

NÍQUEL E COBALTO

Tobias Maia Rabelo Fonte Boa

CPMTC – IGC/UFMG

tobiasfonteboa@gmail.com

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ASPECTOS GERAIS.....	2
2.1. NÍQUEL	2
2.2. COBALTO.....	3
3. OCORRÊNCIA	4
3.1. NÍQUEL	4
3.2. COBALTO	4
3.3. AS ROCHAS ULTRAMÁFICAS.....	6
3.3.1. Sistema Ultramáfico Vulcânico.....	6
3.3.2. Sistema Ultramáfico Plutônico	7
4. PROCESSOS MINERALIZANTES DE NÍQUEL E COBALTO.....	9
4.1. PROCESSOS MAGMÁTICOS	9
4.2. PROCESSOS HIDROTERMAIS.....	10
4.2.1. Níquel-Cobalto e o Hidrotermalismo.....	10
4.3. PROCESSOS SUPERGÊNICOS.....	11
4.3.1. Laterização.....	11
4.3.2. As Lateritas de níquel.....	12
5. DEPÓSITOS NIQUELÍFEROS E COBALTÍFEROS DE MINAS GERAIS	14
5.1. DEPÓSITOS DO GREENSTONE BELT MORRO DO FERRO.....	15
5.1.1. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-PGE Fortaleza de Minas.....	16
5.1.2. Depósito Pratápolis.....	17
5.2. DEPÓSITOS NIQUELÍFEROS DA REGIÃO DE LIBERDADE.....	17
5.2.1. Depósitos Morro do Corisco e Fazenda da Roseta.....	18
5.3. DEPÓSITO NIQUELÍFEROS DO COMPLEXO MÁFICO-ULTRAMÁFICO ACAMADADO DE IPANEMA.....	18
5.3.1. Depósitos de Santa Cruz e Santa Maria	19
6. APLICAÇÕES.....	21
7. ASPECTOS ECONÔMICOS.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

Níquel e cobalto, dois bens minerais metálicos milenarmente empregados na sociedade, serão os focos deste capítulo. Estes dois metais possuem alta afinidade química, o que os tornam elementos bastante parecidos no que diz respeito à sua ocorrência e aplicações em geral. Com os avanços tecnológicos, principalmente na área da indústria do aço e dos eletrônicos, tanto o níquel quanto o cobalto vêm ganhando força e adquirindo um papel estratégico no mercado mundial. O estado de Minas Gerais possui grande potencial de exploração para estes elementos, mas, devido à atual situação econômica global, não são largamente explorados. Além dos aspectos gerais e de um breve histórico, será apresentada uma síntese da geologia e ocorrência destes recursos no estado de Minas Gerais, bem como suas principais aplicações e aspectos econômicos.

2. ASPECTOS GERAIS

2.1. Níquel

O níquel (Ni) é um elemento químico de número atômico 28, classificado como metal de transição. Geologicamente falando, este metal é relativamente abundante na crosta continental (Figura 1). Ocorre frequentemente associado a depósitos de cobre e por isso já foi chamado de cobre branco. Quando puro, apresenta brilho metálico cinza claro levemente dourado. Devido à sua resistência a corrosão e resistência mecânica, hoje o níquel é empregado em mais de três mil ligas metálicas, a maioria delas com o ferro, na produção de aço inoxidável. Curiosamente, além de ser encontrado nas rochas, o níquel naturalmente existe na maioria dos vegetais, frutas e nozes, pois é essencial para uma vida vegetal saudável (McKean 2011).

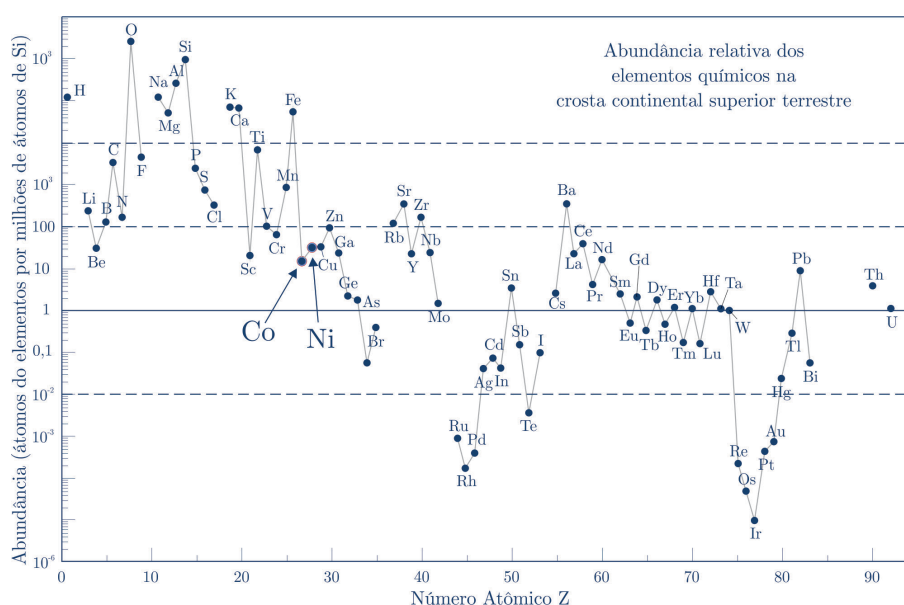


Figura 1. Diagrama da abundância dos elementos químicos na crosta continental superior (Fonte: modificado de Haxel *et al.* (2002).

Segundo registros, os chineses já utilizavam este elemento em ligas metálicas há quase quatro mil anos, contudo a palavra níquel deriva do termo alemão que significa demônio ("old nick"). A aplicação do termo se deu em meados do século XVII devido às dificuldades encontradas na sua mineração.

O nome permaneceu, porém com o aprimoramento das técnicas de mineração e avanço da ciência, as propriedades e aplicabilidades do níquel foram sendo melhor reconhecidas (Figura 2). Grande parte dessa evolução ocorreu no século XX, durante as duas Guerras Mundiais, quando a demanda de níquel cresceu muito devido à utilização do metal em ligas metálicas pela indústria bélica. Atualmente, o consumo global de níquel vem crescendo e é atribuído ao aumento de demanda da China e Índia para a produção de superligas e aço inoxidável.

Em 2017, a produção mundial de níquel foi de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas por ano. As Filipinas são as maiores produtoras e são responsáveis por quase 20% da produção mundial seguidas por Rússia, Austrália e Canadá. A produção de níquel do

Brasil em 2015 foi cerca de 170 mil toneladas de minério contido. As principais reservas estão nos estados de Goiás, Pará, Piauí, Minas Gerais e São Paulo, sendo que os dois primeiros detêm 90% de toda reserva nacional.



Figura 2. Imagem ilustrativa dos conceitos de mineração alemã do século XVIII (Brückmann 1730
In: Baldwin 1931).

2.2. Cobalto

O cobalto (Co) é um elemento químico de número atômico 27, possui características magnéticas e é classificado como metal de transição. Este metal é normalmente encontrado associado a outros metais como níquel e platinoides (PGE – elementos do grupo da platina) e é relativamente abundante na crosta continental (Figura 1). O nome deste elemento deriva do termo mitológico alemão “*kobold*”, que significa espírito maligno, devido à associação deste com a morte misteriosa de alguns mineiros. Provavelmente a primeira aplicação do cobalto foi na produção de vidros e cerâmicas azuis, que deu origem à cor “azul cobalto”. Hoje o cobalto é vastamente utilizado na produção de ligas especiais e superligas, bem como na indústria do petróleo como catalizador, também no tratamento do câncer e mais recentemente vem sendo empregado na produção de baterias para veículos híbridos. Acredita-se que no futuro o cobalto será uma alternativa barata que substituirá a platina no processo de produção de hidrogênio combustível a partir da água.

Atualmente, a produção mundial de cobalto é de aproximadamente 110 mil toneladas por ano, sendo a República Democrática do Congo (RDC) responsável por aproximadamente 60% deste montante. Outros grandes produtores são Austrália, Rússia, Canadá, Cuba e Filipinas (USGS 2018). Grande parte do cobalto é extraída como subproduto do níquel e do cobre, mas apesar da valorização deste metal no mercado mundial, sua produção caiu como consequência da queda de preço do níquel. Em 2013, a empresa Votorantim era a principal produtora de cobalto no Brasil, sendo as principais jazidas localizadas nos municípios de Niquelândia (GO), Americano do Brasil (GO) e Fortaleza de Minas (MG). Porém, com a queda do preço do níquel, atualmente o Brasil não produz mais cobalto. Essa deficiência é suprida com a importação do metal vindo da China e República Democrática do Congo.

3. OCORRÊNCIA

3.1. Níquel

O níquel é encontrado na natureza em vários estados de oxidação (+2, 0, +1, +3, +4), sendo o mais comum o +2. Nessa forma este metal possui alta afinidade com o ferro e o enxofre, possibilitando classificá-lo como um elemento siderófilo e calcófilo, respectivamente.

Por possuírem raio iônico muito similar ao do ferro (Fe) e do magnésio (Mg), o níquel e o cobalto frequentemente substituem estes elementos na estrutura cristalina de alguns minerais ferromagnesianos, como olivina, piroxênio, anfibólio e serpentina. Estes minerais são os principais formadores das rochas constituintes do manto terrestre e por isso grande parte do níquel encontrado na crosta vem destas partes mais internas do planeta. Acredita-se que a grande maioria do níquel da Terra esteja em seu núcleo na forma de uma liga metálica de níquel e ferro. As maiores concentrações de níquel existentes em nosso planeta são, portanto, inacessíveis.

