

# ARGILAS E MINERAIS REFRATÁRIOS



**Anderson Magalhães Victoria**  
*andersongeo@yahoo.com.br*

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CARACTERÍSTICAS DO SETOR INDUSTRIAL DE PRODUTOS REFRAATÓRIOS .....	1
1.2. AS INDÚSTRIAS DE REFRAATÓRIOS EM MINAS GERAIS.....	1
1.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS REFRAATÓRIOS.....	3
2. OS RECURSOS MINERAIS REFRAATÓRIOS .....	4
3. AGALMATOLITO (PIROFILITA) .....	7
3.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	8
3.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM.....	8
3.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	8
3.4. ASPECTOS ECONÔMICOS EM MINAS GERAIS.....	9
3.4.1. Dados de reservas .....	9
3.4.2. Dados de produção .....	11
4. ARGILAS REFRAATÓRIAS .....	12
4.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	13
4.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM.....	14
4.2.1. Argilas caulínicas (caulim refratário).....	15
4.2.2. Argilas bauxíticas .....	16
4.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	17
4.3.1. Argilas Refratárias do Triângulo Mineiro (região entre Uberaba e Uberlândia).....	17
4.3.2. Argilas bauxíticas da região de Poços de Caldas a Andradadas.....	19
4.4. ASPECTOS ECONÔMICOS EM MINAS GERAIS.....	20
4.4.1. Dados de reservas .....	20
4.4.2. Dados de produção .....	20
5. BAUXITA .....	22
5.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	23
5.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM.....	24
5.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	24
5.5. ASPECTOS ECONÔMICOS EM MINAS GERAIS.....	25
5.5.1. Dados de reservas .....	25
5.5.2. Dados de produção .....	25
6. CIANITA E MINERAIS POLIMORFOS .....	27
6.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	28
6.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM.....	29
6.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	29
6.3.1. Depósitos de cianita na região sul de Minas.....	29
6.3.2. Depósitos de cianita na região nordeste de Minas Gerais .....	30
6.4. ASPECTOS ECONÔMICOS EM MINAS GERAIS.....	32
6.4.1. Dados de reservas .....	32
6.4.2. Dados de produção .....	32
7. CROMITA.....	33
7.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	34
8. DOLOMITO.....	35
8.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS .....	36
8.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM.....	37
8.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	37
8.3.1. Dolomitos da Bacia Minas.....	37
8.3.2. Dolomitos da Bacia Bambuí .....	38

8.3.3. Dolomitos da Bacia Vazante.....	39
8.4. ASPECTOS ECONÔMICOS EM MINAS GERAIS.....	39
8.4.1. Dados de reservas .....	39
8.4.2. Dados de produção .....	40
9. GRAFITA.....	42
9.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÁRIOS .....	43
10. MAGNESITA.....	44
10.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÁRIOS.....	45
10.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM .....	45
11. QUARTZO.....	47
11.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÁRIOS.....	48
12. ZIRCÃO.....	50
12.1. APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE REFRAATÁRIOS.....	51
12.2. OCORRÊNCIA GEOLÓGICA E ORIGEM .....	51
12.3. DEPÓSITOS IMPORTANTES EM MINAS GERAIS.....	52
12.3.1. Os depósitos da região de Caldas e Poços de Caldas.....	52
12.3.2. Os depósitos da região entre Pouso Alegre e São Gonçalo do Sapucaí .....	53
12.4. ASPECTOS ECONÔMICOS .....	53
12.4.1. Dados de reserva.....	53
12.4.2. Dados de produção.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

# 1. INTRODUÇÃO

---

Os materiais refratários compreendem uma ampla gama de produtos que têm como característica principal a capacidade de suportar altas temperaturas, normalmente acima de 1200 °C (McColm 2013), sem sofrer qualquer tipo de alteração nas suas propriedades físico-químicas. Esses materiais também são conhecidos por apresentarem alta resistência frente às solicitações mecânicas, elétricas, ataques químicos e ao choque térmico. Tais propriedades elevam os refratários à condição de produtos essenciais ao homem moderno, uma vez que constituem a base da linha de produção em diversos tipos de indústrias, à exemplo das metalúrgicas, siderúrgicas, indústrias cerâmicas, vidreiras, cimenteiras, cerâmicas tradicionais, materiais abrasivos, químicas, petroquímicas, entre outras.

Como exemplo de produtos refratários típicos (Semler 2006), pode-se citar os cadinhos e tanques receptores de produtos químicos, dutos de transferência de materiais granulares abrasivos, painéis e calhas para escoamento de material fundido em siderúrgicas, metalúrgicas ou nas indústrias vidreiras, além dos tijolos refratários usados em churrasqueiras, lareiras e fornos rústicos, domésticos ou industriais etc.

## 1.1. Características do setor industrial de produtos refratários

O segmento das indústrias de refratários no Brasil é dominado por empresas com alto padrão de organização e profissionalismo, não sendo comum a ocorrência de unidades informais. Tais indústrias estão concentradas na região sudeste e são responsáveis pela geração de milhares de empregos. As siderúrgicas são as principais consumidoras de refratários, absorvendo aproximadamente 70% do volume da produção nacional (Lobato 2009). Outras indústrias que apresentam elevado consumo desses materiais são: fundições de ferro e aço, metalúrgicas de metais não-ferrosos (alumínio principalmente), bem como as indústrias cimenteiras, vidreiras e de produtos químicos.

Com base na estruturação das atividades econômicas no Brasil (Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE 2.0, IBGE 2015), a indústria de materiais refratários corresponde a uma classe do segmento cerâmico que, por sua vez, é um ramo do setor das indústrias que envolvem a transformação de bens minerais não metálicos. Isso ocorre porque os materiais refratários são entendidos como tipos específicos de cerâmicas e, como tal, podem ser genericamente definidos como sólidos não metálicos, formados a partir da transformação de massas inorgânicas submetidas a processo térmico elevado (Associação Brasileira de Cerâmicas – ABCERAM 2018).

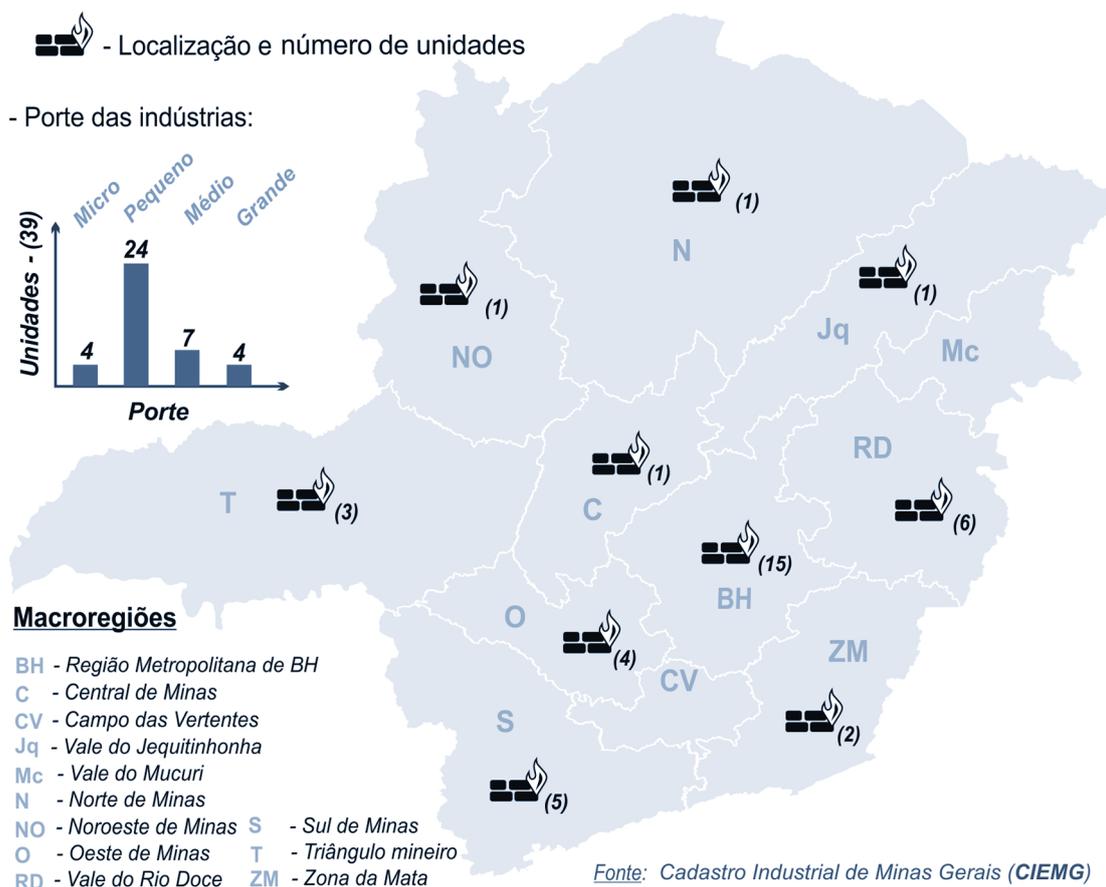
## 1.2. As indústrias de refratários em Minas Gerais

Com base no Cadastro Industrial de Minas Gerais (CIEMG 2018), em 2018 foram contabilizadas 39 unidades produtoras de materiais refratários no estado, a maioria delas concentradas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (15), mas com pelo menos um representante na maioria das demais macrorregiões (Figura 1).

Em relação ao porte, essa fonte indica que dessas 39 indústrias, 4 são consideradas de microporte (até 19 empregados); 24 são de pequeno porte (de 20 a 99 empregados); 7 são

de médio porte (de 100 a 499 empregados); e 4 são de grande porte (acima de 500 funcionários; Figura 1). Dentre as de médio e grande porte, seis estão instaladas na Região Metropolitana de BH (municípios de Contagem, Betim e Belo Horizonte), duas no Vale do Rio Doce (Coronel Fabriciano e Santana do Paraíso – região tradicionalmente conhecida como Vale do Aço), duas no Sul de Minas (Poços de Caldas) e uma na Zona da Mata (Visconde do Rio Branco).

### INDÚSTRIAS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS EM MINAS GERAIS



**Figura 1.** Distribuição das unidades produtoras de materiais refratários em Minas Gerais. Conforme dados do Cadastro Industrial de Minas Gerais (CIEMG 2018), o estado registrou 39 unidades em 2018, sendo a maioria delas concentradas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (15). A proximidade com as jazidas de recursos minerais usados como matéria prima é um fator importante na instalação de uma indústria desse tipo, mas não é o fator determinante.

Em relação às demais Unidades da Federação, o número de indústrias refratárias presentes em Minas Gerais é considerado alto (Figura 1) e, em grande parte, resulta da disponibilidade e abundância dos recursos minerais usados como matérias primas. Como é característico o uso de grandes volumes desses insumos, há uma tendência das unidades se instalarem próximas às jazidas para diminuir os custos com o transporte. Em contrapartida, outros fatores também são relevantes para a localização de uma indústria desse tipo, a saber: (i) proximidade com os grandes centros consumidores; (ii) facilidade no escoamento da produção; e (iii) necessidade de mão de obra especializada. Nesse sentido, a proximidade com os grandes centros consumidores é o critério mais relevante que influencia no local de instalação das unidades (Lobato 2009).

Vale ressaltar que, em alguns casos, as empresas produtoras de materiais refratários não exercem atividade minerária, isto é, adquirem os insumos de fornecedores (mineradoras) locais, regionais ou importam de outros países, conforme a necessidade e conveniência.

### 1.3. Classificação dos materiais refratários

De acordo com Krause (2014), o modo mais apropriado de se classificar os diversos tipos de materiais refratários existentes deve levar em consideração a soma de vários fatores, tais como:

- i. Natureza composicional: tipos de compostos químicos principais que formam os materiais;
- ii. Porosidade: se densos ou porosos;
- iii. Forma: se são moldados em forma de tijolos, blocos, monolitos, ou se são agregados granulares, ou se são massas disformes etc.);
- iv. Aplicação: se são refratários para indústria siderúrgica, metalúrgica, cimenteira etc.

No mercado comercial, entretanto, os refratários são usualmente classificados apenas quanto à natureza composicional, seja com base no tipo de matéria prima utilizada, seja em relação ao componente químico predominante. Dessa forma, vários nomes são encontrados no mercado: (i) refratários silicosos; (ii) refratários sílico-aluminosos; (iii) refratários de alta alumina; (iv) refratários magnesianos; (v) refratários cromíticos-magnesianos; (vi) refratários cromíticos; (vii) refratários grafitosos; (viii) refratários de zircônia-magnésia; (ix) refratários de carvão de silício; entre vários outros (ABCERAM 2018).

Vale ressaltar que, no passado, os refratários eram classificados apenas com base na composição e eram agrupados em quatro grandes grupos:

- i. Refratários ácidos: compostos basicamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tendem a reagir com materiais básicos em altas temperaturas;
- ii. Refratários básicos: compostos basicamente por magnésia ( $\text{MgO}$ ) ou doloma ( $\text{MgO.CaO}$ ). Tendem a reagir com materiais ácidos em altas temperaturas;
- iii. Refratários neutros: aqueles que não reagem com outros materiais, normalmente contendo óxidos de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), carbono (C), carvão de silício (SiC) etc.;
- iv. Refratários especiais: tipos mais puros, formados por outros componentes, tais como titânia ( $\text{TiO}_2$ ), zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), nitretos de alumínio ou sílica ( $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) etc.

Contudo, devido ao surgimento de dezenas de outros tipos de materiais refratários com o passar do tempo, em especial dos tipos produzidos a partir da mistura de vários componentes, a utilização dessa classificação está cada vez mais em desuso (Semler 2006).

## 2. OS RECURSOS MINERAIS REFRAATÓRIOS

Historicamente, os primeiros materiais refratários eram produzidos a partir de argilas refratárias, as areias quartzosas e fragmentos de rochas como quartzitos, filitos e xistos aluminosos, todos recursos minerais com elevado ponto de fusão, disponíveis em abundância na natureza e de fácil extração. À medida que os conhecimentos técnicos e científicos avançaram, diversos outros minerais e rochas também passaram a ser utilizados, tais como: agalmatolito (pirofilita), bauxita, dolomito, cianita e seus polimorfos (andaluzita e sillimanita), cromita, grafita, magnesita e zircão (Semler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

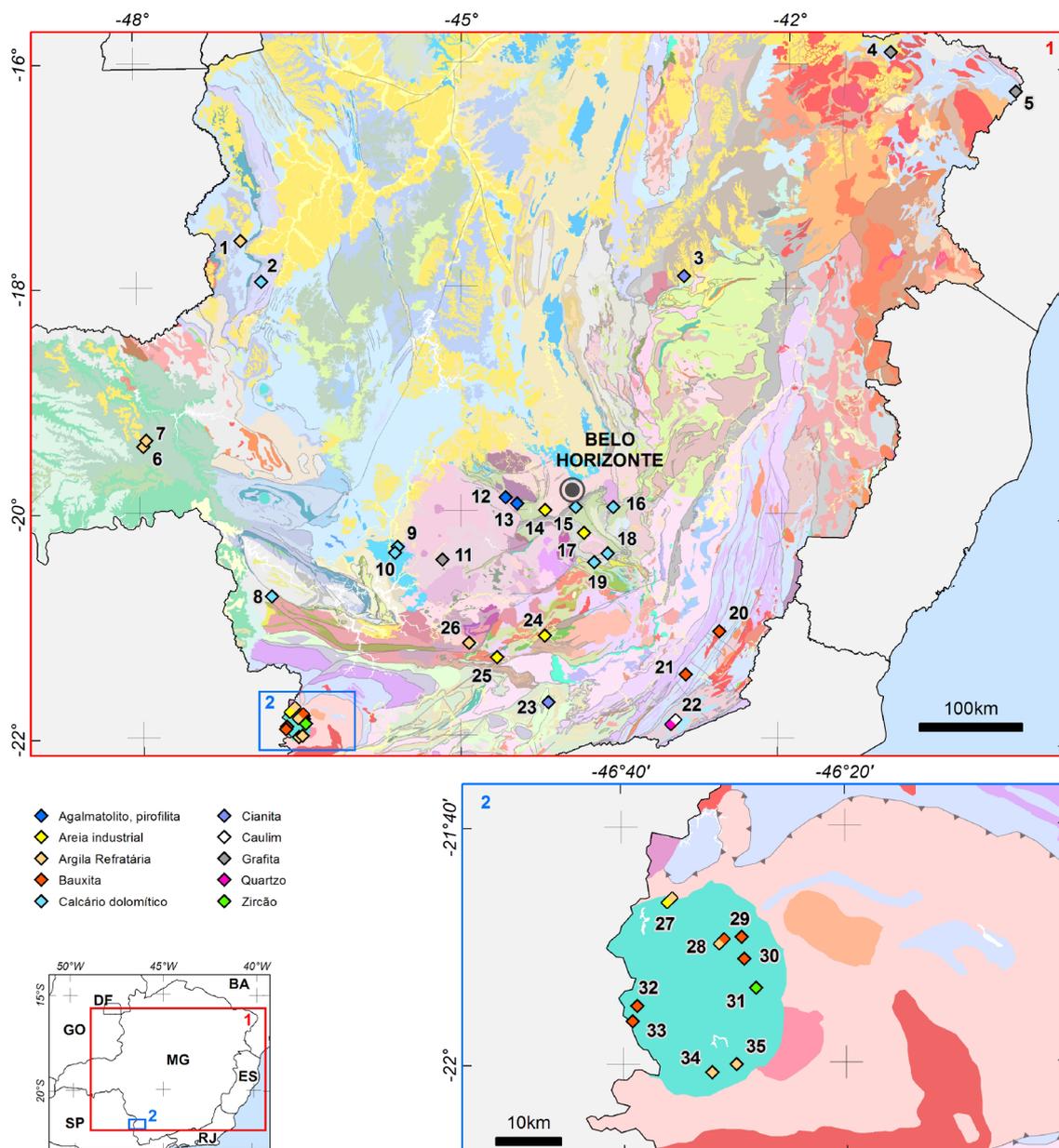
Inicialmente, os recursos minerais refratários eram usados na forma bruta (*in natura*), sendo submetidos apenas a alguns processos simples de tratamento como trituração, lavagem, catação (ou outro método de separação mineral) e peneiramento. Entretanto, com o passar do tempo, aumentou-se a necessidade da obtenção de refratários mais puros e de maior qualidade. Assim, os insumos naturais passaram a ser submetidos a tratamentos mais rigorosos (eg. calcinação, sinterização e eletrofusão), objetivando a produção de compostos químicos sintéticos de alta pureza. Como exemplo de insumos sintéticos desse tipo, pode-se citar a sílica fundida, o chamote, a mulita sinterizada, a alumina calcinada, a alumina eletrofundida, a magnésia calcinada e sinterizada, a doloma, além de compostos artificiais com estrutura cristalina e composição semelhante a alguns tipos de minerais naturais, à exemplo do compostos sintéticos de espinélio e cordierita (Semler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

A Tabela 1 mostra uma síntese dos principais recursos minerais refratários usados atualmente e o principal tipo de material que produz, seja atuando na forma bruta (como componente das massas refratárias), seja atuando como fonte para a produção de insumos sintéticos.

**Tabela 1.** Lista dos principais recursos minerais utilizados como matéria prima nas indústrias produtoras de materiais refratários. (Semler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

Recurso Mineral	Tipo de material que produz
Agalmatolito (pirofilita)	Refratários sílico-aluminosos
Argilas refratárias	Refratários sílico-aluminosos
Bauxita	Refratários de alta alumina
Cianita e minerais polimorfos	Refratários de alta alumina
Cromita	Refratários básicos de cromo
Dolomito	Refratários de doloma
Grafita	Refratários básicos de carbono
Magnesita	Refratários de magnésia
Quartzo	Refratários silicosos
Zircão	Refratários básicos de zircônia

Nos tópicos subsequentes, são apresentadas as principais características dos recursos apresentados na Tabela 1 e seu potencial de ocorrência no estado de Minas Gerais. A Figura 2 e a Tabela 2 mostram as principais ocorrências de argilas e minerais refratários em Minas Gerais. Ressalta-se que alguns desses recursos são abordados em capítulos à parte deste livro, onde informações complementares acerca do recurso analisado podem ser encontradas.



**Figura 2.** Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 2. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.

