

2ª Edição revisada e ampliada

EDITORES: ADÃO BENVINDO DA LUZ & FERNANDO A. FREITAS LINS

# ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS

## usos e especificações



## SUMÁRIO

### **PARTE I: INTRODUÇÃO GERAL**

01. PANORAMA DAS ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS NO BRASIL 3  
*Fernando A. Freitas Lins*

02. DESEMPENHO FUNCIONAL DOS MINERAIS INDUSTRIAIS: 25  
DESAFIOS TECNOLÓGICOS, FERRAMENTA DE MARKETING E ESTRATÉGIA DE VALORIZAÇÃO  
*Renato R. Ciminelli*

### **PARTE II: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES**

03. AGALMATOLITO 69  
*Adão Benvindo da Luz, Paulo Tomedi e Rodrigo Martins*

04. AMIANTO 79  
*Normando Claudino Moreira de Queiroga, William Bretas Linares, Joselito Dasio da Silva  
e Adão Benvindo da Luz*

05. AREIA INDUSTRIAL 103  
*Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins*

06. AGROMINERAIS - ENXOFRE 125  
*Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque (in memoriam), Ronaldo Simões L. Azambuja (in memoriam.)  
e Fernando A. Freitas Lins*

07. AGROMINERAIS - FOSFATO 141  
*Francisco E. Lápido Loureiro, Marisa Bezerra de Mello Monte e Marisa Nascimento*

08. AGROMINERAIS - POTÁSSIO 175  
*Marisa Nascimento, Marisa Bezerra de Mello Monte e Francisco E. Lápido Loureiro*

09. AGROMINERAIS - ROCHAS SILICÁTICAS COMO FONTES MINERAIS 205  
ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO PARA A AGRICULTURA  
*Éder de Souza Martins, Claudinei Gouveia de Oliveira, Álvaro Vilela de Resende e Marcello  
Silvino Ferreira de Matos*

10. ARGILA - ATAPULGITA E SEPIOLITA 223  
*Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida*

11. ARGILA - BENTONITA 239  
*Adão Benvindo da Luz e Cristiano Honório de Oliveira*

12. ARGILA - CAULIM	255
<i>Adão Benvindo da Luz, Antônio Rodrigues de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho, Luis Carlos Bertolino e Rosa Bernstein Scorzelli</i>	
13. BARITA	295
<i>Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho Magalhães Baltar</i>	
14. BAUXITA	311
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
15. BERILO	339
<i>Marcelo Soares Bezerra e Júlio de Rezende Nesi</i>	
16. CALCÁRIO E DOLOMITO	363
<i>João Alves Sampaio e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
17. CIANITA REFRAATÁRIA	389
<i>Caroline Meira Lopes de Castro Joffily e Claudinei Gouveia de Oliveira</i>	
18. CROMITA	403
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
19. DIAMANTE	427
<i>Mario Jorge Costa e Adão Benvindo da Luz</i>	
20. DIATOMITA	451
<i>Silvia Cristina Alves França, Adão Benvindo da Luz e Paulo Francisco Inforçati</i>	
21. FELDSPATO	467
<i>Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins e José Mario Coelho</i>	
22. FLUORITA	487
<i>João Alves Sampaio, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Mônica Calixto de Andrade</i>	
23. GIPSITA	505
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Flavia de Freitas Bastos e Adão Benvindo da Luz</i>	
24. GRAFITA	527
<i>João Alves Sampaio, Paulo Fernando Almeida Braga e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
25. HALITA	551
<i>Paulo Roberto Cabral de Melo, Renato Senna de Carvalho e Dorival de Carvalho Pinto</i>	

26. LÍTIÓ	585
<i>Paulo Fernando Almeida Braga e João Alves Sampaio</i>	
27. MAGNESITA	605
<i>Luís Rodrigues Armôa Garcia, Paulo Roberto Gomes Brandão e Rosa Malena Fernandes Lima</i>	
28. MANGANÊS	633
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade, Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Márcio Torres Moreira Penna</i>	
29. MICA	649
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio e Patrícia Maria Tenório Cavalcante</i>	
30. NEFELINA SIENITO	663
<i>João Alves Sampaio, Silvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga</i>	
31. QUARTZO	681
<i>Pedro Luiz Guzzo</i>	
32. RMIS: ROCHAS E MINERAIS PARA CERÂMICA DE REVESTIMENTO	723
<i>Mônica Calixto de Andrade, João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Alberto Buoso</i>	
33. RMIS: ARGILA PARA CERÂMICA VERMELHA	747
<i>Marsis Cabral Junior, José Francisco Marciano Motta, Amilton dos Santos Almeida e Luiz Carlos Tanno</i>	
34. RMIS: ARGILA PLÁSTICA PARA CERÂMICA BRANCA	771
<i>José Francisco Mariano Motta, Adão Benvindo da Luz, Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Marcelo Soares Bezerra, Marsis Cabral Júnior e José Mario Coelho</i>	
35. TALCO	793
<i>Ivan Falcão Pontes e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
36. TERRAS-RARAS	817
<i>Simon Rosental</i>	
37. TITÂNIO: MINERAIS DE TITÂNIO	841
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Dorival de Carvalho Pinto</i>	
38. VERMICULITA	865
<i>José Fernandes de Oliveira Ugarte, João Alves Sampaio e Silvia Cristina Alves França</i>	
39. ZEOLITAS NATURAIS	889
<i>Nélio das Graças de Andrade da Mata Resende, Marisa Bezerra de Mello Monte e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
40. ZIRCONITA	917
<i>Luiz Carlos Bertolino, Nely Palermo, João Alves Sampaio e Silvia Cristina Alves França</i>	

