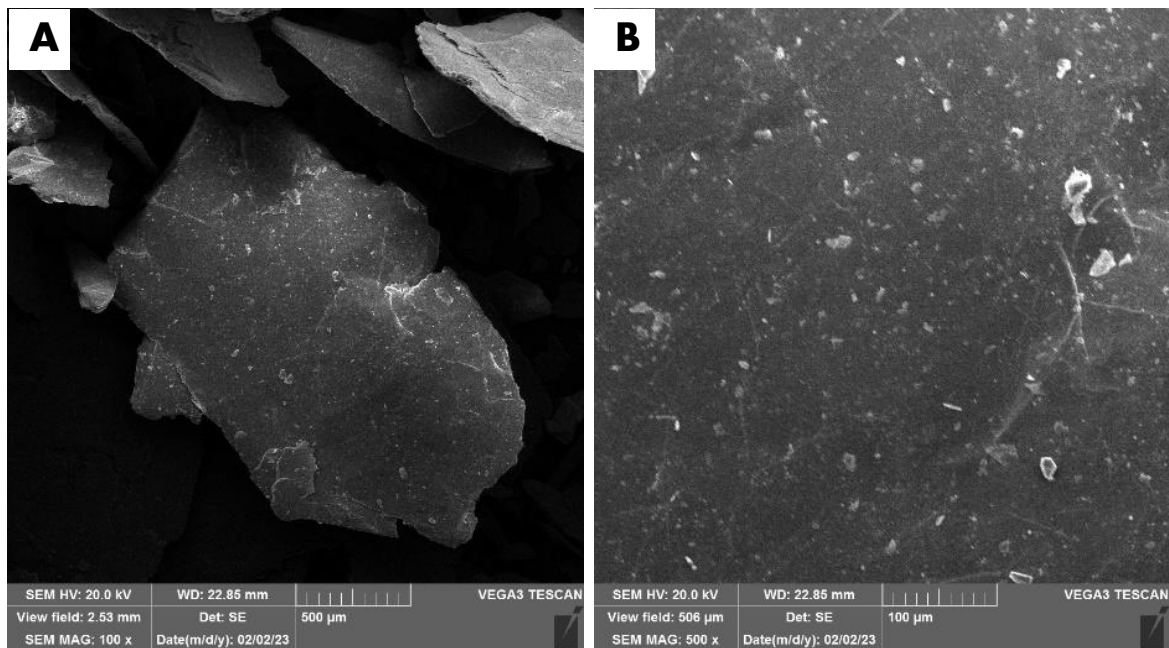


Figura 9– (A) Estrutura lamelar típica das vermiculitas em ampliação 100x. (B) Ampliação na face lamelar onde é possível identificar a superfície de alteração.

Os minerais de vermiculita variam na escala de milímetros a micrômetros. A Figura 9A, em ampliação de 100x, demonstra essa morfologia observando-se a face das lamelas. Pode-se verificar que as placas de vermiculita apresentam em sua superfície alteração mineralógica (Figura 9B). Essa característica é descrita como estruturas semelhantes a agregados, referindo-se a textura das placas de mica que apresentam condição de alteração mineralógica, organizadas estruturalmente dessa forma. Machado (2000) descreve a sequência de transformação desses minerais como: mica (biotita ou flogopita) -> vermiculita -> esmectita. O aspecto friável da rocha é representado também pela grande quantidade de finos observados tanto nas imagens como na análise granulométrica.

4.4. GRANULOMETRIA

A vermiculita é classificada de acordo com sua granulometria, podendo ser grossa, média, fina, superfina e micron. A Tabela 6 apresenta a classificação de acordo os sistemas internacional, americano e brasileiro. O padrão brasileiro não adota um sistema de classificação próprio e adota o sistema internacional como referência.

Tabela 6– Classificação Granulométrica, segundo os padrões Internacional, Americano e Brasileiro.

SISTEMA	CLASSIFICAÇÃO	TAMANHO (mm)
Internacional	Grande	8 - 2,8
	Médio	4 - 1,4
	Fino	2 - 0,71
	Super fino	1 - 0,35
	Micro fino	0,71 - 0,25
Americano	1	7 - 3,33
	2	3,5 - 1,75
	3	2 - 0,6
	4	0,85 - 0,212
	5	0,3
Brasileiro	-	55-95%> 2,4
	-	65-95%> 1,2
	-	70-95%> 0,6
	-	80-100%> 0,3

Reis (2002)

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise granulométrica realizadas nas amostras de vermiculita. A análise foi realizada a partir de via a úmido e seco. Os resultados da percentagem em massa retida e teor de vermiculita é mostrado em cada uma das seis faixas (grande, médio, fino, superfino e microfino) obtidas a partir de dois tipos de R.O.M, classificados como “fino a médio” e “fino a superfino”.