**Tabela 2.** Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais.

SUBSTÂNCIA	STATUS ECONÔMICO	SITUAÇÃO	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	Latitude	Longitude
1 Argila Refratária	Mina	Ativa	Córrego Pedro Pereira	Guarda-Mor	-17,590646	-47,031222
2 Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Serra do Poço Verde - Sucuri	Vazante	-17,954863	-46,844816
3 Cianita		Paralisada	Distrito sede de Itamarandiba	Itamarandiba	-17,900903	-42,938404
4 Grafita	Mina	Ativa	Mina Pedra Azul	Pedra Azul	-15,880005	-41,07216
5 Grafita	Mina	Ativa	Mina Zé Crioulo	Salto da Divisa	-16,206853	-39,922361
6 Argila Refratária	Mina	Ativa	Fazenda Caraço Paraíso	Uberaba	-19,411062	-47,956043
7 Argila Refratária	Mina	Ativa	Fazenda Tijucu	Uberaba	-19,357047	-47,928524
8 Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Mina Taboca	Itaú de Minas	-20,758231	-46,771768
9 Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Mina Bucaininha	Arcos	-20,322995	-45,59215
10 Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Fazenda Corumbá	Arcos	-20,374922	-45,615467

	SUBSTÂNCIA	STATUS ECONÔMICO	SITUAÇÃO	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	Latitude	Longitude
11	Grafita	Mina	Ativa	Distrito sede de Itapecerica	Itapecerica	-20,437575	-45,17142
12	Agalmatolito, pirofilita	Mina	Ativa	Fazenda dos Gomes	Pará de Minas	-19,882782	-44,581077
13	Agalmatolito, pirofilita	Mina	Ativa	Mineração Mateus Leme	Mateus Leme	-19,937603	-44,471865
14	Areia industrial	Mina	Ativa	Rio Betim, região de Vargem do Olaria	Betim	-19,993501	-44,212764
15	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Acaba Mundo (Mannesmann)	Belo Horizonte	-19,965991	-43,925966
16	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Socorro	Barão de Cocais	-19,965418	-43,575412
17	Areia	Mina	Ativa	Distrito sede de Itabirito	Itabirito	-20,196446	-43,846799
18	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Bairro Funil	Ouro Preto	-20,378683	-43,62521
19	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Rodeio de Baixo (CSN)	Ouro Preto	-20,456462	-43,748914
20	Bauxita	Mina	Ativa	Fazenda Chorona	Miraí	-21,059316	-42,567749
21	Bauxita	Mina	Ativa	Distrito sede de Itamarati de Minas	Itamarati de Minas	-21,447754	-42,87919
22	Quartzo, Caulim	Mina	Ativa	Fazenda Santa Maria	Mar de Espanha	-21,876424	-42,991996
23	Cianita		Paralisada	Fazenda Capitão Anastácio	Andrelândia	-21,705861	-44,172659
24	Areia industrial	Mina	Ativa	Distrito sede de São João del Rei	São João del Rei	-21,115133	-44,209461
25	Areia industrial	Mina	Ativa	Distrito sede de Itutinga	Itutinga	-21,306782	-44,658691
26	Argila Refratária	Mina	Ativa	Distrito sede de Ijaci	Ijaci	-21,179281	-44,921951
27	Argila Refratária, Areia	Mina	Ativa	Distrito sede de Poços de Caldas	Poços de Caldas	-21,771376	-46,595615
28	Bauxita, Argila refratária	Mina	Ativa	Morro das Arvores	Poços de Caldas	-21,82961	-46,518488
29	Bauxita	Mina	Ativa	Campo do Meio	Poços de Caldas	-21,823169	-46,488193
30	Bauxita	Mina	Ativa	Cabeça de Boi	Poços de Caldas	-21,854126	-46,484229
31	Zircão		Reavaliação de Reserva	Cercado	Caldas	-21,895149	-46,467117
32	Bauxita	Mina	Ativa	Divisa MG-SP, Mineração Caldense	Poços de Caldas	-21,919057	-46,644697
33	Bauxita	Mina	Ativa	Divisa MG-SP, Mineração Caldense	Poços de Caldas	-21,940467	-46,651979
34	Argila Refratária	Mina	Ativa	Distrito sede de Andradas	Andradas	-22,013238	-46,533944
35	Argila Refratária	Mina	Ativa	SW de Minas Gerais	Andradas	-22,002136	-46,497318

### 3. AGALMATOLITO (PIROFILITA)

O termo *agalmatolito* (Figura 3) deriva das palavras gregas *algamas* (imagem) e *lito* (rocha) e faz referência a um tipo incomum de rocha que, por ser macia e facilmente moldável, era usada em culturas orientais antigas para esculpir objetos decorativos sagrados (Romano 2007a). Trata-se de uma rocha hidrotermal enriquecida em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), caracterizada pela granulação fina, brilho gorduroso (sensação oleosa ao tato), maciez, podendo conter conteúdo mineral diversificado e assumir texturas diversas (foliada, maciça, granular etc.). Nesse caso, a composição da rocha original e as características do fluido hidrotermal são os fatores que determinam as espécies minerais presentes. Em geral, são rochas que apresentam assembleias minerais formadas por pirofilita, quartzo, caulinita, sericita, hidróxidos de alumínio (diásporo e gibsita), coríndon e os polimorfos  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  (cianita, andaluzita e sillimanita; Hida & Kitagawa 2006).



**Figura 3.** Detalhe de agalmatolito de cor bege e estrutura maciça. A depender do contexto geológico, o agalmatolito pode variar bastante quanto aos aspectos texturais e composicionais. Entretanto, é característico dessas rochas o enriquecimento em alumínio e a presença da pirofilita, um mineral com diversas aplicações industriais, em especial na produção de materiais refratários. Foto: Sena 2007.

Dentre os minerais diagnósticos do agalmatolito, a pirofilita é o que o mais se destaca no setor industrial. Trata-se de um filossilicato de alumínio hidratado [ $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ], com composição ideal formada por 66,7% de  $\text{SiO}_2$ , 28,3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 5,0% de  $\text{H}_2\text{O}$ . Na escala de Mohs, a pirofilita apresenta dureza 1,5, sendo facilmente processada e comercializada na forma de um pó de cor branca (Klein & Dutrow 2012). Além da elevada refratariedade, a pirofilita é quimicamente inerte e resistente a ataques ácidos.

Com base nas suas propriedades, o agalmatolito é um importante recurso mineral industrial que pode ser usado para diversos fins (ABCERAM 2018): (i) fabricação de massas refratárias; (ii) fabricação de alguns tipos de tintas; (iii) fabricação de fritas e esmaltes cerâmicos (vidrados); (iv) fabricação de alguns tipos de porcelanas; entre outras aplicações.

Quando processado, o agalmatolito extraído dos depósitos é reduzido na forma de um pó industrial normalmente branco, semelhante ao que é obtido por outros recursos minerais como o talco e o caulim. Por causa disso, por vezes, essas rochas são comercializadas de

maneira incorreta, o que prejudica a obtenção de dados estatísticos confiáveis para esse recurso.

Provavelmente devido a essa dificuldade, as publicações seriadas a respeito do comportamento dos recursos minerais, sejam elas internacionais (USGS 2018) ou nacionais (Lima & Neves 2016), mostram os dados do talco e da pirofilita em conjunto, não se distinguindo o tanto que cada um desses minerais representa com relação aos valores divulgados.

### 3.1. Aplicações na indústria de refratários

O agalmatolito mais visado para a aplicação em indústrias refratárias é aquele que contém a pirofilita como constituinte majoritário (preferencialmente quando acima de 60%) e, ao mesmo tempo, apresenta ausência de grãos de quartzo e baixa concentração em óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1\%$ ; Hida & Kitagawa 2006). Além disso, Romano (2007a) acrescenta que, para essa finalidade, é importante que o agalmatolito possua um teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  acima de 45% e a quantidade total de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) seja inferior a 2%, o que implica em rochas com menores concentrações de micas brancas. Sendo essencialmente constituída por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a pirofilita é um insumo que produz refratários sílico-aluminosos, principalmente tijolos e monolitos de fornos industriais.

No aquecimento industrial, quando as temperaturas atingem cerca de 700 °C, a pirofilita se desidrata e se transforma em uma fase mais estável e resistente, capaz de resistir até temperaturas da ordem de 1200 °C. Na indústria de refratários, a pirofilita pode ser usada para a produção de diversos materiais, tais como tijolos refratários, fornos, cimento refratário, moldes de fundição etc. (Hida & Kitagawa 2006).

### 3.2. Ocorrência geológica e origem

O termo agalmatolito é genérico e não possui conotação genética. Trata-se de um tipo rocha secundária que pode ser formada a partir de vários litotipos originais, desde que suficientemente enriquecidos em alumínio e submetidos às condições hidrotermais ideais para estabilizar os minerais diagnósticos, como a pirofilita. Este é um mineral que raramente ocorre isolado na natureza e que pode ser formado em três situações (Hida & Kitagawa 2006):

- i. Alteração hidrotermal de rochas vulcânicas ácidas (riolitos, dacitos e tufos);
- ii. Alteração hidrotermal de granitoides aluminosos, especialmente por ação de fluidos residuais que se acumulam na zona de cúpula dos plútons;
- iii. Associada à percolação de fluidos hidrotermais em veios que produzem depósitos de minerais metálicos.

Nos depósitos, a morfologia do agalmatolito é variada, podendo apresentar-se na forma maciça, lenticular, nodular ou venular.

### 3.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

Em Minas Gerais, o agalmatolito é explorado na região central do estado, nas proximidades das cidades Mateus Leme, Pará de Minas, Onça do Pitangui e Pitangui (Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010; DNPM 2011).

As reservas estão situadas ao longo de uma faixa de direção NW-SE conhecida como lineamento Pitangui, com cerca de 60 km de extensão. Trata-se de um sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes que se desenvolveram durante um evento de colisão continental antigo, responsável pela geração de cadeias montanhosas durante a era paleoproterozoica (Romano 2007a).

Na região de Pará de Minas, Onça do Pitangui e Pitangui (Figura 3), essas rochas estão associadas à sequência metavulcanossedimentar do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas), de idade neoarqueana. O embasamento da região está representado por rochas gnáissicas mais antigas (Complexos Divinópolis e Belo Horizonte). Tanto o embasamento quanto as rochas do Grupo Nova Lima estão intrudidos por um conjunto de suítes graníticas formadas no contexto compressivo colisional Neoarqueano. A área também contém coberturas sedimentares de idade neoproterozoica (Grupo Bambuí), bem como coberturas de sedimentos inconsolidados depositados ao longo do Cenozoico (Figura 4, Romano 2007b).

Nessa região, ocorrem diversos depósitos de agalmatolito, com destaque para os que estão localizados nas proximidades da cidade Pitangui, na serra dos Antimes, na serra dos Ferreiras e na serra do Rio do Peixe (Figura 4), todos atribuídos à alteração das rochas vulcânicas félsicas (riolitos, riodacitos e tufos) do Grupo Nova Lima. Outros depósitos de referência ocorrem na região da serra do Andaime e em Pará de Minas (Figura 4). Entretanto, a gênese do agalmatolito ainda não é muito bem compreendida nesses últimos anos (Romano 2007a).

Com relação aos depósitos da região de Mateus Leme, também são necessários estudos petrogenéticos mais detalhados para entender os processos genéticos do agalmatolito, havendo apenas a suspeita de que os depósitos sejam derivados da alteração hidrotermal de rochas sedimentares areno-argilosas (Romano 2007a).

### 3.4. Aspectos econômicos em Minas Gerais

#### 3.4.1. Dados de reservas

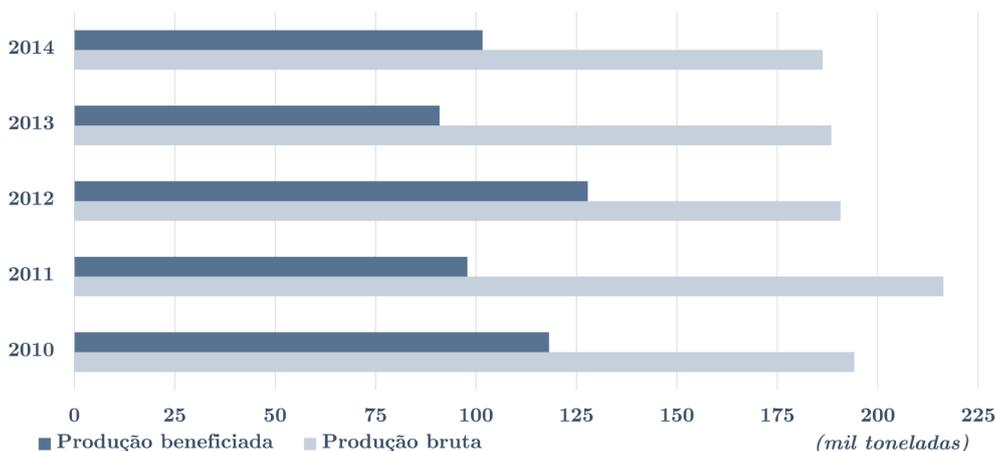
Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), ao longo desses anos, o estado de Minas Gerais registrou um considerável aumento no volume de reservas medidas de agalmatolito, passando de aproximadamente 14 milhões de toneladas em 2010, para 31,5 milhões de toneladas em 2014. Um aumento proporcional também foi registrado pelo volume de reservas lavráveis, sendo cerca de 8,5 milhões de toneladas em 2010 e 24 milhões em 2014 (Figura 5). A diferença brusca nesses dados foi observada na passagem dos anos de 2011 e 2012. Contudo, o anuário mineral estadual (Dalla Costa *et al.* 2017) não sugere o motivo desse aumento.



### 3.4.2. Dados de produção

No ano de 2014, Minas Gerais registrou 13 minas de agalmatolito (pirofilita), sendo 12 com lavra a céu aberto e 1 subterrânea. Dentre essas minas, 4 foram consideradas de pequeno porte (produção bruta entre 10 e 100 mil toneladas), ao passo que as 9 restantes foram registradas como de microporte, apresentando produção inferior a 10 mil toneladas. No ano de 2014, tais minas atingiram uma produção bruta de aproximadamente 185 mil toneladas, um valor próximo do observado nos anos anteriores, à exceção de 2011, que foi o ano com maior produção bruta (ca. 215 mil toneladas; Figura 6).

Em relação aos valores da produção beneficiada em usinas de tratamento, houve maior oscilação entre 2010 e 2014, com maior volume de material beneficiado em 2012 (ca. 128 mil toneladas) e menor em 2013 (ca. 90 mil toneladas). Em 2014, a produção aumentou em relação ao ano anterior e Minas Gerais encerrou o ano com aproximadamente 100 mil toneladas de agalmatolito beneficiado (Figura 6). A empresa que mais se destacou com a produção de agalmatolito (pirofilita) no estado em 2014 foi a Magnesita S.A. (Dalla Costa *et al.* 2017).



**Figura 6.** Evolução da produção bruta e beneficiada de agalmatolito (pirofilita) em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Dalla Costa *et al.* 2017.

Mais recentemente, a revista *Minérios & Minerais* (2017) divulgou o ranking das 200 maiores minas produtoras de recursos minerais em 2016. Dentre essas, duas se referem à extração de agalmatolito (pirofilita) em Minas Gerais:

- i. *Mina velha (Pará de Minas)*: explorada pela empresa Lamil Lage Minérios Ltda, com produção de cerca de 75 mil toneladas;
- ii. *Mina Fazenda de Pedra (Mateus Leme)*: explorada pela Mineração Mateus Leme Ltda. (recentemente adquirida pelo Grupo Kymeria), com produção bruta de 60 mil toneladas.

## 4. ARGILAS REFRAATÓRIAS

O termo *argila* é genérico e pode ser usado para definir qualquer material natural, de textura terrosa, granulometria fina (menor do que 0,004 mm), constituído essencialmente por argilominerais, podendo conter também diferentes tipos de impurezas como outros minerais (eg. quartzo, muscovita, biotita, hematita, pirita etc.) ou matéria orgânica (ABCERAM 2018). Trata-se de um dos recursos minerais mais acessíveis ao homem, sendo abundante e recorrente em todas as superfícies continentais e até mesmo marinhas.

Em linhas gerais, com relação à formulação química, os argilominerais são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, podendo conter vários outros tipos de elementos, tais como ferro, potássio, sódio, cálcio, lítio etc. Em termos de classificação mineralógica, eles pertencem à subclasse dos filossilicatos, que são os minerais que ocorrem na forma planar, em lamelas empilhadas umas sob as outras, como as folhas de um livro. Somente algumas espécies de argilominerais mais raros são exceções. A depender de diferenças, como o modo lamelas dos argilominerais estão organizadas, eles podem conter diferentes tipos de elementos químicos ou moléculas de água entre as camadas, o que confere diferentes tipos de propriedades nas argilas que produzem (DHZ – Deer *et al.* 2013).

Com base no tipo de arranjo cristalográfico e na composição, dezenas de espécies de argilominerais diferentes podem ser encontrados em depósitos argilosos. Nesse caso, conforme suas propriedades, eles são divididos em grupos em comum, dentre os quais se destacam os membros dos grupos da caulinita, as esmectitas e as ilitas (Tabela 3).

**Tabela 3.** Síntese dos principais grupos de argilominerais e suas características diagnósticas principais. Fonte: Deer *et al.* 2013.

GRUPO	CARACTERÍSTICAS
Caulinita	<b>Fórmula Geral:</b> $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
	<b>Espécies minerais:</b> Caulinita; Haloisita; Dickita; Nacrita
	Íon principal na camada interlamelar: <i>Inexistente</i>
	<b>Água na camada interlamelar:</b> <i>somente na espécie haloisita</i>
Esmectita	<b>Fórmula Geral:</b> $(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10}).nH_2O$
	<b>Espécies:</b> Montmorilonita; Nontronita; Beidelita; Saponita
	Íon principal na camada interlamelar: <i>Ca e Na</i>
	<b>Água na camada interlamelar:</b> <i>alta</i>
Ilita	<b>Fórmula Geral:</b> $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}.nH_2O$
	<b>Espécies:</b> Ilita; Fengita; Brammalita; Glauconita; Celadonita
	Íon principal na camada interlamelar: <i>K</i>
	<b>Água na camada interlamelar:</b> <i>baixa</i>
	<b>Origem:</b> reações diagenéticas ou de baixo grau metamórfico.

A existência de diversos tipos de argilominerais implica em tipos de argilas diferentes que, por sua vez, podem ser encontradas em diversos ambientes e apresentar diferentes propriedades industriais. Com base nas suas características e nas aplicações dos produtos manufaturados, o mercado nacional e internacional divide as argilas em seis grandes tipos

(DNPM 2011, Dalla Costa *et al.* 2017, USGS 2018): (i) argilas comuns; (ii) argilas plásticas; (iii) argilas refratárias; (iv) bentonita; (v) caulim; e (vi) terras *fuller* (Tabela 4).

**Tabela 4.** Principais tipos de argilas com base na classificação de mercado. Conforme suas propriedades, cada tipo de argila possui uma aplicação principal. Fonte: USGS (2018).

TIPO	USO PRINCIPAL
Argilas comuns ( <i>Brick clays</i> )	Cerâmicas de alvenaria (tijolos, telhas, lajes, etc.)
Argilas plásticas ( <i>Ball clays</i> )	Louças sanitárias e de mesa; cerâmicas de revestimento
Argilas refratárias ( <i>Fire clays</i> )	Tijolos refratários, fornos e demais equipamentos industriais
Bentonita	Perfuração de poços, fundição e pelotização
Caulim ( <i>China clays</i> )	Papel e cerâmicas sanitárias e de mesa

Segundo o Dicionário da Ciência Cerâmica e Engenharia (McColm 2013), as argilas refratárias são genericamente definidas como os tipos que possuem ponto de fusão elevado (acima de 600 °C) e que, por isso, são utilizadas para a confecção de vários tipos de materiais industriais caracterizados pela alta resistência térmica.

A propriedade refratária dessas argilas está intimamente relacionada aos tipos de argilominerais presentes, à quantidade de impurezas e ao teor de alumina ( $Al_2O_3$ ). Dessa forma, mais enriquecida em minerais do grupo da caulinita (espécies essencialmente constituídas por sílica -  $SiO_2$  e alumina; Tabela 4) e mais puras (livres da presença de outros minerais ou matéria orgânica), maior é o ponto de fusão e maior será a resistência térmica dos materiais produzidos (ABCERAM 2018).

Em linhas gerais, conforme a composição e origem, as argilas refratárias podem ser subdivididas em dois tipos (Krause 2014):

- i. *Argilas cauliniticas*: tipos específicos de caulim mais puros e enriquecidos em caulinita ou haloisita. No mercado internacional, são genericamente conhecidas como *fire clays*;
- ii. *Argilas bauxíticas*: são as argilas encontradas em associação com depósitos de bauxita e caracterizadas pelo elevado teor de alumina ( $Al_2O_3$ ) devido à presença de hidróxidos de alumínio como a gibsita ( $Al(OH)_3$ ).

#### 4.1. Aplicações na indústria de refratários

Os primeiros materiais produzidos com argilas datam de 4.000 anos antes da era comum, sendo utilizada na forma bruta para a confecção de cerâmicas usadas em fornos. Ainda hoje esses materiais são usados para esse propósito, como pode ser verificado em fornos rústicos usados, por exemplo, para a produção de carvão vegetal em regiões produtoras de eucalipto (Figura 7).

A partir do século XIX, no contexto da revolução industrial, as argilas refratárias adquiriam uma importância fundamental devido à necessidade de se manipular massas aquecidas em temperaturas maiores, especialmente para a produção do aço (Harvey *et al.* 2006).

Com o passar do tempo, a tecnologia industrial aumentou e materiais ainda mais resistentes começaram a ser produzidos a partir do uso de outros recursos naturais ou sintéticos. Entretanto, as argilas refratárias ainda são amplamente utilizadas pelas indústrias,

atuando como matéria prima para a confecção de materiais refratários sílico-aluminosos ( $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) aplicados, por exemplo, no revestimento de alguns tipos de fornos industriais. Além disso, essas argilas também são amplamente empregadas para a produção de tijolos isolantes térmicos usados em lareiras, churrasqueiras e fornos domésticos, bem como na confecção de tipos específicos de louças e cerâmicas de revestimento, além de vidros e argamassas especiais (cimento refratário). Nesse caso, os tijolos refratários convencionais produzidos com essas argilas são capazes de suportar temperaturas da ordem de 1.250 a 1.500 °C, sendo exigidas matérias primas com valores entre 20 e 45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  inferior a 2,5% e teor de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) abaixo de 3% (Krause 2014).



**Figura 7.** Detalhe de forno rústico construído com tijolos de argila e usado para produzir carvão vegetal a partir da queima da madeira de eucalipto. Foto: Acervo pessoal do autor.

Além de ser usada diretamente na produção dos materiais refratários sílico-aluminosos, essas argilas também são úteis para a confecção do chamote, um tipo de insumo sintético e rico em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 50 e 75%), obtido a partir do processo de calcinação. Por ser mais puro e aluminoso, o chamote tem um ponto de fusão acima de 1500 °C e é comumente usado como um dos componentes das massas que produzem refratários de alta alumina, que são tipos de maior qualidade, capazes de resistir a temperaturas que podem atingir até 1800 °C (Krause 2014).