**PARTE III: OS MINERAIS E O MEIO AMBIENTE**

41. MINERAIS APLICADOS À TECNOLOGIA AMBIENTAL: MINERAIS VERDES 933  
*Silvia Cristina Alves França, José Fernandes de Oliveira Ugarte e Adriana de A. Soeiro da Silva*
42. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E AMBIENTAL A POEIRAS DE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS 961  
*Zuleica Carmen Castilhos, Reiner Neumann e Olívia Bezerra*

**GLOSSÁRIO**

# CAPÍTULO 17

## Cianita Refratária

Caroline Meira Lopes de Castro Joffily<sup>1</sup>  
Claudinei Gouveia de Oliveira<sup>2</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

A cianita é um mineral com alta porcentagem de alumina, com cerca de 60% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sendo por isso um dos mais importantes minerais usados na produção de alumina de alto teor (50-55%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Os teores elevados em alumina permitem que a cianita seja amplamente empregada como mineral industrial por suas características refratárias (Bulut e Yurtsever, 2004). A cianita quando calcinada e transformada em mulita (mineral com excelentes propriedades físicas e mecânicas a temperaturas elevadas) apresenta alto ponto de fusão, baixa expansão térmica, boa resistência à fratura e ao choque térmico, alta resistência à fluência, estabilidade térmica, baixa densidade e baixa constante dielétrica. Essas propriedades permitem que a mulita seja utilizada na fabricação de tijolos refratários e peças cerâmicas. A cianita é também utilizada como mineral gemológico.

Os Estados Unidos da América são os principais produtores de cianita e mulita no mundo. Sua principal reserva está localizada no Estado da Virgínia, com produção anual em torno de 150 mil toneladas. No Brasil, as principais ocorrências e depósitos estão localizados em Goiás, com destaque para o depósito da Serra das Araras no município de Santa Terezinha, Minas Gerais e Bahia. No entanto, a produção do país ainda é muito baixa.

### 2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

A cianita ( $\text{Al}^{[6]}\text{Al}^{[6]}\text{SiO}_5$ ) é um nesossilicato triclinico que integra o grupo mineralógico dos aluminossilicatos, de fórmula geral  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , e que tem andaluzita ( $\text{Al}^{[6]}\text{Al}^{[5]}\text{SiO}_5$ ) e silimanita ( $\text{Al}^{[6]}\text{Al}^{[4]}\text{SiO}_5$ ) como polimorfos (Klein e Hurlbut, 1999). O arranjo cristalino da cianita é 1:1, em que cadeias de octaedros de Al-O, que se distribuem paralelamente ao longo do eixo cristalino *c*, são ligadas entre si pelos íons Si, Al e O. Os íons de Si são coordenados por quatro íons de oxigênio e o

---

<sup>1</sup>Geóloga/UnB, M.Sc. em Geologia Econômica/UnB.

<sup>2</sup>Geólogo/UnB, D.Sc. em Geologia Econômica/UnB, Professor Associado do IG-UnB.

Al por seis, onde o Si fica entre quatro oxigênios e resulta em um tetraedro  $\text{SiO}_4$  independente. Os átomos de oxigênio têm ordenação cúbica, compacta e ligeiramente distorcida (Deer *et al.*, 1966).

A cianita é normalmente azul, mas pode ser verde e cinza, e apresenta como importante propriedade distintiva dureza 5 ao longo do prisma e 7 no sentido transversal. A substituição em qualquer um dos quatro sítios octaédricos de  $\text{Al}^{3+}$  pode resultar na variação de cor do cristal. De acordo com Owens e Dickerson (2001), na Província de Piedmont (Estado da Virgínia – EUA) ocorrem dois tipos de cianita, sendo um azul acinzentado pálido a branco e outro azul acinzentado escuro a azul esverdeado. Análises por microsonda eletrônica do primeiro tipo revelam cerca de 0,4% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$ , enquanto que a segunda é constituída quase exclusivamente por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . A adição de elementos na cadeia cristalina da cianita pode afetar significativamente a absorção e a reflexão da luz do visível. Elementos como cromo, ferro e titânio podem estar presentes na estrutura da cianita e alterar suas propriedades físico-químicas (Gil Ibarugghi *et al.*, 1991). Ti e Fe são comuns, enquanto Cr é raro e se associa à cianita que se cristaliza sob pressão muito elevada (Seifert e Langer, 1970; Cooper, 1980; King, 2003). O nome da cianita é derivado da palavra grega *kyanos* que significa azul (Klein e Hurlbut, 1999).