Tabela 7– Análise granulométrica para os R.O.M. Os resultados obtidos foram realizados via úmido e seco.

(mm)	ROM FINA A MÉDIA		ROM FINA A SUPER FINA	
	Úmido (%)	Seco (%)	Úmido (%)	Seco (%)
8,00	0,00	0,00	5,75	18,43
4,00	14,08	71,09	34,47	19,00
2,00	29,07	63,33	20,74	25,94
1,00	27,23	68,27	18,78	28,70
0,50	40,59	75,66	21,47	33,72
<0,30	33,55	63,04	21,46	34,44
<0,30	87,93	39,72	61,25	26,50

É possível observar que os maiores teores foram observados para o procedimento realizado a seco para o R.O.M classificado como médio a fino, sendo as faixas de 0,5 mm e 4,0 mm os maiores teores. O procedimento via úmido apresenta teores maiores nas faixas mais finas (microfino). Para a segunda classificação de R.O.M fina a superfina apresenta teores médios mais distribuídos nas faixas granulométricas apresentadas, contudo ainda são as faixas mais finas também (microfina) onde vão se encontrar os maiores teores. Para os ensaios de concentração também foram utilizadas as classificações fina a média e fina a superfina, conforme observado na Tabela 8.

Tabela 8– Resultados dos teores de vermiculita de acordo com cada fração granulométrica nos concentrados média a fina e fina a superfina.

(mm)	CONCENTRADO MÉDIO A FINO	CONCENTRADO FINO A SUPER FINO
	%	%
8,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00
2,00	1,20	1,86
1,00	12,02	16,60
0,50	41,58	15,20
<0,30	28,60	13,24
<0,30	16,60	53,10

Verifica-se que a maior teor de vermiculita está nas granulometrias de 1,0 mm e <0,3 mm, sendo os teores mais significantes encontrados nas frações de 0,5 mm para o concentrado médio a fino e as frações <0,30 mm para o concentrado fino a superfino.

É possível observar o aumento do teor de vermiculita com a diminuição da granulometria. Hindman (1992) aponta que minérios com teores inferiores a 15% de vermiculita não são considerados economicamente viáveis para o seu aproveitamento industrial. É possível observar que as maiores concentrações para a Vermiculita Boqueirão estão nas frações mais finas. Produtos comerciais de vermiculita são obtidos com a fração maior que 0,30 mm.

4.5. ESFOLIAÇÃO

As amostras AM1 e AM2 tiveram suas análises realizadas pela Brasil Minérios S/A. Visualmente, as duas amostras apresentaram partículas com granulometria mais grosseira, contendo pouca ou nenhuma presença significativa de argila. Foi feita a homogeneização e quarteamento dessas amostras. Após a preparação foram analisadas granulometria, teor e rendimento, conforme descrito nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9– Teor e Rendimento resultantes da análise física das amostras esfoliadas.

AMOSTRA	TEOR	RENDIMENTO
	%	m ³ /t
AM1	53,4	2,6
AM2	49,7	3,0

Tabela 10– Percentagem da granulometria retida simples das amostras esfoliadas.

		AM1	AM2
		(%)	(%)
Granulometria	(mm)		
	8	52,0	67,0
	4	14,1	14,2
	2	9,2	5,2
	1	7,0	3,9
	0,5	6,0	1,7
	0,3	4,8	2,8
	<0,3	7,1	5,1

As conclusões recebidas do laboratório foram que as duas amostras não apresentam rendimento interessante, embora ambas desloquem levemente o floco. Em relação ao ensaio de teor, as partículas que eram maiores acabaram se desintegrando com a expansão (Figura 10). Ao colocar na água, as partículas menores flutuaram e grande parte do material que não expandiu afundou. Logo, a vermiculita das amostras não apresentou um rendimento significativo, mesmo que o teor da amostra apresente um intervalo considerado alto.