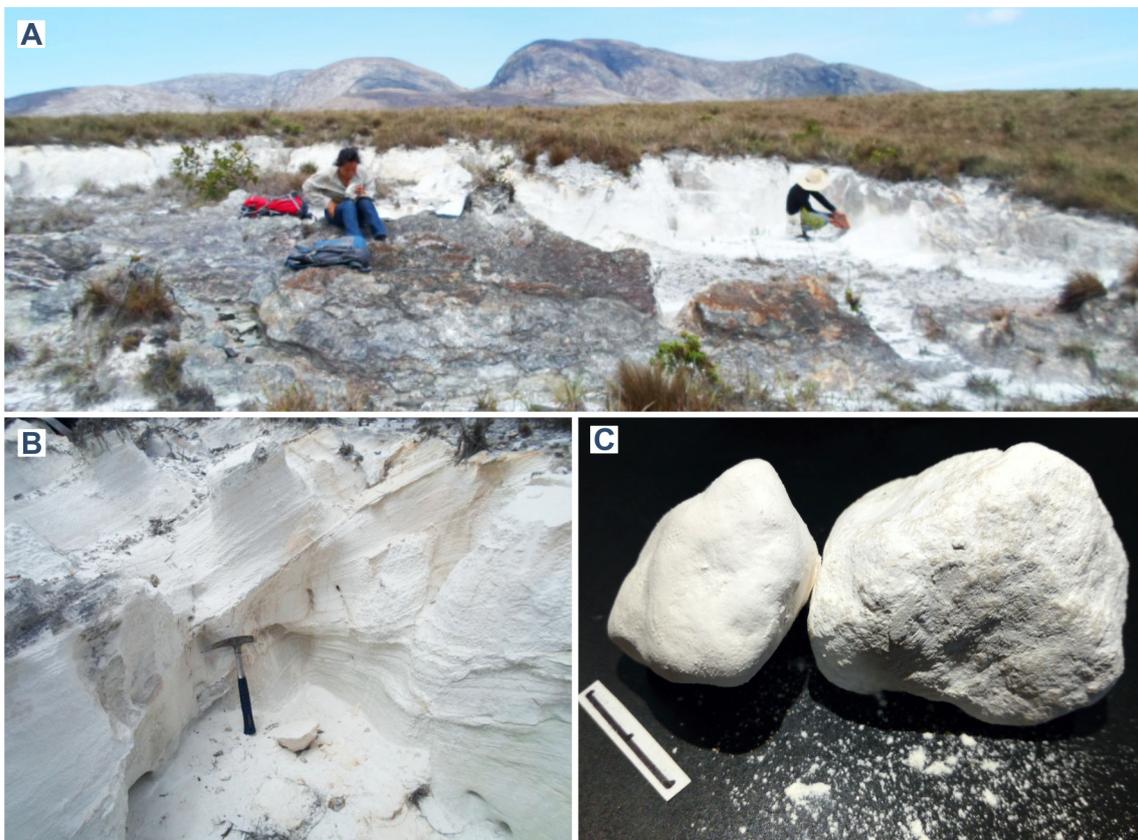
## 4.2. Ocorrência geológica e origem

Com relação à origem, as argilas de uma forma geral são classificadas como primárias ou secundárias. No primeiro caso, os argilominerais presentes derivam diretamente da alteração intempérica de rochas aflorantes na superfície e se depositam no local onde foram formadas (*in situ*), formando as argilas residuais. As argilas secundárias, por sua vez, resultam de argilominerais transportados pela ação da água ou do vento e que se acumulam em depósitos sedimentares afastados da área fonte. Nesse grupo também estão incluídos os

argilominerais (especialmente a caulinita) formados a partir de reações químicas que podem ocorrer nos estágios iniciais da sedimentação (minerais autigênicos, Murray 2000).

#### 4.2.1. Argilas caulínicas (caulim refratário)

As argilas refratárias caulínicas são tipos especiais de *caulim*, um termo genérico que faz referência ao conjunto de argilas majoritariamente composta por argilominerais do grupo da caulinita e de coloração esbranquiçada, ou próxima do branco (Murray 2000; Figura 8). Elas incluem uma ampla variedade de tipos com composições diferentes, podendo ser primárias (residuais) ou secundárias (sedimentares), sendo este último caso o mais comum. Isso ocorre porque os agentes transportadores (vento e água) agem como filtros naturais e tendem a selecionar mais os sedimentos quanto ao tamanho e forma. Assim, os depósitos secundários de argilas caulínicas, de maneira geral, tendem a ser mais puros.



**Figura 8.** Exemplos de argilas caulínicas em escala de afloramento e de detalhe. **A)** Exposição de pacote caulínico tabular evidenciado pela erosão no solo (região de Lapinha da Serra – Minas Gerais, Coordenadas geográficas 19.079417°S, 43.638826°W, WGS84). **B)** Detalhe do afloramento anterior, mostrando a cor esbranquiçada típica dessas argilas e estrutura laminada. **C)** Detalhe de amostras de caulim, com destaque para a coloração esbranquiçada, os grãos muito finos, o aspecto terroso e o caráter pulverulento (desagrega facilmente em pó). Escala em centímetros. Fotos: A e B) Acervo pessoal do autor. C) Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

Em termos de composição, os caulins refratários são predominantemente constituídos por caulinita ou haloisita, contendo também diferentes proporções de ilita (Tabela 3) e quartzo. Tipicamente, esses três minerais somam 90% da composição total (BGS 2006).

Os depósitos mais tradicionais de caulins refratários ocorrem nos estados da Pensilvânia e Missouri (EUA) e em países como a França, a Alemanha e o Reino Unido, todos formados no período carbonífero e representados por lentes ou camadas tabulares de material argiloso situado abaixo de camadas de carvão (Harvey *et al.* 2006). O termo comercial *fireclay* normalmente faz referência às argilas derivadas desses tipos de depósitos e, por vezes, também ser nomeadas como *underclays*. Uma outra variedade famosa de argilas refratárias encontradas em depósitos desse tipo são as argilas silicosas (*flint clays*), que diferem das demais por serem compactadas, rígidas (não plásticas) e apresentarem textura maciça, fratura conchoidal e maiores concentrações de quartzo e de óxidos de ferro (BGS 2006, McColm 2013).

#### 4.2.2. Argilas bauxíticas

As argilas bauxíticas (Figura 9) são recursos minerais inconsolidados encontrados em associação com a bauxita maciça, uma rocha secundária que se forma a partir da alteração superficial de rochas ricas em alumínio. Em linhas gerais, esse processo se deve à lixiviação de componentes químicos da rocha original pela ação constante de água superficial, ou infiltrada no solo, que atua removendo os componentes químicos mais móveis (eg.  $K_2O$ ,  $Na_2O$  e  $SiO_2$ ), enriquecendo a porção residual em componentes menos móveis, como a alumina ( $Al_2O_3$ ).



**Figura 9.** Detalhe de agregados inconsolidados de argila bauxítica, recurso mineral refratário formado a partir da decomposição de rochas aluminosas que se encontra associado com depósitos de bauxita Foto: Companhia Brasileira de Alumínio (Acesso em 1/7/2018).

Os depósitos são mais comumente encontrados em zonas tropicais, onde o aporte de chuva é intenso. Tendem a se concentrar em zonas de relevo plano e datam da era cenozoica, com a maioria das ocorrências mundiais formadas durante os períodos Neogeno e Quaternário. Além de ser produto direto do intemperismo e desagregação de rochas aluminosas, as argilas bauxíticas também podem ser formadas a partir da desagregação da bauxita maciça, ocorrendo na forma de solos residuais ou como depósitos transportados em zonas de colúvio ou aluviões (Hill & Sehnke 2006).

Com relação ao conteúdo mineral, as argilas bauxíticas são compostas basicamente por hidróxidos de alumínio (gibsite –  $Al(OH)_3$ , bohemita e diásporo –  $AlO(OH)$ ) e argilominerais do grupo da caulinita, podendo também conter ilitas e micas como a clorita.

Óxidos de ferro (hematita –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e magnetita –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e hidróxidos de ferro (Goethita –  $\text{FeO}(\text{OH})$ ) normalmente ocorrem como fases acessórias e são os principais responsáveis por conferir a coloração amarronzada-avermelhada típica da bauxita e das argilas associadas (Figura 9).

### 4.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

Como é característico das argilas de uma forma geral, as ocorrências de depósitos são recorrentes e, em Minas Gerais, estão amplamente distribuídas. Segundo a mais recente publicação oficial referente às reservas desse recurso em Minas Gerais (Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010; DNPM 2011), são verificados depósitos nas proximidades dos seguintes municípios no estado: *Andradas, Araújo, Betim, Bom Despacho, Caldas, Conceição do Pará, Esmeraldas, Florestal, Francisco Dumont, Guarda-Mor, Ijaci, Indianópolis, Inhaúma, Itabirito, Itaúna, João Pinheiro, Nova Lima, Nova Ponte, Nova Resende, Paracatu, Perdizes, Poços de Caldas, Sacramento, Santo Antônio do Monte, Uberaba e Uberlândia.*

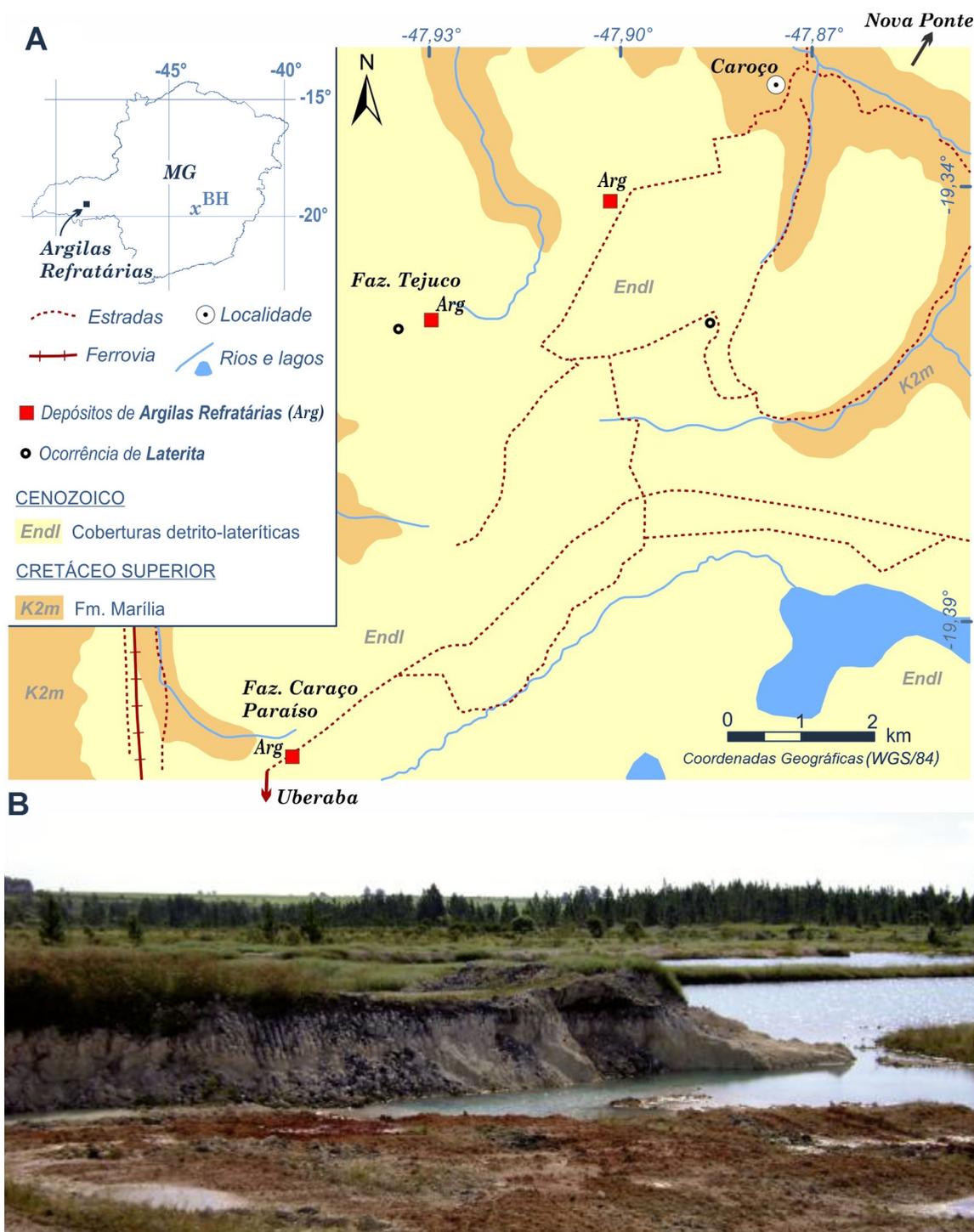
Dentre esses, destacam-se os depósitos de argilas caulínicas do Triângulo Mineiro e as argilas bauxíticas de Poços de Caldas, ambos tradicionalmente explorados por diversas empresas mineradoras ao longo dos últimos anos.

#### 4.3.1. Argilas Refratárias do Triângulo Mineiro (região entre Uberaba e Uberlândia)

Em termos geológicos, o Triângulo Mineiro está inserido nos domínios da Bacia do Paraná, uma entidade tectônica constituída por uma sucessão de rochas sedimentares e magmáticas que preencheram uma antiga bacia intracontinental formada ao longo de um extenso intervalo de tempo, entre o Ordoviciano e o Cretáceo (Seer & Moraes 2017).

Os registros de argilas refratárias nessa região ocorrem nas proximidades de Uberaba e Uberlândia, nos domínios das rochas sedimentares atribuídas à Formação Marília, do Grupo Bauru. Trata-se de uma sequência sedimentar areno-argilosa depositada no topo da sequência estratigráfica da Bacia do Paraná (Cretáceo Superior) e basicamente constituída por conglomerados, arenitos, calcretes, argilitos e siltitos (Chaves & Dias 2017, Seer & Moraes 2017).

A extração de argilas refratárias é uma atividade que vem sendo praticada há tempos. Esses materiais ocorrem em depósitos tabulares estratiformes, lenticulares ou em fragmentos superficiais, associados com lateritas, e sua gênese é atribuída à decomposição dos arenitos impuros, argilitos e siltitos da Formação Marília (Coelho 2014, Chaves & Dias 2017). Depósitos expressivos e tradicionais ocorrem nos domínios das fazendas Caraço do Paraíso e Tejuco (Figura 10A) os quais foram lavrados durante muitos anos pela empresa Magnesita S.A., apresentando-se atualmente em fase de cessão total de lavra (SIGMINE 2018). Nessa região também ocorre um depósito expressivo próximo à localidade de Caroço (Figura 10A) que é atualmente lavrado pela empresa IBAR - Indústria Brasileira de Artigos Refratários Ltda.

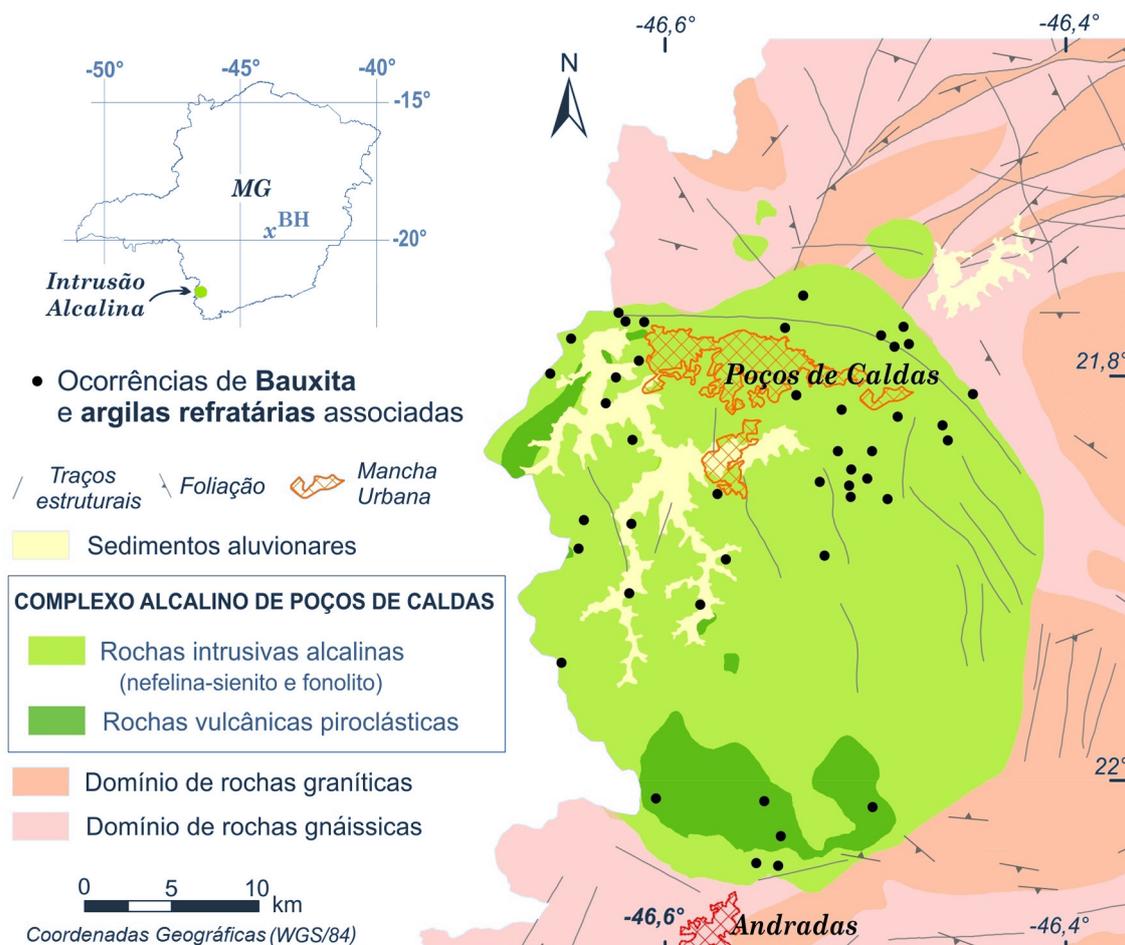


**Figura 10. A)** Mapa geológico simplificado de parte da região do triângulo mineiro que contém depósitos importantes de argilas caulínicas refratárias, tradicionalmente explorados ao longo dos anos. Tais argilas são coberturas cenozoicas associadas à desagregação dos arenitos impuros, siltitos e argilitos da Formação Marília. Mapa Geológico adaptado de Chaves & Dias (2017). **B)** Detalhe do depósito que ocorre nas proximidades da localidade de Carço e que atualmente encontra-se em fase de lavra pela empresa IBAR - Indústria Brasileira de Artigos Refratários Ltda. Foto: Coelho (2014).

Segundo Coelho (2014), as argilas refratárias no triângulo mineiro são caulins esbranquiçados residuais (Figura 10B), podendo conter tons amarelados a depender da presença de óxidos de ferro ( $Fe_2O_3$ ). São majoritariamente compostos por caulinita e gibsita, havendo tipos que atingem até 70% de  $Al_2O_3$ .

### 4.3.2. Argilas bauxíticas da região de Poços de Caldas a Andradas

Em Poços de Caldas, as argilas refratárias estão associadas à formação dos depósitos de bauxita, ambos produtos da alteração de nefelina sienitos, sienitos, fonolitos e tinguaitos que constituem o Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Figura 11), um dos maiores corpos ígneos alcalinos do mundo, com cerca de 800 km<sup>2</sup> em área superficial. Esse corpo resulta da manifestação de expressivo volume de magma que atravessou a crosta continental brasileira no Cretáceo Superior, no contexto da tectônica extensional relacionada com a quebra do supercontinente Pangea e desenvolvimento da crosta oceânica do Atlântico (Valeton *et al.* 1997, Tedeschi *et al.* 2015a).

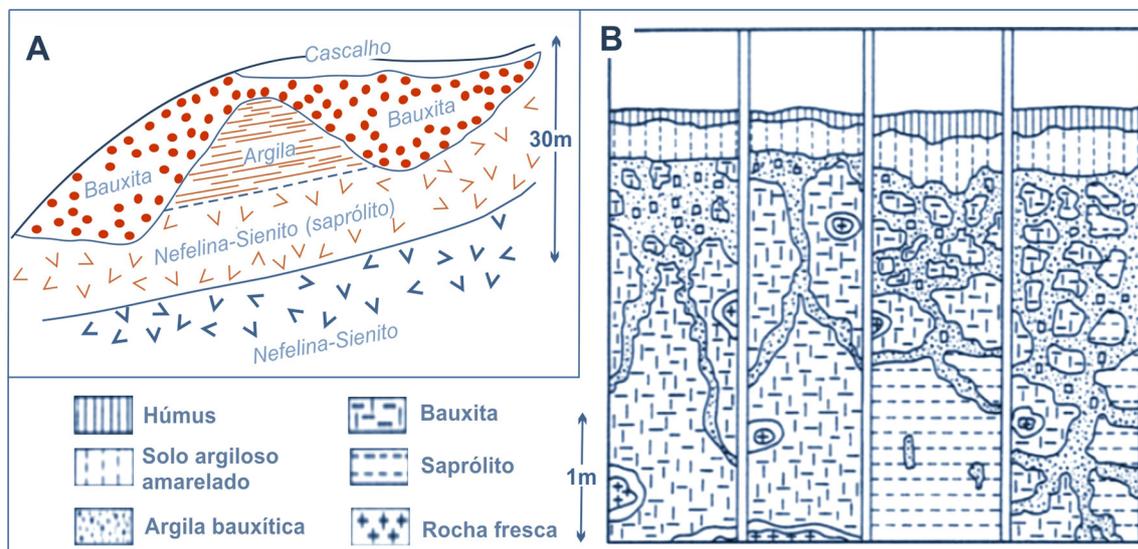


**Figura 11.** Mapa geológico esquemático da região de região sul de Minas Gerais, com destaque para o Complexo Alcalino de Poços de Caldas e as ocorrências de bauxita associadas. Fonte: Adaptado dos mapas geológicos de Tedeschi *et al.* (2015b) e Peixoto *et al.* (2015).

Atualmente, o que se verifica na região é a expressão resultante do intemperismo e erosão atuante nas rochas alcalinas desse complexo durante todo o Cenozoico e, como resultado desse processo, vários depósitos de bauxita e argilas refratárias foram formados em diferentes regiões entre as cidades de Andradas e Poços de Caldas (Figura 11, Tedeschi *et al.* 2015b).