A estabilidade dos polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  depende principalmente da pressão e temperatura. São pequenas as diferenças na entropia e energia livre entre os três polimorfos, mas a substituição parcial de  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Fe}^{3+}$  pode resultar na distorção da estrutura e em uma ligeira troca por outros componentes (Miyashiro, 1973).

### 3. TIPOLOGIA DOS DEPÓSITOS DE CIANITA

A cianita, também denominada de distênio, ocorre como porfiroblastos ou agregados cristalinos em xistos aluminosos, paragnaisses e quartzitos localizados em terrenos metamorfizados em fácies anfibolito a granulito e em zonas de deformação de alta pressão, como zonas de cisalhamento (Miyashiro, 1973; Simandl *et al.*, 1999). Neste contexto, muscovita, granada, silimanita e estauroлита ocorrem comumente associados com a cianita.

As rochas com concentrações elevadas de cianita são derivadas de protolitos com alta concentração de alumina, tais como rochas sedimentares finas, paleoregolito ou zonas de alteração hidrotermal. A classificação dos depósitos de cianita em proporções economicamente explotáveis é descrita por Bennet e Castle (1975) em quatro tipos principais: cianita quartzito, cianita xisto,

cianita gnaisse e cianitito. Os depósitos ocorrem comumente na forma de lentes e bolsões e em corpos planares ao longo de zonas de cisalhamento (Simandl *et al.*, 1999).

Os principais depósitos de cianita quartzito estão localizados nos EUA, Suriname, Noruega, Kênia e Austrália. Estas rochas contêm de 15 a 40% de cianita (10 a 25% de  $Al_2O_3$ ) e caracterizam-se por apresentar baixos teores de potássio e sódio, e traços de cálcio e magnésio. Quando em cianita xistos e gnaisses, a cianita representa entre 2 a 25% do volume da rocha e ocorre disseminada em ganga de biotita, feldspatos, muscovita, granada e hornblenda. Este tipo de depósito apresenta viabilidade econômica somente quando intensamente intemperizado, de modo que a lavra seja de baixo custo, ocorra a céu aberto e envolva grande volume de material desagregado com alto teor de cianita (Bennet e Castle, 1975).

Em depósitos de cianitito, a cianita é encontrada como nódulos e matacões resultantes da segregação de sedimentos aluminosos metamorfizados em alto grau. A principal ocorrência deste tipo de depósito é descrita na Índia, que vem sendo explotada há mais de 40 anos (Bennet e Castle, 1975).

A cianita também é encontrada em concentrações residuais ou em solos originados da erosão mecânica ou desagregação de depósitos primários. Este é o caso dos depósitos encontrados nos estados de Minas Gerais e Bahia.

As principais ocorrências e áreas mineradas em Minas Gerais situam-se no Quadrilátero Ferrífero, em Mateus Leme e Nova Lima, e na região de Diamantina e Andrelândia. A principal reserva encontra-se em Andrelândia, nos depósitos eluviais provenientes da desagregação de mica xistos quartzosos (Alecrim, 1982). Quartzo, hematita, mica e rutilo são os principais minerais inclusos nos cristais de cianita, assim como grafita fina, gibsita e goetita ocorrem na crosta laterítica ao redor da cianita maciça oxidada. Processos de beneficiamento são realizados para separar os elementos deletérios como o Fe, que degrada a qualidade do minério como refratário (Brandão e Mendes, 1998).

Na Bahia, a cianita representa 1% dos recursos minerais cadastrados no Brasil (Sampaio *et al.*, 2004). A reserva mais significativa é relatada no município de Anagé, próximo a Vitória da Conquista, que ocorre sob a forma de depósitos residuais areno-argilosos resultantes da alteração intempérica de xistos que contêm quartzo, biotita, cianita, granada e estauroлита. A reserva medida desta jazida é de 115 mil t (Silva Sá e Nery, 2002).

Em Goiás, são cadastradas 27 ocorrências de cianita distribuídas em cerca de dezoito municípios, com destaque para Santa Terezinha de Goiás, Mara Rosa, Pilar de Goiás, Crixás, Córrego São Domingos (São João da Paraúna), Serra do Tombador (SE de Mozarlândia), Campos Verdes, Edealina, Porangatu, Pirenópolis, Estrela do Norte, Silvânia, Nerópolis e Mutunópolis (Lacerda *et al.*, 1999).