Contudo, devido a processos geológicos, é possível que parte desse material inacessível seja incorporada nas porções mais externas da Terra, tornando o níquel acessível à humanidade. O processo geológico mais importante responsável por trazer material do manto e incorporá-lo na crosta é o de fusão parcial mantélica. Nesse processo, uma porção do manto se funde e sobe para a crosta, onde se cristaliza. Parte desse material, mais enriquecida em minerais ferromagnesianos, dá origem às rochas máficas e ultramáficas. Para efeito de comparação, a concentração média de níquel na crosta é de 47 ppm, enquanto que nas rochas ultramáficas esse número sobe para 2.000 ppm (González-Álvarez *et al.* 2013).

Naturalmente, o níquel pode ocorrer em vários minerais (Tabela 1), sendo que a maioria deles é raro. Como veremos adiante, os dois minerais mais recorrentes são a pentlandita e a garnierita. A pentlandita é um mineral da classe dos sulfetos que possui brilho metálico, cor em tons de bronze e marrom, que é muito comum em rochas ultramáficas (Figura 3A). A garnierita, na verdade, não é um mineral e sim uma mistura de minerais como serpentina, talco e outros silicatos que contêm níquel, como a pimelita (Figura 3B). Uma característica marcante da garnierita é a coloração verde, que pode ser usada como indício prospectivo de níquel.

3.2. Cobalto

O cobalto é encontrado na natureza frequentemente em estado de oxidação +2, porém também pode aparecer nas formas +3, +1 e menos comum no estado +4. Assim como o níquel, o cobalto está ligado às rochas máficas (40 ppm de Co) e ultramáficas (150 ppm de Co) (ver seção 3.1).

Naturalmente, o cobalto pode ser encontrado em vários minerais (Tabela 1). O mais famoso deles é a cobaltita (Figura 3C). Esse mineral é um sulfeto de cobalto e arsênio característico de depósitos de cobalto hidrotermais e metamórficos. A erythrita é um mineral

secundário dos depósitos de cobalto e sua característica marcante é a coloração carmim (Figura 3D).

Tabela 1. Lista dos principais minerais de níquel e cobalto (Cornwall 1966).

Minerais de níquel		Minerais de cobalto	
Mineral	Fórmula química	Mineral	Fórmula química
Níquel-Ferro nativo	Ni_3Fe	Ahlfeldita	$(\text{Ni},\text{Co})[\text{SeO}_3] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Pentlandita	$(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$	Alloclasita	$(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$
Bravoita	$(\text{Fe},\text{Ni})\text{S}_2$	Apowita	$\text{CoSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Violarita	Ni_2FeS_4	Carrollita	CuCo_2S_4
Polydymita	Ni_3S_4	Cattierita	CoS_2
Millerita	NiS	Cobaltita	CoAsS
Heazlewoodita	Ni_3S_2	Cobaltoblodita	$\text{Na}_2\text{Co}(\text{SO}_4)2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Siegenita	$(\text{Ni},\text{Co})_3\text{S}_4$	Erythrita	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Linnaeita	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})_3\text{S}_4$	Glaucodot	$(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$
Gersdorffita	NiAsS	Linnaeite	$(\text{Co}^{+2},\text{Co}^{+3})_2\text{S}_4$
Niccolita	NiAs	Moorhouseita	$\text{CoSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Rammelsbergita	NiAs_2	Penroseita	$(\text{Ni},\text{Co},\text{Cu})\text{Se}_2$
Chloantita	$(\text{Ni},\text{Co})\text{As}_{3-x}$	Roselita	$\text{Ca}_2(\text{Co},\text{Mg})[\text{AsO}_4]2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Smaltita	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{3-x}$	Safflorita	$(\text{Co},\text{Fe})\text{As}_2$
Skutterudita	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_3$	Skutterudita	CoAs_3
Maucherita	$\text{Ni}_{11}\text{As}_8$	Smaltita	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_2$
Breithaupita	NiSb	Sphero-cobaltita	CoCO_3
Ullmannita	NiSb_5	Trogtalita	CoSe_2
Parkerita	$\text{Ni}_3\text{Bi}_2\text{S}_2$	Tyrellita	$\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{Se}_4$
Annabergita	$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$		
Morenosita	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		
Zaratita	$\text{NiCo}_3 \cdot 2\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		

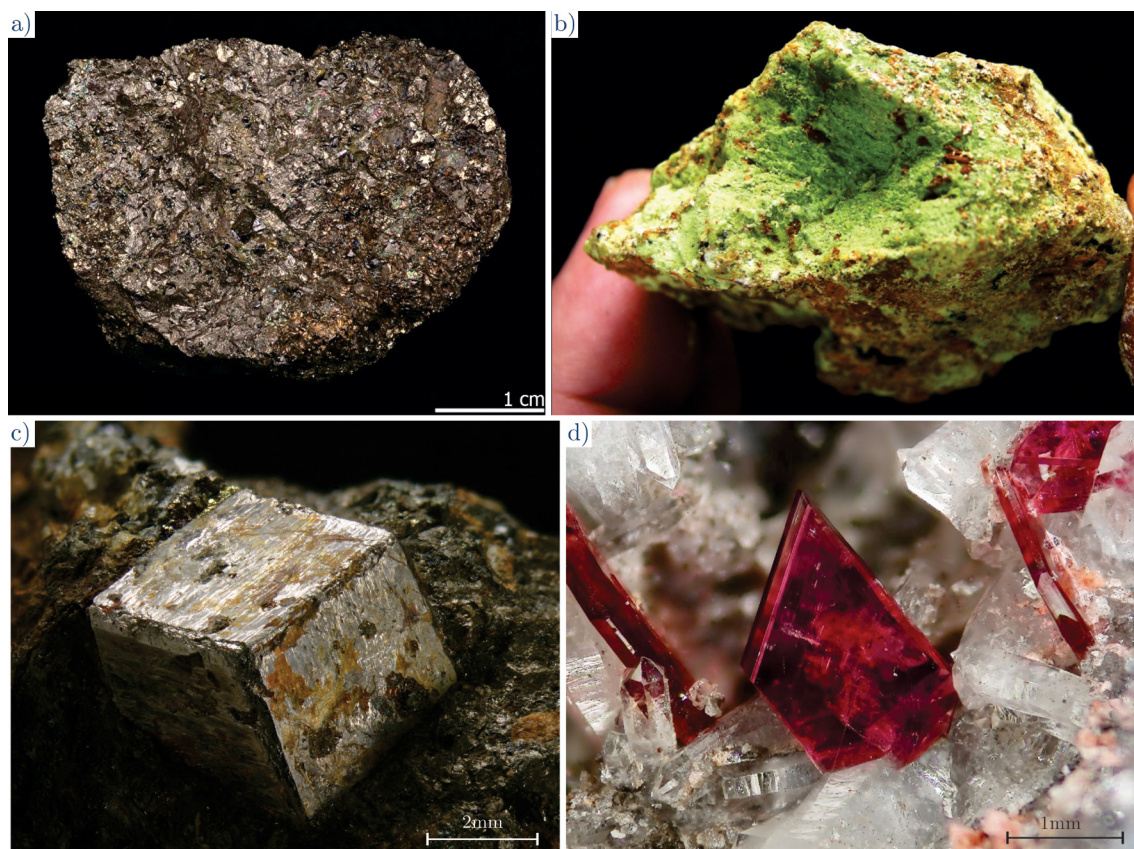


Figura 3. Minerais de níquel e cobalto: **a)** Pentlandita, amostra da Mina Worthington, Canadá (Fonte: [Rruff Project](#) - acesso em 12/2017). **b)** Pimelita, porções esverdeadas, amostra da Mina Szklary Chrysoprase, Polônia (Fonte: [Van King](#) - acesso em 12/2017). **c)** Cobaltita, da Suécia (Fonte: [Dominik Schläfli](#) - acesso em 12/2017). **d)** Erythrita, do Marrocos (Fonte: [Stephan Wolfsried](#) - acesso em 12/2017).

3.3. As rochas Ultramáficas

As rochas ultramáficas formam um grupo de rochas ígneas que são constituídas por mais de 70% de minerais ferromagnesianos que, por serem geralmente escuros, dão esta coloração à rocha. Na crosta, a gênese destas rochas pode ser dividida em dois sistemas distintos: o sistema ultramáfico vulcânico e o sistema ultramáfico plutônico (Figura 4).

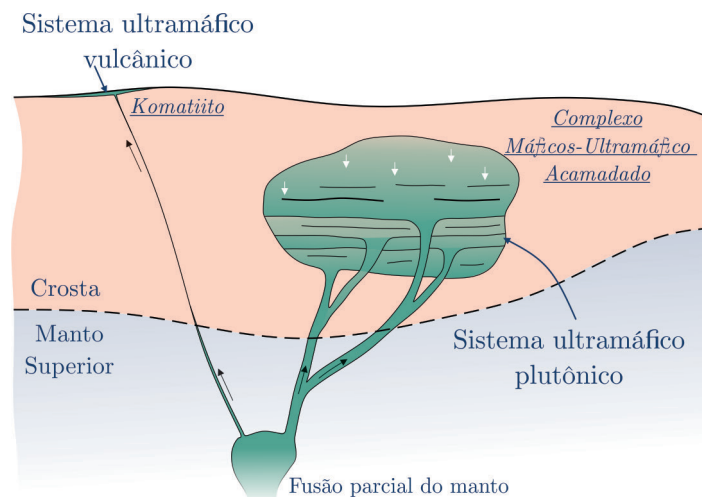


Figura 4. Seção esquemática das porções mais superficiais do planeta Terra, crosta e manto superior, mostrando os sistemas ultramáficos.

