

**UM OLHAR SOBRE OS MINERAIS DE ASBESTO: ASPECTOS  
HISTÓRICOS E GEOLÓGICOS E ESTUDO DE CASO DO SÍTIO XILILI  
(PE), PORÇÃO CENTRAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA**

*AN OVERVIEW INTO THE ASBESTOS MINERALS: HISTORICAL AND GEOLOGICAL ASPECTS  
AND CASE STUDY OF THE SÍTIO XILILI (PE), CENTRAL BORBOREMA PROVINCE*

**Glenda LIRA SANTOS<sup>1</sup>, Lauro César Montefalco de LIRA SANTOS<sup>2</sup>,  
José Ferreira de ARAÚJO NETO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mails: glendaliraa@gmail.com; araujoneto.geo@gmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: lauro.lsantos@ufpe.br

Introdução  
Histórico e aspectos econômicos  
Aspectos mineralógicos  
Crisotila  
Grupo do anfibólio  
Aspectos genéticos  
Crisotila  
Amosita e crocidolita  
Antofilita, tremolita e actinolita  
Técnicas de identificação de minerais asbestiformes  
Ocorrência de asbesto do Sítio Xilili (Pe)  
Considerações finais  
Referências

**RESUMO** - Asbesto ou amianto são nomes genéricos dados a minerais que possuem hábito fibroso e morfologia alongada. Estes subdividem-se em silicatos do grupo da serpentina: crisotila e do grupo dos anfibólios: crocidolita (variedade da riebeckita), amosita (variedade da cummingtonita-grunerita), além da antofilita, tremolita e actinolita. São minerais de grande apelo econômico por possuírem elevada flexibilidade, resistência ao calor, eletricidade e tração. Apesar de sua toxicidade, estas fibras são utilizadas há milhares de anos na indústria de construção civil e automobilística. São encontrados principalmente em rochas ultramáficas metassomatizadas e o principal depósito de asbesto, do tipo crisotila, no Brasil, ocorre na mina Cana Brava, Goiás. Neste trabalho tratamos como estudo de caso a ocorrência de asbesto antofílico do Sítio Xilili (próximo a cidade de Arcoverde, Pernambuco). O asbesto ocorre em lentes de rochas ultramáficas serpentinizadas compostas por antigorita, serpentina, talco, magnesita e clorita encaixadas nas rochas metavulcanossedimentares do Complexo Riacho do Tigre, Terreno Rio Capibaribe, da Província Borborema. São apresentados aspectos mineralógicos, petrográficos e de campo, os quais trazem informações sobre como identificar um depósito de asbesto através de técnicas petrográficas.

**Palavras-chave:** Minerais de asbesto. Rochas ultramáficas. Província Borborema.

**ABSTRACT** - Asbestos is a generic name given to minerals that have a fibrous habit and elongated morphology. These minerals subdivide into silicates from the serpentine group: chrysotile and, the amphibole group: crocidolite (var. riebeckite), amosite (var. cummingtonite-grunerite), besides anthophyllite, tremolite, and actinolite. They are minerals with great economic appeal since they have high flexibility, heat, electricity, and traction resistance. Despite their toxicity, those fibers are utilized for thousands of years in the civil construction and automobile industries. Asbestos is found mainly in metasomatized ultramafic rocks, and the main asbestos deposit, from the chrysotile type, in Brazil, occurs in the Cana Brava Mine, Goiás. In this paper, we deal with the case study of the Sítio Xilili (near Arcoverde City, Pernambuco) anthophyllitic asbestos occurrence. The asbestos occurs as lenses in the serpentized ultramafic rocks composed of antigorite, serpentine, talc, magnesite, and chlorite, which are hosted by the metavolcanosedimentary rock from the Riacho do Tigre Complex, Rio Capibaribe Terrane, Borborema Province. Mineralogical, petrographic, and field data aspects are presented to add information on how to identify asbestos deposits through petrographic analysis.

**Keywords:** Asbestos minerals. Ultramafic rocks. Borborema Province.

## INTRODUÇÃO

Os termos “asbesto” e “amianto” provém do grego “a-sbestos” e “a-mianto” e significam inextinguível, incorruptível e são termos comerciais/industriais utilizados para descrever um grupo específico de minerais fibrosos utilizados há milhares de anos. Seu hábito de cristalização se define por uma associação de longas fibras polifilamentosas com razão comprimento/largura

de 3:1, permitindo agrupá-las em duas categorias: grupos das serpentinas (crisotila) e do anfibólio (crocidolita, antofilita, amosita, tremolita e actinolita). Estes minerais possuem características físico-química semelhantes, porém se diferenciam em composição química e estrutural (Ross et al., 2007). Geralmente, as fibras dos cristais de anfibólio são retas, duras, pontiagudas (crocidolita) e

quebradiças (antofilita e tremolita), já as fibras de serpentina são mais onduladas, flexíveis e macias (Queiroga et al., 2005 e referências ali contidas).

Desde a antiguidade, têm-se registros do uso deste grupo de minerais, onde mais de 95% dos minerais de asbesto que vêm sendo comercializados são provenientes do tipo mais abundante, a crisotila (Ross & Virta, 2001). Os depósitos de asbesto são associados, principalmente, às rochas ultramáficas, carbonatos serpentinizados e formações ferríferas bandadas (Ross, 1987). A prospecção deste tipo de minério, quando associada a rochas ultramáficas, é baseada em métodos geofísicos como a magnetometria (aérea e terrestre), já que a intensa serpentinação destas rochas podem concentrar uma grande quantidade de magnetita (Kennedy, 1990). O mapeamento utilizando imageamento espectroscópico também vem sendo aplicado, com eficiência, para reconhecimento de variedades mineralógicas. Por exemplo, Swayze et al. (2009) conseguiram mapear áreas onde o acesso é limitado e identificar regiões com presença de poeira de asbesto para contenção.

Os minerais de asbesto têm grande importância econômica, com destaque para a construção civil e indústria automobilística devido sua resistência ao calor, flexibilidade, alta resistência à tração, grande área de superfície para relação de massa, resistência elétrica e à degradação química

(Strohmeier et al., 2010). A larga diversidade de propriedades exibida por estas fibras naturais vem sendo fonte de exploração e procura em escala mundial, entretanto estas características são as mesmas responsáveis por numerosas doenças ligadas ao sistema respiratório.

O amplo banimento do uso e exploração das fibras de asbesto devido a sua nocividade levou a numerosos trabalhos relacionando o asbesto às doenças respiratórias (e.g. Nogueira et al., 1975; Castro & Gomes, 1997; Capellozzi, 2000; Mendes, 2001; Terra Filho et al., 2006; Craighead & Gibbs, 2008; Oury et al., 2014). Não obstante, pouca bibliografia, especialmente em português, foi produzida nas últimas décadas com relação as características deste tipo de minério, que ainda apresenta forte apelo industrial (e.g. Skinner et al., 1988; Scliar, 1998; Virta, 2001, Strohmeier et al., 2010).