As ocorrências nos municípios de Santa Terezinha de Goiás, Porangatu, Pilar de Goiás, Nova Iguaçu e Mara Rosa estão associadas a falhas regionais (ex. falha Rio dos Bois) e/ou a zonas de intensa alteração hidrotermal no domínio do Arco Magmático Mara Rosa. Na Serra do Tombador e Pirenópolis, são encontradas nos mica xistos do Grupo Araxá, enquanto nas regiões de Silvânia e Nerópolis são associadas a gnaisses e granitóides do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu (Lacerda *et al.*, 1999).

A maior reserva oficial de cianita do Brasil, com cerca de 2 Mt, encontra-se em Santa Terezinha de Goiás, onde o principal depósito localiza-se na Serra das Araras no contexto do Arco Magmático de Mara Rosa (Schobbenhaus, 1997) (Figura 1). Este depósito foi alvo de exploração durante a década de 1980 e muito contribuiu para a economia local. As rochas portadoras de cianita são cianitito, muscovita cianitito, muscovita-cianita quartzito e cianita quartzito derivadas do metamorfismo em fácies anfibolito de produtos gerados por alteração hidrotermal avançada associada à mineralização de Cu-Au na região (Oliveira *et al.*, 2004).

Estas rochas, que podem ser encontradas em forma de matacões e blocos ao longo de serras estreitas e lineares (Figuras 2 e 3), são ainda utilizadas como guias exploratórios para depósitos de cobre e ouro. Depósitos de cianita similares aos do Arco Magmático de Mara Rosa são relatados por Owens e Pasek (2007) na Província de Piedmont, Estado da Virgínia (EUA).

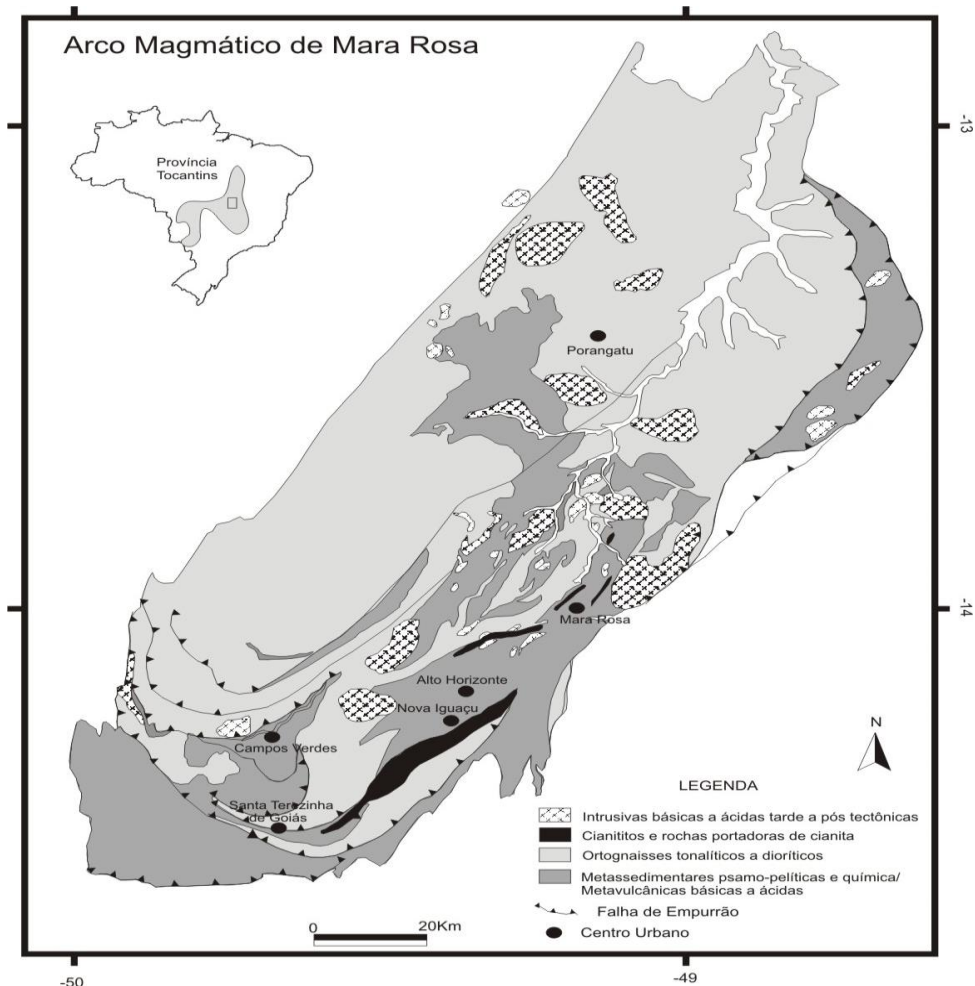


Figura 1 – Localização da maior reserva de cianita do país, em Santa Terezinha de Goiás-GO, na Serra das Raras Arco Magmático de Mara Rosa (Schobbenhaus, 1997).