Tendo em vista fatores como a morfologia do relevo, a composição da rocha original e a quantidade de água infiltrada no solo, o estilo dos depósitos e a proporção entre bauxita maciça e argilas podem variar bastante. Em geral, esses depósitos ocorrem como mantos de

alteração que recobrem os níveis de rocha fresca e saprolitizada e possuem uma ampla extensão lateral, com espessuras métricas a decamétricas (Hill & Sehnke 2006, Figura 12A). Nos perfis de alteração levantados por Valeton *et al.* (1997) em diferentes regiões do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (Figura 12B) é possível verificar a heterogeneidade de um depósito em relação a outro, sendo alguns marcados por espessos mantos de material argiloso e outros dominados por bauxita maciça.



**Figura 12.** Detalhes da formação das argilas bauxíticas no Complexo Poços de Caldas. **A)** Os depósitos são residuais e ocorrem como mantos de alteração sobre as rochas saprolitizadas e frescas do complexo, podendo assumir espessuras variadas conforme fatores como topografia e grau de infiltração de água em subsuperfície. **B)** Perfis de alteração levantados em diferentes porções do complexo, mostrando a associação entre a bauxita maciça e os depósitos de argilas, ambos formando pacotes que recobrem rochas alcalinas frescas e saprolitizadas. Fonte: A) Adaptado de Hill & Sehnke (2006). B) Retirado de Valeton *et al.* (1997).

## 4.4. Aspectos econômicos em Minas Gerais

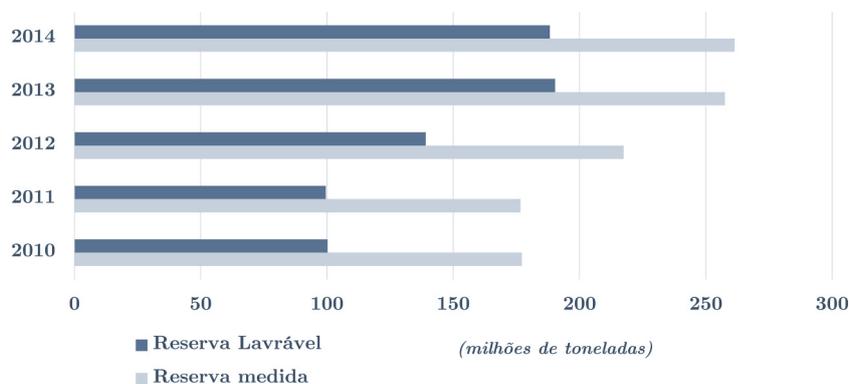
### 4.4.1. Dados de reservas

Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), nesse período, o estado de Minas Gerais registrou um considerável aumento no volume de reservas medidas de argilas refratárias, passando de aproximadamente 180 milhões de toneladas em 2010, para cerca de 260 milhões de toneladas em 2014. Paralelamente, um aumento proporcional também foi registrado para as reservas lavráveis, sendo cerca de 100 milhões de toneladas em 2010 e 190 milhões em 2014 (Figura 13). Entre 2010 e 2011 o volume dessas reservas foi praticamente constante (ca. 100 milhões de toneladas) e aumentou consideravelmente ao final de 2012 (ca. 130 milhões de toneladas) e de 2013 (ca. 180 milhões de toneladas). No ano de 2014, o volume das reservas lavráveis se manteve constante, com leve decréscimo em relação ao ano anterior.

### 4.4.2. Dados de produção

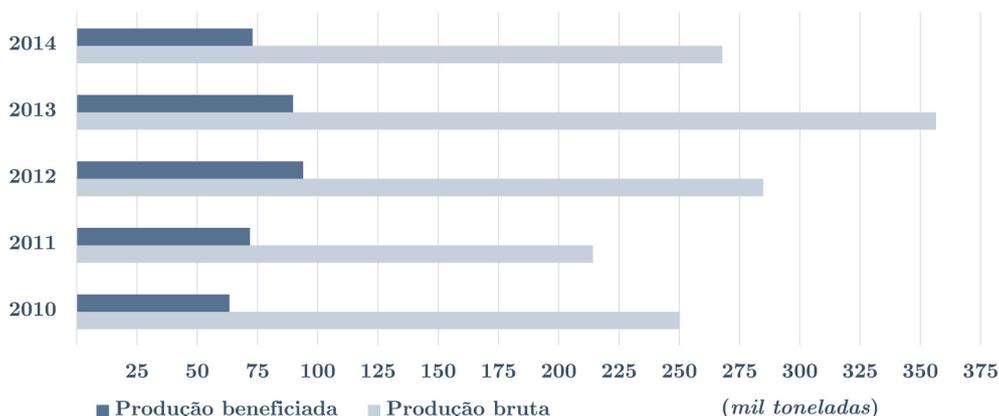
No ano de 2014, Minas Gerais registrou 38 minas de argilas refratárias, todas com lavra em cava a céu aberto. Do total, apenas uma mina foi considerada de médio porte (produção bruta entre 100 mil e 1,0 milhão de toneladas), ao passo que seis foram registradas como

de pequeno porte (10 mil e 100 mil toneladas) e as 31 restantes de microporte, com produção inferior a 10 mil toneladas (Dalla Costa *et al.* 2017). Conforme essa mesma fonte, no ano de 2014 tais minas atingiram uma produção bruta de aproximadamente 268 mil toneladas, um valor consideravelmente menor do total produzido no ano anterior (355 mil toneladas em 2013). Entre 2010 e 2012, a produção bruta de argilas refratárias no estado também flutuou, atingindo cerca de 284 mil toneladas em 2012, 214 mil toneladas em 2011 e 250 mil toneladas em 2010 (Figura 14).



**Figura 13.** Evolução do volume das reservas medidas e lavráveis de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

Em relação ao montante de argilas refratárias beneficiadas em usinas de tratamento, os dados mostram que há uma considerável discrepância em comparação com o volume da produção bruta, bem como não há uma relação de proporcionalidade entre ambos (Figura 14). Ao longo dos anos de 2010 a 2014, a produção beneficiada desse recurso flutuou menos do que a produção bruta e, ainda que este valor tenha se reduzido de um ano para o outro (eg. de 2010 para 2011), a produção beneficiada registrou aumento de volume. Em 2014, Minas Gerais encerrou o ano com aproximadamente 73 mil toneladas de material beneficiado nas usinas de tratamento (Figura 14).



**Figura 14.** Evolução da produção bruta e beneficiada de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

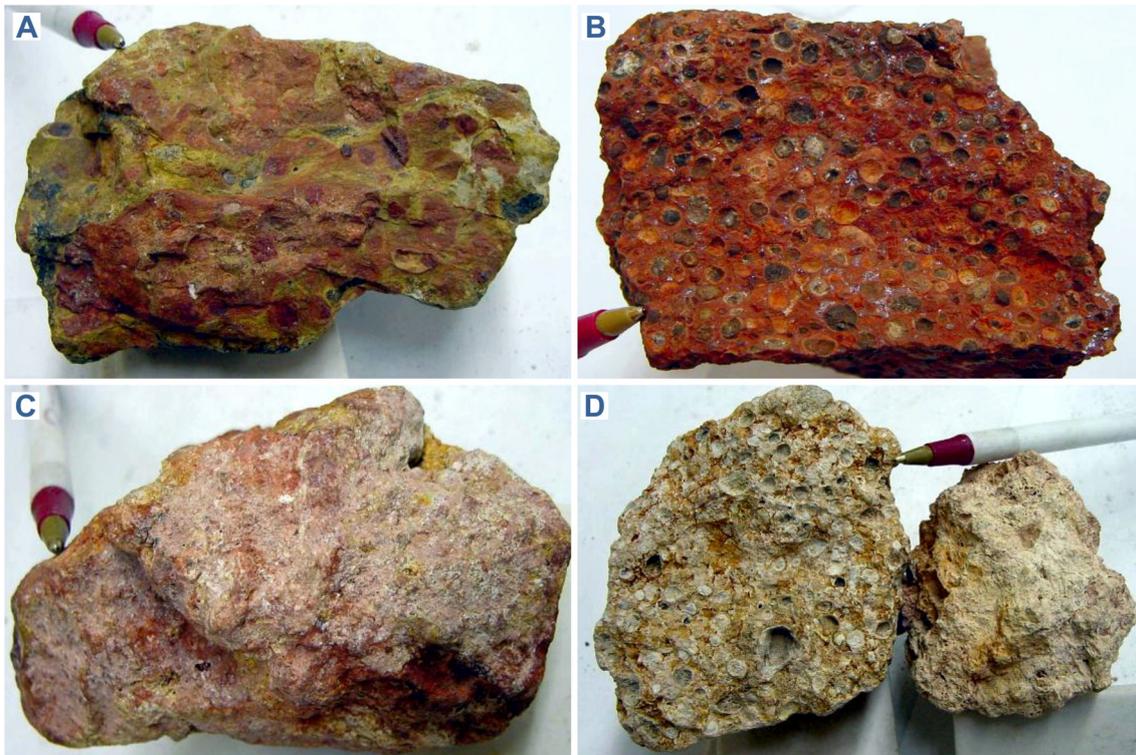
Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017), as empresas que mais se destacaram com a produção de argilas refratárias no estado em 2014 foram a Vale S.A., Magnesita S.A. e a Mineração Caldense Ltda.

## 5. BAUXITA

Assim como as argilas que se encontram associadas, a bauxita é um recurso mineral utilizado nas indústrias de refratários, atuando como matéria-prima fonte de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) em diversos tipos de materiais sílico-aluminosos e aluminosos.

O termo *bauxita* deriva de *beauxite*, uma palavra criada pelo químico francês Pierre Berthier no início do século XIX para fazer referência a um conjunto de rochas avermelhadas com elevados teores de alumina, que ocorrem na região de *Les Beaux*, sul da França. Atualmente, esse termo é usado para definir um amplo e diversificado grupo de rochas, com diferentes aspectos texturais (Figura 15).

A bauxita é uma rocha secundária, residual, que se forma a partir da alteração de protolitos aluminosos. A heterogeneidade textural e composicional que ela pode apresentar decorre do fato de que a bauxita pode se formar a partir de várias fontes diferentes, uma vez que o alumínio é um mineral abundante na crosta e está presente em boa parte dos minerais formadores de rochas comuns (Hill & Sehnke 2006).



**Figura 15.** Detalhe de amostras de bauxita, tipo de rocha rica em alumínio e que pode se apresentar com diferentes aspectos texturais. **A)** Bauxita avermelhada maciça, com nódulos de ferro. **B)** Bauxita avermelhada vesicular. **C)** Bauxita acinzentada-rosada maciça. **D)** Bauxita amarronzada vesicular e nodular. Fotos: Andrew Silver A, B, C, D. Acesso em 1/7/2018. Departamento de Geologia; Universidade de Young, Utah.

Com relação ao conteúdo mineral, a bauxita é majoritariamente composta por minerais da classe dos hidróxidos (gibsite –  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , bohemita e diásporo –  $\text{AlO}(\text{OH})$ ), comumente contendo também óxidos de ferro (hematita –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), hidróxidos de ferro (goethita –  $\text{FeO}(\text{OH})$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e pequenas quantidades de óxidos de titânio (rutilo –  $\text{TiO}_2$ ). Trata-se de uma rocha comumente encontrada em regiões subtropicais, marcadas por grande aporte de chuvas, e os depósitos normalmente ocorrem na forma de coberturas

superficiais de espessura variada e grande extensão lateral (Figura 12). Tendo em vista a grande diversidade de tipos com aspectos texturais e teores de alumina diferentes (Figura 15), a bauxita comumente é classificada com base na aplicação no mercado industrial (eg. bauxitas metalúrgicas, bauxitas refratárias, bauxitas para as indústrias cimenteiras, bauxitas para produtos químicos, bauxita para materiais abrasivos etc.). A Tabela 5 mostra a composição química típica usada em cada uma dessas indústrias (Hill & Sehnke 2006).

**Tabela 5.** Composição química típica dos principais tipos de bauxitas comercializadas no mercado industrial. Detalhe para a composição das bauxitas refratárias que, para a produção de produtos de qualidade, devem possuir uma composição mais específica, principalmente com relação aos elevados teores de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Fonte: Hill & Sehnke (2006).

TIPO	Composição (% em peso)			
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$
Bauxita Metalúrgica	50 - 55	0 - 15	5 - 30	0 - 6
Bauxita para Cimento	45 - 55	< 6	20 - 30	3
Bauxita para Abrasivos	> 55	< 5	< 6	> 2,5
Bauxita para Produtos Químicos	55 - 60	5 - 18	< 2	0 - 6
Bauxita Refratária	59 - 61	1,5 - 5,5	< 2	< 2,5

No mundo, as principais reservas de bauxitas estão localizadas na Austrália, China, Guiné, Brasil, Índia, Jamaica, Rússia, Cazaquistão, Arábia Saudita, Indonésia, Vietnam, Grécia, Guiné, Malásia, Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Irlanda, Ucrânia e Espanha. Atualmente, a China é o maior produtor de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo responsável por cerca de 56% do total mundial (USGS 2018).

### 5.1. Aplicações na indústria de refratários

A bauxita é um recurso mineral amplamente utilizado no mundo todo como fonte de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo o destino da produção dominado pela indústria do aço e outras ligas metálicas. Somente cerca de 5% de toda a bauxita produzida no mundo destina-se às indústrias de materiais não metálicos, atuando, principalmente, na produção de refratários aluminosos e materiais abrasivos (Hill & Sehnke 2006).

Na indústria de refratários, é usada para a produção de materiais aluminosos de diversos tipos, podendo ser submetida a diferentes processos de tratamento industrial conforme as especificações do produto. Normalmente, após a extração nos depósitos, a bauxita é triturada, lavada e submetida a processos de calcinação e sinterização para a remoção de impurezas e formação de agregados granulares ricos em alumínio. Segundo Krause (2014), a bauxita sinterizada para refratários aluminosos deve apresentar baixo conteúdo em álcalis ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ), alumina acima de 85%,  $\text{TiO}_2$  abaixo de 4% e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  abaixo de 2%.

Para a produção do aço e refratários de maior qualidade (de alta alumina), a bauxita é submetida a tratamento industrial clássico conhecido como Processo Bayer, que visa a obtenção de compostos sintéticos com maior pureza em alumina. Esses compostos podem experimentar outros processos posteriores (calcinação em temperaturas extremas, sinterização e eletrofusão) que, quando usados para a produção de refratários, produzem

materiais com teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  acima de 98% e que chegam a resistir temperaturas da ordem de 1800 °C (Krause 2014).

## 5.2. Ocorrência geológica e origem

A bauxita é uma rocha secundária, produto da alteração intempérica de rochas enriquecidas em minerais aluminosos (alteração supergênica), a partir de um mecanismo de remoção de compostos químicos mais móveis (eg.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  etc.) e enriquecimento em hidróxidos de alumínio como a alumina e o diásporo. Trata-se do mesmo processo que produz as argilas bauxíticas (seção anterior), porém a bauxita ocorre na forma consolidada em rocha, ao passo que essas argilas são agregados granulares naturais de tamanho muito reduzido e possuem menores concentrações de argilominerais refratários (grupo da caulinita).

Com relação à textura, esse recurso normalmente possui coloração amarronzada-avermelhada e ocorre na forma maciça, com aspecto terroso. Contudo, a depender das condições de alteração e do tipo de rocha original, pode assumir diferentes outras texturas: botrioidal, brechada, sacaroidal, vermiforme, vesicular, nodular etc. (Figura 15, Hill & Sehnke 2006).

Com relação à morfologia e formas de ocorrência, os depósitos de bauxita podem apresentar diversas peculiaridades que dependem de fatores como o tipo de rocha fonte, as condições do relevo e o aporte de água disponível. Abaixo, alguns detalhes de importantes depósitos de bauxita no mundo, formados a partir de diferentes tipos de rochas (Hill & Sehnke 2006):

- i. Bauxitas da Península de York (Austrália): derivam da alteração de arenitos caulinitíticos e ocorrem como coberturas superficiais sobre as rochas frescas e saprolitizadas;
- ii. Bauxitas da Índia: derivam da alteração de basaltos e ocorrem como extensas coberturas superficiais de espessuras variadas;
- iii. Bauxitas da Jamaica (Província Caribenha): ocorrem como material de preenchimento em canais, fraturas e bolsões em rochas carbonáticas que produzem relevo cárstico. Nesse caso, as bauxitas estão encaixadas em calcários e dolomitos, mas sua gênese é atribuída, principalmente, à alteração de cinzas vulcânicas e argilas depositadas nessas cavidades;
- iv. Bauxitas do Arkansas (Estado Norte Americano): derivam de nefelina-sienitos e ocorrem em depósitos residuais superficiais ou como bauxitas detríticas, transportadas e depositadas em camadas intercaladas com outras rochas sedimentares.

## 5.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

No Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010 (DNPM 2011), os dados estatísticos referentes aos depósitos de bauxita estão divididos em dois tipos conforme sua aplicação industrial: i) bauxita metalúrgica; e ii) bauxita refratária.

Com relação à bauxita refratária, Minas Gerais é o estado que mais se destaca no cenário nacional, seja na abundância de reservas, seja no volume da produção. Por outro lado, em relação à bauxita metalúrgica, os depósitos do estado do Pará detêm a esmagadora maioria do volume total das reservas de bauxita conhecidas no Brasil, sendo um depósito de importância a nível mundial (Hill & Sehnke 2006).

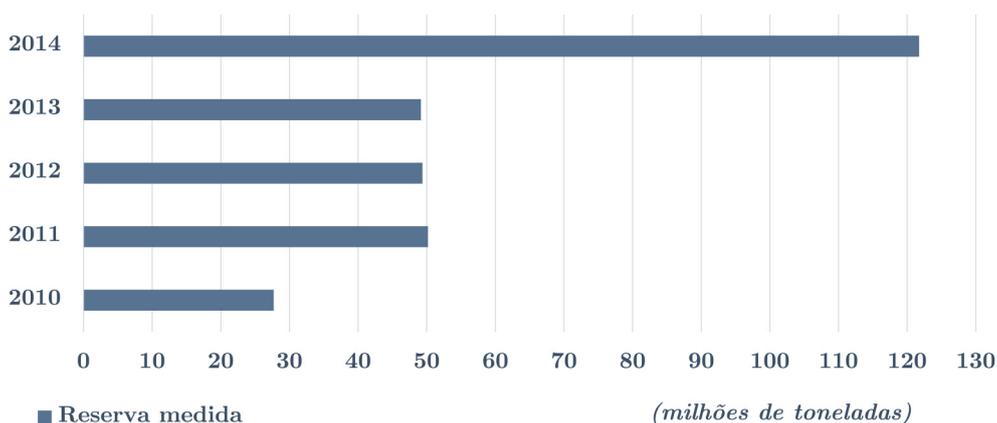
Os depósitos de bauxita refratária em Minas Gerais estão localizados nas proximidades dos seguintes municípios: *Andradas, Caldas, Carangola, Caratinga, Cataguases, Chácara, Divino, Espera Feliz, Itamarati de Minas, Itamonte, Mercês, Miradouro, Miráí, Muriaé, Passa Quatro, Poços de Caldas, São Francisco do Glória, São João Nepomuceno, São José da Safira, Silveirânia e Simonésia* (DNPM 2011).

Dentre esses, tanto em relação ao volume das reservas quanto em relação ao volume de material lavrado, destacam-se os depósitos da região de Poços de Caldas e Andradas (Figura 11), bem como os de Miráí, Carangola e Simonésia.

## 5.5. Aspectos econômicos em Minas Gerais

### 5.5.1. Dados de reservas

Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), nesse período, o estado de Minas Gerais registrou um considerável aumento no volume de reservas medidas de argilas refratárias, passando de aproximadamente 28 milhões de toneladas em 2010, para cerca de 122 milhões em 2014. Entre os anos de 2011 e 2013, o volume se manteve praticamente o mesmo (ca. 50 milhões de toneladas) e aumentou consideravelmente (mais de 40%) em 2014 (Figura 16). Uma das razões desse aumento brusco pode ser atribuída ao aumento das pesquisas de cálculo de reservas em razão ao aumento de minas no estado entre 2013 (16) e 2014 (19).

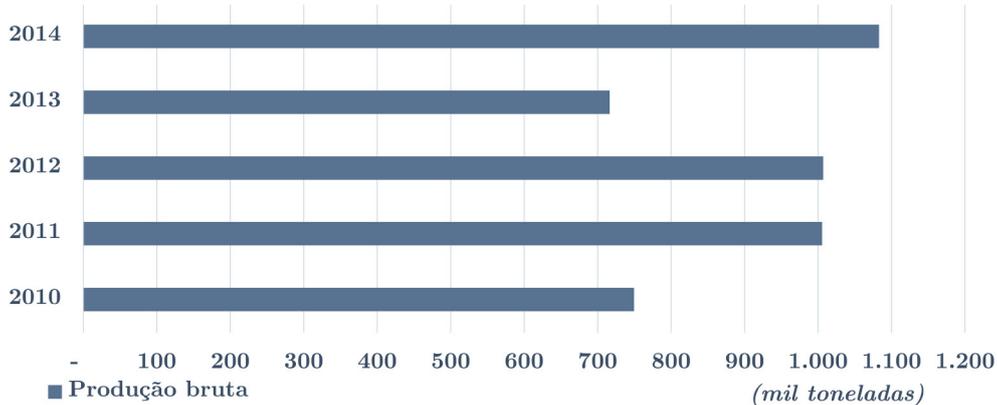


**Figura 16.** Evolução do volume das reservas medidas de bauxita refratária em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

### 5.5.2. Dados de produção

Dentre as 19 minas de bauxitas refratárias registradas em Minas Gerais em 2014, todas exercem a lavra em cava a céu aberto. Dessas, 2 minas foram consideradas de médio porte (produção bruta entre 100 mil e 1,0 milhão toneladas), 2 de pequeno porte (10 mil e 100 mil

toneladas) e as 15 restantes de microporte, com produção inferior a 10 mil toneladas (Dalla Costa *et al.* 2017). No ano de 2014 as minas atingiram uma produção bruta de aproximadamente 1,1 milhão de toneladas, um valor consideravelmente maior do total produzido no ano anterior (ca. 720 mil toneladas em 2013). Nesse caso, o valor registrado em 2013 representa a menor produção entre o período de 2010 a 2014 (Figura 17). Nos anos anteriores, a produção bruta de argilas refratárias no estado também flutuou, passando de aproximadamente 750 mil toneladas em 2010 para cerca de 1 milhão de toneladas em 2011 e 2012 (Figura 17).