3.3.1. Sistema Ultramáfico Vulcânico

No sistema ultramáfico vulcânico, o magma mantélico ascende, atinge a superfície da crosta e se resfria rapidamente (Figura 4). Este processo foi muito abundante no Éon Arqueano, há mais de 2,5 bilhões de anos atrás, quando a crosta era fina o suficiente para permitir o acesso rápido à superfície dos magmas vindos diretamente do manto. Hoje em dia, devido à maior espessura crustal, o vulcanismo de magmas ultramáficos é muito raro.

O komatiito é a mais importante rocha hospedeira de níquel, que pode conter cobalto, que representa este sistema. Trata-se de rocha ultramáfica vulcânica com temperatura de extrusão de aproximadamente 1.600 °C, ou seja, a lava que forma o komatiito é extremamente quente. Devido ao baixo teor de sílica e à alta temperatura da lava, esses derrames são pouco viscosos e podem percorrer grandes distâncias na superfície, na ordem de centenas de quilômetros (Figura 5A). A feição diagnóstica mais importante na caracterização desta rocha é, sem dúvida, a famosa textura spinifex, resultado do rápido resfriamento da lava, que resulta na cristalização de olivina em forma de cristais alongados que lembram agulhas.

O komatiito mais famoso do mundo foi descrito na década de 60 na África do Sul, à margem do Rio Komati, que deu origem ao nome da rocha. No Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, estas rochas são bastante comuns no Quadrilátero Ferrífero, constituindo parte do *greenstone belt* Rio das Velhas. Em se tratando de depósitos de níquel e cobalto, a ocorrência de komatiito mais importante em Minas Gerais integra o *greenstone belt* Morro do Ferro, que hospeda o depósito de Fortaleza de Minas, a principal e mais importante ocorrência de níquel e cobalto do estado.

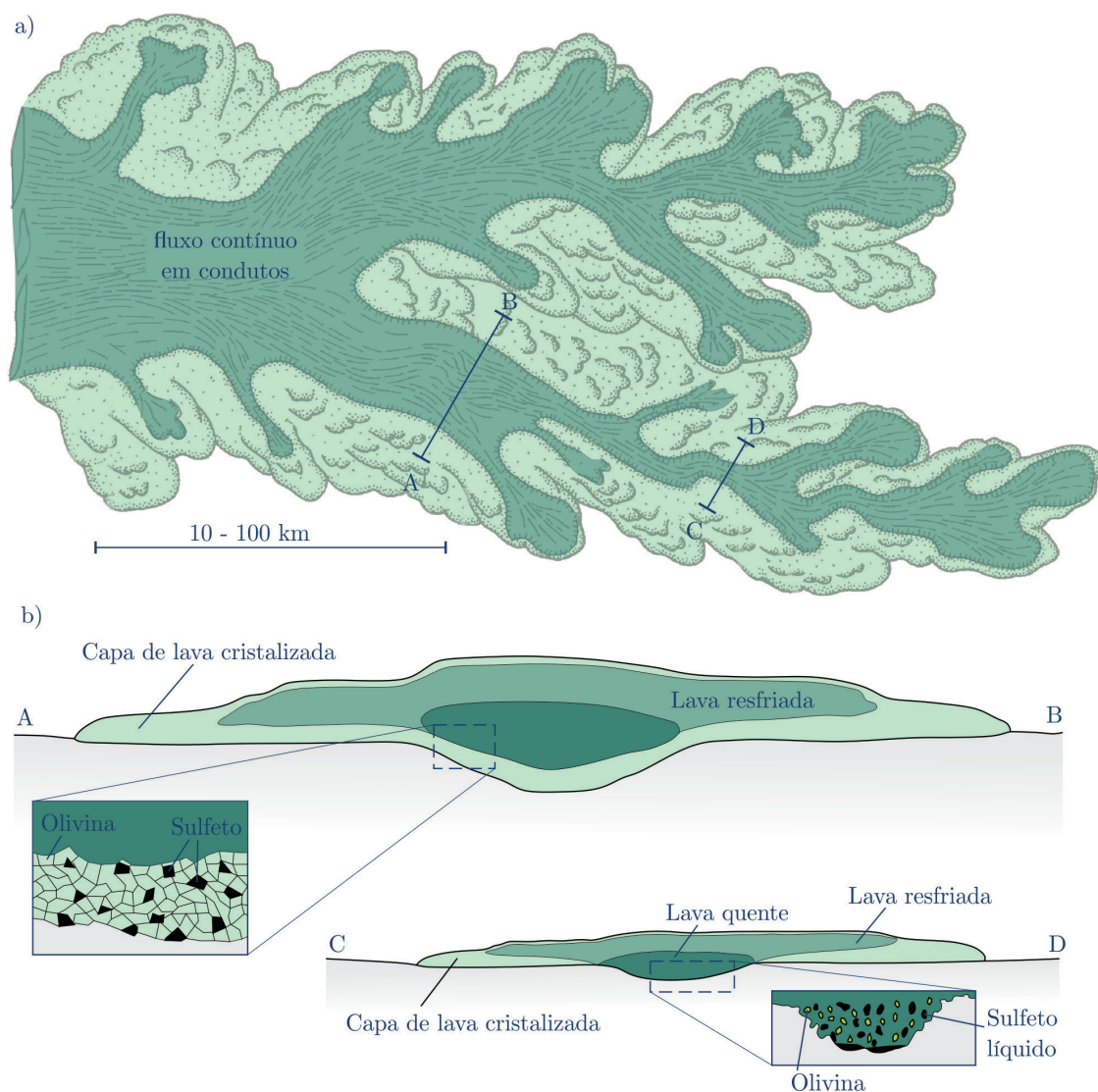


Figura 5. Sistema ultramáfico vulcânico. **a)** Ilustração esquemática de um derrame komatiítico. **b)** Seções esquemáticas do derrame mostrando a formação de sulfetos no sistema ultramáfico vulcânico. (modificado de Hill 2001).

3.3.2. Sistema Ultramáfico Plutônico

No sistema ultramáfico plutônico, o magma que vem do manto não atinge a superfície da crosta e se resfria lentamente em profundidade (Figura 4). Dentro da câmara magmática, diferentes fases minerais vão se cristalizando com o passar do tempo e isso faz com que a composição do magma mude. Este processo é chamado de diferenciação magmática. À medida que a composição do magma muda, outras fases minerais vão se cristalizando e decantando no fundo da câmara magmática fazendo com que a composição da rocha seja diferente dependendo da profundidade. Este fenômeno se chama cristalização fracionada e é muito comum nos sistemas plutônicos ultramáficos, dando origem à uma classe de depósitos chamada de complexo máfico-ultramáfico acamadado (Figura 6A).

Mundialmente, o Complexo máfico-ultramáfico acamadado mais famoso é o Complexo de Bulshveld na África do Sul. Trata-se de um extenso corpo intrusivo com um registro vertical de mais de 7 km. Em Minas Gerais um representante deste sistema

ultramáfico plutônico é o Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Ipanema (Angeli 1988, Angeli *et al.* 2004) que é definido por um conjunto de pequenos corpos máficos e ultramáficos localizados próximos ao município de Ipanema, no extremo leste de Minas Gerais.

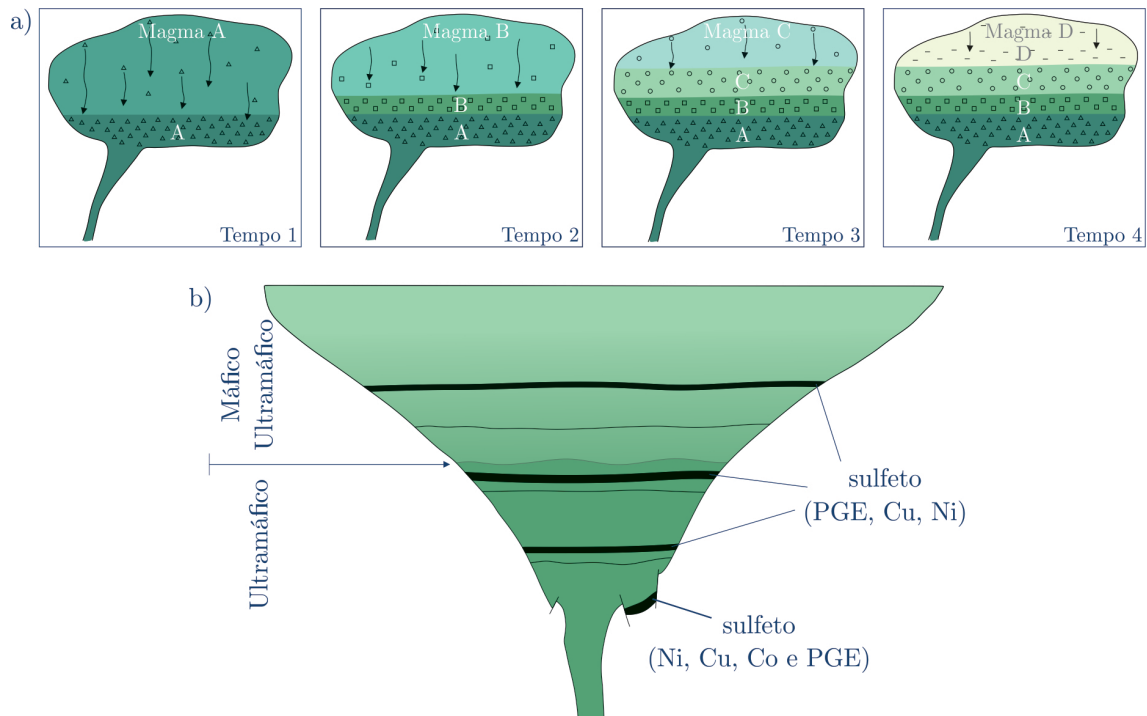


Figura 6. Sistema ultramáfico plutônico. **a)** Esquema simplificado mostrando a diferenciação magmática durante a cristalização do magma em profundidade na crosta. **b)** Esquema simplificado dos níveis contendo sulfeto de um complexo máfico-ultramáfico acamadado (modificado de Naldrett *et al.* 1990).