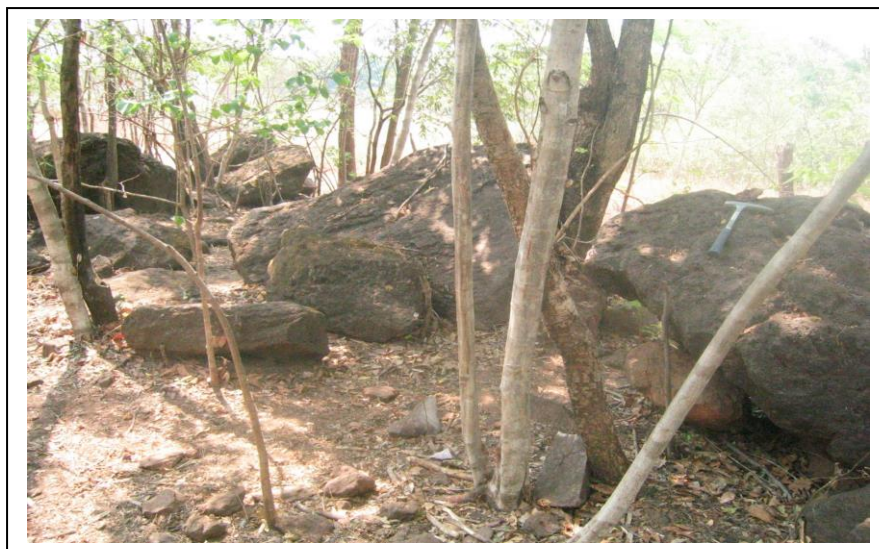


Figura 2 – Os cianititos e demais rochas que contêm concentrações elevadas de cianita ocorrem comumente em blocos e matações ao longo de serras lineares e estreitas que marcam o traço de zonas de cisalhamento regionais.



Figura 3 – Detalhe da foto anterior destacando bloco de cianitito com microestrutura diablástica e cristais centimétricos de cianita.

#### **4. LAVRA E PROCESSAMENTO**

A cianita é concentrada comercialmente em diferentes contextos com o emprego de vários métodos de mineração e processamento mineral, em que se destacam seleção manual de blocos (ou catação), separação gravítica, separação magnética e flotação. Bulut e Yurtsever (2004) fizeram recentemente uma revisão do processamento mineral de cianita. A flotação é o método mais comum para o beneficiamento de cianita. Neste caso, a moagem com moinho de bolas cerâmicas é recomendada quando metais liberados da moagem com bolas de aço podem ativar minerais da ganga.

A flotação eficiente requer ainda adequada deslamagem e condicionamento a elevadas razões de sólidos. Isso para evitar a presença indesejável de pirita e outros sulfetos, que tendem a flotar antes da remoção de lama. Os coletores catiônicos são usados para flotação de minerais de ganga como as micas, que são prejudiciais quando concentrados de cianita são usados em materiais refratários. A cianita é separada do quartzo por flotação utilizando-se espumantes como coletor e carbonato de sódio e silicato de sódio como reagentes de controle. Coletores do tipo sulfonato também podem ser empregados para a flotação de cianita. Em alguns experimentos têm sido testados silicato de sódio, ácido cítrico, ácido láctico, ácido sulfúrico e as suas combinações como depressores para quartzo, mica e outros minerais de ganga. Porém, nenhum destes reagentes, sozinho ou em combinação, produziram resultados satisfatórios. Foram também realizados experimentos para flotar primeiro a mica e então a cianita, deprimindo quartzo.

#### **5. USOS E FUNÇÕES**

Aproximadamente 95% da produção de cianita no mundo são consumidas por indústrias de refratários, da qual 60% são para fundição e processamento de metais ferrosos, 20% para metais não ferrosos e 15% para fabricação de vidros e cerâmicas (MacDonald, 1992). Refratários são materiais resistentes ao calor acima de 1500°C que constituem os forros para fornalhas e reatores de alta temperatura e que suportam o desgaste e a corrosão física por agentes químicos (Jensen e Bateman, 1981). A cianita é utilizada principalmente como mineral refratário devido a sua grande e irreversível expansão térmica, que ajuda a neutralizar a contração normal existente na maioria dos outros materiais refratários, como as argilas (Potter, 2003).

A cianita é utilizada na indústria de refratários na sua forma calcinada, transformada em mulita. A total transformação da cianita em mulita ocorre a temperaturas entre 1350 e 1400°C (Sainz *et al.*, 1997). A conversão da cianita em mulita resulta em um nível mais elevado de refratariedade e de resistência ao choque térmico. A mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) é utilizada como constituinte de produtos cerâmicos por apresentar excelentes propriedades físicas e mecânicas, tais como: baixa constante dielétrica, baixa expansão térmica, alto ponto de fusão, estabilidade mecânica a altas temperaturas e resistência a impactos e corrosões químicas (Aksel, 2003). Em conseqüência, o emprego da mulita em produtos refratários visa aumentar a resistência termal e a deformação sob pressão. Artigos especiais que podem ser usados nos fornos requerem uma quantidade grande de mulita, a fim de suportar o choque térmico repetidas vezes; com isso a maioria dos artigos utilizados em cozinhas contém mulita.