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar o estado da arte concernente aos aspectos históricos e geológicos dos minerais de asbesto. Adicionalmente, como estudo de caso, é apresentado aspectos mineralógicos, petrográficos e de campo sobre a ocorrência de asbesto do Sítio Xilili, localizado no Sertão do estado de Pernambuco. Esta ocorrência é conhecida desde a década de 1970, porém, até o presente momento, não existem trabalhos detalhados com foco na geologia da ocorrência.

## HISTÓRICO E ASPECTOS ECONÔMICOS

O asbesto foi identificado, primariamente, como fibras suficientemente flexíveis de coloração cinza a branca para uso de tecelagem, além de ser incombustível e imutável à altas temperaturas (Skinner et al., 1988). O registro mais antigo data de 2500 a.C. na Finlândia e é representado pelo uso de antofilita para reforçar utensílios de matéria prima de argila (Europaeus-Åyräpää, 1930). Também são reportados outros usos antigos das fibras de asbesto, como fabricação de pavios de lâmpada, roupas de crematório e papel (Skinner et al., 1988). No século XIX, a produção de asbesto alcançou a escala industrial na fabricação de têxteis, o que levou a exploração mundial em depósitos no Canadá, África do Sul e antiga URSS (Figura 1; Virta, 2002 e referências nele contidas). Somente no século XX, as fibras de asbesto foram fortemente utilizadas como material isolante térmico, principalmente para suprir demandas durante a Segunda Guerra Mundial, especialmente para a fabricação de

navios (Virta, 2002).

Além de isolante, o asbesto também foi comercializado na indústria civil para a fabricação de fibrocimentos (mistura de cimento e cerca de 10% de amianto; Scliar, 1998), utilizados majoritariamente em tubos para distribuição de água potável, coleta e rede de esgotos (Ferreira Filho & Linares, 2009); e na indústria automobilística, em freios, embreagens e juntas de asbesto. Estima-se que cerca de 98% do asbesto produzido no mundo é destinado ao fibrocimento (92%), produtos de fricção (6%) e indústria têxtil (2%) (Garcia et al., 2010). Até o ano de 2017, as grandes exportações do asbesto concentraram-se na Rússia (62%), Cazaquistão (18%) e Brasil (17%). Apesar das grandes reservas localizadas no Canadá, a última grande exportação mundial de asbesto neste país, com 8,4%, deu-se em 2011 (The Observatory Economic Complexity, 2020).

No Brasil, as primeiras citações da ocorrência de asbesto remontam ao início do século XX em



**Figura 1** – Principais ocorrências de depósitos de minerais de asbesto no mundo. Fonte: Modificado de Virta & Mann (1994).

Minas Gerais, Ceará e Paraíba, com explorações minoritárias na Bahia (Figura 2; Scliar, 1998). Com o advento do fibrocimento, a procura por esta commodity se intensificou, principalmente com a chegada das grandes empresas mineradoras europeias, como a Brasilit (atualmente, pertencente ao grupo francês Saint-Gobain) e a Eternit (hoje, companhia de capital aberto). O mapeamento de novas jazidas de crisotila, entre os anos de 1950 e 1960, nos estados de Goiás, Bahia, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, ocorreram com

a criação da S.A. Mineração em Amianto (SAMA) pela Brasilit e, pela Sociedade Brasileira de Mineração (FAMA). Entretanto, a principal descoberta se deu com o depósito de crisotila, de classe mundial, conhecido como Cana Brava (Minaçu-GO). Por volta da década de 1980, com a grande exploração deste minério em Goiás, o Brasil se tornou autossuficiente na produção, classificando-se como exportador de fibras de asbesto, chegando a produzir no ano 2003, cerca de 230 mil toneladas.



**Figura 2** – Ocorrências de asbesto do tipo crisotila no Brasil. Destaque para a mineração de Cana Brava em Minaçu (GO) detentora da maior produção de crisotila no Brasil até 2017 e a ocorrência do antofilita asbesto do Sítio Xilili em Arcoverde (PE), descrita no presente trabalho. Modificado de Scliar (1998).

Por outro lado, entre as décadas 1960 e 1970, a descoberta dos problemas de saúde associados a longas exposições às fibras de asbesto no ar, levou a uma grande redução na produção desta commodity, principalmente na Europa Ocidental e Estados Unidos (Virta, 2002). No Brasil, o banimento de anfíbio asbesto se deu em 1995, enquanto que o banimento do uso do asbesto

crisotila ocorreu em 2017 com a declaração à inconstitucionalidade do artigo 2º da Lei Federal 9.055/1995, que permitia a exploração deste tipo de amianto. Atualmente, a discussão sobre a inconstitucionalidade da lei continua, e, no estado de Goiás, a Sama/Eternit possui a autorização para continuação da lavra afirmando cumprir os métodos de segurança necessários.

### ASPECTOS MINERALÓGICOS

Dentro dos silicatos existem três grupos que usualmente exibem morfologia fibrosa: serpentina, anfíbio e zeólita, porém somente os dois primeiros possuem apelo comercial e são enquadrados como minerais de asbesto. A serpentina e o anfíbio, quando exibem hábito fibroso e morfologia alongada, são chamados de “asbestiforme” (Skinner et al., 1988), e possuem comumente uma razão largura/altura maior que 20:1 (Strohmeier et al., 2010).

Seis minerais fazem parte dos minerais de asbesto, subdividido em duas classes: (i) grupo

da serpentina: a crisotila, conhecida como amianto branco; e (ii) grupo do anfíbio: crocidolita (variedade da riebeckita) conhecida como amianto azul, amosita (variedade da cummingtonita-grunerita) conhecida como amianto marrom, além da antofilita, tremolita e actinolita (Tabela 1; Steel & Wylie, 1981; Queiroga et al., 2005; Strohmeier et al., 2010). Quando exibem hábito “asbestiforme”, os anfíbrios devem ser designados como asbesto, já que estes podem ocorrer em outras morfologias.

**Tabela 1** - Principais características físicas e químicas dos minerais de asbesto. □ - vazio no sítio “A” da estrutura do anfíbio. Fonte: Virta (2005).