4. PROCESSOS MINERALIZANTES DE NÍQUEL E COBALTO

Devido a sua compatibilidade química com o ferro e o magnésio, o níquel e o cobalto têm uma relação muito forte com as rochas máficas e ultramáficas, principalmente com as últimas, porém nem toda rocha ultramáfica ou máfica tem concentrações econômicas suficientes de níquel e/ou cobalto para caracterizar uma ocorrência ou um depósito mineral. Para isso é necessário que exista uma concentração anômala do metal na crosta.

Atualmente, são conhecidos três processos geológicos capazes de concentrar níquel e cobalto tornando-os economicamente importantes e são eles os processos **magmáticos**, **hidrotermais** e **supergênicos**.

4.1. Processos Magmáticos

O níquel pode ser concentrado de maneira eficiente em alguns minerais durante a cristalização magmática descrita na seção anterior. A fusão parcial do manto gera um magma silicatado que irá subir em direção à crosta. Nesse processo o magma se resfria e pode incorporar material das rochas em que ele atravessa. O magma mantélico, por sua vez, é produto de fusão de minerais ferromagnesianos e por isso é constituído essencialmente por silício, oxigênio, ferro e magnésio, porém outros elementos podem se concentrar neste magma dependendo da composição e grau de fusão da fonte e dependendo também da composição da rocha que este magma atravessa durante a sua ascensão. A presença de enxofre (S) no magma será muito importante, pois irá ajudar a concentrar o níquel à medida que a rocha se cristaliza.

A combinação de enxofre com os outros metais presentes no magma irá formar uma classe de minerais chamados sulfetos. Como vimos, o níquel é um metal calcófilo, ou seja, tem grande afinidade com o enxofre. Portanto, em depósitos magmáticos, o níquel será concentrado em cristais de sulfeto. Desta maneira, denominamos os **depósitos magmáticos** de níquel como depósitos **sulfetados** e, por se tratar de processos de cristalização magmática, esses depósitos podem ser chamados de **primários**.

A formação de depósitos de níquel sulfetado ocorre devido à segregação de gotículas de sulfetos do magma mantélico. Esse processo é responsável por separar não só o níquel, mas outros elementos calcófilos da parte restante do magma. Além do níquel, elementos como ferro (Fe), cobalto (Co), paládio (Pd), platina (Pt), ródio (Rh), ósmio (Os), cobre (Cu) e ouro (Au) podem se concentrar nos sulfetos de magmas máfico-ultramáficos formando importantes depósitos multi-minerálicos (Naldrett 2010). Os elementos mais comuns que ocorrem junto ao níquel em depósitos magmáticos são os elementos do grupo da platina (PGE – *platinum group of elements*), cobre (Cu) e cobalto (Co). No caso do sistema ultramáfico vulcânico, os sulfetos irão se cristalizar em porções específicas dos condutos vulcânicos, como mostrado na Figura 5B. Já no sistema ultramáfico plutônico, os sulfetos irão se concentrar em horizonte ou níveis distintos dentro da câmara magmática (Figura 6B).

O principal mineral minério de níquel encontrado nos depósitos magmáticos é a pentlandita (Figura 3A). Ela pode ocorrer de forma disseminada dentre cristais de olivina e

também na forma maciça, formando grandes bolsões de sulfeto chamados de sulfeto maciço.

4.2. Processos Hidrotermais

Em sua essência, o hidrotermalismo ou processo hidrotermal é um processo mineralizante no qual a água ou um fluido aquoso quente, em condições físico-químicas específicas, dissolve, transporta e concentra alguma substância ou elemento químico na crosta da Terra. Portanto, diferentemente dos processos magmáticos, os elementos e metais nos processos hidrotermais encontram-se dissolvidos em meio aquoso.

Existem cinco famílias de fluidos hidrotermais percolantes na crosta:

- fluidos hidrotermais magmáticos, ou juvenis, que são compostos por água e outras substâncias voláteis de um magma;
- fluidos hidrotermais metamórficos, que são gerados durante o metamorfismo a partir de reações como desidratação e decarbonificação;
- fluidos hidrotermais meteóricos, que correspondem à água que integra o ciclo hidrológico que se infiltra na crosta;
- fluidos hidrotermais marinhos, que correspondem às águas dos oceanos e que também se infiltram na crosta;
- fluidos hidrotermais conatos, que corresponde aos fluidos presos nos poros e interstícios das rochas sedimentares quando da sua deposição.

Cada uma das cinco famílias de fluidos possui suas características químicas próprias, mas uma característica em comum é a capacidade de transportar substâncias e elementos químicos dissolvidos. Estes fluidos se movimentam na crosta e carregam tais substâncias que serão precipitadas em outros lugares, podendo gerar importantes depósitos minerais.

4.2.1. Níquel-Cobalto e o Hidrotermalismo

No Hidrotermalismo, os metais são transportados na forma de complexos iônicos em meio aquoso. Complexos aniônicos como F^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^- , PO_4^{3-} , Cl^- e HS^- são importantes carreadores de metais como lítio (Li), sódio (Na), potássio (K), rubídio (Rb), zinco (Zn), chumbo (Pb), ferro (Fe), ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu), cobalto (Co), mercúrio (Hg), dentre outros. Os principais fatores que controlam a solubilidade desses complexos nos fluidos são composição, pH, temperatura e pressão, e as mudanças nessas condições irão controlar a dissolução ou a precipitação dos íons presentes nos fluidos (Robb 2004).

Alguns metais, porém, não são facilmente dissolvidos por fluidos hidrotermais, logo são muito difíceis de serem transportados e concentrados por hidrotermalismo. O níquel é um destes metais.

Estudos mostraram que a solubilidade de metais como cobre e cobalto, metais similares ao níquel, é muito superior em relação à solubilidade no níquel em sistemas hidrotermais (González-Álvarez *et al.* 2013). Mesmo que em poucas quantidades, o níquel pode ser transportado hidrotermalmente, mas este processo ainda não é muito bem entendido e muito disso se deve à dificuldade de identificação e caracterização de depósitos

de níquel hidrotermal e pelo pequeno número de registros e ocorrências desses depósitos. O hidrotermalismo é o principal processo geológico capaz de concentrar cobalto.

O depósito de Avebury, localizado no oeste da Tasmânia, foi o primeiro depósito de níquel hidrotermal conhecido, descrito em 1997. Trata-se primeiramente de um depósito de níquel magmático hospedado em rochas máfico-ultramáficas, onde houve remobilização de níquel por processos hidrotermais relacionados a fluidos magmáticos posteriores (Keays & Jowitt 2013). Em Minas Gerais, existe apenas um depósito no qual já foram descritas evidências de remobilização de níquel e cobalto hidrotermal e por sinal é o único depósito de cobalto do estado.

4.3. Processos Supergênicos

Quando qualquer rocha atinge a superfície da crosta, ela começa a ser alterada pelo intemperismo. Agentes superficiais como chuva, gelo, vento, sol, plantas e animais são capazes de modificar as rochas de maneira física e química. Esses processos, principalmente a ação de água através do intemperismo químico, são capazes de mobilizar minerais, substâncias e elementos químicos e concentrá-los, gerando depósitos minerais classificados como depósitos supergênicos. Existem vários tipos de depósitos onde os estágios finais de enriquecimento ocorrem de maneira supergênica. A principal diferença entre os processos hidrotermais e supergênicos é a temperatura dos fluidos. Os fluidos supergênicos geralmente são frios e os hidrotermais são quentes.

Do ponto de vista metalogenético, o intemperismo químico pode ser subdividido em três processos. (1) Dissolução e transporte, no qual parte da rocha é dissolvida e os íons e moléculas solúveis são transportados em meio aquoso. (2) Formação de novos minerais, no qual as moléculas e íons solúveis se concentram na forma de novos minerais; (3) Concentração de material residual, no qual a retirada do material solúvel proporciona a concentração da porção insolúvel.

4.3.1. Laterização

A laterização é um processo supergênico próprio de regiões intertropicais, onde o clima é quente e úmido. Nessas regiões, a alternância de períodos úmidos e secos propicia e intensifica os processos de laterização, que estão intimamente ligados à variação do nível freático. As lateritas se desenvolvem em horizontes ou níveis e podem constituir depósitos muito importantes, pois representam o principal ambiente de concentração de alumínio (Al). Elas também podem conter significantes concentrações de níquel (Ni), manganês (Mn), ouro (Au), cobre (Cu), cobalto (Co) e platínoides.

A Figura 7 apresenta um perfil laterítico genérico, que pode ser dividido em dois níveis principais, o nível saprolítico (base) e o nível pedolítico (topo).

No nível saprolítico, os fluidos envolvidos na alteração são tipicamente oxidantes e levemente ácidos. Esse nível é composto por rocha alterada que preserva feições primárias da rocha sã, como textura e algumas estruturas. A porção mais inferior desse nível, formalmente chamada de *saprock*, é caracterizada pela desestabilização de sulfetos e

carbonatos com a lixiviação dos metais calcófilos e elementos alcalinos. Nessa porção também ocorre destruição dos feldspatos e minerais ferromagnesianos que se transformam em argilominerais, hematita e goetita. Na porção média e superior do nível saprolítico, grande parte dos minerais primários encontram-se desintegrados, com exceção de moscovita e talco, que resistem (Robb 2004).