Nos Estados Unidos, a cianita produzida na Virginia pela *Kyanite Mining Corporation* é aplicada principalmente em fundições, peças de veículos, artigos para cozinha, porcelanas elétricas, artigos de banheiro, fornos caseiros, abrasivos e azulejos de paredes e pisos. A cianita e a mulita são utilizadas extensivamente em fundições de materiais ferrosos e não-ferrosos como moldes; e, quando em frações finas (0,35 e 0,57mm), em pulverizadores para remoção de metal.

A utilização de mulita estende-se a produtos de fricção, como forros de freio e revestimentos de embreagem para aumentar a qualidade de abrasão (fricção) dos produtos, de modo que tenham duração prolongada. Quase todos os forros de freios usados em veículos de estrada de ferro e em caminhões de grande porte contêm de 50 a 80% de mulita. Outra utilização deste mineral é como abrasivo de nível médio, onde são componentes ligantes que agregam as partículas de maior abrasão. Além destas qualidades, a cianita e a mulita possuem condutividade elétrica extremamente baixa e, por isso, podem ser utilizadas em porcelanas elétricas como isolantes.

## 6. ESPECIFICAÇÕES

O concentrado de cianita para indústria de refratários deve conter o mínimo de impurezas, tais como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (Bulut e Yurtsever, 2004). Recentemente, a Diretoria Geral de Desenvolvimento Tecnológico (*Directorate General of Technical Development-DGTD*) dos Estados Unidos da América, por meio do Sub-Comitê de Material Refratário Bruto, recomendou especificações para a indústria de refratários, onde determina a qualidade do concentrado de cianita. Os parâmetros determinados limitam em um máximo de 1,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . O concentrado de alta qualidade (*grade I*) deve

conter no mínimo 58% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e comprimento das partículas entre 25 e 300 mm. Já o de menor qualidade (*grade II*) tolera 54% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e não possui especificações quanto à dimensão das partículas. Os valores de refratariedade recomendados, de acordo com o Cone Pirométrico Equivalente\* (P.C.E.), são de no mínimo 37 (*grade I*) e 36 (*grade II*).

Diferentes depósitos possuem diferentes impurezas e com isso as indústrias assumem parâmetros e regras variadas com relação a quantidades de elementos deletérios (Tabela 1). Como é o caso da *Kyanite Mining Corporation* (KMC), na Virginia (EUA), que tem como deletérios óxidos de Fe, Ti e álcalis. A empresa assume como parâmetro que a combinação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  deve ser menor que 1% para um resultado satisfatório, mas aceita variação entre 1,0-1,5%, enquanto que para os álcalis a concentração não deve ser superior a 0,3% (Dilip Jain, diretor do serviço técnico da KMC, comunicação pessoal 2005). A Indústria de Refratários Togni S/A, que opera em Minas Gerais, admite quantidades de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menor ou igual a 2% e álcalis até 1% para um concentrado de boa qualidade (Osvaldo Luís Regonha, consultor da Togni S/A, comunicação pessoal 2005).

Tabela 1 – Parâmetros químicos do concentrado de cianita considerados pelo *Directorate General of Technical Development*, (DGTD), *Kyanite Mining Corporation* (KMC) e pela Togni S/A.

	DGTD Grade I	DGTD Grade II	KMC	Togni S/A
$\text{Al}_2\text{O}_3$	58% (mín.)	54% (mín.)	54-60% (mín.)	60% (mín.)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,5% (máx.)	1,5% (máx.)	1-1,5% (máx.)	2,0% (máx.)
$\text{TiO}_2$	-	-	-	-
Álcalis	-	-	0,3% (máx.)	1% (máx.)
Tamanho	25-300 mm	-	35-325 mesh	1 mm (mín.)
P.C.E.	37 (mín.)	36 (mín.)	-	-

\* Cone Pirométrico Equivalente é a medida de refratariedade dada de acordo com os testes feitos com o material em um cone padrão. A deformação e o amolecimento resultantes da elevação de temperatura são comparados aos materiais padrões.

## 7. MERCADO E PRODUÇÃO

A produção mundial de cianita, incluindo silimanita e andaluzita, mostra um constante aumento desde 1928 (Kelly e Potter, 2004). Em 1946, a Índia era o maior produtor com 16 mil t, alcançando 119 mil t em 1970. Nos anos 1990, sua produção declinou abruptamente para 5 a 10 mil t (Potter, 2000). A cianita foi explorada no Kênia entre 1946 e 1955, com o ápice da produção em 1949 (24 mil t) (Potter, 2000). Entre 1925 e 1986, a cianita foi produzida nos Estados Unidos nos estados da Califórnia, Geórgia, Carolina do Norte e Sul. A partir de 2000, os EUA tornaram-se líderes na produção de cianita com 90 mil t (Potter, 2000). Em 2003, a produção mundial de cianita e minerais relacionados foi de 410 mil t, sendo os maiores produtores, os EUA, a África do Sul e a França (Potter 2004).