Propriedades	Crisotila	Amosita	Crocidolita	Antofilita	Tremolita asbesto	Actinolita asbesto
<b>Composição</b>	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	$\square\{Fe^{2+}_2\}\{Fe^{2+}_3\}(Si_8O_{22})(OH)_2$	$\square\{Na_2\}\{Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2\}Si_8O_{22}(OH)_2$	$\square\{Mg_2\}\{Mg_5\}(Si_8O_{22})(OH)_2$	$\square\{Ca_2\}\{Mg_5\}(Si_8O_{22})(OH)_2$	$\square\{Ca_2\}\{Mg_{4.5-2.5}Fe_{0.5-2.5}\}(Si_8O_{22})(OH)_2$
<b>Sistema Cristalino</b>	Monoclínico	Monoclínico	Monoclínico	Ortorrômbico	Monoclínico	Monoclínico
<b>Cor</b>	Branco, cinza, verde	Cinza esfumado ou marrom	Azul lavanda, azul metálico	Branco acinzentado, verde amarronzado ou verde	Branco acinzentado, esverdeado, amarelado, azulado	Esverdeado
<b>Brilho</b>	Sedoso	Vítreo a perolado	Sedoso a terroso	Vítreo a perolado	Sedoso	Sedoso
<b>Dureza</b>	2,5-4,0	5,5-6,0	4	5,5-6,0	5,5	±6,0
<b>Estrutura</b>	Altamente fibroso, fino e facilmente separável	Lamelar ou fibras grossas a finas e asbestiforme	Fibroso	Lamelar ou asbestiforme	Longo ou prismático e agregados fibrosos	Cristais prismáticos reticulados longos e fibras
<b>Peso específico</b>	2,4-2,6	3,1-3,25	3,2-3,3	2,85-3,1	2,9-3,2	3,0-3,2
<b>Propriedades ópticas</b>	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial positivo e negativo, extinção paralela	Biaxial positivo, extinção paralela	Biaxial negativo, extinção inclinada	Biaxial negativo, extinção inclinada
<b>Índice de refração</b>	1.51-1.55	±1.64	1.7, pleocróico	±1.61	±1.61	± 1.63, fracamente pleocróico
<b>Textura ao toque</b>	Macio a duro, também sedoso	Grosso mas flexível	Macio a duro	Duro	Geralmente duro, às vezes macio	Duro
<b>Flexibilidade</b>	Boa	Boa	Boa	Pobre	Pobre	Pobre
<b>Resistência ao calor</b>	Alta	Boa, quebradiço a altas temperaturas	Baixo, fusível	Muito boa	Razoável a bom	Não disponível
<b>Tipo de mineralização</b>	“Cross fiber”, “Slip fiber” e “Mass fiber”	“Cross fiber”	“Cross fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”	“Slip fiber” e “Mass fiber”
<b>Paragênese</b>	Rochas ultramáficas serpentinizadas, mármores dolomíticos serpentinizados	Formações ferríferas bandadas metamorfizadas, de origem sedimentar	Formações ferríferas bandadas metamorfizadas, de origem sedimentar	Talco- e biotita xistos	Veios de corpos ultramáficos metamorfizados	Veios de corpos ultramáficos metamorfizados
<b>Impurezas</b>	Ferro, cromo, níquel e cálcio	Ferro	Ferro	Ferro	Cálcio	Cálcio e ferro

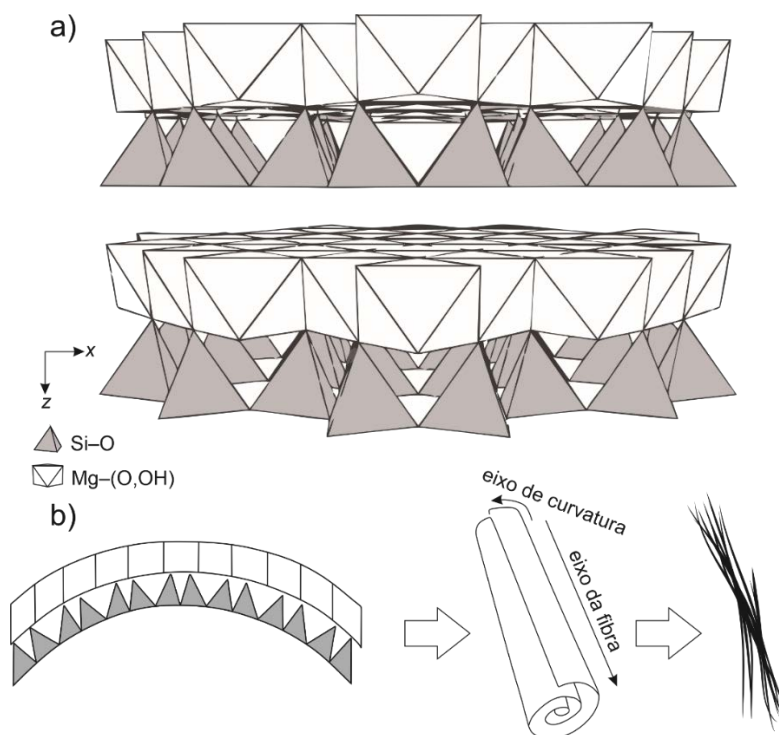
## Crisotila

A crisotila pertence ao grupo da serpentina, cuja fórmula química é  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ , onde  $Si^{4+}$  pode ser substituído por  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ , enquanto  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Al^{3+}$  podem substituir  $Mg^{2+}$  (Stroink et al., 1980; O’Hanley & Dyar 1998). Este mineral é formado por uma camada de tetraedros de sílica em uma rede cristalina pseudo-hexagonal, que se une a uma camada de octaedros de Mg ( $[Mg_6O_4(OH)_8]^{-4}$ ; Virta, 2002) numa proporção de 1:1 (Figura 3a; Pollastri et al., 2016).

As camadas de tetraedros de sílica (T) e de octaedros de magnésio (O) compartilham átomos de oxigênio, que usualmente estariam separados por distâncias de 0,305 nm na camada de sílica, e de 0,342 nm na camada de magnésio (Skinner

et al., 1988).

Estas diferenças causam tensões nas camadas TO, compensadas com o enrolamento destas camadas em torno do eixo x. Consequentemente, formam-se várias camadas encurvadas concêntricas ao eixo x da fibra, resultando em uma estrutura tubular de diâmetros variados, mas com uma média de diâmetro interno e externo com cerca de 250 Å e 75 Å, respectivamente (Figura 3b; Yada, 1971; Deer et al., 2013). Contudo, esta estrutura não compensa, suficientemente, o desajuste na camada TO, ocasionando a formação de núcleos vazios de diâmetros entre 50-80 Å entre as camadas, os quais podem eventualmente ser preenchidos por fases amorfas ricas em sílica e ferro (Cressey et al., 1994; Pollastri et al., 2016).



**Figura 3** – Estrutura da crisotila. a) Esquema da estrutura unitária da crisotila onde uma camada de tetraedros de Si se une a camadas de octaedros de Mg. b) Dobramento das camadas de TO resultando em uma microestrutura de camadas enroladas (“papyrus-like”) que compõe uma fibra de crisotila. Modificado de Pollastri et al. (2016).

