

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS LITOTIPOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS SÍLICO-CARBONATADO DA MINA MORRO DA MINA¹

Nívea Cristina da Silva Viana²
Érica Linhares Reis³
Geraldo Lucio de Faria⁴
Fernando Gabriel da Silva Araújo⁵

Resumo

Neste trabalho são apresentados estudos de caracterização mineralógica de minérios de manganês da Mina Morro da Mina, localizada em Conselheiro Lafaiete – MG. O minério da Mina Morro da Mina é formado por silicatos e carbonato de manganês, com predominância dos silicatos. Foram realizadas análises químicas e mineralógicas. O minério apresenta recuperação média em massa de 90% para o granulado devido à estrutura maciça da rocha. Os minerais-minério encontrados são rodocrosita, rodonita, tefroíta, alabandita, espessartita e os minerais ganga são grafita, anfibólio, micas e alguns sulfetos. Sendo a rodocrosita (carbonato de manganês) e a espessartita (silicato de Mn) os majoritários. A rodocrosita e a espessartita se apresentam, ambos, com tamanho médio de cristais de 150 µm. Os silicatos rodonita e tefroíta possuem cristais com tamanho médio bem maior, da ordem de 0,58 mm. O minério denominado de Primeira possui maior participação em peso de carbonato seguido pelo minério de Segunda e com proporção menor o minério de Terceira. Nos três tipos a rodocrosita e a tefroíta tendem a se concentrar nas frações denominadas granulado e no sinter feed e a espessartita e os minerais ganga tendem a se concentrar na lama, abaixo de 0,15 mm.

Palavras-chave: Minério de manganês; Mina de morro da mina; Caracterização tipológica.

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF SILICO-CARBONATE MANGANESE ORE LITOTYPES FROM MORRO DA MINA MINE

Abstract

This paper presents the mineralogical characterization of manganese ore litotypes from Morro da Mina's mine, placed at Conselheiro Lafaiete – MG. The Morro da Mina ore is composed for manganese silicates and carbonates, with silicates predominance. The performed procedures were chemical (by ICP) and mineralogical (OM and MEV) characterization. The studied ore presents an average recovery of 90% for the lump size, due his massive structure. The found high important minerals were rhodochrosite, rhodonite, tephroite, alabandite, spessartine. The found gangue minerals were graphite, amphibole, micas and some sulfides. The rhodochrosite (manganese carbonate) and the spessartine (manganese silicate) are the major constituents. The both, rhodochrosite and spessartine, have an average crystals size of 150 µm. The silicates rhodonite and tephroite have a bigger average crystals size, near from 0,58 mm. The ore called as by first are richest in carbonates, followed by the second and finally by the third. For the three litotypes of ore the rhodochrosite and the tephroite are accumulated in the lump and sinter feed fractions, however, the gangue minerals are accumulated in the fraction below the 0,15 mm.

Key words: Manganese ore; Morro da mina mining; Typological characterization.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro, M.Sc., Engenheira de Processo, Vale Manganês, Mina de Morro da Mina, Ouro Preto, MG, Brasil; nivea.viana@rdmbr.com.

³ Químico, M.Sc., Dr., Professor, Depto. de Eng. de Minas (demin), UFOP, MG, Brasil; ericalj_99@yahoo.com.br.

⁴ Físico, M.Sc., Dr., Professor, Depto. de Eng. Metalúrgica (Demet), UFOP; geraldofaria@yahoo.com.br.

⁵ Físico, M.Sc., Dr., Professor, Rede Temática em Eng. de Materiais (Redemat), UFOP; fgabrielaraujo@uol.com.br.