**Figura 17.** Evolução da produção bruta de bauxita refratária em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014.  
Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017), a empresa que mais se destacou com a produção de bauxitas refratárias no estado em 2014 foi a Mineração Caldense Ltda. Empresas como a CBA - Companhia Brasileira de Alumínio e a MSM – Mineração Serra da Moeda Ltda também se destacaram com relação ao montante de bauxita produzido, porém o anuário indica que nesses dois casos as empresas extraem bauxitas metalúrgicas destinadas para as indústrias do aço.

## 6. CIANITA E MINERAIS POLIMORFOS

O termo *cianita* deriva da palavra grega *kyanos*, que significa *azul*, e faz referência a um mineral normalmente dessa cor (Figura 18), mas que também pode ser incolor ou com tons esverdeados. É caracterizado por formar cristais alongados e laminados, podendo também ocorrer na forma de agregados cristalinos. A cianita se destaca no mercado industrial por possuir alta resistência térmica, ser quimicamente inerte e insolúvel em ácidos (Schobbenhaus 1997, Klein & Dutrow 2012).



**Figura 18.** Detalhe de cristal bem formado de cianita, um tipo de aluminossilicato com aplicações importantes como recurso mineral refratário. Foto: Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

A cianita é um aluminossilicato anidro ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) constituído por 63,2% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 36,8% de  $\text{SiO}_2$ . Trata-se de um mineral peculiar que detém a mesma composição química observada em outros dois aluminossilicatos anidros (andaluzita e sillimanita) e que, juntos, formam o grupo dos polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , todos comumente utilizados como recursos minerais industriais. Entretanto, apesar da semelhança química, esses minerais apresentam diferenças quanto ao modo de ocorrência, estrutura cristalina e algumas propriedades físicas diagnósticas (Tabela 6, Sweet *et al.* 2006).

Os minerais polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  são considerados comuns e estão amplamente distribuídos pelo planeta, principalmente como componentes acessórios em rochas metamórficas. Entretanto, em algumas situações excepcionais, eles podem ocorrer em concentrações anômalas e formarem depósitos de interesse, passíveis de serem explorados para uso industrial. Nesse caso, por apresentarem elevada resistência térmica (Tabela 6), o destino da produção é praticamente dominado pelo mercado de materiais refratários (Sweet *et al.* 2006). Vale ressaltar que, quando ocorrem em cristais bem formados, esses minerais também podem ser explorados para fins gemológicos.

No mundo, as principais reservas de cianita, andaluzita ou sillimanita estão localizadas nos Estados Unidos (cianita), Índia (cianita e sillimanita), Peru (andaluzita) e África do Sul

(andaluzita), sendo esses países também os maiores produtores dos respectivos minerais polimorfos (USGS 2018).

**Tabela 6.** Propriedades físicas e químicas da cianita e seus polimorfos (andaluzita e sillimanita). Fonte: Sweet *et al.* (2006).

	Cianita	Andaluzita	Sillimanita
Fórmula química	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>
Composição	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 63,2%; SiO <sub>2</sub> : 36,8%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 63,2%; SiO <sub>2</sub> : 36,8%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 63,2%; SiO <sub>2</sub> : 36,8%
Classe mineral	Aluminossilicato	Aluminossilicato	Aluminossilicato
Sistema cristalino	Triclínico	Ortorrômico	Ortorrômico
Cor do cristal	Azul, Verde, Cinza, Branco.	Amarelo, Marrom, Verde, Vermelho, Branco	Marrom, Verde, Cinza, Branco, Incolor
Clivagem	Perfeita em uma direção	Boa em duas direções	Boa em uma direção
Peso Específico	3,56 – 3,66	3,16 – 3,20	3,23
Dureza	5-7	7,5	6-7
Faixa de temperatura até onde é estável	1.100°C – 1.480 °C	1.450°C – 1.500 °C	1.550°C – 1.650 °C

No Brasil predomina a ocorrência de cianita, com registros de exploração na forma de lavras e garimpos em alguns depósitos localizados nos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás (Schobbenhaus 1997). Entretanto, devido à inexistência de dados estatísticos referentes a esses recursos no mais recente Sumário Mineral Brasileiro (Lima & Neves 2016) pode-se concluir que a produção desse recurso no país atualmente é modesta, ou inexistente.

## 6.1. Aplicações na indústria de refratários

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmicas (ABCERAM 2018), os polimorfos de Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> são basicamente usados para a fabricação de refratários aluminosos, bem como para a produção de alguns tipos de porcelanas. Apesar de exibirem diferentes características físicas, há uma certa confusão com relação a terminologia utilizada no mercado comercial, sendo relativamente comum o uso do termo *cianita* ou *sillimanita* para fazer referência aos três minerais do grupo.

A cianita, a sillimanita e a andaluzita são recursos utilizados para o fabrico de refratários de alta alumina (45% < Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 98%) que possuem diversas aplicações nas indústrias siderúrgicas, vidreiras, cimenteiras e cerâmicas. Dentre as aplicações, esses recursos são mais usados para o fabrico de materiais de revestimento em fornos de esmaltação e rotativos, bem como agente regenerador de refratários desgastados em função do uso ao longo dos anos (Schobbenhaus 1997).

Por serem naturalmente ricos em alumínio (Tabela 6), os minerais polimorfos podem utilizados tanto na forma natural, bem como fonte para a produção da mulita, um aluminossilicato sintético (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>) obtido a partir da calcinação desses minerais em temperaturas acima dos valores de estabilidade indicados na Tabela 6.

Um produto refratário de alta alumina tipicamente produzido com andaluzita, cianita ou sillimanita possui capacidade de resistir temperaturas de até 1590 °C e detém a seguinte composição química: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (55-65%); SiO<sub>2</sub> (33-43%); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<1,5%) e Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O (<1%; Krause 2014).

## 6.2. Ocorrência geológica e origem

Os minerais polimorfos de  $Al_2SiO_5$  são tipicamente metamórficos e podem ocorrer a partir da transformação de vários tipos de rochas, desde que suficientemente enriquecidas em alumínio e submetidas às condições de temperatura e pressão necessárias para estabilizar uma ou mais dessas fases minerais. As relações de estabilidade entre os três polimorfos foram definidas experimentalmente e, em linhas gerais, tem-se a seguinte associação (Klein & Dutrow 2012): (i) a cianita tende a ocorrer em áreas sujeitas a metamorfismo regional de alta pressão; (ii) a andaluzita predomina em áreas afetadas por metamorfismo de contato, estabilizando-se em pressões mais baixas; e (iii) a sillimanita é mais comum em rochas metamórficas formadas em metamorfismo regional associado a altas temperaturas.

Todos os três tipos são mais comumente encontrados em xistos aluminosos, podendo também ocorrer em quartzitos, gnaisses e filitos, bem como em pegmatitos de corpos graníticos, ou em veios em zonas de falhas. Além disso, esses minerais também podem ocorrer como sedimentos detríticos resultantes da desagregação dessas rochas e depositados em bacias sedimentares de idade recente. Dentre as espécies minerais que mais aparecem associadas com o trio cianita-andaluzita-sillimanita, destacam-se o rutilo, a estauroлита, granadas, hornblenda, micas e o coríndon (Schobbenhaus 1997).

## 6.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

Devido ao fato de grande parte do substrato geológico de Minas Gerais ser constituído por rochas metamórficas (Pinto & Silva 2014), o potencial para ocorrências de cianita e demais polimorfos é grande. Esse fato pode ser confirmado com base nos dados do Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010 (DNPM 2011), que aponta o estado como sendo o detentor das maiores reservas de cianita do Brasil, seguido pelos estados da Paraíba e de Goiás. De acordo com essa fonte, as reservas mineiras mais importantes estão localizadas nas proximidades dos seguintes municípios: *Andradas*, *Arantina* (sul de Minas) e *Itamarandiba* (nordeste de Minas).

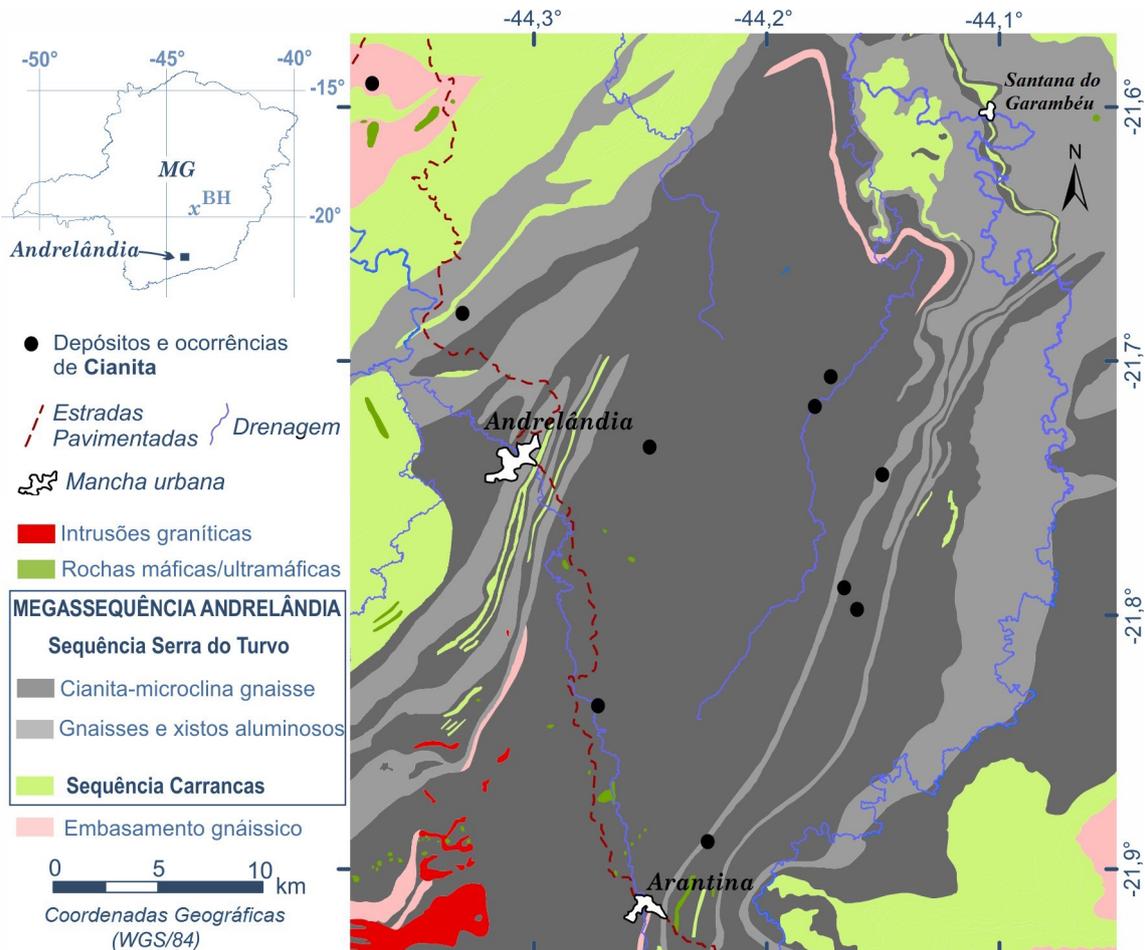
### 6.3.1. Depósitos de cianita na região sul de Minas

Nessa região, a cianita está relacionada às rochas metamórficas da Megassequência Andrelândia e ocorre em mica xistos, veios de quartzo e depósitos residuais, coluviais e aluviais formados a partir dos sedimentos provenientes da erosão dessas fontes.

A Megassequência Andrelândia (Figura 19) é sucessão metassedimentar de idade neoproterozoica (1,0 - 0,6 Ga), contendo também rochas meta-ígneas máficas associadas. Essa unidade inclui várias associações de litofácies que representam diferentes tipos de rochas submetidas a metamorfismo em fácies anfíbolito ou granulito. Nessa unidade, a cianita é frequente em xistos e gnaisses associados às sucessões sedimentares distais da sequência deposicional Serra do Turvo (Figura 19), que compreende espessos pacotes de material pelítico interpretados como depósitos turbidíticos e camadas argilosas formadas sobre o fundo oceânico da bacia Andrelândia (Paciullo *et al.* 2003).

Nessa região, a cianita comumente ocorre em associação com rutilo e os depósitos mais relevantes são detríticos, encontrados em zonas de colúvio ou solos residuais. Devido à facilidade de extração, esses depósitos eram comumente explorados em épocas passadas a partir de lavras garimpeiras esporádicas.

Conforme informações do banco de dados da Agência Nacional de Mineração (SIGMINE 2018), a região sul de Minas não apresenta registros de lavra de cianita em atividade atual.



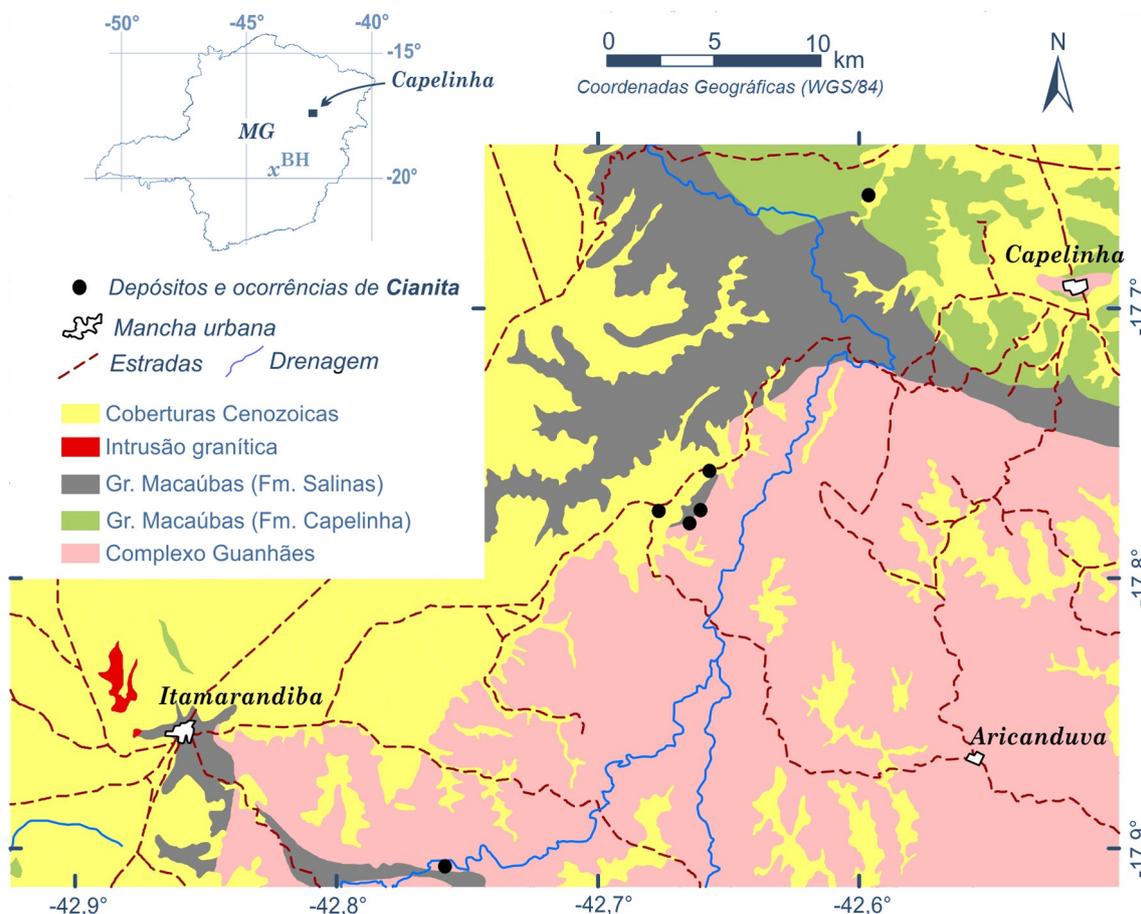
**Figura 19.** Mapa geológico esquemático da região de região de Andrelândia, sul de Minas Gerais, onde ocorrem depósitos de cianita associados aos xistos e gnaisses aluminosos da sequência Serra do Turvo, Megassequência Andrelândia. Fonte: Adaptado do mapa geológico de *Paciullo et al. (2003)*.

### 6.3.2. Depósitos de cianita na região nordeste de Minas Gerais

Nessa região, ocorrem as reservas mais importantes de cianita de Minas Gerais, as quais estão associadas aos mica xistos do Grupo Macaúbas, uma unidade extensa, com ampla representação em área, que recobre boa parte do nordeste do estado, estendendo-se também para a porção sul-sudeste da Bahia (*Schobbenhaus 1997*).

*Baars et al. (1997)* descrevem as rochas do Grupo Macaúbas na região de Capelinha e Itamarandiba (Figura 20) como quartzo-mica xistos e mica xistos, localmente a granada, estauroлита e/ou cianita, bandados ou não, contendo intercalações espessas de camadas de grafita-cianita xisto. Tais rochas pertencem à Formação Salinas que, atualmente, é

interpretada como uma sucessão sedimentar neoproterozoica constituída por grauvas, arenitos, pelitos e conglomerados depositados em uma bacia sin-orogênica, desenvolvida entre cerca de 548 a 520 Ma e posteriormente metamorfozada em condições de fácies xisto-verde a anfibolito (Alkmim *et al.* 2017 e referências internas).



**Figura 20.** Mapa geológico esquemático da região de região entre Itamarandiba e Capelinha, nordeste de Minas Gerais, onde ocorrem depósitos de cianita majoritariamente associados aos xistos aluminosos da Formação Salinas, Grupo Macaúbas. Fonte: Adaptado do mapa geológico de Baars *et al.* (2012).

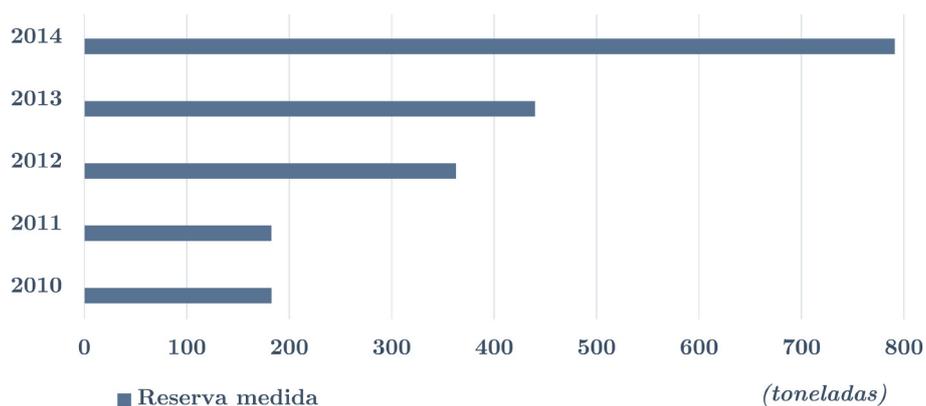
Depósitos importantes de cianita foram registrados em uma faixa de direção aproximadamente NE-SW, entre as cidades de Itamarandiba e Capelinha (Figura 20). Trata-se de cianita de coloração cinza clara a escura que ocorre em agregados centimétricos a decimétricos, contendo cristais com até 10 cm de comprimento. A concentração do material no nível xistoso é estimada como variável entre 5 e 40%. Subordinadamente, também existem registros de bolsões mineralizados contendo cerca de 70% de cianita (Baars *et al.* 1997).

As atividades de lavra de cianita na região são registradas há tempos e ocorrem por meio de atividades garimpeiras esporádicas. Por algum tempo, a empresa Magnesita S.A. extraiu a cianita em uma mina a sudoeste de Itamarandiba, mas as atividades foram encerradas em 2015 (Agência Nacional de Mineração - SIGMINE 2018). Segundo o banco de dados dessa fonte, atualmente a região não apresenta registros de atividade minerária.

## 6.4. Aspectos econômicos em Minas Gerais

### 6.4.1. Dados de reservas

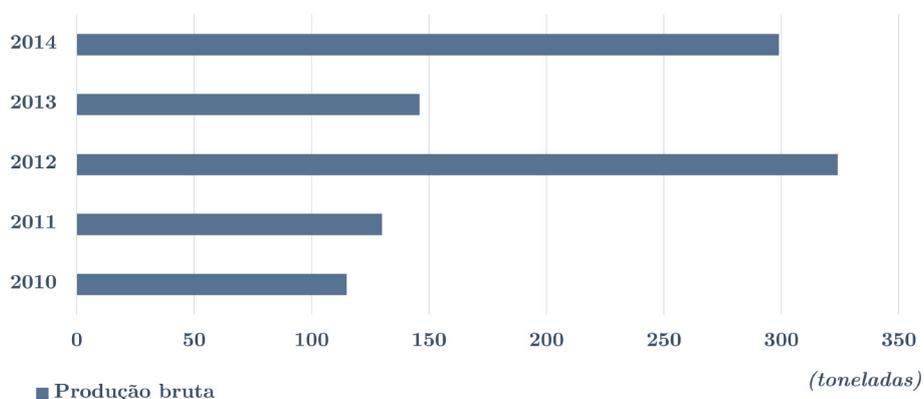
Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), nesse período, o estado de Minas Gerais registrou um considerável aumento no volume de reservas medidas de cianita, passando de aproximadamente 180 mil toneladas em 2010, para cerca de 790 mil toneladas em 2014. O aumento desse volume se deu a partir de 2012, quando o estado encerrou o ano com registro de cerca de 360 mil toneladas, com aumento gradual em 2013 (ca. 440 mil toneladas) e aumento brusco em 2014 (Figura 21). O Anuário Mineral Estadual não indica a razão desse aumento.