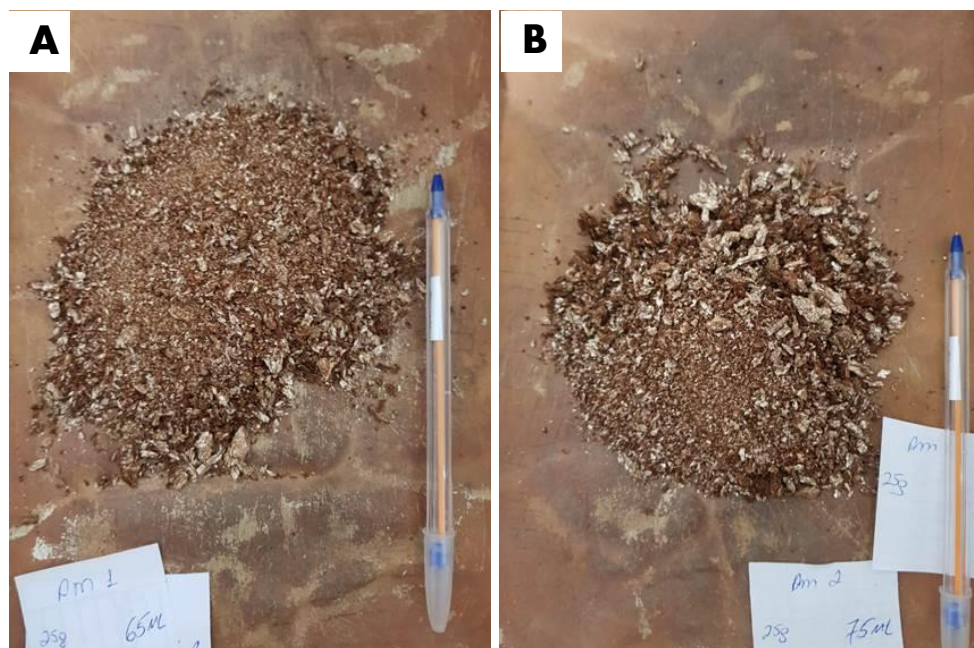


Figura 10– (A) Amostra AM1 e amostra AM2 (B) após processo de expansão (vermiculita esfoliada).

4.6. VERMICULITA FINA BOQUEIRÃO NA FORMA DE CONDICIONADOR DE SOLO

Foi realizado um experimento na Fazenda Boqueirão utilizando a vermiculita combinada com cálcio (30% CaO) e magnésio (19% MgO) para formar um condicionador de solo. O experimento conseguiu se mostrar eficiente na correção da acidez do solo, aumentando a capacidade de retenção de água. Foi observado também maior efetividade na redução da compactação do solo (Figura 11).

Os resultados obtidos foram visivelmente positivos, com o desenvolvimento de plantas robustas, apresentando trama fibrosa resistente e a folhagem apresentou coloração verde. A vegetação revelou crescimento rápido, além do aumento da fertilidade do solo e redução da compactação (Figura 12).