## Grupo do anfibólio

O grupo do anfibólio compreende a maioria dos minerais de asbesto, porém nem todos cristalizam-se com o hábito asbestiforme. Estes formam cadeias duplas, onde a proporção de Si(Al):O tem razão de 4:11. A fórmula química simplificada para o anfibólio, segundo Hawthorne et al. (2012), é  $A B_2 C_5 T_8 O_{22} W_2$ , onde A = □, Na, K, Ca, Pb, Li; B = Na, Ca,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ , Mg, Li; C = Mg,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , Al,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$ , Li; T = Si, Al,  $Ti^{4+}$ , Be; e W = (OH), F, Cl,  $O^{2-}$ . As variedades conhecidas dos minerais de anfibólio asbesto e suas fórmulas químicas são:

Grunerita (var. amosita) –  
□{ $Fe^{2+}$ } { $Fe^{2+5}$ } ( $Si_8O_{22}$ )(OH)<sub>2</sub>;  
Riebeckita (var. crocidolita) –  
□{Na<sub>2</sub>} { $Fe^{2+3}Fe^{3+2}$ }  $Si_8O_{22}(OH)_2$ ;  
Tremolita –  
□{Ca<sub>2</sub>} {Mg<sub>5</sub>} ( $Si_8O_{22}$ )(OH)<sub>2</sub>;  
Actinolita –  
□{Ca<sub>2</sub>} {Mg<sub>4.5-2.5</sub>Fe<sub>0.5-2.5</sub>} ( $Si_8O_{22}$ )(OH)<sub>2</sub>;  
Antofilita –  
□{Mg<sub>2</sub>} {Mg<sub>5</sub>} ( $Si_8O_{22}$ )(OH)<sub>2</sub>;  
onde □ - vazio no sítio “A” da estrutura do anfibólio.

A formação de anfibólio asbestiformes resulta

do crescimento ao longo de uma direção cristalográfica de uma fibra de um único cristal (Skinner et al., 1988).

Estes minerais, geralmente, ocorrem em veios criados a partir de preenchimento de fraturas. Quando abertas, estas fraturas produzem regiões de deformação negativa que associadas ao fluxo de soluções influenciam na nucleação, crescimento e direção das fibras (Ross, 1981). Usualmente, as fibras de anfibólio asbestiformes apre-

sentam uma maior tendência a conter defeitos cristalinos, comparando-se aos não asbestiformes (e.g. defeitos de Wadsley, geminação e desordem na largura da cadeia; Steel & Wylie, 1981; Virta, 2002). A concentração de defeitos em minerais de anfibólio asbesto pode ser um importante fator no papel de formação das fibras, já que imperfeições nas superfícies (100) e (010) podem atuar como planos de enfraquecimento, facilitando a separação lateral das fibras (Steel & Wylie, 1981).

## ASPECTOS GENÉTICOS

A gênese de depósitos para que formem as fibras de asbesto requer condições químicas, de nucleação e crescimento, de modo que devam permanecer durante longo período, permitindo o crescimento contínuo de cadeias de silicatos (Whittaker, 1979). Os minerais de asbesto ocorrem, principalmente, em rochas ultramáficas e máficas (e.g. dunitos e anfibólitos) metassomatizadas e subsequentemente cisalhadas e silicificadas e raramente em rochas carbonáticas (e.g. dolomito e mármore) serpentinizadas. Podem ocorrer ainda associadas às formações ferríferas bandadas submetidas à metamorfismo termal e intrusões alcalinas (Van Gosen, 2007).

Dentre os depósitos, aqueles onde o asbesto pode ser facilmente separado da rocha encaixante, facilitando o processo de exploração são considerados economicamente viáveis (Ferreira Filho & Linares, 2009).

### Crisotila

A crisotila ocorre como veios em serpentinitos, rochas ultramáficas parcialmente serpentinizadas e mármore dolomíticos (Virta, 2002).

Os principais depósitos deste asbesto são encontrados em serpentinitos, formados por processos de alteração hidrotermal de rochas máficas/ultramáficas (Van Gosen, 2007). Vários fatores são determinantes para o desenvolvimento das fibras de crisotila em serpentinitos: (i) ausência de foliação, devido ao impedimento do processo de fraturamento por esta textura; (ii) proximidades a zonas de falha ativa durante a mudança na orientação do campo de deformação; (iii) serpentinito deve estar no campo de estabilidade da crisotila; e (iv) não pode haver elevado incremento de temperatura (Harvey-Kelly, 1995).

Os depósitos tipo crisotila são divididos em: *cross fibers*, *slip fibers* e *mass fibers*. O processo de mineralização de crisotila em *cross fibers* é o mais comum e pode ser explicado, primeiramente, pelo encaixe e subsequente alteração de

rochas ultramáficas para serpentinitos, que sofrem deformações estruturais (e.g. dobramento, falhamento e cisalhamento).

Quando fraturado, o serpentinito exhibe áreas propensas a processos hidrotermais e deformação transpressional (e.g. Mina Cassiar; Harvey-Kelly, 1995). Assim, os cristais fibrosos da crisotila crescem perpendiculares às fraturas, mantidas abertas pela pressão hidrostática, e têm seu comprimento limitado pela largura da fratura (Hendry, 1965). Um exemplo brasileiro deste tipo de depósito, ocorre na Mina de Cana Brava (GO), onde crisotila é encontrada na forma de veios compactos, preenchendo fraturas em ultramafitos formando estruturas conhecidas como “stockwork” (Correia, 1994; Ferreira Filho & Linares, 2009).

Os depósitos do tipo *slip fiber* resultam da extrema deformação de serpentinitos, os quais são bastante fraturados em consequência da saturação em fluidos hidrotermais e recristalização, resultando no crescimento das fibras paralelas às faces das fraturas. Os depósitos do tipo *mass fiber* revelam fortes processos de fraturamento em serpentinitos, onde as fibras ocorrem como pequenas placas ou aglomerados brancos.

### Amosita e crocidolita

Apesar da pequena diferença composicional, amosita e crocidolita possuem origem similar, ocorrendo em formações ferríferas bandadas metamorfizadas (Hendry, 1965). A crocidolita é inicialmente cristalizada em riebeckita maciça, em condições de temperatura e pressão moderadas, e a transformação para o hábito asbestiforme pode resultar da instabilidade durante a deformação cisalhante (Harvey-Kelly, 1995; Deer et al., 2013). A crocidolita foi extensamente explorada nos depósitos das províncias Cape e Transvaal na África do Sul, em Hamersley Range no oeste da Austrália e da Bolívia. Na África do Sul e no oeste da Austrália, a crocidolita ocorre como



*cross-fibers*, similar a crisotila, em fraturas relativamente paralelas aos planos de estratificação das formações ferríferas. A amosita ocorre comumente associada a magnetita e quartzo, ou granada almandina e olivina faialita (bandas de eulysita; Harvey-Kelly, 1995).