**Figura 21.** Evolução do volume das reservas medidas de cianita e outros minerais refratários em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

### 6.4.2. Dados de produção

Apesar de ser considerado o estado com o maior volume de reservas de cianita do Brasil (DNPM 2011), não há registros de lavra oficial atual em Minas Gerais (Agência Nacional de Mineração (SIGMINE 2018). Entretanto, o Anuário Mineral Estadual – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), indica que, nesse período, a empresa Magnesita S.A. extraía esse recurso mineral na região nordeste do estado. Essa mina era de cava a céu aberto e considerada de microporte, tendo em vista que a produção bruta anual sempre foi abaixo de 10 mil toneladas entre 2010 a 2014 (Figura 22).



**Figura 22.** Evolução da produção bruta de cianita em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

## 7. CROMITA

O termo *cromita* é genérico e pode ser usado tanto para fazer referência ao mineral cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , Figura 23) quanto para a rocha usada como minério de cromo, que detém elevada concentração de cromita (Papp & Lipin 2006).



**Figura 23.** Detalhe de cristal de cromita, mineral comumente utilizado pela indústria de materiais refratários. Foto: Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

O mineral cromita é um tipo de óxido que pertence ao grupo dos espinélios e representa o termo final, mais enriquecido em ferro, dos espinélios de cromo que se cristalizam em solução sólida com a magnésio-cromita ( $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ). Dessa forma, a cromita pura é rara na natureza e normalmente apresenta alguma quantidade de magnésio na estrutura mineral. Em relação aos aspectos físicos, a cromita é geralmente maciça, podendo ser granular ou compacta, de coloração preto-ferro a preto-castanho, dureza 5,5 e comumente é diagnosticada pelo brilho submetálico e pela cor de alteração verde brilhante (Figura 23, Klein & Dutrow 2012).

A ocorrência da cromita está relacionada com rochas magmáticas ultrabásicas, tais como peridotitos e dunitos, podendo também ser encontrada nos serpentinitos que delas derivam. A cromita é, portanto, um mineral ígneo produto da cristalização de magmas primitivos e é comum em depósitos máficos-ultramáficos, tais como o complexo ígneo de Bushveld (África do Sul) e o grande dique do Zimbábue (Papp & Lipin 2006, Klein & Dutrow 2012). Outras fontes importantes da cromita ocorrem em complexos ofiolíticos, ou na forma secundária, em depósitos sedimentares ou lateríticos, produtos da desagregação física ou química das rochas ultrabásicas.

No mundo, as principais reservas de cromita estão localizadas na África do Sul (ca. 98%) e no Canadá (ca. 2%). Atualmente, a África do sul é o maior produtor de compostos químicos com cromo, sendo responsável por cerca de 48% do total produzido no ano de 2017 (USGS 2018).

A cromita é um recurso mineral abordado em um capítulo à parte neste livro (“Cromo”) que contém informações detalhadas com relação aos aspectos genéticos, aplicações, depósitos em Minas Gerais e aspectos econômicos. Dessa forma, nessa seção esse mineral será tratado apenas quanto às suas aplicações nas indústrias de materiais refratários.

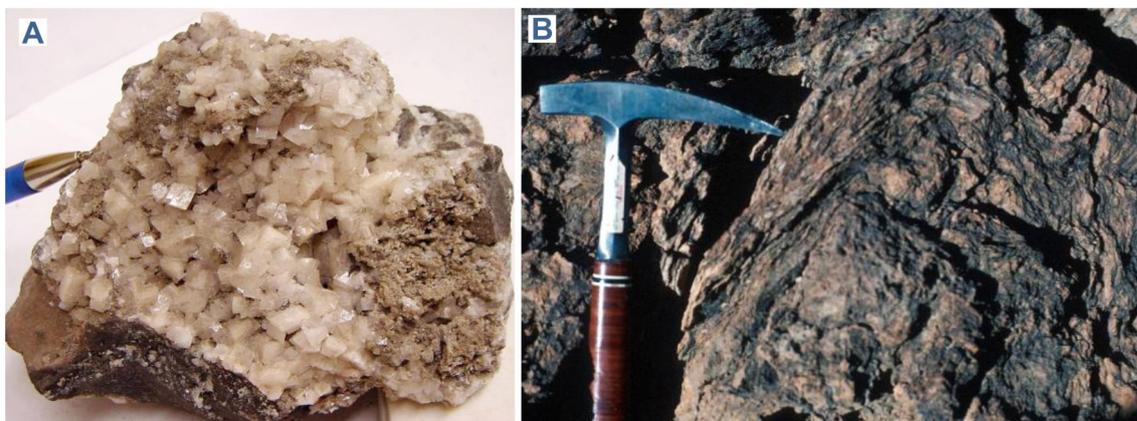
## 7.1. Aplicações na indústria de refratários

Na indústria refratária, a cromita é usada como fonte de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) para a confecção de materiais básicos, à base de magnésia ( $\text{MgO}$ ). Nesses produtos, ela promove aumento da resistência térmica (diminuição do coeficiente de dilatação e condutividade) e química, quando em contato com os resíduos silicosos (ácidos) de alto forno. A depender da quantidade de cromita adicionada, os materiais produzidos podem ser de dois tipos e suas características principais estão sintetizadas abaixo (Krause 2014):

- i. *Refratários magnesianos-cromíticos*: são aqueles que possuem teor de magnésia entre 40% e 80%. Resistem a temperaturas maiores do que 1600 °C e um material típico possui a seguinte composição (% em peso):  $\text{MgO}$  (48-70);  $\text{CaO}$  (0,4-3);  $\text{SiO}_2$  (0,3-3);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5-16);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4-15); e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (12-23). Entre outras aplicações, são utilizados na produção de painéis e vasos recipientes para tratamento do aço à vácuo, na confecção de fornos rotativos para fins diversos ou como regeneradores de fornos da indústria vidreira;
- ii. *Refratários cromíticos*: são aqueles mais enriquecidos em cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) e com menores valores de magnésia ( $\text{MgO}$ ). Tais produtos resistem a temperaturas da ordem de 1650 °C e um material convencional possui a seguinte composição (% em peso):  $\text{MgO}$  (15-32);  $\text{CaO}$  (0,3-1,5);  $\text{SiO}_2$  (2-3);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9-20);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10-28); e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (25-50). Os refratários de cromita são caracterizados pelo caráter inerte e elevada resistência à corrosão frente a produtos básicos (ricos em  $\text{MgO}$ ) e ácidos (ricos em  $\text{SiO}_2$ ). Entretanto, sua aplicação é restrita e cuidadosamente selecionada, uma vez que eles reagem mais facilmente quando em meio alcalino (rico em  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ ).

## 8. DOLOMITO

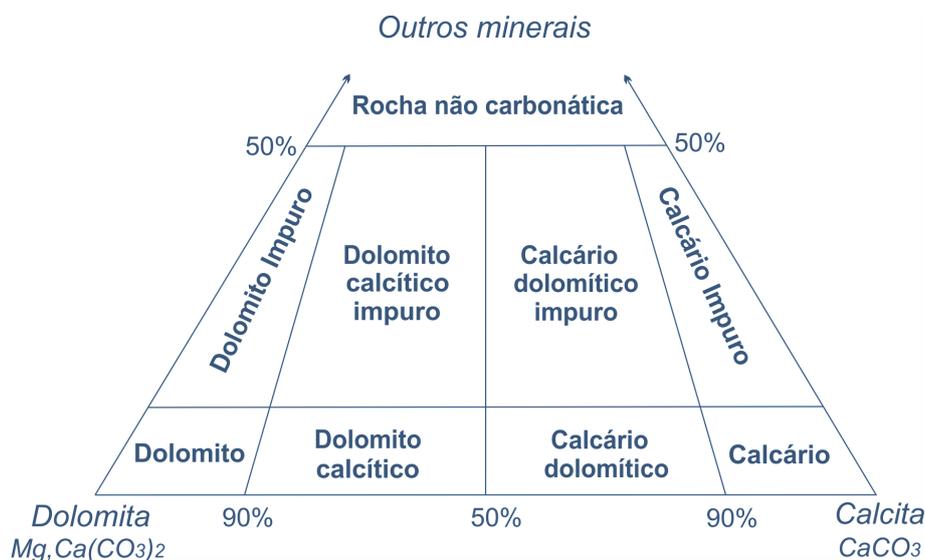
A dolomita é um mineral magnesiano pertencente à classe dos carbonatos  $[\text{Mg,Ca}(\text{CO}_3)_2]$ , com composição química teórica constituída por 30,4% de CaO, 21,7% de MgO e 47,9% de  $\text{CO}_2$ . Trata-se de um mineral comum, amplamente distribuído na crosta terrestre que, quando se cristaliza em cristais grandes e bem formados, normalmente apresenta-se em formato romboédrico com vértices curvos e detém uma cor rosa-carne característica (Figura 24A). Entretanto, sua ocorrência mais usual é como mineral maciço, microcristalino, constituinte de rochas sedimentares carbonáticas, (eg. dolomitos (Figura 24B) ou dos mármore, seus correspondentes metamórficos). Nessas rochas, a dolomita ocorre em diferentes quantidades e comumente está associada com a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), podendo conter também outros minerais carbonáticos (magnesita –  $\text{MgCO}_3$ , siderita –  $\text{FeCO}_3$ , ankerita –  $\text{Ca}_2\text{Mg,Fe}(\text{CO}_3)_4$  etc.) e vários outros minerais (eg. silicatos, óxidos e hidróxidos; Klein & Dutrow 2012).



**Figura 24. A)** Detalhe de cristais de dolomita bem formados, com formato romboédrico e coloração rosa-carne típica. **B)** A dolomita também pode ocorrer na forma maciça, microcristalina, como constituinte em rochas carbonáticas. Quando predomina em relação a outros minerais, essas rochas são conhecidas como dolomitos. Fotos: Acesso em 1/7/2018). Créditos: A) Andrew Silver. Departamento de Geologia; Universidade de Young, Utah. B) USGS Denver Library Photographic Collection.

Tendo em vista a diversidade mineralógica, as rochas carbonáticas podem variar bastante com relação à composição química, o que implica em consequências para a sua utilização como insumo mineral em alguns segmentos industriais, como o de refratários. Nesse sentido, é conveniente a utilização de um esquema de classificação que determina o tipo de rocha comercializada. Um exemplo dessa classificação é o diagrama encontrado em Freas *et al.* (2006) que determina o tipo de rocha carbonática com base na proporção entre calcita, dolomita e outros minerais (impurezas) presentes (Figura 25).

Além do conteúdo mineral, outra forma de classificar as rochas carbonáticas se baseia nos teores de magnésia (MgO) obtidos a partir de análises químicas (Tabela 7, Pettijohn 1957).



**Figura 25.** Diagrama de classificação das rochas carbonáticas com base no conteúdo mineralógico. Por serem mais magnesianos, os dolomitos e dolomitos calcíticos são as rochas mais visadas pelas indústrias de materiais refratários. Fonte: Freas *et al.* (2006).

**Tabela 7.** Classificação das rochas carbonáticas com base no teor de magnésia (MgO).  
Fonte: Pettijohn (1957).

NOME	MgO (% em peso)
Calcário Calcítico	0 a 1,1
Calcário Magnesiano	1,1 a 2,1
Calcário Dolomítico	2,1 a 10,8
Dolomito Calcítico	10,8 a 19,5
Dolomito	19,5 a 21,7

## 8.1. Aplicações na indústria de refratários

Como recurso mineral refratário, a dolomita extraída das rochas dolomíticas (Figura 24) é utilizada para a obtenção da doloma (MgO.CaO), um material sintético comumente usado para a confecção de refratários básicos aplicados, principalmente, em revestimento de fornos conversores e painéis siderúrgicos para a produção do aço. Esses produtos diferem dos refratários à base de magnésia (MgO) pelo fato de conterem certas quantidades de cal (CaO), um composto que diminui a porosidade do material e ajuda a promover uma maior estabilidade quando em contato com ligas metálicas fundidas. Além disso, a doloma também pode ser usada para a produção de cimentos e tijolos refratários, sendo esses últimos capazes de resistir a temperaturas que atingem valores até 1.400 °C (Krause 2014).

Com relação às especificações, a doloma usada nos produtos refratários deve conter entre 52 e 62% de MgO, 36 a 40% de CaO e menos do que 2% de SiO<sub>2</sub>. Um material refratário de doloma típico possui a seguinte composição (% em peso): MgO (38); CaO (59); SiO<sub>2</sub> (1,1); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,9); e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,4).

Diferentemente de outros compostos sintéticos como a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e a magnésia (MgO), a doloma é propensa à hidratação devido ao fato de conter a cal (CaO) livre. Dessa forma, para evitar a formação da cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>), a doloma deve ser manuseada em ambiente livre de umidade (Krause 2014).

## 8.2. Ocorrência geológica e origem

Apesar da semelhança física com a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e comumente ocorrer associada nas rochas, a gênese da dolomita não está atrelada aos mesmos processos geológicos de formação desse mineral. Enquanto a calcita resulta de diferentes processos genéticos primários (precipitação química em ambientes marinhos, ação biogênica, hidrotermal, ou até mesmo magmática – eg. carbonatitos), a grande maioria da dolomita existente possui origem secundária, sendo resultado da alteração de sedimentos carbonáticos pela ação de fluidos hipersalinos em condições físico-químicas específicas (Freas *et al.* 2006). Vale ressaltar que, além desse processo, importantes depósitos de dolomita também podem se formar a partir da alteração hidrotermal de rochas carbonáticas. Nesses casos, ela comumente está relacionada com mineralizações de sulfetos de chumbo e zinco e é lavrada como produto secundário em minas que exploram esses metais.

Os diversos tipos de rochas carbonáticas (Figura 25) ocorrem em diferentes partes do mundo e não estão restritos a um período específico na história geológica do planeta, podendo ser encontrados desde dolomitos Pré-Cambrianos (comumente deformados e metamorfizados) a até depósitos recentes localizados em diversas plataformas continentais ao redor do globo (Brandão & Schobbenhaus 1997).

Cada depósito de rocha carbonática possui peculiaridades com relação à composição e morfologia. Em linhas gerais, os dolomitos normalmente ocorrem na forma lenticular ou em espessos pacotes tabulares (Figura 26), por vezes intercalados com outras rochas sedimentares. Subordinadamente, essas rochas também podem ser encontradas como material de preenchimento em nódulos, bolsões e veios maciços incrustados dentro de espessos pacotes de calcário (Figura 26).

## 8.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

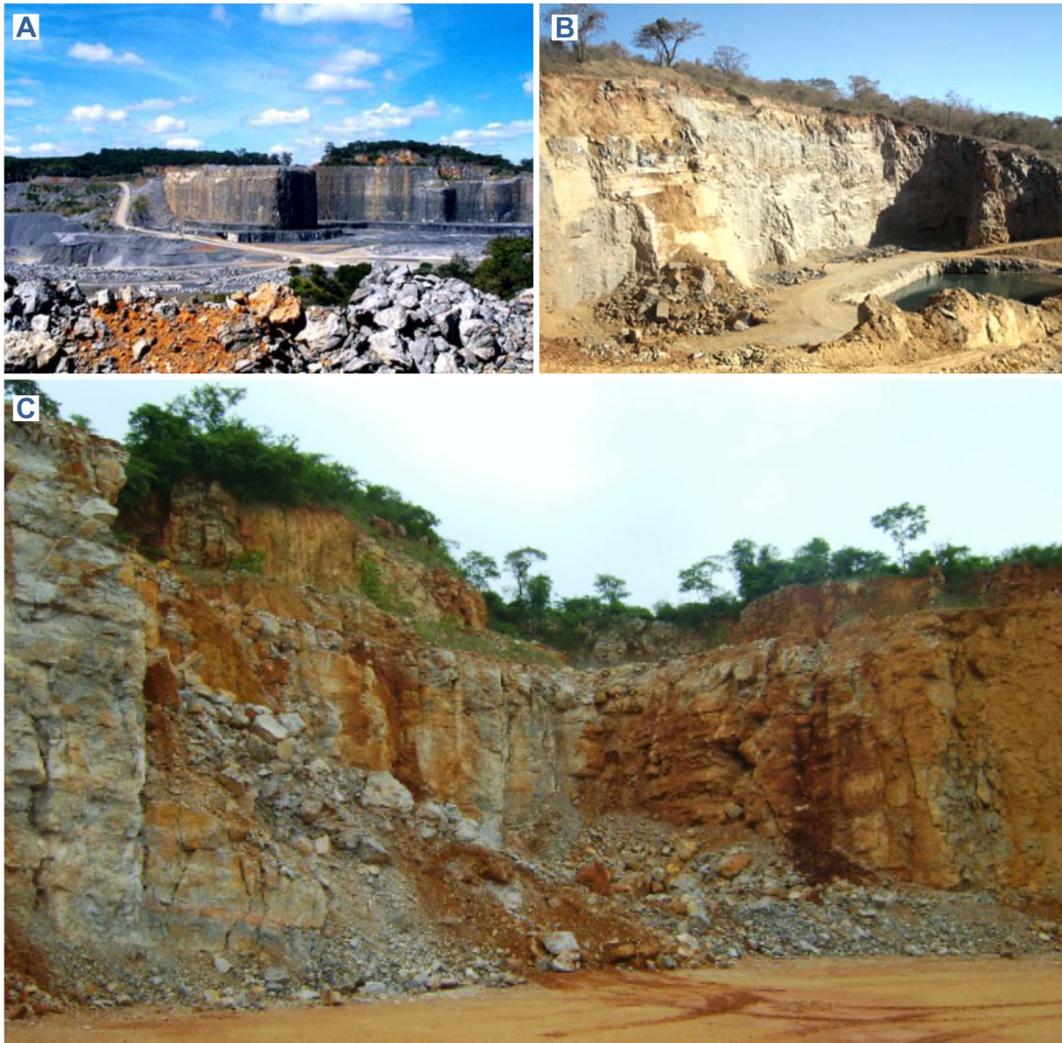
De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010 (DNPM 2011), Minas Gerais é um estado relevante na produção nacional de dolomito e detém importantes reservas nas proximidades dos seguintes municípios: *Arcos, Barão de Cocais, Belo Horizonte, Itabirito, Moema, Monjolos, Ouro Branco, Ouro Preto, Pains, Paracatu, Santa Bárbara, Santana de Pirapama e Unaí*. À título de exemplo, a Figura 26 mostra três exposições de pacotes dolomíticos espessos que foram lavrados em tempos passados, ou ainda estão em atividade.

Em razão da constituição geológica do substrato do estado, todos esses depósitos representam bacias sedimentares antigas (Pré-Cambrianas) e podem ser genericamente divididos em três grupos com base nas unidades geológicas que representam: i) dolomitos da Bacia Minas; ii) dolomitos da Bacia Bambuí; e iii) dolomitos da Bacia Vazante.

### 8.3.1. Dolomitos da Bacia Minas

Os dolomitos da região de Barão de Cocais, Itabirito, Ouro Branco, Ouro Preto e Santa Bárbara estão inseridos no contexto do Quadrilátero Ferrífero e ocorrem associados à Formação Gandarela, uma sequência sedimentar química depositada na era

Paleoproterozoica e relacionada ao contexto da bacia relacionada ao Supergrupo Minas (Grupo Itabira).



**Figura 26.** Exemplos de depósitos com exposição de espessos pacotes de rochas carbonáticas localizadas em diferentes regiões do estado de Minas Gerais e que são tradicionalmente reconhecidas pela produção de dolomito para fins industriais. **A)** Depósito na região de Arcos (Grupo Bambuí, [Ribeiro et al. 2008](#)). **B)** Depósito na região de Curvelo-Santana de Pirapama (Grupo Bambuí, [Costa et al. 2012](#)). **C)** Depósito na região de Vazante (Grupo Vazante, [Pinho et al. 2017](#)). Localização (Coordenadas Geográficas, WGS84): A) 20,322995°S, 45,592150°W; B) 18,716802°S, 44,420088°W; C) 17,941898°S, 46,862208°W.

A Formação Gandarela representa uma época em que o paleorrelevo da região experimentou uma invasão marinha que resultou na deposição de sedimentos responsáveis pela formação de pacotes de calcário e dolomitos, com intercalações de material argiloso e formações ferríferas dolomíticas. Posteriormente, com o passar do tempo geológico, essas rochas foram submetidas a eventos tectônicos relacionados com a formação de cadeia de montanhas e sofreram deformação e metamorfismo ([Alkmim & Teixeira 2017](#) e referências internas).

### 8.3.2. Dolomitos da Bacia Bambuí

O Grupo Bambuí é a unidade geológica que contém os mais extensos e espessos registros de rochas carbonáticas em Minas Gerais, ocupando boa parte da região central e

norte do estado, ao longo do vale do Rio São Francisco. Trata-se de uma sequência sedimentar constituída por rochas químicas (calcários e dolomitos) intercaladas com rochas clásticas (pelitos, siltitos, margas, arenitos e conglomerados subordinados) e interpretada como uma bacia de antepaís formada no período Ediacarano, em resposta ao soerguimento de cadeias montanhosas a seu redor (orógenos Brasília e Araçuaí). No Grupo Bambuí, as rochas carbonáticas estão associadas com as Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. A primeira corresponde a uma sequência sedimentar mais antiga, sendo basicamente constituída por calcários e dolomitos em associação com margas e pelitos depositados em ambiente marinho raso (plataformal). A Formação Lagoa do Jacaré, por sua vez, compreende rochas carbonáticas mais impuras, também associadas com margas e pelitos, formadas em ambiente plataformal de maior energia (Reis *et al.* 2017 e referências internas).

Dentre as reservas de rochas dolomíticas destacadas no Anuário Mineral Brasileiro (DNPM 2011), estão incluídos no Grupo Bambuí os depósitos das regiões de Arcos, Pains, Belo Horizonte, Monjolos, Moema, Santana do Pirapama e Unaí, sendo a maioria deles atribuídos à Formação Sete Lagoas.