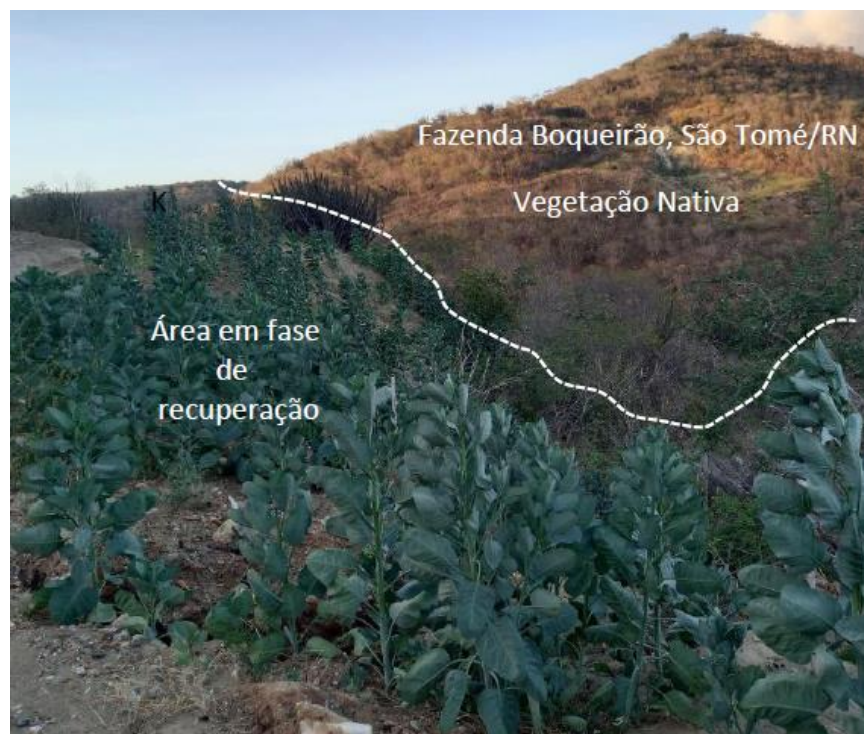


Figura 11– Contraste observado da área de vegetação nativa com a área de recuperação onde foi utilizada a Vermiculita Boqueirão combinada com carbonato de cálcio e magnésio.



Figura 12– Crescimento de vegetação após a utilização da Vermiculita Boqueirão. Os resultados permitiram obter um solo mais solto e propício para que as raízes das plantas crescessem com mais facilidade.

O experimento foi conduzido pelo próprio responsável da Mina Boqueirão que concluiu que a vermiculita fina existente na área de estudo apresentou-se útil para fins agrônômicos, onde foi possível tornar o solo mais fértil, a partir da maior retenção de água proporcionada pela vermiculita.

A vermiculita fina balanceada com cálcio e magnésio da Fazenda Boqueirão, na forma de condicionador de solo, poderá ser aplicada em áreas afetadas principalmente pelos processos de desertificação e compactação, muitas vezes provocada pelos impactos ambientais causados pela pecuária. O condicionamento de solos permite o reaproveitamento dessas áreas a partir da retomada de plantio com o replantio de espécies nativas, e promovendo a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo.

Os principais resultados do uso da Vermiculita fina de Boqueirão como condicionador de solos são listados abaixo:

- a) Proporcionou aumentos significativos na geração de plantas saudáveis;
- b) A aplicação no sulco de plantio ou em toda a área foram eficientes no adensamento experimentado, gerando plantas na mesma altura e

visivelmente fortes;

- c) O balanceamento com cálcio e magnésio aumentou o pH do solo;
- d) Reduziu significativamente a compactação do solo;
- e) Disponibilizou por mais tempo a oferta de água para as plantas;
- f) Aumentou o poder de troca dos cátions (CTC).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para propriedades descritas e analisadas por esse estudo e tendo em vista o objetivo principal desse trabalho focado na caracterização tecnológica desse novo depósito de vermiculita no estado do Rio Grande do Norte, pode-se concluir que:

1- O mapeamento geológico realizado permitiu identificar importantes contatos e associações litológicas para entender a gênese do depósito. As rochas calcissilicáticas desempenham importante parte no processo de alteração hidrotermal das rochas máficas/ultramáficas, gerando como produto a vermiculita. Essa relação foi principalmente estabelecida pelo contato direto das vermiculitas com as rochas calcissilicáticas, onde pode-se observar também uma relação entre rochas mais ricas em scheelita com uma textura mais sedosa apresentada pelas vermiculitas nesses contatos. Os *boudins* de quartzo também evidenciam a influência de uma zona cisalhante significativa para a formação do depósito. As áreas que mostram o contato com gnaiss também podem ser resultado desse controle estrutural na área e precisam ser melhor investigadas.

2- A partir da análise química realizada na Vermiculita Boqueirão, observou-se que em comparação com outras vermiculitas comerciais brasileiras, como Santa Luzia (PB), Sanclerlândia (GO) e Massapê (PI), a diferenciação mais notável se deu nos teores de alumínio e potássio da Vermiculita Boqueirão que foram menores quando comparados aos outros depósitos. Os teores de ferro e cálcio se mostraram maiores, enquanto sílica e magnésio permanecem na mesma média. Atribui-se essa variação química das vermiculitas principalmente a fatores associados ao próprio processo de mineralização, alteração das micas e grau de intemperismo.

3- As análises por MEV testemunham a estrutura tipicamente lamelar da vermiculita. O aspecto friável do depósito da Vermiculita Boqueirão, e a granulometria fina começa a ser atestado já nessa análise. Algumas placas de vermiculita apresentam alteração mineralógica para esmectita, a partir da sequência descrita por Machado (2000).