### **Antofilita, tremolita e actinolita**

Com depósitos mundialmente conhecidos na Finlândia (Ilgren & Hoskens, 2018), a antofilita hospeda-se principalmente em talco- e biotita-xistos. Ocorre como lentes formadas pelo produto de zona de reação (anfíbolização e serpentinização) entre rochas ultramáficas (e.g.

peridotito serpentinizados) e demais rochas da região como granitos e pegmatitos (Kennedy, 1990; Harvey-Kelly, 1995).

Tremolita e actinolita asbestos são reportados em veios de corpos ultramáficos metamorfizados e foram explorados no leste dos Estados Unidos e em alguns países, como a Índia, ainda podem ser explorados (Van Gosen, 2007). Skarns também são litotipos favoráveis à formação de tremolita-actinolita asbestos, já que as variedades prismáticas destes minerais são comumente observadas em corpos de substituição em mármore (Van Gosen, 2007).

## **TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE MINERAIS ASBESTIFORMES**

Para caracterização mineralógica (fibras maiores que 5 mm), as fibras de asbesto são identificadas por suas propriedades ópticas através do microscópio petrográfico e quando muito finas, por microscópios eletrônicos de varredura e de transmissão. Neste trabalho, a técnica da microscopia petrográfica foi utilizada e pode ser encontrada abaixo. A composição química pode ser avaliada utilizando a espectrometria por fluorescência de raios-X ou espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X (Virta, 2002), enquanto sua estrutura cristalina é identificada através de difração de raios-X (Yada, 1971; Virta, 2002).

Outras técnicas de caracterização ainda podem ser aplicadas, como a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, onde os

asbestos apresentam bandas de absorção próximas a 3680 e 3650  $\text{cm}^{-1}$  associadas à vibração de estiramento de Mg–OH e bandas próximas a 1000 e 950  $\text{cm}^{-1}$  típicas do estiramento de Si–O–Si (Kusiorowski et al., 2012). A recente técnica de imageamento hiperspectral foi aplicada em materiais cimentícios contendo fibras de asbesto como crisotila e crocidolita, onde foi possível a identificação e localização na amostra destes minerais através de um método não destrutivo (Bonifazi et al., 2015). Ainda, através da análise termodiferencial e termogravimétrica, a crisotila, por exemplo, pode ser identificada pela forte curva exotérmica com pico em 830 °C, a diferenciando de outros minerais associados, como o talco (Virta, 2002).

## **OCORRÊNCIA DE ASBESTO DO SÍTIO XILILI (PE)**

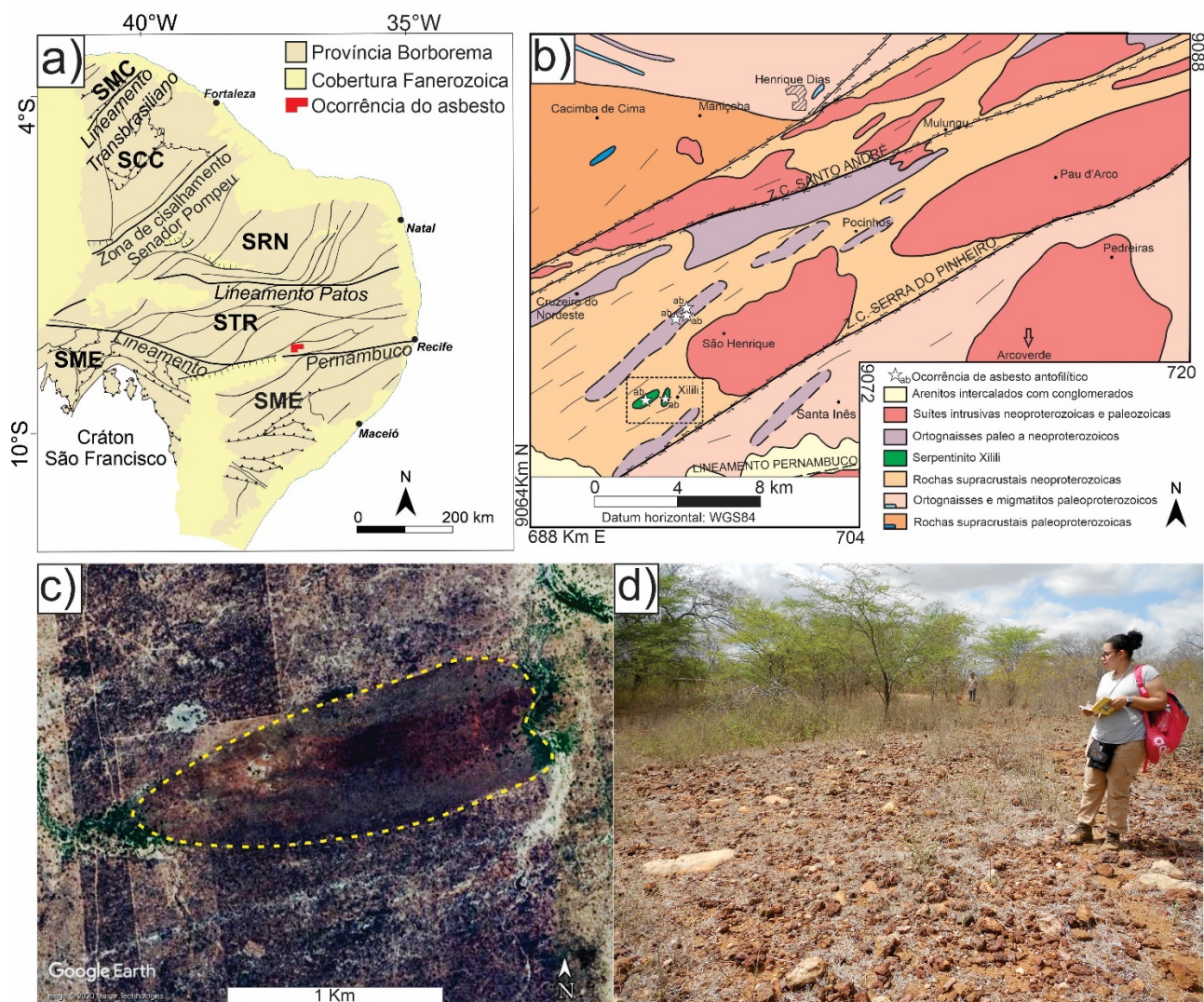
Localizado no Nordeste do Brasil, o Serpentinó Xilili está geologicamente inserido na Província Borborema, definida por Almeida et al. (1981), no contexto da Sub-Província Transversal, no Terreno Rio Capibaribe (Figura 4a; Van Schmus et al., 2011; Santos et al., 2021). Este corpo metamórfico, provavelmente derivado de um peridotito, ocorre como lentes bastante intemperizadas compostas por antigorita, serpentina, talco, magnesita e clorita de coloração esverdeada a esbranquiçada dentro do pacote de rochas metavulcanossedimentares do Complexo Riacho do Tigre (Figura 4b; Santos et al., 2017).