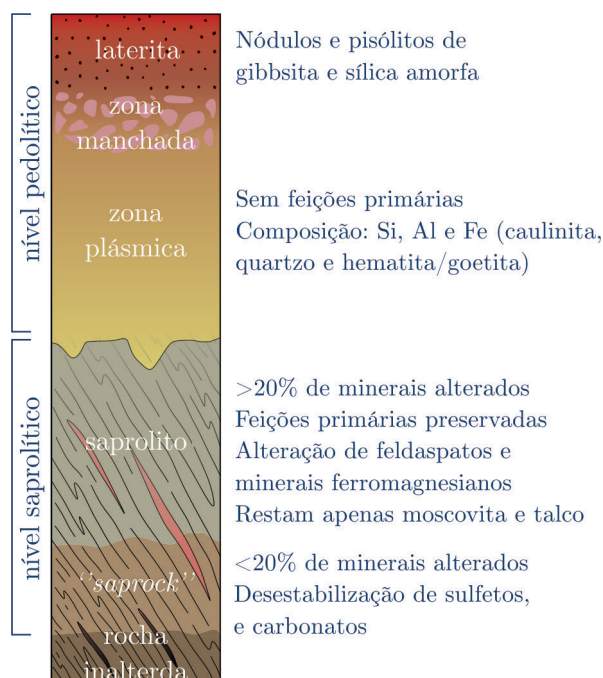


Figura 7. Perfil laterítico genérico mostrando os diferentes horizontes de alteração. (modificado de Butt *et al.* 2000).

No nível pedolítico, todas as feições primárias foram destruídas e grande parte dos elementos foram lixiviados. Esse nível é principalmente composto por Si, Al e Fe (caulinita, quartzo, hematita e goetita).

Quando a laterização se desenvolve sobre rochas ultramáficas, nesse nível existe predomínio de hematita e goetita. Caso contrário, haverá predomínio de caulinita. Nas porções mais superficiais, frequentemente ocorrem nódulos e pisólitos de gibbsita e sílica amorfa (Robb 2004).

4.3.2. As Lateritas de níquel

Como vimos, as rochas ultramáficas são as principais rochas portadoras de níquel presentes na crosta. Os minerais que compõem estas rochas são altamente instáveis e se alteram muito facilmente em superfície. Em parte, essa instabilidade se deve à presença de ferro com número de oxidação 2+ presente na estrutura destes minerais. O Fe^{2+} é estável durante a cristalização dos minerais ferromagnesianos, porém ele se oxida facilmente na superfície da crosta, se transformando em Fe^{3+} devido à presença de oxigênio. Assim, devido às condições do nível saprolítico, que são oxidantes e levemente ácidas (Figura 7), minerais ultramáficos como olivina, piroxênio, anfibólio e serpentina são completamente alterados para garnierita (Robb 2004). Garnierita é um nome genérico dado ao minério verde de níquel que na verdade trata-se de uma mistura de vários silicatos hidratados de níquel (Figura 3B). Esse processo de alteração é capaz de concentrar níquel em teores até 10 vezes maiores dos

que são encontrados na rocha inalterada (Figura 8), aumentando substancialmente seu potencial econômico. O mesmo pode ocorrer com o cobalto.

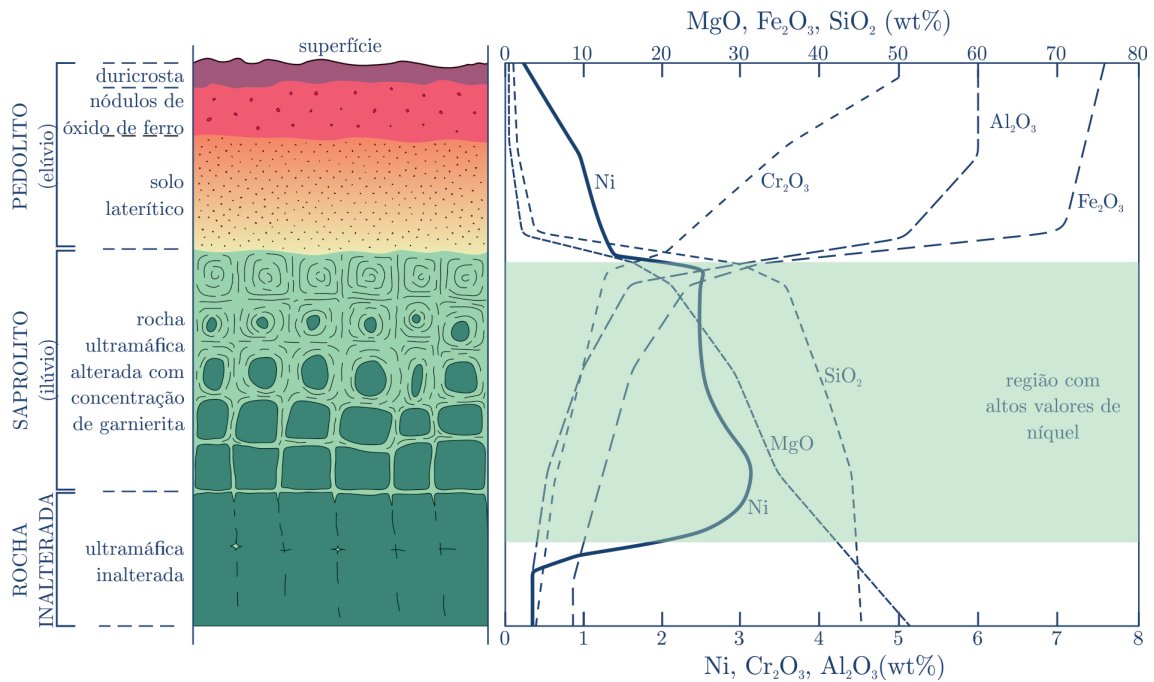


Figura 8. Perfil laterítico de níquel mostrando os diferentes horizontes e a variação da concentração relativa de alguns elementos dentre estes horizontes. Destaque para os altos valores de níquel associados ao nível saprolítico, onde existe a concentração de garnierita (modificado de Butt *et al.* 2000).

5. DEPÓSITOS NIQUELÍFEROS E COBALTÍFEROS DE MINAS GERAIS

O níquel e o cobalto estão estritamente relacionados às rochas máficas e ultramáficas. Tais rochas são originadas a partir de material mantélico, que foi incorporado na crosta terrestre. Existem três classes de depósitos de níquel:

- depósitos magmáticos, também chamados de minério sulfetado ou primário;
- depósitos supergênicos também conhecidos como oxidados ou lateríticos;
- depósitos hidrotermais.

O cobalto está relacionado principalmente com os depósitos hidrotermais. Um fato que deve se ter em mente é que um depósito raramente será produto exclusivo de um único processo mineralizante. Portanto, nada impede que um depósito de origem magmática tenha mineralizações resultantes de processos hidrotermais ou mesmo supergênicos. Um exemplo é o caso do depósito de Fortaleza de Minas, que possui evidências dos três processos mineralizantes citados acima.

A Figura 9 apresenta a localização dos principais depósitos e ocorrências de níquel e cobalto do estado de Minas Gerais (Tabela 2). Um fato que chama a atenção é que nem toda rocha ultramáfica é uma ocorrência ou um depósito de níquel e cobalto. Para que seja definida uma ocorrência ou um depósito mineral, devem-se ter concentrações anômalas de algum metal ou bem mineral na crosta.

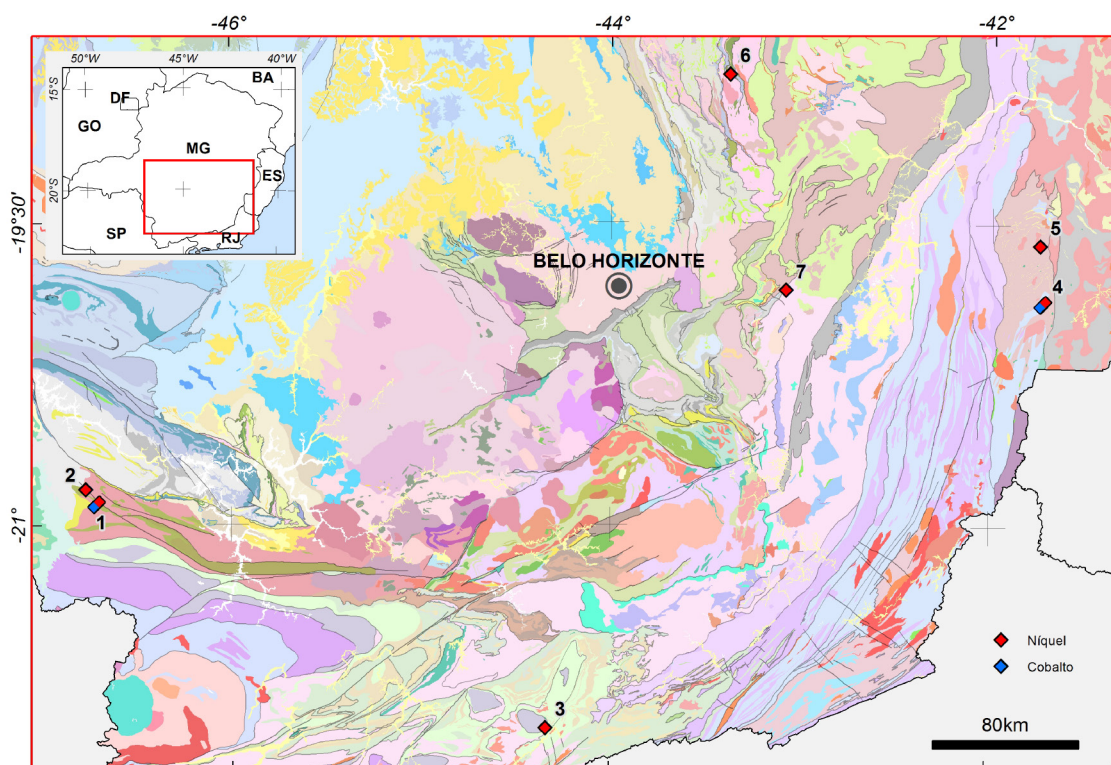


Figura 9. Principais ocorrências de níquel e cobalto no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 2. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.