4- Os resultados obtidos da análise granulométrica feita pela Brasil Minérios foram realizados via úmido e seco. Em ambos os procedimentos, pode-se observar que os maiores teores se concentram nas frações mais finas, menores que 1 mm. Para as análises dos concentrados, foram constatados o aumento dos teores com a diminuição da granulometria.

5- O ensaio de esfoliação realizado verificou que, apesar do deslocamento do floco e de teores relativamente altos apontados na análise química, a esfoliação não demonstrou um rendimento significativo.

6 - O experimento de utilizar a vermiculita fina a superfina do Boqueirão como condicionador de solo se mostrou bem-sucedida e apresenta resultados bastante satisfatórios para essa finalidade. Novos testes continuam a ser realizados na região de Elói de Sousa, no Rio Grande do Norte.

O resultado dessa pesquisa corrobora com a concepção generalizada da privilegiada posição não só do Rio Grande do Norte, mas do Brasil inteiro, em relação à quantidade de ocorrências e volumes de reservas de minerais industriais em seus territórios. Sabe-se também que as atividades agrícolas do estado e de todo o semiárido brasileiro são uma forte vertente econômica.

Considerando a escassez e a crescente necessidade desse recurso para as áreas irrigadas, a utilização da água em sua maior eficiência deve ser uma meta a ser sempre buscada. A vermiculita, embora ainda pouco conhecida no Brasil, é considerada em muitos países do mundo um condicionante capaz de aumentar a capacidade dos solos de retenção de água e troca catiônica, sem prejuízos para a produção. Isso consiste em aumentar a fertilidade de solos sem comprometer o

equilíbrio do meio ambiente, diminuindo a dependência do setor no uso de produtos químicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth Science Reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- AMARAL, W. D. S. et al. High-pressure granulites from Cariré, Borborema Province, NE Brazil: Tectonic setting, metamorphic conditions and U–Pb, Lu–Hf and Sm–Nd geochronology. **Gondwana Research**, v. 22, p. 892–909, 2012.
- ANGELIM, L. A. A. et al. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte: texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte na Escala 1:500.000**. CPRM. Recife, p. 233. 2007.
- BARROS, I. M. D. S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 87. 2018.
- BASSETT, W. A. The Geology of Vermiculite Occurrences. **Clays and Clay Minerals**, Nova York, v. 10, p. 61-69, 1961.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic History of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U. G., et al. **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro, p. 151-182, 2000.
- CAMPOS ROSARIO, A. M.; MORENO, S.; MOLINA, R. Characterization of Vermiculite by XRD and Spectroscopic Techniques. **Earth Sciences Research Journal**, v. 13, p. 108-118, 2009.
- CINTRA, L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. P. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. **Cerâmica**, v. 60, p. 69-76, 2014.
- CORDANI, U. G. et al. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 43, p. 583-597, 2013.
- DANTAS, R. **Petrografia e litoquímica de rochas ferríferas na região central do estado do Rio Grande do Norte (domínio do rio Piranhas-Seridó, NE da província Borborema)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 170. 2017.
- FRANÇA, S. C. A. et al. **Vermiculita, mais que um mineral acústico**. IV Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. João Pessoa, p. 126-136, 2017.
- FREITAS PAULA, R.; CAVALHARES, C. Vermiculita. In: MEDEIROS, K. A.; OLIVEIRA, M. L.; CEDRAZ NERY, M. A. **Sumário Mineral 2017**. 1. ed. Brasília: Agência Nacional de Mineração. p. 176-178, 2019
- GELLERT, R. Inorganic mineral materials for insulation in buildings. In: HALL, M. R. **Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings**. 1. ed. Munich: Woodhead Publishing Limited, v. 1. p. 193-228, 2010.
- HILLIER, S.; MARWA, E. M. M.; RICE, C. M. On the Mechanism of Exfoliation of Vermiculite. **Clays Minerals**, v. 48, p. 563-582, 2013.
- HINDMAN, J. R. Vermiculite. In: CARR, D. D. **Industrial Minerals and Rocks**. 3. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. p. 1103-1111, 1992.
- HINDMAN, J. R. Vermiculite. In: KOGEL, J. E., et al. **Industrial Minerals**. 7. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. p. 1015-1026, 2009.
- HOLLANDA, M. H. B. M. et al. Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province NE Brazil. **Journal of South American Earth Science**, v. 32, p. 287-300, 2011.
- HORNBOSTEL, C. Vermiculite. In: HORNBOSTEL, C. **Construction Materials:**

Types, Uses and Applications. 2. ed. Toronto: John Wiley & Sons, Inc, v. 1, p. 890-893, 1991.

JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-africana.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 803. 1994.

MACHADO, L. C. R. **Caracterização das Vermiculitas Visando sua Esfoliação e Hidrofobização para Adsorção de Substâncias Orgânicas.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 150. 2000.

MARCOS, C.; RODRÍGUEZ, I. Expansion behaviour of commercial vermiculites at 1000 °C. **Applied Clays Science**, Oviedo, v. 48, p. 492-498, 2010.

MEDEIROS, V. C. et al. Augen gnaisses riacianos no Domínio Rio Piranhas-Seridó – Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP, Série Científica**, São Paulo, v. 12, p. 3-14, 2012.

NASCIMENTO, M. C. B. D. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida.** Universidade Federal do Pernambuco. Recife, p. 130. 2008.

NEVES, S. P. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. **Tectonics**, v. 22, p. 1031, 2003.

REIS, E. Vermiculita no Brasil: Situação Atual. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)**, Brasília, 2002.

SANTOS, E. J. D. et al. Metalogênese das Porções Norte e Central da Província Borborema. In: SILVA, M. G., et al. **Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras.** Belo Horizonte: CPRM, p. 343-384, 2014.

SCHULZE, D. Clay Minerals. In: HILLEL, D. **Encyclopedia of Soils in The Environment.** West Lafayette: Academic Press, v. 4, p. 246-254, 2005.

SILVA, H. H. A. B. D. **Caracterização Mineralógica e Filiação da Vermiculita da Mina Cerrado III - Sancrelândia GO.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 169. 2006.

SIMANDI, G. J.; BIRKETT, T.; PARADIS, S. Vermiculite. In: SIMANDL, G. J.; HORA, Z. D.; LEFEBURE, D. V. **Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles.** Victoria, British Columbia: Geological Survey Branch, v. 3, p. 62-72, 1999.

UGARTE, J. F. D. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 864-887, 2008.

VAN SCHMUS, W. R. et al. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. **Precambrian Research**, v. 127, p. 287-327, 2003.

VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; BRITO NEVES, B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from SmNd and UePb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, p. 227-252, 2011.

FORMULÁRIO DE IDENTIFICAÇÃO

Dados do Relatório	
Título e subtítulo: CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM NOVO DEPÓSITO MINERAL DE VERMICULITA EM SÃO TOMÉ-RN	
Tipo de relatório: TÉCNICO	Data: 09/08/2024
Título do projeto/programa/plano: PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM USO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS NATURAIS	
Autor(es): JOANNA PRISCILA DE SOUSA PAIVA	
Instituto e endereço completo: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO NORTE Av. Sen. Salgado Filho, 1559 - Tirol, Natal - RN, 59015-000	
Resumo: <p>O uso da vermiculita surge como um importante instrumento ao conceito de sustentabilidade, por se tratar de um mineral tem sido amplamente utilizado em diversas áreas, apresentando grande relevância especialmente na agricultura. O presente estudo tem por objetivo fazer uma apresentação da ocorrência da Vermiculita Boqueirão, no estado do Rio Grande do Norte. Foi realizada a caracterização tecnológica do minério a partir de um depósito recém-descoberto e ainda não catalogado no município de São Tomé (RN). A coleta de dados foi realizada diretamente do depósito mineral, onde foram coletadas as amostras do minério. Foram realizados ensaios físicos e químicos, como Espectrometria por Fluorescência de Raio-X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e ensaios granulométricos e de esfoliação. Por fim, são mostrados os resultados referentes a utilização da Vermiculita Boqueirão como condicionador de solo. O enfoque deste trabalho é a apresentação de relatório técnico envolvendo a análise de dados pertinentes ao modo de ocorrência, especificações do minério, potencialidade de reserva mineral, dados de mercado, inovações tecnológicas, novas oportunidades de investimentos e fortalecimento da competitividade dos produtos norte-rio-grandense no mercado.</p>	
Palavras-chave/descriptores: Vermiculita, caracterização tecnológica, recursos minerais, minerais industriais, Faixa Seridó.	
Nº de páginas 45	
Jornada de trabalho:	Horas semanais:
Total de horas:	
Observações/notas:	