Neste serpentinó, destaca-se o asbesto antofilitico do Sítio Xilili ocorrendo em veios irregulares associados a anfíbolitos e serpentinó (Santos, 1971; Milet et al., 1984). O asbesto do Sítio Xilili aflora em garimpos abandonados e são identificados pela presença de um solo arenoso-argiloso, marrom avermelhado que podem ser observados por imagens de satélite (Figura 4c).

Estes solos são comumente observados com concreções ferruginosas e fragmentos de rochas metamáficas/metaultramáficas muito alteradas (Figura 4d).

O antofilita asbesto ocorre, majoritariamente, como depósitos do tipo *mass-fiber*, onde as fibras de antofilita são amareladas com brilho sedoso, curtas e quebradiças sendo agrupadas e dispostas de forma aleatória (Figura 5a).

Também são observadas as fibras de antofilita como agregados maciços de fibras paralelas, amarelo-amarronzadas de brilho sedoso, alongadas e quebradiças, com aspecto semelhante a uma madeira (Figura 5b), típicas de depósitos antofiliticos do tipo *slip fiber*, como descrito por Anderson (1956). Por vezes, o asbesto em *mass fiber* apresenta, em porções menos alteradas, cristais colunares de antofilita, com brilho vítreo e coloração amarronzada, apresentando um traço de clivagem bom e partição perpendicular ao eixo C do cristal. Variações de cores observadas



**Figura 4** – Contexto geológico de ocorrência do Serpentinito Xilili. a) Compartimentação da Província Borborema. Modificado de Santos et al. (2014). b) Mapa simplificado do contexto geológico local de ocorrência do Serpentinito Xilili, onde se encontra a ocorrência do asbesto anfífilítico. O quadrado pontilhado representa a localização de asbesto do Sítio Xilili (PE). Modificado de Santos et al. (2017). c) Imagem de satélite do Google Earth demonstrando a ocorrência da lente do Serpentinito Xilili, onde estão localizadas as mineralizações de asbesto. d) Solo areno-argiloso marrom avermelhado com cobertura de concreções lateríticas e rochas metaultramáficas intemperizadas.

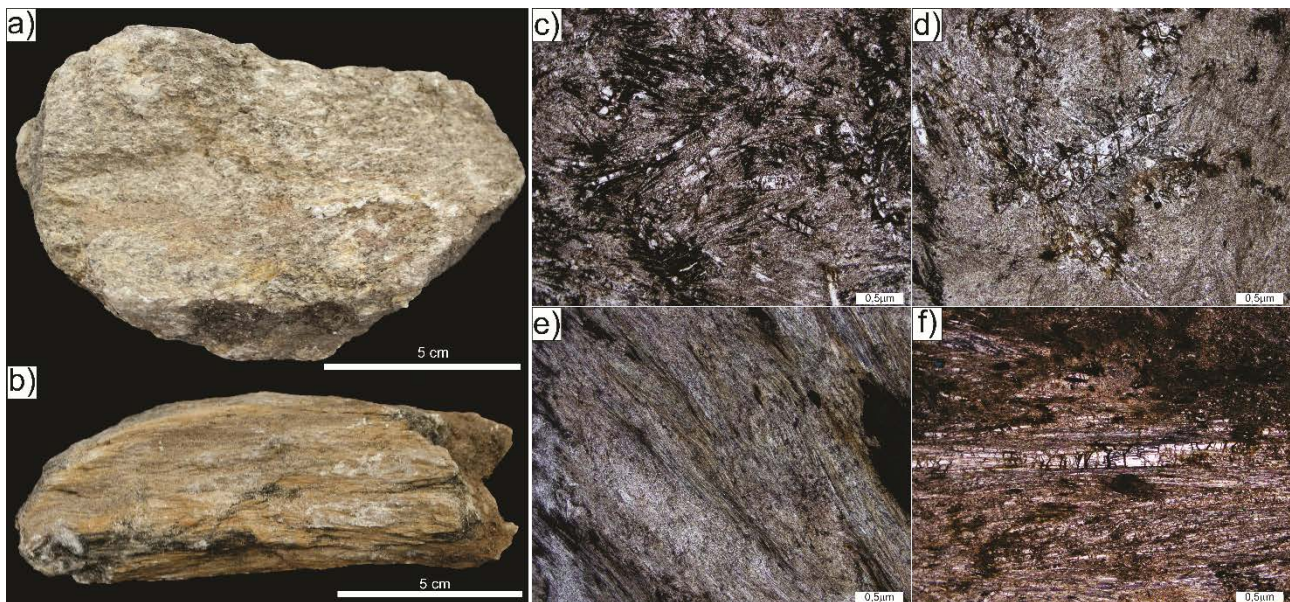
em amostras são correlacionadas com a presença de talco e clorita, que conferem colorações esbranquiçadas e esverdeadas ao asbesto, respectivamente.

Microscopicamente, o asbesto do tipo *mass fiber* é composto por antofilita asbestiforme e relictos cristalinos, além de magnetita e raramente clorita secundária. As fibras de antofilita são incolores, em sua maioria, manchadas pela alteração da magnetita, formando grandes massas de fibras dispostas aleatoriamente (Figura 5c). Os cristais relictos de antofilita são prismáticos subédricos, incolores e dispostos aleatoriamente, geralmente com um traço de clivagem paralelo ao eixo C do cristal, e partição perpendicular ao mesmo eixo, a qual se encontra preenchida por magnetita (Figura 5d). A magnetita também ocorre como grãos subédricos

a anédricos e bastante alterados, e eventualmente ocorrem intercalados com as fibras de asbesto.

Quando do tipo *slip fiber*, as fibras são incolores, mas em sua maioria manchadas por alteração de magnetita para aglomerados de óxidos de ferro. São observados poucos cristais relictos de antofilita, comparado ao tipo *mass fiber*. As fibras são, por vezes, dispostas com uma leve orientação e em algumas porções, as partições perpendiculares ao eixo C do cristal preenchidas magnetita (Figura 5e). Os cristais de antofilita do tipo *slip fiber* também permitiram observar que a formação das fibras de asbestos anfífilíticos se deram através da separação de cristalitos nas bordas dos grãos alongados ao eixo C, que se desagregam formando as fibras de asbesto, como descrito também por Veblen (1980) (Figura 5f).