1 INTRODUÇÃO

A mina de Morro da Mina pertence a Vale Manganês S.A., localizada na cidade de Conselheiro Lafaiete, é centenária na história da mineração do Brasil. A região é caracterizada por um elevado comportamento planáltico bastante dissecado, onde ocorrem formas mamelares, resultando em uma topografia do tipo “mares de morros”, com altimetria que varia entre 400 m e 1.300 m. De acordo com os estudos existentes para a região em questão, as rochas encaixantes da mineralização são interpretadas como pertencentes aos terrenos granito-greenstone belt, formados por quartzo-biotita-xistos, anfibolitos, grafita-xistos, granitóides, granodioritos e a rocha mineralizada queluzito. Os corpos mineralizados são verticalizados e alongados, apresentando formas de sigmóides ou amêndoas, com desenvolvimento de processos de boudinagem em eixos verticais e horizontais.⁽¹⁻⁶⁾

Os distintos minérios de manganês utilizados como matéria-prima para produção de ferro-ligas de manganês são provenientes de diversas minas ou mesmo de diferentes frentes de lavra de uma mesma mina, e são usualmente caracterizados unicamente quanto às suas características químicas e granulométricas. Portanto, um problema frequentemente encontrado na rotina de operação dos fornos metalúrgicos de produção das ligas de manganês é o desconhecimento das propriedades metalúrgicas dos minérios de manganês, que são também função de suas características físicas e mineralógicas.^(7,8)

A caracterização mineralógica dos minérios dos depósitos é fundamental tanto para o conhecimento das características intrínsecas do minério, quanto para a busca de informações que elucidem sua gênese. Com o aprofundamento no conhecimento a respeito dos diferentes tipos de minérios originados em um depósito, cabe aos pesquisadores e às plantas de produção avaliar os seus desempenhos durante todo o processo de produção das ferro-ligas de manganês, buscando respostas que justifiquem determinados tipos de comportamento em cada etapa, visando otimizá-los.⁽⁷⁻¹⁰⁾

Estudos desta natureza viabilizam também a otimização dos recursos naturais através do seu melhor aproveitamento na mina, nos processos de concentração e metalúrgicos. O desenvolvimento de etapas de processos mais eficazes podem promover a geração de novos produtos com características especiais, que atendam melhor ao mercado de produção das ferro-ligas de manganês. A fase inicial desta grande cadeia de melhorias e desenvolvimento é a caracterização mineralógica dos diferentes materiais existentes em cada depósito mineral, através de um método sistemático.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras denominadas ROM (*Run of Mine*) foram coletadas de acordo com as classificações tipológicas utilizadas atualmente nas atividades rotineiras de operação da mina de Morro da Mina. A classificação baseia-se no teor de manganês presente nos minérios, sendo as classes Primeira, Segunda e Terceira, em ordem decrescente de teor de manganês contido.

Estas amostras foram homogeneizadas e quarteadas e passaram por processos de cominuição em moinho de disco para obtenção da amostra global para as etapas de caracterização. Toda a etapa de preparação das amostras foi realizada no laboratório de Tratamento de Minérios CT3/Fundação Gorceix.

Foram determinados os teores de Mn, Fe, CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ e P. Os teores de Mn e SiO₂ foram determinados por via úmida (titulometria) e os demais componentes por ICP – OES (Espectrômetro de emissão por Plasma Indutivamente Acoplado) no laboratório de Geoquímica Ambiental, DEGEO, UFOP.

Para identificação das principais fases minerais que compõem as tipologias de minérios de manganês, foi utilizado um difratômetro de raios X com varredura de 1,2º/grad/min. O equipamento de difração de raios X utilizado foi um difratômetro modelo Rigaku, série D/Max-B. A interpretação dos difratogramas foi feita através do *software* JADE 3.1 do fabricante MDI (Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto).

Para descrição mineralógica, ou seja, identificação e quantificação dos minerais, um microscópio metalográfico, provido de luz polarizada, da marca Leica foi utilizado. As análises mineralógicas e texturais das rochas foram realizadas por meio da descrição e quantificação dos minerais transparentes e opacos em lâminas delgadas polidas, observadas em microscópio de luz transmitida e refletida. Todas as análises foram realizadas no laboratório de microscopia do Departamento de Geologia da UFOP.