Os depósitos de níquel de Minas Gerais se concentram em três principais localidades. De oeste para leste, temos os depósitos associados ao *Greenstone Belt* Morro do Ferro

(ocorrências 1 e 2 da Figura 9), os depósitos da região de Liberdade (ocorrência 3 da Figura 9) e os depósitos associados ao Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Ipanema (ocorrências 4 e 5 da Figura 9). O único depósito de cobalto do estado é o de Fortaleza de Minas (ocorrência 1 da Figura 9), porém o cobalto está presente nos saprolitos do Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Ipanema (ocorrência 4 da Figura 9) e, portanto, podem ser considerados ocorrência de cobalto.

Tabela 2. Principais ocorrências de níquel e cobalto no estado de Minas Gerais.

	SUBSTÂNCIA	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	SITUAÇÃO	ROCHAS HOSPEDEIRA	Latitude	Longitude
1	Níquel, Cobalto	Fortaleza de Minas	Fortaleza de Minas	Ativo	Komatiito	-20,900071	-46,713716
2	Níquel	Morro do Níquel	Pratápolis	Ativo	Coberturas detrito-lateríticas	-20,82452	-46,768445
3	Níquel	Morro do Corisco	Liberdade	Ativo	Coberturas detrito-lateríticas	-22,012474	-44,337073
4	Níquel, Cobalto	Santa Cruz	Ipanema	Ativo	Coberturas detrito-lateríticas	-19,890007	-41,734913
5	Níquel	Santa Maria	Ipanema	Ativo	Coberturas detrito-lateríticas	-19,599643	-41,749799
6	Níquel	Serro	Alvorada de Minas	Inativo	Cromitito	-18,763004	-43,383207
7	Níquel	Bela Vista de Minas	Bela vista de Minas	Inativo	Coberturas detrito-lateríticas	-19,832453	-43,08038

5.1. Depósitos do *Greenstone Belt* Morro do Ferro

O *Greenstone Belt* Morro do Ferro trata-se de uma sequência metavulcanossedimentar tectonizada junto ao Complexo Barbacena, ambos de idade arqueana, localizada próxima ao limite sul do Cráton do São Francisco na região do município de Passos (Figura 9). Tratam-se de corpos lenticulares ou faixas alongadas com direção NW-SE de rocha ultramáficas e máficas intercalados a metapelitos, xistos e formação ferrífera (Figura 10). As lentes ultramáficas são interpretadas como derrames komatiíticos, os primeiros descritos no Brasil (Almeida *et al.* 2007). Neles, atualmente estão hospedados dois depósitos: Fortaleza de Minas e Pratápolis.

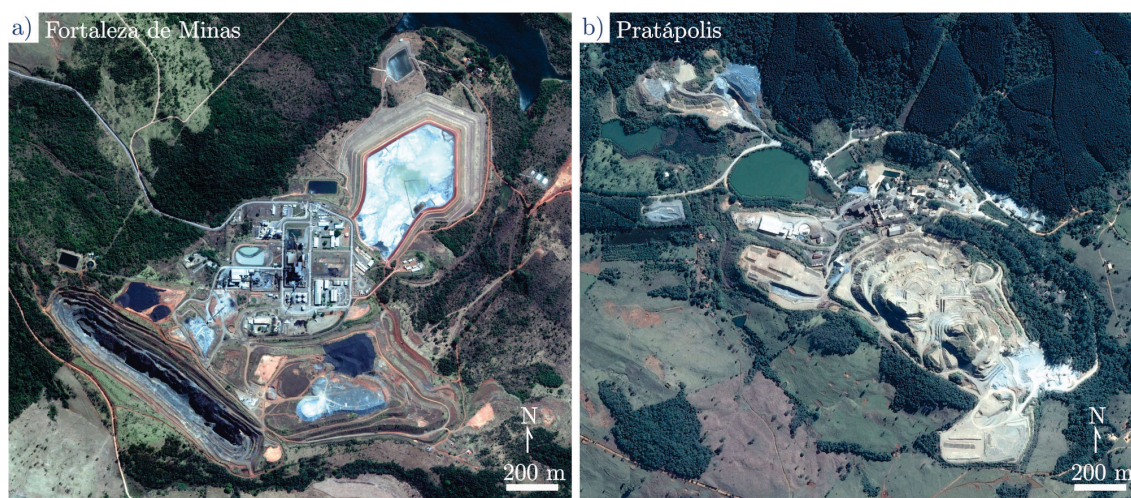


Figura 10. Depósitos do *Greenstone Belt* Morro do Ferro. **a)** Fortaleza de Minas. **b)** Pratápolis. (Fonte: Google Earth - acesso em dez/2017)

5.1.1. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-PGE Fortaleza de Minas

Fortaleza de Minas, também conhecido como O'Toole, é um depósito de Ni-Cu-Co-Au-PGE, hospedado em komatiitos, localizado no *Greenstone Belt* Morro do Ferro, próximo ao município de Fortaleza de Minas (Figura 9, Almeida *et al.* 2007). Atualmente, trata-se do depósito niquelífero mais importante e o único cobaltífero do estado e tem sido alvo de vários estudos. Foi descoberto em 1983, porém a sua lavra foi iniciada em 1997. A jazida possui formato tabular (Figuras 10A, 11A e 11B), com reserva estimada em 10 Mt com teores de 2,5% de níquel encontrado tanto associado a depósitos magmáticos quanto a supergênicos e hidrotermais. Nesse depósito, o cobalto é encontrado principalmente em veios hidrotermais com teor aproximado de 0,05% (Almeida *et al.* 2007, Carvalho & Brenner 2010).

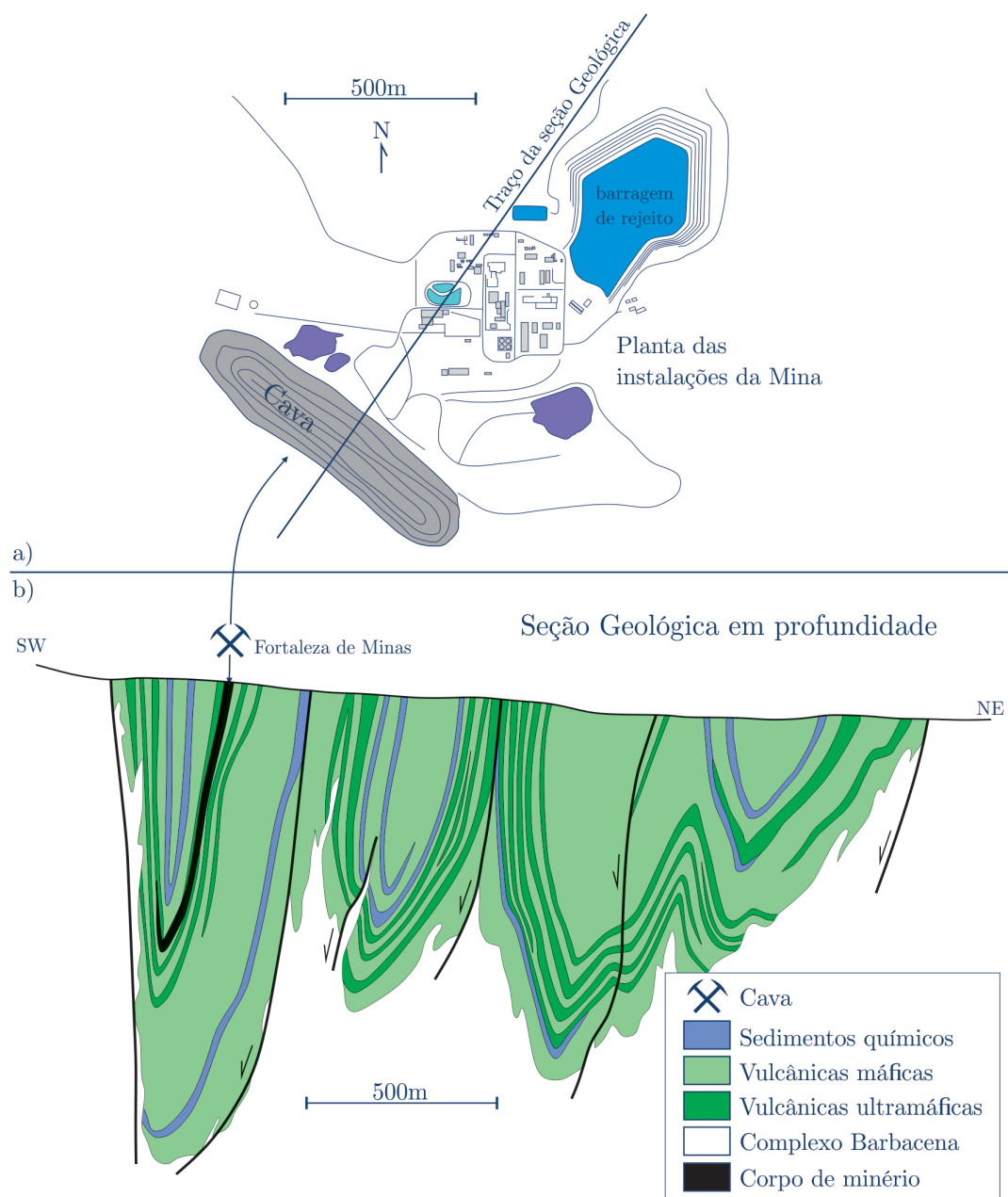


Figura 11. a) Representação aproximada da planta das instalações da Mina de Fortaleza de Minas com destaque para a cava, interpretada a partir de imagem aérea. **b)** Seção geológica mostrando o modelo de depósito de Fortaleza de Minas. Adaptado e modificado de Carvalho & Brenner (2010).