### 8.3.3. Dolomitos da Bacia Vazante

A unidade geológica conhecida como Grupo Vazante está distribuída nas regiões noroeste e oeste de Minas Gerais e representa uma sequência sedimentar plataformal depositada no período Toniano. Trata-se de uma unidade basicamente constituída por intercalações de rochas argilosas e carbonáticas, as quais foram posteriormente deformadas e metamorfizadas, encontrando-se atualmente na forma de metapelitos e metacalcário ou meta-dolomitos. Em linhas gerais, o Grupo Vazante é subdividido em sete formações geológicas que representam diferentes ciclos de sedimentação na bacia (Valeriano 2017 e referências internas). Nesse contexto, as rochas dolomíticas ocorrem de forma mais pronunciada nas sequências mais jovens (formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário), ambas importantes economicamente não só pelo registros de espessos pacotes de meta-dolomitos, mas também por hospedar mineralizações de chumbo e zinco, tradicionalmente explorados nas proximidades das cidades de Paracatu e Vazante (Pinho *et al.* 2017; Valeriano 2017).

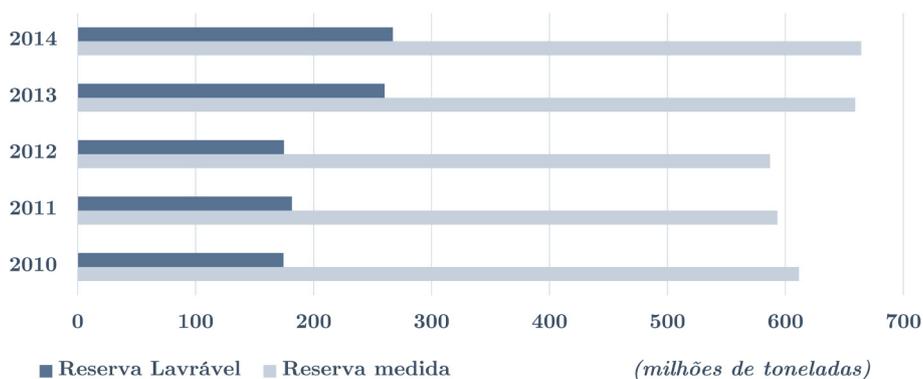
Dentre as reservas de rochas dolomíticas destacadas no Anuário Mineral Brasileiro (DNPM 2011), estão incluídos no Grupo Vazante somente os depósitos da região de Paracatu. Entretanto, de acordo com Pinho *et al.* (2017), na região noroeste de Minas Gerais existem diversas ocorrências de rochas dolomíticas (com teores de MgO variando entre 15 e 19%) associadas ao Grupo Vazante, principalmente entre os municípios de Coromandel e Vazante.

## 8.4. Aspectos econômicos em Minas Gerais

### 8.4.1. Dados de reservas

Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.* 2017), ao longo desse período, o estado registrou um aumento no volume de reservas

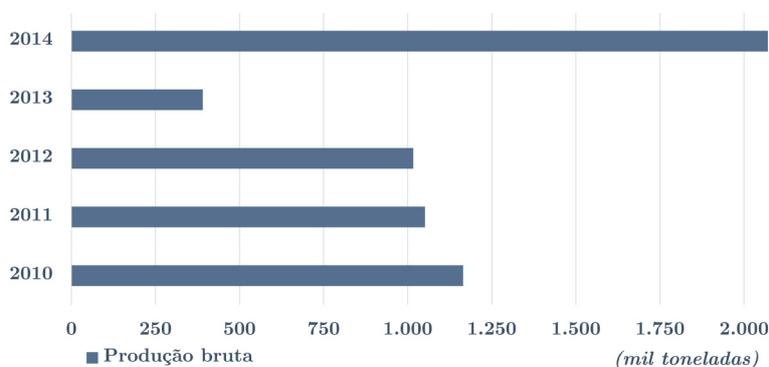
medidas de dolomitos, passando de aproximadamente 610 milhões de toneladas em 2010, para cerca de 665 milhões de toneladas em 2014. Entre 2010 e 2012, o volume das reservas medidas se manteve praticamente constante, com pequenas variações. Ao final de 2013 o volume foi da ordem de 660 milhões de toneladas e manteve-se constante em 2014 (Figura 27). Com relação às reservas lavráveis, o volume registrado foi consideravelmente menor do que as medidas, passando de cerca de 175 milhões de toneladas em 2010 para aproximadamente 270 milhões de toneladas em 2014 (Figura 27).



**Figura 27.** Evolução do volume das reservas medidas e lavráveis de dolomito registrados em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

#### 8.4.2. Dados de produção

No ano de 2014, Minas Gerais registrou apenas 3 minas específicas para a extração de dolomito, todas com lavra em cava a céu aberto. Duas delas foram consideradas de médio porte (produção bruta entre 100 mil e 1,0 milhão de toneladas), ao passo que uma mina foi considerada como de microporte, com produção anual inferior a 10 mil toneladas (Dalla Costa *et al.* 2017). Conforme essa mesma fonte, a produção bruta de dolomito no estado foi de aproximadamente 2,1 milhões de toneladas, um valor consideravelmente maior (cerca de cinco vezes) do total produzido no ano anterior (ca. 390 mil toneladas em 2013; Figura 28). Nos anos anteriores, foi observado um decréscimo gradual de 2010 (ca. 1,1 milhão de toneladas) para 2012 (ca. 1,0 milhão de toneladas; Figura 28). O Anuário Mineral Estadual não indica a razão para a queda brusca em 2013. Entretanto, ele informa que nesse ano o estado registrou apenas duas minas em atividade, sendo uma de médio porte e outra de microporte.



**Figura 28.** Evolução da produção bruta de dolomito em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa *et al.* 2017).

O Anuário Mineral Estadual (Dalla Costa *et al.* 2017) também indica que, em 2014, as empresas mineradoras que mais arrecadaram com a comercialização de dolomito no estado foram: Votorantim Metais S.A.; Votorantim Cimentos S.A.; Magnesita S.A.; e Bemil – Beneficiamento de Minérios.

## 9. GRAFITA

A grafita (C) é um mineral constituído essencialmente de carbono, caracterizado por formar cristais tabulares hexagonais que se empilham uns sobre os outros formando uma estrutura laminada. A ligação entre essas lâminas é fraca e implica em uma relativa facilidade no deslizamento de uma camada em relação a outra. A grafita é um mineral de baixa dureza (1 a 2) que apresenta clivagem perfeita ao longo dos planos basais, brilho metálico, por vezes terroso (grafita amorfa), sensação oleosa ao tato e coloração acinzentada (Figura 29). O nome deriva da palavra grega *graphein* (escrever), uma referência em alusão à facilidade da grafita em formar traços pretos quando riscada. Outras características notáveis desse mineral é o fato de ser excelente condutor de eletricidade e calor, além de apresentar ponto de fusão extremamente elevado, em aproximadamente 3.550 °C (Taylor Jr. 2006, Klein & Dutrow 2012).



**Figura 29.** Detalhe de grafita laminada e maciça incrustada em rocha. Foto: Andrew Silver. Brigham Young University (BYU) Geology Department. Acesso em 1/7/2018

A grafita é um mineral com ampla distribuição no planeta e, além da forma laminada, também pode ser encontrada como flocos dispersos em rochas xistosas (grafita tipo *flake*), podendo também ser encontrada associada a veios de quartzo. Sua ocorrência principal está associada a processos metassomáticos-hidrotermais ou a rochas sedimentares submetidas a metamorfismo de contato.

No mundo, as principais reservas de grafita estão localizadas na Turquia, Brasil, China, Tanzânia, Moçambique, Índia, México e Madagascar. Atualmente, a China é o maior produtor, sendo que foi responsável por cerca de 67% de toda a grafita produzida no mundo durante o ano de 2017 (USGS 2018).

A grafita é um recurso mineral abordado em um capítulo à parte neste livro (“Grafita”) que contém informações detalhadas com relação aos aspectos genéticos, aplicações, depósitos em Minas Gerais e aspectos econômicos. Dessa forma, nessa seção, esse mineral será tratado apenas quanto às suas aplicações nas indústrias de materiais refratários.

## 9.1. Aplicações na indústria de refratários

Devido ao seu alto ponto de fusão, a grafita é comumente usada como mineral industrial para a confecção de diversos produtos refratários básicos à base de carbono. Esses materiais são caracterizados por conter de 7 a 50% de carbono e são produzidos a partir de massas formadas por diferentes combinações entre grafita, magnésia (MgO), doloma (MgO.CaO) e cal (CaO). Além desses, a grafita também é usada para a confecção de alguns tipos de refratários especiais, à base de alumina ou sílica.

Nos produtos refratários, além de aumentar a resistência térmica, o carbono possui a função de reduzir a capacidade de absorção do material, impedindo, por exemplo, a infiltração de escórias e metais fundidos quando os refratários são usados em indústrias siderúrgicas e metalúrgicas. No entanto, os refratários contendo carbono, em relação a outros tipos, tendem a ser mais sensíveis à oxidação na presença de oxigênio livre na atmosfera. Nesse caso, para corrigir esse efeito, é necessário a aplicação de aditivos nesses tipos de refratários.

Dentre as várias aplicações, os refratários de carbono são largamente empregados pelas indústrias siderúrgicas para o revestimento de conversores, cadinhos, panelas e fornos refratários, além de produtos funcionais usados para a purga e fundição do aço (eg. hastes, válvulas, tampões etc.; Krause 2014).

## 10. MAGNESITA

O magnésio é o oitavo elemento químico mais abundante da crosta terrestre e o terceiro maior componente dissolvido na água do mar. Apesar de ser encontrado em mais de 60 minerais na natureza, somente alguns formam depósitos comerciais, economicamente exploráveis. Dentre esses, talvez o mais importante seja a magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), um mineral da classe dos carbonatos basicamente constituído por  $\text{MgO}$  (47,6%) e  $\text{CO}_2$  (52,4%) e que detém um amplo e diversificado uso industrial, em especial como matéria prima para a produção de materiais refratários (Kramer 2006).

Quando ocorre em cristais bem formados (Figura 30), a magnesita se cristaliza em formato romboédrico, de cor branca, cinza, amarela ou castanha, brilho vítreo e com variações entre espécies transparentes e translúcidas. Entretanto, sua ocorrência é mais frequente na forma maciça, como massas criptocristalinas de aspecto terroso. A magnesita apresenta dureza variável na escala de Mohs (3,5 a 5), densidade entre 3 e 3,2  $\text{g/cm}^3$  e é reativa na presença de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ , Klein & Dutrow 2012).



**Figura 30.** Detalhe de cristal de magnesita, um carbonato de magnésio comumente utilizado na indústria de materiais refratários. Escala em centímetros. Foto: Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

A magnesita é usada no mercado industrial para a produção de diversos compostos químicos derivados do óxido de magnésio (magnésia -  $\text{MgO}$ ), tais como a magnésia crua, a magnésia fundida, a magnésia cáustica, os hidróxidos de magnésia, os sulfatos de magnésia etc. Outros recursos também são usados para esse propósito e, dentre eles, destacam-se a água do mar e as salmouras.

No mundo, as principais reservas de magnesita estão localizadas na Rússia, Coréia do Norte, China, Brasil e Austrália. Atualmente, a China é o maior produtor mundial, sendo responsável por cerca de 67% de toda a magnesita produzida no ano de 2017 (USGS 2018).

De acordo com o mais recente Sumário Mineral Brasileiro– Ano 2015 (Lima & Neves 2016), grande parte das reservas brasileiras de magnesita está localizada na Serra das Éguas, na cidade de Brumado, localizada no sudoeste da Bahia. Esse estado é praticamente o único produtor do Brasil, sendo responsável por 99,9% de toda a magnesita produzida no país que, em 2014, atingiu cerca de 1,6 milhões de toneladas. As principais empresas produtoras no país são a Magnesita Mineração S.A., seguida das empresas Ibar - Nordeste S.A. e Xilolite S.A., todas com minas instaladas na cidade de Brumado-BA.

Em Minas Gerais não há registro de minas que extraem a magnesita. Da mesma forma, não há registros de ocorrências ou depósitos favoráveis. No banco de dados da Agência Nacional de Mineração (SIGMINE 2018), há apenas um título minerário requerido para magnesita no estado, o qual se encontra atualmente em fase de autorização de pesquisa e está localizado a noroeste da cidade de Botumirim (norte do estado), nos domínios dos ortognaisses associados ao Complexo Porteirinha, em contato com as rochas metassedimentares do Grupo Macaúbas (Pinto & Silva 2014).

Devido à ausência de depósitos favoráveis, nessa seção a magnesita será abordada apenas com relação às suas aplicações nas indústrias de materiais refratários e aspectos genéticos.

### 10.1. Aplicações na indústria de refratários

A magnesita é amplamente utilizada como fonte para a produção da magnésia (MgO), um pó branco sintético usado para a confecção de vários tipos de materiais refratários básicos. Para tanto, ela é submetida a um tratamento térmico (calcinação e sinterização) que provoca a instabilidade no mineral e eliminação de impurezas, como o CO<sub>2</sub>. Normalmente, as temperaturas excedem 1.450 °C e o produto obtido possui concentração de MgO entre 85 e 98% (Krause 2014).

Os refratários de magnésia podem variar com relação à composição, devido à presença de outros compostos, tais como sílica e óxidos de ferro, alumínio e cálcio. Esses componentes provêm de aditivos diversos adicionados nas massas refratárias e implicam na formação de diferentes tipos de materiais, cada um com características próprias. Esses produtos resistem a temperaturas acima de 1450 °C, possuem baixa condutividade térmica e apresentam boa resistência contra a ação corrosiva de escórias básicas derivadas de metais fundidos.

Dentre as aplicações dos refratários de magnésia destaca-se o uso em metalúrgicas, siderúrgicas, cimenteiras e vidreiras, em especial atuando como componente das massas de revestimento de paredes internas e abóbadas de caldeiras, fornos elétricos, fornos rotativos etc. (Krause 2014).

### 10.2. Ocorrência geológica e origem

A magnesita é encontrada com maior frequência associada às rochas carbonáticas e ultramáficas magnesianas, podendo ocorrer em depósitos com morfologia tabular (em camadas), lenticular ou como uma massa maciça preenchendo veios e bolsões

mineralizados. Em linhas gerais, a magnesita é um mineral que pode ocorrer de quatro maneiras (Queiroz 1997):

- i. Depósitos de substituição de rochas carbonáticas: resultam da alteração dos minerais carbonáticos pela magnesita, a partir da ação gradual e progressiva de fluidos hidrotermais. Nesses depósitos predomina a magnesita como cristal bem formado (Figura 30) e de tamanho normalmente entre 0,5 e 20 mm. No Brasil, existem registros de depósitos possivelmente desse tipo no estado do Ceará e na região de Santo Sé (Bahia);
- ii. Depósitos de substituição de rochas ultramáficas: resultam da alteração hidrotermal dos silicatos de magnésios (eg. olivina- variedade forsterita) que ocorrem em rochas como peridotitos e dunitos. Nesses depósitos, a magnesita normalmente ocorre na forma de lentes maciças e quase sempre são encontradas em associação com talco. No Brasil, não há registros de grandes reservas de magnesita desse tipo e os melhores exemplos são encontrados no Canadá, Estados Unidos, Grécia, Índia, entre outros;
- iii. Depósitos de preenchimento de veios: são formados por magnesita criptocristalina formada a partir da precipitação direta de soluções hidrotermais carbonáticas. Esses veios comumente ocorrem associados com tufo ou rochas ultramáficas e, além da forma venular, podem ser encontrados com morfologia *stockwork* ou nodular. Sob o ponto de vista econômico, a magnesita desse tipo normalmente é considerada de importância secundária;
- iv. Depósitos de bacias sedimentares: resultam da precipitação da magnesita durante a sedimentação em condições específicas. São relativamente comuns em bacias evaporíticas formadas em lagos salinos. Os depósitos ocorrem como camadas tabulares contínuas e, em geral, estão associados com rochas carbonáticas (dolomitos), ou com rochas clásticas e vulcânicas. Os maiores depósitos mundiais são desse tipo, inclusive as grandes reservas brasileiras localizadas nas proximidades do município de Brumado (BA). Nessa região, a magnesita ocorre em extensas camadas associadas com meta-dolomitos, quartzitos, formações ferríferas e rochas metabásicas, sendo o depósito atribuído a sequências vulcanossedimentares, possivelmente de idade arqueana, posteriormente submetidas a eventos tectônicos.

## 11. QUARTZO

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) corresponde ao composto químico mais abundante da crosta continental (ca. 74%), sendo constituinte fundamental dos silicatos, os principais minerais formadores das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A sílica pura pode ser encontrada naturalmente em alguns sólidos amorfos (vidros naturais - obsidiana, diatomito, opala, entre outros), ou nos minerais polimorfos do grupo da sílica (quartzo, tridimita, cristobalita, coesita e stishovita; Flörke *et al.* 2008).

Os polimorfos da sílica correspondem a diferentes tipos de minerais que possuem a mesma composição química ( $\text{SiO}_2$ ), porém com estrutura cristalina modificada. Tais minerais são estáveis a limites específicos de temperatura e pressão que, quando ultrapassados, provocam a transformação dos polimorfos para as fases correspondentes. Vale ressaltar que essa transformação ocorre no estado sólido sem, portanto, haver fusão do mineral.

Nas condições ambientes, a sílica ocorre na forma do quartzo-alfa, ou simplesmente *quartzo* (Figura 31), um mineral amplamente distribuído ao redor do planeta e que, por si só, compõe cerca de 12% de toda a sílica contida na crosta continental. Sem alterar os valores de pressão, o quartzo se torna instável acima de 573 °C e se transforma em uma outra fase denominada quartzo-beta. Este mineral, por sua vez, resiste a temperatura 870 °C, acima da qual se converte em tridimita, que é estável até o limite de 1470 °C. Acima desse valor, a tridimita se transforma em cristobalita, que é o mineral com a maior resistência térmica, sofrendo fusão a partir de 1728 °C (Klein & Dutrow 2012). Nesse caso, o fato de ter um ponto de fusão extremamente elevado faz da sílica um excelente recurso para a confecção de materiais refratários.



**Figura 31.** Detalhe de cristal de quartzo maciço e incolor, mineral que pode ser usado como fonte de sílica para o fabrico de tipos específicos de materiais refratários. Foto: Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

O quartzo é um mineral cujas variedades possuem nomes específicos, conforme o contexto genético ou características físicas (eg. sílex, chert, calcedônia, citrino, quartzo fumê, Morganita, ametista, calcedônia etc.). Dentre suas várias propriedades, o quartzo é caracterizado pela dureza elevada na escala de Mohs (7), fratura conchoidal, brilho vítreo, ausência de clivagem, *habitus* prismático (bipiramidal) quando ocorre como cristais bem formados (quartzo hialino) e o caráter inerte, à exceção de contato com ácido fluorídrico (HF). A depender do grau de pureza, pode apresentar diferentes cores, normalmente sendo as espécies incolores as que detêm as maiores quantidades de sílica (Klein & Dutrow 2012).

Com relação às formas de ocorrência, o quartzo provavelmente é o mineral mais versátil da natureza, podendo ser encontrado em diversos tipos de contextos geológicos. Os depósitos de interesse econômico normalmente ocorrem em veios hidrotermais, pegmatitos, quartzitos, arenitos, areias quartzosas naturais, cherts, granitoides e gnaisses graníticos e seixos de quartzo (Arcoverde & Schobbenhaus 1997).

Como mineral industrial, o quartzo possui inúmeras aplicações, normalmente atuando como fonte de sílica em diversos segmentos industriais (eg. refratários, vidro, cerâmicas tradicionais, materiais abrasivos, fundição, produtos óticos etc.). Nessas indústrias, ele é comercializado na forma de areia industrial, material granular sintético com elevada concentração em sílica (normalmente  $\text{SiO}_2 > 95\%$ ), obtido a partir do processamento do quartzo retirado dos depósitos naturais. Tais processos incluem trituração ou moagem, lavagem, separação do quartzo em relação a outras espécies minerais e peneiramento. Em razão desse último processo, além da composição, as areias industriais também são caracterizadas por conter grãos de quartzo com tamanho e forma conforme as especificações exigidas pelas indústrias.

No mundo, as reservas de quartzo usadas para a produção de areias industriais são abundantes e estão bem distribuídas. Atualmente, os Estados Unidos são os maiores produtores mundiais, sendo responsáveis por cerca de 50% de todas as areias industriais quartzosas produzidas em 2017 (USGS 2018).

As areias industriais derivadas do quartzo são recursos minerais essenciais para a produção do vidro e muito comuns em cerâmicas. Nesse caso, elas também são abordadas em um capítulo à parte neste livro (“Recursos minerais das cerâmicas e dos vidros”) que contém maiores informações com relação aos aspectos genéticos, aplicações, depósitos em Minas Gerais e aspectos econômicos. Dessa forma, nessa seção esse recurso mineral será tratado apenas quanto às suas aplicações nas indústrias de materiais refratários.

### 11.1. Aplicações na indústria de refratários

Devido ao fato de possuir um elevado ponto de fusão e dureza alta, bem como apresentar resistência química e ser um recurso abundante e relativamente barato, as areias quartzosas são comumente usadas pela indústria de refratários para a confecção de tijolos, mantas e placas usadas em fornos que suportam temperaturas de até 1.700 °C. Os fornos de queima do coque do petróleo, as superestruturas de tanques de fusão de vidro e as fornalhas do tipo *hot-blast* são exemplos de produtos confeccionados com tijolos refratários silicosos. Além dessas aplicações, as massas refratárias silicosas também podem ser usadas

para estruturar refratários monolíticos e promover reparos em refratários desgastados (Arcoverde & Schobbenhaus 1997, Krause 2014).

Os tijolos refratários de sílica são densos (baixa porosidade) e possuem teor de sílica acima de 93%, normalmente contendo entre 95 e 97% de  $\text{SiO}_2$ . Pelo fato de serem produzidos a partir de massas quartzosas submetidas a queima em temperaturas elevadas (>870 °C), esses materiais são essencialmente constituídos pelos polimorfos tridimita ou cristobalita. Além da resistência térmica em si, os refratários silicosos são caracterizados pela excelente resistência em relação ao choque térmico. (Krause 2014).