A metodologia adotada compreendeu a quantificação das fases minerais: granada, olivina, piroxenóides, carbonato, minerais de ganga, minerais opacos e, quando possível, a quantificação de poros. Esse método foi aplicado por partícula utilizando-se uma lente objetiva com aumento de 20 vezes e uma ocular com aumento de 10 vezes. A quantificação foi realizada duas vezes por lâmina, uma para minerais transparentes e outra para minerais opacos. Realizou-se também a quantificação do tamanho dos grãos das fases quantificadas. Foi medido o maior diâmetro de um grão de cada mineral por partícula analisada.

Para certificação da identificação de fases minerais, determinou-se a composição química pontual das amostras utilizando a microssonda do microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JEOL JSM 5510, equipada com detectores de energia dispersiva de raios X (*Energy Dispersive X-Ray Spectrometer – EDS*) do DEGEO/EM/UFOP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas globais para os minérios de manganês estudados. As análises químicas comprovam o critério de classificação utilizado na mina de Morro da Mina, sendo o minério de Primeira o tipo mais rico em manganês e o mais pobre em sílica, possuindo teor de 34,49% de Mn e de 15,17% de SiO₂. O minério de Segunda possui teor de manganês intermediário (32,31%) e 21,70% de SiO₂. O minério de Terceira apresenta o maior teor de sílica (33,21%), sendo ele inclusive superior ao de manganês (28,75%). Entre os produtos da mina destaca-se o granulado, com teor de Manganês intermediário (31,97%) e de sílica (23,51%) mais próximo ao do minério do segundo tipo.

Tabela 1. Teor dos principais elementos químicos das amostras tipológicas e de produtos de minérios de manganês de Morro da Mina (M1 – Minério de Primeira, M2 – Minério de Segunda, M3 – Minério de Terceira, PGR – Produto Granulado, PSF – Produto *Sinter Feed*)

Minério de Mn	Teor							
	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ca	Fe	Mg	P	Ti
Primeira	34,49%	15,17%	5,28%	2,91%	2,83%	1,06%	0,08%	0,10%
Segunda	32,31%	21,70%	8,18%	3,88%	3,23%	0,76%	0,08%	0,15%
Terceira	28,75%	33,21%	9,45%	3,72%	3,79%	0,93%	0,08%	0,16%
Produto Granulado	31,97%	23,51%	8,27%	3,69%	4,19%	0,96%	0,11%	0,17%
Produto <i>Sinter-Feed</i>	29,19%	28,69%	9,48%	3,31%	4,53%	0,88%	0,09%	0,18%

Cada um dos litotipos foi subdividido em três faixas granulométrica, sendo a primeira constituída de partículas menores que 1,19 mm, mas maiores que 0,15 mm, a segunda contendo partículas abaixo de 6,35 mm, mas acima de 1,19 mm e a terceira com partículas maiores que 6,35 mm. Foi realizada a caracterização química por faixa granulométrica dos litotipos. Os dados de recuperação mássica e os resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 2. Conforme se pode observar, trata-se de um minério compacto com recuperação elevada para o granulado, na média de 90% nos três litotipos. O minério de Terceira apresentou uma recuperação para o granulado (84,93%) ligeiramente menor que para o minério de Segunda (90,18%) e Primeira (92,30%).

Tabela 2. Resultados de análise química das amostras tipológicas de minério de manganês classificadas por faixas granulométricas

Tipologia	Faixa granulométrica (mm)	Recuperação em massa %	Teor						
			Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ca	Fe	Mg	P
1°	-1,19 +0,15	0,86	33,88%	20,15%	4,56%	2,24%	7,10%	1,10%	0,07%
	-6,35 +1,19	5,34	35,72%	17,87%	5,61%	3,17%	3,23%	1,06%	0,08%
	+6,35	92,3	35,37%	16,77%	5,73%	3,20%	2,96%	1,04%	0,07%
2°	-1,19 +0,15	1,18	33,02%	20,80%	5,81%	3,45%	4,75%	0,94%	0,08%
	-6,35 +1,19	7,25	33,77%	18,72%	6,36%	3,99%	3,16%	0,90%	0,07%
	+6,35	90,1	32,98%	17,62%	6,56%	3,93%	3,08%	0,91%	0,07%
3°	-1,19 +0,15	2,8	30,05%	31,98%	9,27%	2,76%	5,51%	0,85%	0,07%
	-6,35 +1,19	8,71	30,66%	31,60%	9,26%	3,14%	3,91%	0,94%	0,08%
	+6,35	84,93	30,07%	33,13%	11,60%	3,58%	3,93%	0,87%	0,09%