**Figura 5** – Asbesto do Sítio Xilili. a) Ocorrência do tipo *mass fiber* onde as fibras são curtas e agregadas de forma aleatória. b) Ocorrência do tipo *slip fiber* determinada pelas fibras longas e paralelas entre si resultando em um aspecto semelhante a madeira. c) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *mass fiber* demonstrando as fibras e cristais da antofilita dispostos aleatoriamente na amostra. As manchas escuras observadas associadas à grande massa de fibras e cristais são resultado da alteração da magnetita, estas também deixam um aspecto amarelado nas fibras, observadas principalmente macroscopicamente. d) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *mass fiber* destacando o cristal incolor e tabular de antofilita, com partição perpendicular ao eixo C preenchida pelo material de alteração da magnetita, que também mancha as fibras do asbesto. e) Microfotografia a polarizadores paralelos de asbesto do tipo *slip fiber*, em que se observa a partição perpendicular ao eixo C preenchida pelo material de alteração da magnetita perpendicular aos aglomerados das fibras de antofilita paralelas ao eixo maior do cristal. f) Cristal de antofilita alongado ao eixo C formando fibras de asbesto em suas bordas por desagregação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por diversas décadas, os minerais de asbesto, principalmente crisotila, crocidolita e amosita, constaram como uns dos mais importantes e estudados minerais industriais. Aproximadamente 3000 produtos derivados destas fibras podem ser produzidos, com as principais aplicações concentrando-se no fibrocimento (canos, telhas e caixas d'água), materiais de fricção, gaxetas e papeis (Harvey-Kelly, 1995).

O amplo emprego do amianto devido as suas propriedades resistentes à combustão e maleabilidade, dificilmente equiparadas a outros materiais, fazem com que esse grupo de minerais seja de difícil substituição.

Por outro lado, o estudo de ocorrências de asbesto pode trazer informações importantes

concernentes ao caráter econômico e geológico de grande importância, tendo em vista que em sua grande maioria, os depósitos de asbesto estão associados às rochas ultramáficas, que são alvos de importância econômica (e.g. Depósitos ricos em Ni, Cu, Grupo da Platina, Ti e Fe; Ripley & Li, 2018). No caso do depósito de asbesto antofilítico do Sítio de Xilili, este trabalho traz uma primeira descrição voltada para a mineralogia de um depósito conhecido desde a década de 1970.

Ainda, é demonstrada como se pode identificar a ocorrência de minerais de asbesto, neste caso antofilita asbesto, através da observação em campo, de amostras macroscópicas e através de lâmina delgada em microscópio petrográfico.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M.; HASHUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, 1-29, 1981.
- BONIFAZI, G.; COPOBIANCO, G.; SERRANTI, S. Hyperspectral Imaging Applied to the Identification and Classification of Asbestos Fibers. *2015 IEEE Sensors Journal*, p. 1-4, 2015.
- CAPELLOZZI, V.L. Asbesto, asbestose e câncer: critérios diagnósticos. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 27, n. 4, 206-218.
- CASTRO, H.A. & GOMES, V.R. Doenças do aparelho respiratório relacionadas à exposição ao amianto. *Revista Pulmão*, v. 6, 162-170, 1997.
- CORREIA, C.T. *Petrologia do Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava, Goiás*. São Paulo, 1994. 151 p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.
- CRAIGHEAD, J.E. & GIBBS, A.R. *Asbestos and Its Diseases*. Nova Iorque: Oxford University Press, 2008. 410 p.
- CRESSEY B.A.; CRESSEY, G.; CERNIK, R.J. Structural variations in chrysotile asbestos fibers revealed by synchrotron X-ray diffraction and high resolution transmission electron microscopy. *Canadian Mineralogist*, v. 32, 257-270, 1994
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. *An Introduction to the Rock Forming Minerals 3rd edition*. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 495p.