O Brasil possui reserva base (medida + indicada) de cianita e outros minerais refratários de 3,6 Mt, onde 63% estão inseridas no estado de Goiás e o restante em Minas Gerais (34%) e Paraíba (3%) (DNPM/DIDEM, ano base 2004). Dados de 2003 mostram reserva base pouca expressiva no estado da Bahia (69 t) e Tocantins (41 t). As reservas declaradas do Estado de Goiás estão todas dentro do município de Santa Terezinha de Goiás e Pilar de Goiás, no contexto do Arco Magmático de Mara Rosa, com 2,2 Mt e 51 mil t, respectivamente.

O Brasil teve seu ápice na produção de cianita em 1980 (18,2 mil t) (Alecrim, 1982), e desde 1996 é registrada uma variação na produção de material refratário bruto no país. Em 2004 ocorreu aumento significativo, onde Minas Gerais foi responsável por 96% da produção estimada em 726 t (*run of mine*) (DNPM/DIDEM 2005).

Quanto à produção de materiais refratários manufaturados, o que inclui peças cerâmicas para construção, tijolos, peças cerâmicas refratárias, o Brasil vem aumentando desde 2002. A *Millenium Chemical* do Brasil S.A., empresa que atua na Paraíba, é a responsável por este aumento. Desde 1999, ela declara a produção de concentrado de cianita e em 2004 atingiu 2.147 t (DNPM/DIDEM 2005).

No comércio exterior, o Brasil tem baixa contribuição com relação à exportação de produtos refratários. A Argentina é o principal comprador de material bruto (cianita, andaluzita e silimanita) do Brasil, enquanto o Mercado Comum do Sul (MERCOSUL), Oceania e África, de manufaturados. A importação brasileira de bens primários refratários mostra uma tendência inversa à de exportação, ou seja, a quantidade de produtos importados está

crescendo de forma irregular desde 1995. Os principais países de origem em 2004 foram a França (43%), África do Sul (27%), Estados Unidos (27%) e Japão (2%) (DNPM/DIDEM 2005).

Entre 1934 e 1940, o valor da cianita e de outros minerais refratários, no mercado mundial, era alto e inconstante. A partir da II Guerra Mundial, o avanço tecnológico e industrial de países desenvolvidos exigiu cada vez mais matéria prima para utilização em equipamentos e fabricação de peças que utilizam materiais refratários. Com isso, a produção está em constante aumento e os preços estão mais baixos e estáveis. Os preços destes minerais atualmente variam principalmente de acordo com a qualidade e quantidade de compra. Um lote de 18 t de cianita calcinada com 56-60% de  $Al_2O_3$  valia US\$ 225-268/t em 2005 (*Industrial Minerals*, 2005).

## **8. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS**

A cianita na indústria de refratários pode ser substituída por mulita sintética, argilas resistentes ao calor e materiais de alta alumina. Os principais materiais para produção de mulita sintética são bauxita, caolinita e outras argilas, e areia silicosa. (Potter, 2007). Novos estudos apontam o topázio como um mineral capaz de se transformar em mulita quando calcinado, podendo assim ser um substituto da cianita.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores são particularmente gratos aos editores deste livro pela iniciativa destes em preencher uma lacuna na literatura técnica do Brasil sobre um assunto de grande importância para a economia nacional e que está diretamente ligado ao bem-estar da sociedade e à sustentabilidade do meio-ambiente, ou seja o uso racional e a aplicação adequada dos minerais e rochas industriais. Além disso, acreditam que este livro será um importante meio de consulta para estudantes, professores e profissionais ligados ao setor produtivo brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALECRIM J. D. (1982). Recursos minerais da Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Metamig, 298 pp.
- AKSEL C. (2003). The effect of mullite on the mechanical properties and thermal shock behavior of alumina-mullite refractory materials. *Ceramics International* **29**:183-188.
- BENNET P. J. e CASTLE J. E. (1975). Kyanite and related minerals. In: Leford S. J. (ed) *Industrial Minerals and Rocks*. New York, NY, p. 729-736.
- BRANDÃO, P. R. G. e MENDES L. C. (1998). Kyanite from Minas Gerais, Brazil: characterization for use in ceramic materials. *Innovations Miner. Coal Process Proc. Int. Miner. Process. Symp. 7th.* 295-300.
- BULUT, G. e YURTSEVER, C. (2004). Flotation behavior of Bitlis kyanite ore. *Internacional Journal Mineral Processing*. **73**: 29-36.
- COOPER, A. F. (1980). Retrograde alteration of chromian kyanite in metachert and amphibolite whiteschist from the Southern Alps, New Zealand, with implications for uplift on the Alpine Fault. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **75**, p. 153-164.
- DEER W. A.; HOWIE, R. A. e ZUSSMAN, J. (1966). *Minerais Constituintes das Rochas - Uma Introdução*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. 558 pp (Trad.: Conde, L.E.N, 1981).
- GIL IBARGUGHI, J. I; Mendia, M. e GIRARDEAU, J. (1991). Mg- and Cr-rich staurolite and Cr-rich kyanite in high-pressure ultrabasic rocks (Cabo Ortegal, northwestern Spain). *American Mineralogist*, **76**: 501-511.
- Industrial Minerals (2005). Prices July 2005, *Mineral PriceWatch*, p. 66-67.
- JENSEN, M. L. E BATEMAN, A. M. (Eds.) (1981). *Economic Mineral Deposits*. Third edition. John Wiley & Sons, New York, 593 pp.
- KELLY, T. D. e POTTER, M. J. (2004). Kyanite and Related Materials Statistics. In: *Annual Publications USGS, open-file report 01-006. Historical Statistics for Mineral Commodities in the United States. Version 9.2, Online Only*