Os minérios de Primeira, de Segunda e de Terceira de Morro da Mina apresentam diferenças pouco significativas quanto aos teores de manganês e sílica por faixa granulométrica (granulado e as duas faixas de sinter feed), o que justifica a pequena diferença entre qualquer uma das faixas granulométricas analisadas e o ROM.

As principais características macroscópicas das rochas classificadas como minério estão relacionadas com a estrutura e coloração. Todas possuem estrutura compacta, sendo a diferença entre os três tipos de minério sutil, caracterizada principalmente pela coloração da rocha. O minério de Primeira apresenta coloração cinza homogênea, o minério de Segunda apresenta coloração cinza com vênulas milimétricas de coloração branca e o minério de Terceira apresenta coloração cinza

claro e às vezes coloração rosada em alguns pontos. A Figura 1 apresenta fotos que ilustram estas características.

Microscopicamente, os três tipos de minério possuem a mesma assembléia mineralógica, diferenciando-se somente no percentual de cada fase mineral em cada tipo. Não foi observada porosidade em nenhum dos tipos de minério, através de microscopia óptica.

Por meio da aplicação das técnicas de difratometria de raios X e microscopia óptica, pôde-se observar que os principais constituintes do minério de Morro da Mina portadores de manganês são carbonatos, silicatos e sulfetos. Como minerais de ganga ocorrem os anfibólios, micas, grafita e alguns sulfetos. Entre os silicatos, foram identificados espessartita (granada), tefroíta (olivina) e rodonita (piroxenóide). O carbonato de manganês é a rodocrosita e o sulfeto a alabandita. A grafita, a grunerita (anfibiólio) e a anita (mica) foram identificados como minerais de ganga. Observou-se que os minerais minérios perfazem mais de 85% em peso da composição mineralógica dos minérios de Morro da Mina.

A Tabela 3 apresenta os percentuais em volume das principais fases minerais presentes nas amostras de minério de manganês da mina de Morro da Mina, quantificados por microscopia óptica. As fases quantificadas foram alabandita, espessartita, rodocrosita, rodonita e tefroíta. Foram quantificados também em uma única classe os minerais de ganga.

Pôde-se observar que as proporções minerais justificam os resultados obtidos pela análise química, pois o minério denominado de Primeira possui maior participação em peso de carbonato seguido pelo minério de Segunda e com proporção menor o minério de Terceira, o que conseqüentemente explica a mesma ordem decrescente dos teores de Mn. Em contra partida, o minério de Terceira é o mais rico em silicatos, seguido pelo de segunda e finalmente pelo de Primeira, justificando assim a mesma ordem decrescente dos teores de SiO₂.



Figura 1. Macrografias das rochas de minério de manganês de Morro da Mina (a) minério de primeira; (b) minério de segunda; e (c) minério de terceira).

Tabela 3. Percentuais em volume das principais fases minerais presentes nas amostras de minério de manganês de Morro da Mina, quantificados por microscopia óptica

Minério de Mn	Espessartita	Tefroíta	Rodonita	Rodocrosita	Alabandita	Ganga
Primeira	20,56%	19,90%	3,04%	36,73%	2,38%	17,39%
Segunda	27,57%	6,56%	25,58%	25,79%	2,83%	11,68%
Terceira	28,44%	6,30%	21,61%	18,47%	2,84%	22,34%
Produto Granulado	24,98%	15,72%	6,15%	26,94%	4,22%	21,99%
Produto Sinter-Feed	24,73%	5,86%	15,34%	25,64%	3,12%	25,30%

Observou-se ainda que, nos três tipos de minérios, a rodocrosita e a tefroíta tendem a se concentrar nas frações denominadas granulado e no sinter feed e a espessartita e os minerais ganga tendem a se concentrar na lama, abaixo de 0,15 mm.