- EUROPAEUS-ÄYRÄPÄÄ, A. Die relative Chronologie der steinzeitliche Keramik in Finnland I & II. **Acta Archaeologica I: Fasc. 2 & 3**, 1930.
- FERREIRA FILHO, O.B. & LINARES, W.B. Crisotila. In: DNPM, SILVA RODRIGUES, S.F. (Org.). **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM, 2009. p.655-679.
- GARCIA, R.; DUARTE, E.; KHOURY, J.; CARREIRA, L.; SILVA, G.; THAME, A. M. **Relatório do Grupo de Trabalho da Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados destinado à análise das implicações do uso do amianto no Brasil**. Câmara dos Deputado do Brasil, 2010. 682 p.
- HARVEY-KELLY, F.E.L. **Asbestos occurrences in British Columbia**. British Columbia: British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 1995. 102 p.
- HAWTHORNE, F.C.; OBERTI, R.; HARLOW, G.E.; MARESCHE, W.V.; MARTIN, R.F.; SCHUMACHER, J.C.; WELCH, M.D. Nomenclature of the amphibole supergroup. **American Mineralogist**, v. 97, 2031-2048, 2012.
- HENDRY, N. W. The Geology, occurrences, and major uses of Asbestos. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 132, 12–21, 1965.
- ILGREN, E.B. & HOSKENS, J. Anthophyllite Asbestos: The Role of Fiber Width in Mesothelioma Induction Part 2: Further Epidemiological Studies of Occupational, Domestic and Environmental Exposure to Finnish Anthophyllite Asbestos. **Environment and Pollution**, v. 7, n. 1, 24-35, 2018.
- KENNEDY, B.A. **Surface Mining**, 2 ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1990. 1194p.
- KUSIOROWSKI, R.; ZAREMBA, T.; PIOTROWSKI, J.; ADAMEK, J. Thermal decomposition of different types of asbestos. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, 693-704, 2012.
- MENDES, R. Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 17, n. 1, 7-29, 2001.
- MILET, H.A.R. (Coord.). **Projeto cadastramento das ocorrências minerais do Estado de Pernambuco**. Recife: Minérios do Brasil; SUDENE. 261 p., 1984.
- NOGUEIRA, D.D.; CERTAIN, D.A.; UESUGUI, S.J.; KOGA, R.K.; RIBEIRO, H.P. Asbestose no Brasil: um risco ignorado. **Revista de Saúde Pública**, v. 9, n. 3, 427-432, 1975.
- O'HANLEY, D. S. & DYAR, M. D. The composition of chrysotile and its relationship with lizardite. **Canadian Mineralogist**, v. 36, 727-740, 1998.
- OURY, T.D.; SPORN, T.A.; ROGGI, V.L. **Pathology of Asbestos-Associated Diseases**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 357 p.
- POLLASTRI, S.; PERCHIAZZI, N.; LEZZERINI, M.; PLAISIER, J.R.; CAVALLO, A.; DALCONI, M.C.; GANDOLFI, N.B.; GUALTIERI, A.F. The crystal structure of mineral fibres. 1. Chrysotile. **Periodico di Mineralogia**, v. 85, 249-259, 2016.
- QUEIROGA, N.C.M.; PAMPLONA, R.I.; LINARES, W.B.; LUZ, A.B.; PONTES, I.F. Amianto. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Coordenadores), **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 85-106.
- RIPLEY, E.M. & LI, C. Metallic Ore Deposits Associated With Mafic to Ultramafic Igneous Rocks. In: MONDAL, S. K.; GRIFFIN, W. L. (Coords), **Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time**. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 79-111.
- ROSS, M. & VIRTA, R.L. Occurrence, production and uses of asbestos. In: NOLAN, R.P.; LANGER, A.M.; ROSS, M.; WICKS, F.J.; MARTIN, R.F., (Coords), **The Health Effects of Chrysotile Asbestos**. Ottawa: The Canadian Mineralogist, Special Publication 5, 2001. p. 79–88.
- ROSS, M. Minerals and Health: The Asbestos Problem. In: PIERCE, H.W. (Coord.) **Proceedings of the 21st Forum on the Geology of Industrial**. Arizona: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Special Paper, 1987. p. 83-89.
- ROSS, M. The geologic occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. In: VEBLEN, D. R. (Coord.). **Amphiboles and other hydrous pyroxenes—Mineralogy**. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, 1981. p. 279-319.
- ROSS, M.; LANGER, A.M.; NORD, G.L.; NOLAN, R.P.; LEE, R.J.; VAN ORDEN, D.; ADDISON, J. The mineral nature of asbestos. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v.5 2, S26-S30. 2007.
- SANTOS, C.A.; ACCIOLY, A.C.A.; LEITE, P.R. B.; LINS, C.A.C.; SANTOS, R. B.; MENDES, V. A., BEZERRA, D. R. **S. Geologia e Recursos Minerais da Folha Sertânia, Estados de Pernambuco e Paraíba**. CPRM, Recife, PE, 2017. 158 p.
- SANTOS, E.J. **Síntese da geologia do pré-cambriano da folha Arcoverde - Nordeste do Brasil**: relatório preliminar sobre o levantamento geológico da Folha Arcoverde, escala 1:200.000. Recife: SUDENE, 1971. 33p.
- SANTOS, L.C.M.L.; FUCK, R.A.; SANTOS, E.J.; DANTAS, E.L. Análise Tectônica de Terrenos: Metodologia, Aplicação em Cinturões Orogênicos e Exemplo Das Províncias Tocantins e Borborema, Brasil. **Geonomos**, v. 22, n. 2, 51-63. 2014.
- SANTOS, L.C.M.; OLIVEIRA, R.G.; LAGES, G.A.; DANTAS, E.L.; CAXITO, F.A.; CAWOOD, P.A.; FUCK, R.A.; LIMA, H.M.; SANTOS, G.L.; ARAÚJO NETO, J.F. Evidence for Neoproterozoic terrane accretion in the central Borborema Province, West Gondwana deduced by isotopic and geophysical data compilation. **International Geology Review**, v. 63, 1-20, 2021.
- SCLAR, C. **Amianto: Mineral Mágico ou Maldito? Ecologia Humana e Disputa Político-Econômica**. Belo Horizonte: CDI, 1998. 152p.
- SKINNER, H.C. W.; ROSS, M.; FRONDEL, C. **Asbestos and other fibrous materials**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1988. 204p.
- STEEL, E. & WYLIE, A.G. Mineralogical Characteristics of Asbestos. In: RIORDON, P.H. (Coord.), **Geology of Asbestos Deposit, USA**: Society for Mining Metallurgy, 1981. p. 93-99.
- STROHMEIER, B.R.; HUNTINGTON, J.C.; BUNKER, K.L.; SANCHEZ, M.S.; ALLISON, K.; LEE, R.J. What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos. **International Geology Reviews**, v. 52, n. 7-8, 801-872, 2010.
- STROINK, G.; BLAAUW, C.; WHITE, C.G.; LEIPER, W. Mössbauer characteristics of UICC standard reference asbestos samples. **The Canadian Mineralogist**, v. 18, 285-290, 1980.
- SWAYZE, G.A.; KOKALY, R.F.; HIGGINS, C.T.; CLINKENBEARD, J.P.; CLARK, R.N.; LOWERS, H.A.; SUTLEY, S.J. Mapping potentially asbestos-bearing rocks using imaging spectroscopy. **Geology**, v. 37, n. 8, 763-766, 2009.
- TERRA FILHO, M.; FREITAS, J.B.P.; NERY, L.E. Doenças asbesto-relacionadas. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 32, n. 2, S48-S53, 2006.
- THE OBSERVATORY ECONOMIC COMPLEXITY. **Which countries export Asbestos?** Disp. em: [https://oec.world/en/visualize/tree\\_map/hs92/export/show/all/2524/2011/](https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/2524/2011/). Acessado em: 25fev2020.
- VAN GOSEN, B.S. The Geology of Asbestos in the United States and Its Practical Applications. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 13, n. 1, 55-68, 2007.
- VAN SCHMUS, W.R.; KOZUCH, M.; BRITO NEVES, B.B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil; Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, 227-252, 2011.
- VEBLEN, R.D. Anthophyllite asbestos: microstructures, intergrown sheet silicates, and mechanisms of fiber formation. **American Mineralogist**, v. 65, p. 1075-1086, 1980.
- VIRTA, R.L. & MANN, E.L. Asbestos. In: CARR, D.D. (Coord.) **Industrial minerals and rocks (6th ed.)**. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1994. p. 97-124.

- VIRTA, R.L. **Asbestos—Geology, mineralogy, mining, and uses.** Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-149, 2002. 35p.
- VIRTA, R.L. **Mineral Commodity Profiles—Asbestos: U.S.** Geological Survey Circular 1255–KK, 56 p.
- VIRTA, R.L. **Some facts about asbestos Virginia:** U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-012-01, 2001. 4 p.
- WHITTAKER, E.J.W. Mineralogy, chemistry and crystallography of amphibole asbestos. In: LEDOUX, R.L. (Coord.). **Short Course in Mineralogical Techniques of Asbestos Determination.** Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 1979. p. 1–34.
- YADA, K. Study of Microstructure of Chrysotile Asbestos by High Resolution Electron Microscopy. **Acta Crystallographica**, v. A27, 659-664, 1971.

*Submetido em 14 de outubro de 2021*

*Aceito para publicação em 20 de fevereiro de 2022*