- KING, R. J. (2003). Minerals explained 38, Kyanite. *Geology Today, January-February*, 19, nº 1. p. 33-36.
- LACERDA Filho, J. V.; REZENDE, A. e SILVA, A. (1999). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1:500.000. 2ª edição. Goiânia: CPRM/METAGO/UnB, 203 pp.
- MACDONALD, R. H. (1992). Various industrial mineral commodities; Nova Scotia Department of Natural Resources, Mines and Energy Branches, Economic Geology Series 1992-1. Chapter 2, Andaluzite and Related Materials, p. 5-13.
- MIYASHIRO, A. (1973). Metamorphism and metamorphic belts, London, Georgan Allen & Unwin Ltd.
- OLIVEIRA, C. G.; PIMENTEL, M. M., MELO, L. V. e FUCK, R. A. (2004). The copper and gold deposits of the Neoproterozoic Mara Rosa magmatic arc, central Brazil. *Ore Geology Reviews* **25**: 285-299.
- OWENS, B. E. e DICKERSON, S. E. (2001). Kyanite color as a clue to contrasting protolith compositions for kyanite quartzites in the Piedmont Province of Virginia, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, vol., **33**, nº 2, p. 70.
- OWENS, B. E. e PASEK, M. A. (2007). Kyanite quartzites in the Piedmont Province of Virginia: Evidence for a possible high-sulfidation system. *Economic Geology* **102**(2): 495-509.
- POTTER, M. J. (2000). U. S. Geological Survey Minerals Yearbook - 2000. Kyanite and Related Materials, United State, 44.1-44. 3 p.
- POTTER, M. J. (2003). U. S. Geological Survey Minerals Yearbook - 2003. Kyanite and Related Materials, United State, 42.1-44.2 p.
- POTTER, M. J. (2004). U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January . Kyanite and Related Minerals, United State, 92-93 p.
- POTTER, M. J. (2007). U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January.

- SAINZ, M. A.; SERRANO, F. J.; BASTIDA, J. e CABALLERO, A. (1997). Microstructural evolution and growth of crystallite size of mullite during thermal transformation of kyanite. *Journal of the European Ceramic Society* 17:1277-1284.
- SAMPAIO, A. R.; MARTINS, A. M.; LOUREIRO, H. C.; ARCANJO, J. B.; MORAES Filho, J. C.; SOUZA, J. D.; PEREIRA, L. H.; COUTO, P. A.; SANTOS, R. A.; MELO, R. C.; BENTO, R. V. e BORGES, V. P. (2004). Projeto Extremo Sul da Bahia: Estado da Bahia: Geologia e Recursos Minerais. Salvador, CBPM, Série arquivos abertos 19, 55 pp.
- SCHOBENHAUS, C. (1997). Geologia da Cianita. In: C. Schobbenhaus, E. T. Queiroz & C. E. S. Coelho Principais Depósitos Minerais do Brasil, CPRM, p. 251-254.
- SEIFERT, F. e LANGER, K. (1970). Stability relations of chromium kyanite at high pressures and temperatures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 28: 9-18.
- SILVA SÁ, J. H. e NERY, M. A. C. (2002). Desempenho da mineração na Bahia: 1989 a 2000. Salvador, SICM.COMIN; UFBA, 232p.
- SIMANDL, G. J.; PARADIS, S.; MCCRACKEN, W. H. e HANCOCK, K. D. (1999). Kyanite, muscovite, garnet in metasediments. In: G.J. Simandl, Z.D. Hora and D.V. Lefebure (eds.) *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, vol. 3, Industrial Minerals, British Columbia Ministry of Energy and Mines.