Pôde-se observar que, de forma geral, todos os litotipos, assim como os produtos são majoritariamente constituídos pelos silicatos, destacando-se entre eles a espessartita ($A_3B_2(TO_4)_3$) que apresentou a composição variada entre 97% e 52% de Mn na posição A da molécula. Com o auxílio da microsonda acoplada a um MEV foi possível traçar um diagrama ternário que apresenta as variações nas substituições do Mn da espessartita por outros elementos, como Ca no caso da grossularita e Mg no caso do piropo. A Figura 2 apresenta este diagrama associado a uma fotomicrografia de luz transmitida de uma partícula essencialmente constituída por espessartita. Observou-se que o tamanho médio dos cristais da espessartita é 150 μ m, estando os maiores cristais no minério de Terceira, e os menores no de Segunda.

Os carbonatos presentes, com composições químicas do tipo ACO_3 foram caracterizados levando-se em consideração os elementos Mn, Ca e Mg como ocupantes da posição A na molécula. Assim sendo, com a aplicação da microsonda acoplada a um MEV foi possível obter um diagrama ternário que considera três minerais diferente, sendo eles a rodocrosita (A=Mn), a calcita (A=Ca) e a dolomita (A=Mg). Pôde-se observar a presença majoritária da rodocrosita com tamanho médio de cristal idêntico ao da espessartita 150 μ m, porém observou-se que no minério de primeira, estes cristais se apresentam com maior diâmetro médio do que nos demais litotipos. A Figura 3 apresenta o diagrama ternário e uma fotomicrografia de luz transmitida com nicóis cruzados, onde é possível observar uma partícula constituída por cristais granoblásticos de rodocrosita, que se destacam pela tonalidade rosácea.

Por meio da aplicação da microsonda acoplada ao MEV, observou-se, de forma geral, que os minerais presentes nas tipologias mais ricas apresentam teores de manganês mais elevados, a rodocrosita possui teores de 34% e 30,3%, a espessartita 31,7% e 29,9%, a rodonita 34,9% e 34,7% e a tefroíta 44,8% e 45,5%, respectivamente para minérios de Primeira e Terceira.

Observou-se que os minerais de rodonita e tefroíta, também presentes de forma significativa, apresentam-se como porfiroblastos com tamanho médio de 0,58 mm, bem superior ao tamanho médio dos outros minerais que estão na ordem de 0,15 mm, inclusive os minerais ganga. Ocorrem inclusões de espessartita e carbonatos na rodonita e na tefroíta e inclusões de rodocrosita nos grãos de espessartita. Observou-se que os minerais de ganga ocorrem disseminados na estrutura da rocha.