O minério vulcanogênico pode ser dividido em três tipos, maciço brechoide, matriz e disseminado. O minério maciço brechoide consiste em matriz de sulfetos que engloba clastos de formação ferrífera, serpentinito, talco xisto, piroxenito e gabro. Por sua vez, o minério matriz é caracterizado por sulfetos que envolvem pseudomorfos de olivina e magnetita que ocorrem na base dos derrames. Já o minério vulcanogênico disseminado, como o próprio nome já diz, é caracterizado por sulfetação disseminada em meio à fase silicatada. A análise dos sulfetos mostra que, nos três tipos de minério vulcanogênico, a composição é bastante parecida, 65% de pirrotita, 25 a 30% de pentlandita e 5 a 10% de calcopirita.

O minério hidrotermal é volumetricamente menos expressivo e ocorre em regiões restritas da jazida. Ele ocorre preenchendo vênulas, fissuras, fraturas e falhas configurando corpos de minério centimétricos a métricos hospedados principalmente em serpentinitos. Ele é constituído principalmente por pirrotita, pentlandita, calcopirita, pirita e magnetita; e menores quantidades de cobaltita, esfalerita e ilmenita. Esse tipo de minério possui os maiores teores quando comparado com os demais, em média 4 a 9,1% de níquel. Neste tipo de minério se encontra o cobalto com teor de 0,05%.

O minério supergênico pode ser dividido em duas zonas, a zona oxidada, ou também denominada de *gossan*, e a zona de transição. A zona oxidante cobre o corpo de minério e está exposta ao longo de 1 km e possui espessura média de 30 m. Trata-se de um lençol de fragmentos (cascalho de *gossan*) e solos autóctones constituídos de goetita, fragmentos de talco xisto e presença de pirrotita, pentlandita, serpentina e anfibólio, que aumentam de quantidade em direção às porções basais desta zona, que é mais rica em cobre, níquel, cobalto, ouro e PGE. A zona de transição possui cerca de 100 m de espessura e é marcada pela desestabilidade dos sulfetos primários como a pentlandita. Outra característica dessa zona é a presença de manchas disseminadas de oxidação em meio ao minério primário.

5.1.2. Depósito Pratápolis

Pratápolis - (Figura 10B) ocorre geograficamente próximo ao depósito de Fortaleza de Minas e por isso estão no mesmo contexto geológico, o *Greenstone Belt* Morro do Ferro. Este depósito localiza-se no Morro do Níquel, que fica próximo ao município de Pratápolis. Possui dimensão aproximada de 900x400 m, que vêm sendo explorado nas últimas cinco décadas, antes mesmo da descoberta do depósito de Fortaleza de Minas. A exploração se concentra na parte oxidada do depósito e é feita pela Mineradora Morro Azul. Em Pratápolis, foram produzidos 49.387 t de minério de níquel por ano com o teor de 0,39% de níquel (DNPM 2014 in Costa 2016).

5.2. Depósitos Niquelíferos da região de Liberdade

Na região de Liberdade, município localizado no sul de Minas Gerais (Figura 9), ocorrem vários corpos de rocha ultramáfica serpentinizados, em contato com as rochas metassedimentares do Grupo Andreilândia. Tratam-se de corpos máfico-ultramáficos acamadados (Santos 1972, Almeida 1998) que possuem formato elíptico com o eixo maior paralelo à direção da xistosidade principal. Dois desses corpos são mineralizados em níquel

supergênico, são eles: Morro do Corisco e Fazenda da Roseta. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM 2014 *In*: Costa 2016), em 2011 produziu cerca de 490 t de concentrado com teor de 4,9% de níquel.

5.2.1. Depósitos Morro do Corisco e Fazenda da Roseta

O corpo ultramáfico Morro do Corisco é a jazida de níquel mais antiga do país (Figura 12). Sua exploração começou em 1915, quando o município de Liberdade era conhecido como Livramento. Trata-se de um pequeno corpo com aproximadamente 0,4 km², composto principalmente de harzburgito, dunito e hornblendito serpentinizados explorados pela Companhia de Níquel do Brasil S.A. (Almeida 1998).



Figura 12. Corpo Máfico-Ultramáfico Morro do Corisco, jazida de níquel mais antiga do país. (Fonte: Google Earth - acesso em 1/12/2017).

O corpo Fazenda da Roseta também se trata de um corpo ultramáfico serpentizado muito parecido com o corpo Morro do Corisco, porém um pouco maior, com aproximadamente 4 km². É composto por websterito, hornblenditos serpentizados e clorita xistos (Almeida 1998).

Em ambos os corpos, o níquel é explorado na parte supergênica do depósito. Segundo Santos (1972), nos depósitos da região de Liberdade a alteração supergênica da serpentina tem como produto goetita, caulinita, gibbsita e quartzo. O processo de alteração resultou em um perfil laterítico típico com a concentração de Al no topo e com concentração de níquel logo acima do serpentinito fresco.

5.3. Depósito Niquelíferos do Complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Ipanema

Angeli (1988) e Angeli *et al.* (2004), a partir de estudos sobre os jazimentos de níquel da folha Ipanema, caracterizaram vários corpos máfico-ultramáficos que definiram o Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Ipanema (Figura 9). Esses corpos estão preferencialmente encaixados em rochas metassedimentares e corresponderiam a um evento magmático do tipo *rift* que ocorreu durante a era mesoproterozoica. Ao todo, foram

catalogados seis corpos mineralizados em níquel: Santa Rita, Santa Maria, Santa Cruz, São Barnabé, Conceição de Ipanema e Professor Sperber. Os dois corpos mais importantes, tanto em termos de expressão superficial como em tonelagem, são Santa Cruz, com teor médio de 1,24% e 30.409 t de níquel, e Santa Maria, com teor de 1,17% e 63.563 ton. Apesar de não ser classificado como um depósito de cobalto, é importante salientar que se trata de uma ocorrência, devido aos valores anômalos de cobalto encontrados nos saprolitos avermelhados.

5.3.1. Depósitos de Santa Cruz e Santa Maria

Santa Cruz é um maciço máfico-ultramáfico com formato elíptico que ocupa uma superfície de 0,5 km². Ele é composto principalmente por dunitos e peridotitos serpentinizados. O maciço de Santa Maria é bem parecido com o de Santa Cruz. Possui uma área superficial de 0,45 km² e é composto por peridotitos e piroxenitos serpentinizados. A caracterização dos horizontes de alterações possibilitou a divisão de 4 horizontes (Figura 13):

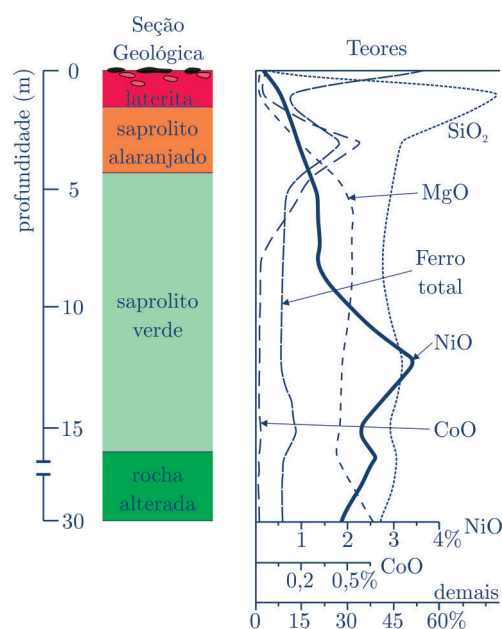


Figura 13. Perfil de alteração da extensão sul do maciço de Santa Cruz. (modificado de Angeli 1988).

Rocha Alterada – Material de coesão elevada, onde se encontram preservadas as estruturas da rocha primária. São encontrados veios de garnierita, quartzo, talco e antofilita, crisoprásio e calcedônia.

Saprolito Verde – Material poroso de coloração verde clara, onde comumente ocorrem estruturas primárias preservadas, que pode chegar a ter 20 metros de espessura. É composto principalmente por serpentina, clorita, talco, goetita e esmectita. O limite deste horizonte é gradativo para o horizonte de rocha alterada. Trata-se do horizonte mais fértil com teores variando de 0,6% a 2,6% de níquel.

Saprolito Alaranjado – Possui contato brusco com o horizonte de saprolito verde e contem espessura muito variável, com valor médio de 3 metros. É representado por material de granulação fina e coloração alaranjada e composto essencialmente por

óxidos e hidróxidos de ferro, calcedônia, e relictos de talco e clorita. Uma característica marcante deste horizonte são os altos teores de cobalto.

Laterita Vermelha – Possui coloração castanha avermelhada escura e textura argilosa. Os teores de níquel neste horizonte são baixos e possui elevada concentração de magnetita. As espessuras máximas atingem 1,2 m.

6. APLICAÇÕES

Ambos os metais, níquel e cobalto, possuem um histórico bastante antigo de aplicações. O níquel é mundialmente reconhecido pela sua utilização na cunhagem de moedas. Manuscritos chineses de 1.400-1.700 A.C já reportam a utilização do “cobre branco” no oriente, porém acredita-se que o início da utilização do níquel foi posterior ao século IV A.C. O cobalto, por sua vez, é historicamente reconhecido pela sua aplicação como pigmento azul de vidros e cerâmicas desde o passado remoto. Atualmente, além das aplicabilidades antigas, estes dois metais são principalmente empregados em ligas metálicas. Devido às suas características físico-químicas como, por exemplo, alto ponto de fusão, estes elementos são utilizados na produção de superligas.