Além de refratários silicosos normais ( $\text{SiO}_2 > 93\%$ ), o quartzo também pode ser utilizado para a produção de refratários de sílica fundida, que são produtos de altíssima tecnologia e extrema pureza ( $\text{SiO}_2 > 99\%$ ). Nesse caso, o quartzo derivado das areias industriais é submetido a temperaturas extremamente altas, induzidas por processo elétrico (eletrofusão), e fundem a sílica, produzindo refratários extremamente silicosos de matriz vítrea e que chegam a atingir porosidade zero e resistência térmica da ordem de 1.700 °C. Nas indústrias de refratários, esses materiais são usados para revestimento e reparação de diversos tipos de fornos industriais (Krause 2014). Além disso, eles são comumente usados no fabrico de fibras de vidros para telecomunicações e para a produção de cerâmicas avançadas (Arcoverde & Schobbenhaus 1997). À título de exemplo, a Tabela 8 mostra a composição de um tijolo refratário silicoso convencional e um material de sílica fundida.

**Tabela 8.** Comparação entre a composição (% em peso), porosidade e a temperatura de resistência de dois tipos materiais refratários silicosos produzidos a partir do quartzo. Fonte: Krause (2014).

NOME	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	Porosidade	T (°C)	Uso
Refratário de sílica fundida	-	99,5	-	-	0	1700	Fibras de vidro refratárias; cerâmicas avançadas; revestimento e reparadores de fornos industriais
Refratário Silicoso	< 0,9	> 95	< 0,7	< 0,2	18-23	1610-1650	Forno para queima do coque do petróleo

## 12. ZIRCÃO

O zircão ( $ZrSiO_4$ , Figura 32) é o principal mineral fonte do zircônio (Zr), elemento de transição na tabela periódica (número atômico 40) que, entre outras propriedades, é caracterizado pela alta refratariedade (funde a  $3.578\text{ }^\circ\text{C}$ ) e resistência à corrosão. O zircônio representa o nono metal mais abundante na crosta terrestre, sendo mais comum do que elementos como o níquel (Ni), o cobre (Cu), o chumbo (Pb) e o zinco (Zn, Schobbenhaus & Santana 1997).



**Figura 32.** Detalhe de cristal de zircão macroscópico, um mineral que pode ser usado como fonte de zircônia ( $ZrO_2$ ) para o fabrico de tipos específicos de materiais refratários. Foto: Amostra de propriedade do laboratório petrográfico do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), gentilmente cedida para fotografia.

O zircão é um mineral da classe dos silicatos que pode ocorrer na forma de cristais prismáticos bipiramidais ou como grãos irregulares sem faces bem definidas. Comumente são acastanhados (Figura 32), havendo também espécies que apresentam cor cinza, verde, azul, vermelho ou até mesmo incolor. Normalmente são translúcidos e de brilho adamantino. O zircão possui densidade alta ( $4,68\text{ g/cm}^3$ ) e boa resistência à abrasão, com valor de dureza na escala de Mohs da ordem de 7,5.

Com relação à composição, a fórmula teórica do zircão compreende 67,2% de zircônia ( $ZrO_2$ ) e 32,8% de sílica ( $SiO_2$ ). Entretanto, na prática, a composição do zircão é variável, com presença de alguma concentração de óxidos de háfnio ( $HfO_2$ ), urânio ( $UO_2$ ), tório ( $ThO_2$ ) e ítrio ( $YO_2$ ) na estrutura mineral.

Vale ressaltar que a zircônia também pode ocorrer como um mineral denominado badeleíta ( $ZrO_2$ ), porém ela não é recorrente e raramente é explorada como mineral industrial. Com relação às aplicações, além da produção de materiais refratários, a zircônia também é amplamente utilizada no fabrico de esmaltes cerâmicos e produtos químicos, bem como para formar moldes nas indústrias de fundição ou como componente dos vidros em televisões e monitores de computador (Murphy & Frick 2006).

Além da importância industrial, vale ressaltar que o zircão é fundamental nos trabalhos de pesquisa geológica relacionados com estudo dos processos evolutivos de formação e evolução das rochas. Isso porque eles contêm elementos radioativos (principalmente o urânio) que podem ser quantificados e usados como traçadores geocronológicos.

No mundo, as principais reservas de zircão estão na Austrália, África do Sul, Índia, Moçambique, Estados Unidos, China, Indonésia e Senegal. Atualmente, a Austrália é o maior produtor mundial, sendo responsável por cerca de 38% de toda a zircônia produzida ao longo do ano de 2017. África do Sul (ca. 25%), China (ca. 9%) e Indonésia (ca.7%) foram os demais destaques da produção mundial (USGS 2018).

De acordo com o mais recente Sumário Mineral Brasileiro – Ano 2015 (Lima & Neves 2016), as reservas nacionais de zircão estão estimadas em 2,4 milhões de toneladas e distribuídas nos estados do Amazonas, Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo, Paraíba, Rio Grande do Sul e, de forma menos expressiva, Tocantins e Bahia. Ao longo do ano de 2014, o Brasil produziu cerca de 23 mil toneladas e as principais empresas produtoras foram: Cristal Mineração do Brasil Ltda, Mito Mineração Tocantins Ltda. e Indústrias Nucleares do Brasil S.A.

### 12.1. Aplicações na indústria de refratários

Como mineral industrial, o zircão extraído dos depósitos é processado fisicamente (submetido a lavagem, separação das outras fases minerais e peneiramento) a fim de produzir concentrados granulares em faixas granulométricas específicas, conforme as exigências do mercado.

Esses concentrados são utilizados como aditivos em massas que produzem refratários básicos à base de magnésia, sendo a quantidade adicionada variável até o limite de 15% do produto. Nesses produtos, a função do zircão é proporcionar maior resistência ao choque térmico, durabilidade e resistência quanto à ação corrosiva de escórias resultantes de metais fundidos. Dentre as aplicações principais, esses produtos são usados para o fabrico de fornos rotativos e de eixo em diversas indústrias, em especial das produtoras de material calcinado (cal, doloma, magnésia). O zircão também atua como componente das massas usadas como material regenerador em fornos na indústria vidreira (Krause 2014).

### 12.2. Ocorrência geológica e origem

O zircão é um mineral comum e sua gênese está associada a processos magmáticos, sendo um dos primeiros minerais a se cristalizar durante o resfriamento dos magmas silicosos. É mais comumente encontrado como mineral acessório (< 5%) em granitos, granodioritos, sienitos, monzonitos e nefelina sienito, raramente ocorrendo em concentrações suficientes para serem explorados. Quando ocorrem, os depósitos são classificados como primários.

Por ser mineral resistente e durável, o zircão também pode ser encontrado em rochas metamórficas (gnaisses, quartzitos, xistos, mármore etc.), normalmente apresentando bordas de sobrecrecimento devido às condições superimpostas. Da mesma forma, ele

resiste aos processos de erosão e intemperismo dessas rochas, assim como ao desgaste proporcionado pelos agentes de transporte dos grãos em superfície. Quando uma bacia sedimentar acumula um montante considerável de zircões detríticos depositados ao longo do tempo, formam-se os depósitos do tipo plácer ou secundários. Nesse caso, além do zircão, esses depósitos podem conter concentrações interessantes para outros minerais pesados como o rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), a cassiterita ( $\text{SnO}_2$ ), a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) etc. (Schobbenhaus & Santana 1997, Murphy & Frick 2006).

### 12.3. Depósitos importantes em Minas Gerais

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro – Ano 2010 (DNPM 2011), Minas Gerais possui algumas reservas de zircão na região sul do estado, nas proximidades dos seguintes municípios: *Caldas, Poços de Caldas, Pouso Alegre, São Gonçalo do Sapucaí e Silvianópolis*.

#### 12.3.1. Os depósitos da região de Caldas e Poços de Caldas

A região de Caldas e Poços de Caldas contém os depósitos mais importantes de zircão do estado, tendo sido palco de intensa extração na década de 80, mas com encerramento das atividades no início da década 90. Dentre outros fatores, o fim das lavras se deu pela forte recessão econômica que o Brasil passava no momento, bem como à queda do preço do zircão (Schobbenhaus & Santana 1997). Atualmente, essa região conta com 27 títulos minerários (Figura 33), todos em fase de concessão de lavra, mas sem nenhuma operação. Os títulos pertencem às empresas MINEGRAL - Companhia Brasileira de Minerações Indústria e Comércio e CBA - Companhia Brasileira de Alumínio, estando esta última em processo de reavaliação de uma jazida à noroeste da cidade de Caldas (Figura 33, SIGMINE 2018).



**Figura 33.** Imagem de satélite da região noroeste de Caldas-MG, onde predominam os registros de títulos minerários para depósitos de zircão no estado (polígonos em branco). Todos esses títulos estão em fase de concessão de lavra, mas não registram atividades minerárias até o momento. No polígono destacado pelo marcador amarelo, a empresa Companhia Brasileira de Alumínio está atualmente realizando estudos de reavaliação de jazida. Fonte: Google Earth e Agência Nacional de Mineração (SIGMINE 2018).

Os depósitos em questão estão associados ao magmatismo intrusivo, de idade cretácea, que resultou na formação do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (vide seção sobre as argilas refratárias, neste volume). Nessa região, os depósitos de zircão ocorrem associados ao caldasito, um material fibroso composto por uma mistura entre zircão (ca. 75%) e hidróxidos de zircônio e/ou badeleíta (ca. 25%, [Schobbenhaus & Santana 1997](#), [Tedeschi \*et al.\* 2015a](#)). Nesse caso, o caldasito se encontra associado com brechas hidrotermais ou preenchendo veios e sua origem é atribuída a um evento hidrotermal que ocorreu concomitantemente à cristalização do magma alcalino ([Tedeschi \*et al.\* 2015a](#) e referências internas).

### 12.3.2. Os depósitos da região entre Pouso Alegre e São Gonçalo do Sapucaí

Na literatura geológica, existem poucas informações acerca dessas reservas. No banco de dados da Agência Nacional da Mineração ([SIGMINE 2018](#)) não existem títulos minerários para exploração de zircão nessa região. De acordo com [Schobbenhaus & Santana \(1997\)](#), os depósitos existentes nessa área são secundários e ocorrem em aluviões do rio Sapucaí.

## 12.4. Aspectos econômicos

### 12.4.1. Dados de reserva

Com base no Anuário Mineral de Minas Gerais – Anos 2010 a 2014 ([Dalla Costa \*et al.\* 2017](#)), ao longo desse período, o estado não contabilizou reservas de zircão em 2010 e, a partir de 2011, mostrou os mesmos dados sobre reservas medidas: cerca de 54 mil toneladas. Da mesma forma, as reservas consideradas lavráveis também permaneceram constantes, com o valor de 1.530 toneladas.

### 12.4.2. Dados de produção

Minas Gerais não registra produção oficial de zircão atualmente. Segundo [Schobbenhaus & Santana \(1997\)](#), as lavras nos depósitos mais importantes do estado (região de Caldas e Poços de Caldas) se encerraram no início da década de 90.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. *Informações técnicas*. Acesso em 1/7/2018.
- Alkmim F.F., Kuchenbecker M., Reis H.L.S., Pedrosa-Soares A.C. 2017. The Araçuaí belt. In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (eds.). *São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing Co., p. 255-276. ISBN: 9783319017150, doi: 10.1007/978-3-319-01715-0\_14
- Alkmim F.F. & Teixeira W. 2017. The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (eds.). *São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing Co., p. 71-94. ISBN: 9783319017150, doi: 10.1007/978-3-319-01715-0\_5
- Arcoverde W.L. & Schobbenhaus C. 1997. Geologia do Quartzito. In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S. (coords.). *Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte C, p. 315-324.
- Baars F.J., Grossi Sad J.H., Fonseca E. 1997. Geologia da Folha Capelinha (SE.23-X-D-V), escala 1:100.000. In: Grossi-Sad J.D., Lobato, L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coords. e eds.). *Projeto Espinhaço em CD-ROM. (textos, mapas e anexos)*. Belo Horizonte, COMIG-Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 1373-1503.
- Baars F.J., Grossi Sad J.H., Motta E., Pedrosa-Soares A.C., Uhlein A. 2012. Mapa Geológico – Folha Capelinha (SE.23-X-D-V), escala 1:100.000. In: *Projeto criação de banco de dados geográfico para os mapas geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais*, CODEMIG-UFMG-CPMTC.
- BGS. 2006. *Mineral Planning Factsheet – Fireclay*. British Geological Survey, UK, 10 p.
- Brandão W. & Schobbenhaus C. 1997. Geologia dos Calcários e Dolomitos. In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S (coords.). *Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte C, p. 373-385.
- CIEMG – Centro Industrial Empresarial de Minas Gerais. 2018. *Cadastro Industrial de Minas Gerais*. Disponível em <https://www.cadastroindustrialmg.com.br:449/>. Acesso em 1/7/2018.
- Chaves M.L.S.C. & Dias C.H. 2017. Folha Nova Ponte (SE.23-Y-C-I), escala 1:100.000. In: *Projeto Triângulo Mineiro*, Belo Horizonte, CODEMIG-UFMG-CPMTC.
- Coelho C.V.S. 2014. *Avaliação do enriquecimento aluminoso em perfil laterítico desferruginizado na Chapada Sedimentar do Triângulo Mineiro e potencial econômico*. Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Rio Claro, São Paulo, Rio Claro, 58 p.
- Costa R.D., Knauer L.G., Prezotti F.P.S., Duarte F.T., Fonseca H.A.M. 2012. Geologia e Recursos Minerais da Folha Curvelo – SE.23-Z-A-V, Minas Gerais, escala 1:100.000. In: *Programa Geologia do Brasil*, Belo Horizonte, CPRM-UFMG, 50 p.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 2013. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. England, Mineralogical Society, 3ª ed, 498 p. ISBN: 9780903056274
- Dalla Costa M.M., Fernandes L., Duarte J.E.C., Recuero J.C. (coords.). 2017. *Anuário mineral estadual Minas Gerais. Anos base 2010 a 2014*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 133 p.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. 2011. *Anuário Mineral Brasileiro 2010*. Brasília, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 871 p. ISSN: 01009303
- Flörke O.W., Graetsch H.A., Brunk F., Benda L., Paschen S., Bergna H.E., Roberts W.O., Welsh W.A., Libanati C., Ettliger M., Kerner D., Maier M., Meon W., Schmoll R., Gies H., Schiffmann D. 2008. Silica. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Electronic Release, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 32, p. 442-507. doi: 10.1002/14356007.a23\_583.pub3

- Freas R.C., Hayden J.S., Pryor Jr. C.A. 2006. Limestone and Dolomite. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 581-597. ISBN: 9780873352499.
- Harvey C.C., Headrick Jr., Hemrick J.G. 2006. Refractory clays. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 407-413. ISBN: 9780873352499.
- Hida T. & Kitagawa R. 2006. Pyrophyllite. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 755-767. ISBN: 9780873352499.
- Hill V.G. & Sehnke E.D. 2006. Bauxite. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 227-261. ISBN: 9780873352499.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015. *Classificação Nacional de Atividades Econômicas*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), versão 2.0, 2ª ed, Disponível em <https://concla.ibge.gov.br/classificacoes/por-tema/atividades-economicas>. Acesso em 1/7/2018.
- Klein C. & Dutrow B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. Traduzido por Rualdo Menegat. Porto Alegre: Bookman, 23ª ed., 724 p. ISBN: 9788540700857
- Kramer D.A. 2006. Magnesium Minerals and Compounds. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.) *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 615-629. ISBN: 9780873352499.
- Krause O. 2014. Refractory Ceramics. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Electronic Release, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 35, p. 1-59. doi: 10.1002/14356007.a23\_001.pub2
- Lima T.M. & Neves C.A.R. (coords.). 2016. *Sumário Mineral 2015*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, 135 p. ISSN: 01012053.
- Lobato E. 2009. *Relatório Técnico 71 - Refratários*. Brasília, Ministério de Minas e Energia (MME), Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM), 22 p.
- McColm I.J. 2013. *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*. London, Springer, 3ª ed., 549 p. ISBN: 9789400709157, doi: 10.1007/978-94-007-0916-4
- Minérios & Minerale. 2017. 200 maiores minas brasileiras, The 200 largest mines in Brasil-2017. *Minérios & Minerale*, Ano XL, número 391, Outubro-Novembro, 68 p.
- Murphy P. & Frick L. 2006. Zirconium and Hafnium. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 1065-1071. ISBN: 9780873352499.
- Murray H.H. 2000. Clays. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Electronic Release, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, v. 9, p. 203-233. doi: 10.1002/14356007.a07\_109
- Paciullo F.V.P., Trow R.A.J., Ribeiro A., Simões L.A., Lopes M. 2003. Mapa Geológico – Folha Andrelândia – SF.23-X-C-V, escala 1:100.000. In: *Projeto Sul de Minas-Etapa I*, CODEMIG-UFRJ. Capítulo 4. p. 84-119.
- Papp J.F. & Lipin B.R. 2006. Chromite. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 309-333. ISBN: 9780873352499.
- Peixoto E.I.N., Falci A., Noronha C.R., Degler R., Martins L.C.D., Nassif M.T., Freitas A.R., Novo T.A. 2015. Folha Ouro Fino – SF.23-Y-B-I e Folha Andradas – SF.23-Y-A-III, escala 1:100.000, In: *Projeto Fronteiras de Minas*, Belo Horizonte, UFMG-IGC-CPMTC-CODEMIG.
- Pettijohn F.J. 1957. *Sedimentary rocks*. Harper & Brothers, Publishers. New York, 2ª ed., 718 p.

- Pinho J.M.M., Féboli W.L., Signorelli N., Tuller M.P., Brito D.C., Ribeiro J.H., Baptista M.C., Silva R.N. (eds.). 2017. Geologia e Recursos Minerais das Folhas Cabeceira Grande, Unai, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas, escala 1:100.000. *In: Projeto Vazante-Paracatu, Estados de Minas Gerais e Goiás, Programa Geologia do Brasil*, CPRM, 356 p.
- Pinto C.P. & Silva M.A. 2014. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, CODEMIG e Serviço Geológico do Brasil, CPRM.
- Queiroz E.T. 1997. Geologia da Magnesita. *In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S. (eds.). Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*, Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte C, p. 205-218.
- Reis H.L.S., Alkmim F.F., Fonseca R.C.S., Nascimento T.C., Suss J.F., Prevatti L.D. 2017. The São Francisco Basin *In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (eds.). São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing Co., p. 177-143. ISBN: 9783319017150, doi: 10.1007/978-3-319-01715-0\_7
- Ribeiro A., Paciuolo F.V.P., Senra A.S., Valeriano C.M., Trouw R.A.J. 2008. Nota Explicativa da Folha Piumhi – SE.23-V-B-II, escala 1:100.000. *In: Programa Geologia do Brasil*, Brasília, CPRM-UFRJ, 50 p.
- Romano A.W. 2007a. Geologia da Folha Pará de Minas - SE.23-Z-C-IV, escala 1:100.000, nota explicativa, edição revista e atualizada. *In: Programa Geologia do Brasil*, Brasília, CPRM-UFMG, 65 p.
- Romano A.W. 2007b. Folha Pará de Minas – SE.23-Z-C-IV, escala 1:100.000. *In: Programa Geologia do Brasil*, CPRM-UFMG.
- Semler C.E. 2006. Refractories. *In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 1471-1476. ISBN: 9780873352499.
- Sena S. 2007. *Mica e o Agalmatolito*. Artigo Técnico, Lamil Lage Minérios, 3 p.
- Seer H.J. & Moraes L.C. 2017. Geologia Regional do Triângulo Mineiro. *In: Projeto Triângulo Mineiro*, Belo Horizonte, CODEMIG-UFMG-CPMTC, 123 p.
- SIGMINE. *Sistema de Informações Geográficas da Mineração. Áreas dos Processos Minerários. Estado de Minas Gerais*. Agência Nacional da Mineração (ANM). Acesso em 1/7/2018.
- Schobbenhaus C. 1997. Geologia da Cianita. *In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S. (eds.). Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*, Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte B, p. 251-254.
- Schobbenhaus C. & Santana P.R. 1997. Geologia do Zircônio. *In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S. (eds.). Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*, Brasília, DNPM/CPRM, v. 4, parte C, p. 585-592.
- Sweet P.C., Dixon G.B., Snoddy J.R. 2006. Kyanite, Andalusite, Sillimanite and Mullite. *In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 553-560. ISBN: 9780873352499.
- Taylor Jr H.A. 2006. Graphite. *In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 507-518. ISBN: 9780873352499.
- Tedeschi M.F., Vieira P.L.N.C.R., Novo T.A. 2015a. Nota Explicativa: Folha Caldas SF.23-V-D-IV, Folha Poços de Caldas SF.23-V-C-VI, Escala 1:100.000. *In: Projeto Fronteiras de Minas*, Belo Horizonte, UFMG-IGC-CPMTC-CODEMIG.
- Tedeschi M.F., Novo T.A., Azevedo R.A., Amaral L.F.S., Degler R., Vieira P.L.N.C. 2015b. Mapa Geológico: Folha Caldas – SF.23-V-D-IV e Folha Poços de Caldas – SF.23-V-C-VI, escala 1:100.000. *In: Projeto Fronteiras de Minas*, Belo Horizonte, UFMG-IGC-CPMTC-CODEMIG.
- USGS. 2018. *Mineral commodity summaries 2018*. United States Geological Survey, 200 p. ISBN: 9781411341999, doi: 10.3133/70194932

- Valeriano C.M. 2017. The Southern Brasília Belt. *In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (eds.). São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing Co., p. 189-203. ISBN: 9783319017150, doi: 10.1007/978-3-319-01715-0\_10*
- Valeton I., Schumann A., Vinx R., Wieneke M. 1997. Supergene alteration since the upper cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of the Poços de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry*, **12**:133-154. doi: 10.1016/S0883-2927(96)00060-1