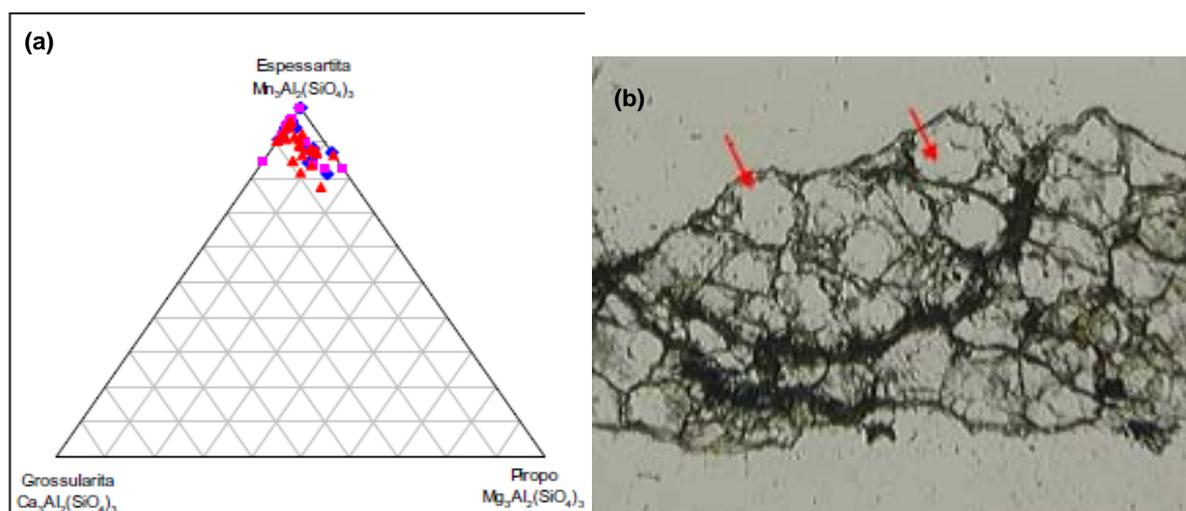


Figura 2. (a) Diagrama das variações nas substituições entre as diferentes moléculas de espessartita, grossularita e piropo nas amostras de minério de Morro da Mina (Triângulos Vermelhos – minério de primeira, Quadrados Rosas – minério de segunda e Losangos Azuis – minério de terceira); e (b) Fotomicrografia de luz transmitida de uma partícula essencialmente constituída por espessartita (largura da fotomicrografia: 500 μm).

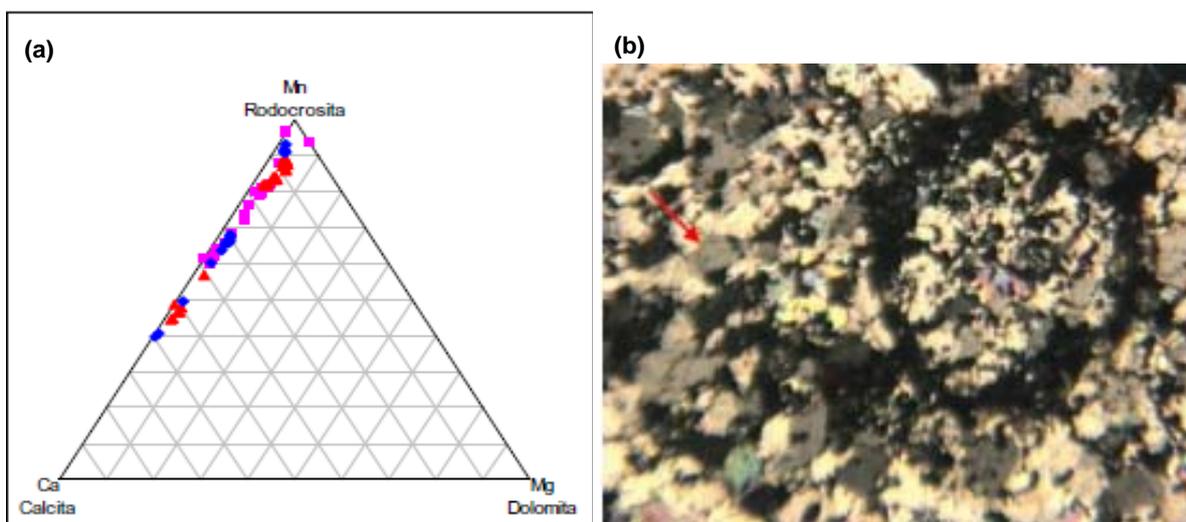


Figura 3. (a) Diagrama das variações nas substituições entre as diferentes moléculas de carbonatos nas amostras de minério de Morro da Mina (Triângulos Vermelhos – minério de primeira, Quadrados Rosas – minério de segunda e Losangos Azuis – minério de terceira); (b) fotomicrografia de luz transmitida com nicóis cruzados de uma partícula essencialmente constituída por rodocrosita (largura da fotomicrografia: 500 μm).