O níquel atualmente é aplicado em mais de 3 mil ligas metálicas (Parkinson 2001). Estima-se que 65% do consumo deste metal sejam na fabricação de aço inoxidável, outros 20% vão para a produção de superligas empregadas na indústria aeroespacial e militar. O restante, cerca de 15%, é empregado em materiais de revestimento, cunhagem de moedas e baterias recarregáveis (USGS 2018). Além disso, o níquel é um material altamente reciclável, sendo que 50% do níquel empregado na produção de aço inoxidável vem do reaproveitamento. Mais informações podem ser encontradas em Nickel Institute (2018) e International Nickel Study Group (2018).

Da mesma forma que o níquel, o cobalto é utilizado em superligas, ferramentas de corte, revestimento de superfícies e muitos outros materiais. Devido as suas inúmeras aplicações, o cobalto vem sendo mundialmente considerado como um elemento tecnologicamente essencial. Atualmente, devido à grande demanda de aparelhos recarregáveis, uma das aplicações mais importantes do cobalto é na produção de baterias. Além de aumentar o tempo de carga, a adição de cobalto nas baterias torna o produto mais seguro e estável diminuindo o inchaço e, portanto, risco de explosão e corrosão. O cobalto vem revolucionando os meios de transporte na produção de baterias para veículos híbridos e acredita-se que será uma alternativa barata que substituirá a platina no processo de produção de hidrogênio combustível a partir da água.

7. ASPECTOS ECONÔMICOS

Em 2015, a produção brasileira de minério de níquel contido foi de 173.972 toneladas (Pinheiro *et al.* 2016). A maior empresa produtora no Brasil é a Anglo American Níquel Brasil Ltda., responsável por 38% da produção total, estabelecida no Estado de Goiás. No mesmo estado, a empresa Votorantim Metais S.A. foi responsável por 21% da produção total brasileira. As outras empresas produtoras são a Vale S.A., localizada no Pará, e Mirabela Mineração do Brasil Ltda.

No ano de 2015, o Brasil exportou um total aproximado de 880 milhões de dólares relativos à venda de níquel para países como Estados Unidos, China, Japão e Países Baixos. Este bem foi comercializado como bens primários, manufaturados, compostos químicos e, a maior parte, como bens semimanufaturados. Por outro lado, as importações somaram cerca de 120 milhões de dólares em níquel, em sua totalidade na forma de bens semimanufaturados, provenientes de países como Rússia, China, Argentina e Peru.

No final do século XX, o preço do níquel oscilava entre 20 mil e 5 mil dólares a tonelada. A partir de 2004, devido à crescente demanda chinesa, o preço do níquel começa a subir e atinge seu máximo no primeiro semestre de 2007 (Figura 14). A grave crise econômica que se instala em todo o mundo no segundo semestre de 2008 faz com que o valor do metal despenque e fique bastante oscilante. Atualmente, o preço do níquel é de aproximadamente 12 mil dólares a tonelada.

O cobalto é um metal tecnologicamente estratégico, porém é um subproduto do níquel. Devido à desvalorização do níquel, deixamos de produzir cobalto em 2013 e está situação não melhorou até os dias de hoje. Desde 2010 o preço do cobalto nunca esteve tão alto, chegando a custar 90 mil dólares a tonelada (Figura 14), porém aparentemente essa valorização em relação ao níquel ainda não foi suficiente para a volta da sua produção no Brasil.

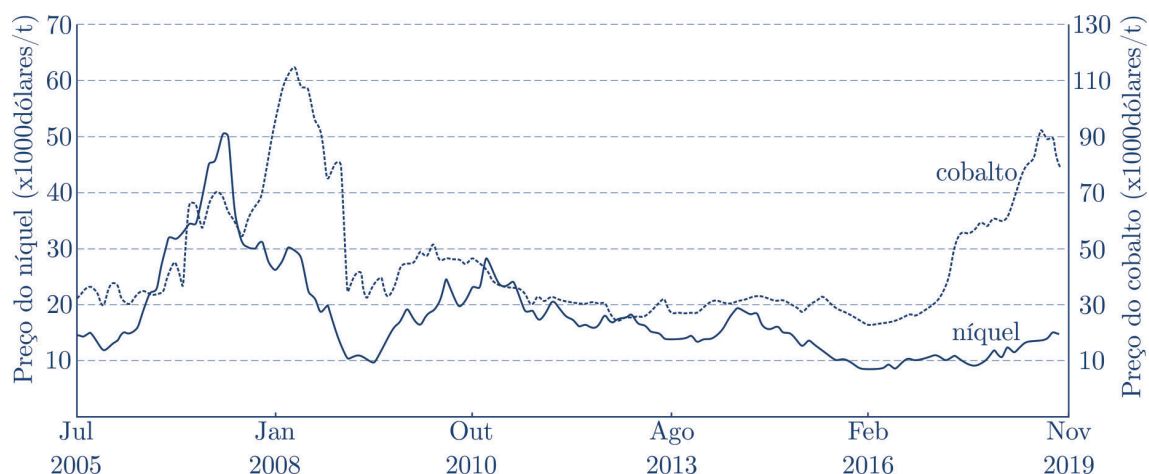


Figura 14. Histórico da variação do preço do níquel e cobalto (fonte: *Brasil Infomine* - acesso em 15/7/2018).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida S. 1998. *Petrologia de Rochas Ultramáficas Associadas ao Grupo Andrelândia e seu Embasamento, na região de Liberdade, Arantina, Andrelândia, São Vicente de Minas e Carrancas, MG*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 194 p.
- Almeida C.M., Olivio G.R., Carvalho S.G. 2007. The Ni-Cu-PGE sulfide ores of the komatiite-hosted Fortaleza de Minas deposit, Brazil: evidence of hidrothermal remobilization. *The Canadian Mineralogist*, **45**(4):751-773. doi: 10.2113/gscanmin.45.4.751
- Angeli N. 1988. *Pesquisa dos jazimentos de Níquel e geologia da Folha Ipanema – Minas Gerais*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 290 p.
- Angeli N., Teixeira W., Heaman L., Moore M., Fleet M.E., Sato K. 2004. Geochronology of the Ipanema Layered Mafic-Ultramafic Complex, Minas Gerais, Brazil: evidence of extension at the Meso-Neoproterozoic time boundary. *International Geology Review*, **46**(8):730-744. doi: 10.2747/0020-6814.46.8.730
- Baldwin W.H. 1931. The story of nickel. I. How "Old Nick's" gnomes were outwitted. *Journal of Chemical Education*, **8**(9):1749-1761. doi: 10.1021/ed008p1749
- Butt C.R.M., Lintern M.J., Anand R.R. 2000. Evolution of the regoliths and landscapes in deeply weathered terrain – implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, **16**(3-4):167-183. doi: 10.1016/S0169-1368(99)00029-3
- Carvalho S.G. & Brenner T.L. 2010. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-EGP de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. In: Brito R.S.C. de, Silva M.G., Kuyumjian R.M. (eds.). *Modelos de Depósitos de Cobre do Brasil e sua Resposta ao Intemperismo*. Brasília, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 97-125.
- Costa M.L. 2016. O níquel no Brasil e seus depósitos lateríticos. In: Melfi A.J., Misi A., Campos D.A., Cordani U.G. (orgs.). *Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios*. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, p. 124-132.
- Cornwall H.R. 1966. Nickel Deposits of North America. Geological survey *Bulletin* 1223, United states government printing office, Washington, 62 p.
- González-Álvarez I., Pirajno F., Kerrich R. 2013. Hydrothermal nickel deposits: Secular variation and diversity. *Ore Geology Reviews*, **52**:1-3. doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.11.006
- Haxel G.B., Hedrick J.B., Orris G.J. 2002. Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology. USGS - *U.S. Geological Survey*, Fact Sheet 087-02, 4 p.
- Hill R.E.T. 2001. Komatiite volcanology, volcanological setting and primary geochemical properties of komatiite-associated nickel deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **1**(4):365-381. doi: 10.1144/geochem.1.4.365
- International Nickel Study Group. 2018. Disponível em <http://www.insg.org/>. Acesso em 5/1/2018.
- Keays R.R. & Jowitt S.M. 2013. The Avebury Ni deposit, Tasmania: A case study of an unconventional nickel deposit. *Ore Geology Reviews*, **52**:4-17. doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.07.001
- McKean B.A. 2011. Naturally-occurring, micro-nutrient nickel fundamental in ammonia conversion. *Nickel - the magazine devoted to nickel and its applications*, **26**(2):16.
- Naldrett A.J. 2010. *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Springer Berlin Heidelberg, Germany, 727 p. ISBN: 9783642060991, doi: 10.1007/978-3-662-08444-1
- Naldrett A.J., Brugmann G.E., Wilson A.H. 1990. Models for the concentration of PGE in layered intrusions. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, *The Canadian Mineralogist*, **28**(3):389-408.
- Nickel Institute. 2018. Disponível em <https://www.nickelinstitute.org/>. Acesso em 5/1/2018.
- Parkinson R. 2001. Nickel plating and electroforming: Essential industries for today and the future. Nickel development Institute. *NiDI Technical Series* Nº 10088. 30 p.

- Pinheiro W.F., Ferreira Filho O.B., Neves C.A.R. (coords.). 2016. *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 31 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.
- Robb L. 2004. *Introduction to ore-forming processes*. Wiley-Blackwell, Australia, 382 p. ISBN: 9780632063789
- Santos L.C.S. 1972. *Evolução geoquímica e mineralógica de um solo niquelífero*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 105 p.
- USGS - U.S. Geological Survey. 2018. *Nickel: Statistics and information*. Disponível em <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/#pubs>. Acesso em 5/1/2018.