4 CONCLUSÕES

- O minério de Morro da Mina se caracteriza por sua natureza carbonática e silicática. É formado por silicatos e carbonato de manganês, predominando os minerais-minério de natureza silicática, perfazendo aproximadamente 60% em peso. Os minerais carbonáticos constituem cerca de 25% em peso, estando os 15% restantes associados aos minerais de ganga sulfetados, a grafita e alguns tipos de silicatos. A rocha é compacta e apresenta textura granoblástica, localmente observam-se veios de rodonita. A mineralogia associada ao minério de manganês de Morro da Mina é a mesma para os três litotipos hoje classificados, diferenciando-se somente na proporção em peso

de cada fase mineral. As diferentes proporções, no entanto, se refletem no teor de manganês, variável utilizada na classificação tipológica atual;

- os minerais presentes nas tipologias mais ricas apresentam teores de manganês mais elevados, a rodocrosita possui teores de 34% e 30,3%, a espessartita 31,7% e 29,9%, a rodonita 34,9% e 34,7% e a tefroíta 44,8% e 45,5%, respectivamente para minérios de Primeira e Terceira;
- os minerais de rodonita e tefroíta apresentam-se como porfiroblastos com tamanho médio de 0,58 mm, bem superior ao tamanho médio dos outros minerais que estão na ordem de 0,15 mm, inclusive os minerais de ganga. Ocorrem inclusões de espessartita e carbonatos na rodonita e na tefroíta e inclusões de rodocrosita nos grãos de espessartita. Os minerais de ganga ocorrem disseminados na estrutura da rocha; e
- o minério de Primeira possui 36% em peso de rodocrosita; o minério de Segunda, 26% e o minério de Terceira 18%. A rodocrosita e a tefroíta tendem a se concentrar no granulado e no *sinter feed* e a espessartita e os minerais de ganga tendem a se concentrar na lama, abaixo de 0,15 mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale-Manganês pela concessão das amostras e financiamento do projeto, ao DEPEC-Fundação Gorceix, à Redemat, à UFOP e à FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 ARAÚJO, M. C.; FILHO, D. A. e REINHARDT, M. C. Mapeamento geológico e estrutural do Morro da Mina, Conselheiro Lafaiete. Relatório Interno, 2005. 64p.
- 2 CHAUDHARY, P. N.; GOEL, R. P. & ROY, G. G. Dephosphorization of high carbon ferromanganese using BaCO₃ based fluxes. Ironmaking and Steelmaking, vol. 28, nº 5, pág. 396-403, 2001.
- 3 CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. ABM, 6ª Edição, São Paulo, SP. 1990.
- 4 REIS, E. L. Caracterização e Tratamento de Alguns Minérios de Manganês Utilizados para a Produção de Ferro-Ligas, com Ênfase no Comportamento do As, Pb, Cd, Hg e Zn. Tese de Doutorado. Rede temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 185 p., 2010.
- 5 REIS, E. L. Caracterização dos resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM - Unidade Morro da mina. 2005. 124p. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2005.
- 6 VIANA, N. C. S. Mineralogia, Calcinação e Nova Classificação Tipológica De Minérios de Manganês Sílico-Carbonatados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT. Ouro Preto, Brasil, 99p, 2009.
- 7 FARIA, G. L. Estudo da Intensidade de Crepitação de Minérios Granulados de Manganês do Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT. Ouro Preto, Brasil, 125p, 2008.
- 8 FARIA, G. L. Estudo Geometalúrgico de Granulados e Pelota de Minério de Manganês. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT. Ouro Preto, Brasil, 302p, 2011.
- 9 OLSEN, S. E; TANGSTAD, M; LINDSTAD, TOR. Production of Ferromanganese Alloys in the submerged Arc Furnace. Trondheim, Norway, 247p, 2007.
- 10 WALDE, D. H. G; GIERTH, E.; LEONARDOS, O. H. Stratigraphy and Mineralogy of the Manganese Ores of Urucum, Mato Grosso, Brazil. Band 70, Heft3. p.1077-1085. 1981.