



Caracterização Tecnológica e Mineralógica dos Itabiritos Quartzo-Dolomítico e Dolomítico da Mina de Jangada, e Uso da Separação Magnética como Método de Concentração
Technological and Mineralogical Characterization of Quartz-Dolomitic and Dolomitic Itabirites with low Iron Content and Use of Magnetic Separation as a Method of Concentration

Natercia Lage Duarte Cruz Drumond Junia^{1,2};
Rosaline Cristina Figueiredo e Silva¹ & Paulo Roberto Gomes Brandão³

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia,
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Vale S.A., Diretoria Corredor Sudeste, Planejamento Curto Prazo Paraopeba,
Fazenda da Mutuca, s/nº Mutuca, 34000-000, Nova Lima, MG, Brasil.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Minas,
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
E-mails: njuniageo@yahoo.com.br; rosalinecris@yahoo.com.br & pbrandao@demin.ufmg.br

Recebido em: 08/07/2018 Aprovado em: 27/09/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_195_206

Resumo

Existe a necessidade crescente de aproveitamento de minérios de ferro com teores de ferro cada vez mais baixos. Para tal aproveitamento, são indispensáveis estudos de caracterização tecnológica e mineralógica do material. Neste trabalho, foram analisadas duas amostras de itabiritos carbonáticos com baixos teores de Fe para verificar a viabilidade da separação magnética como método de concentração. A amostra de itabirito quartzo-dolomítico apresenta em sua composição 28,68% de Fe, com grande quantidade de CaO (6,15%) e SiO₂ (42,29%). A mineralogia é composta basicamente por magnetita, quartzo e dolomita. Os resultados da etapa *rougher* de separação magnética mostrou um aumento de teor de Fe para 56,43%, com uma recuperação de 88,24%, sendo necessária uma etapa *cleaner* para purificação do concentrado. A amostra de itabirito dolomítico apresenta em sua composição uma baixa quantidade de SiO₂ (0,91%) e teor de Fe de 35,27%, com a presença majoritária de hematita. O resultado da etapa *rougher* da separação magnética apresentou um aumento do teor de Fe para 65,46%, já caracterizado como produto final. A etapa *scavenger* recuperou boa parte do Fe (72,63%) perdido na etapa *rougher*. No geral, a separação magnética se mostrou um método eficiente para a concentração de itabiritos dolomítico e quartzo-dolomítico.

Palavras-chave: Caracterização; Separação Magnética; Itabirito dolomítico; Itabirito quartzo-dolomítico

Abstract

There is a growing need for the use of iron ore with lower iron contents, for which studies of technological and mineralogical characterization are crucial to have a better understanding of the material. In this case study two samples of dolomitic itabirite with low Fe contents were analyzed to verify the viability of the magnetic separation as a concentration method. The quartz-dolomitic itabirite sample has 28.68% Fe, with a large amount of CaO (6.15%) and SiO₂ (42.29%). The mineralogy is composed mainly of magnetite, quartz and dolomite. The results for the rougher stage of magnetic separation showed an increase of Fe content to 56.43%, with a recovery of 88.24%, requiring a cleaner stage to purify the concentrate. The sample of dolomitic itabirite has in its composition a low amount of SiO₂ (0.91%) and Fe content of 35.27%, with the presence of hematite. The result of the rougher stage of magnetic separation showed an increase of Fe content to 65.46%, already being characterized as final product. The scavenger stage recovered most of the Fe (72.63%) lost in the rougher stage. In general, magnetic separation proved to be an efficient method for the concentration of dolomitic and quartz dolomite itabirite.

Keywords: Characterization; Magnetic Separation; dolomitic itabirite; quartz-dolomitic itabirite

1 Introdução

O contexto atual dos depósitos de minério de ferro constitui-se na exaustão dos depósitos de minério de alto teor, compostos principalmente por hematítos e no aproveitamento econômico de áreas contendo itabiritos. Itabiritos apresentam uma diversidade mineralógica, com complexas associações entre os minerais, cristais de diminutos tamanhos e baixo teor de Fe na alimentação da usina de beneficiamento (Gonçalves & Peres, 2015). Este cenário acarreta a necessidade de se ampliar os estudos de caracterização tecnológica, com técnicas modernas, objetivando o máximo conhecimento possível do minério, analisando os efeitos das propriedades destes nos processos de concentração mineral.

A diminuição dos teores de Fe causa impacto direto nas etapas de concentração do minério de ferro. Para os minérios que já atendem as especificações de teores, é suficiente apenas uma adequação granulométrica (Carmo *et al.*, 2014). Com a diminuição dos teores e conseqüentemente do tamanho de liberação dos grãos, etapas de separação gravítica, separação magnética e flotação estão sendo incorporadas ao processo de beneficiamento. A separação gravítica encontra em desuso nos atuais depósitos, enquanto que os outros dois métodos são os mais utilizados atualmente no processamento do minério de ferro. Contudo, com o aproveitamento de materiais com teores de Fe mais baixos, torna-se cada vez maior a utilização de circuitos industriais de concentração complexos, com mais etapas, de modo que se obtenha um produto com as especificações comerciais, seja no teor mínimo exigido de Fe como no teor máximo exigido dos contaminantes.

A separação magnética é comumente aplicada na maior parte das plantas de beneficiamento de minérios itabiríticos do Brasil (Queiroz & Brandão, 2009). Os principais equipamentos utilizados nas plantas de beneficiamento de minério de ferro brasileiro são do tipo *Wet High Intensity Magnetic Separator* (WHIMS), que empregam alta intensidade de campo magnético, e do tipo tambor, que empregam baixa e média intensidade de campo magnético. Nas plantas industriais de beneficiamento de minério de ferro que utilizam a concentração magnética de alta

intensidade, é imprescindível uma etapa inicial de separação magnética de baixo campo magnético (<2000 G) para materiais com proporção volumétrica de magnetita igual ou superior a 30%. Para proporção volumétrica de magnetita entre 5% e 30%, é necessária uma etapa de separação magnética de médio campo (2000 a 9000 G; Queiroz & Brandão, 2009).

O objetivo deste trabalho consiste na caracterização tecnológica de amostras de itabiritos quartzo-dolomítico e dolomítico provenientes da mina de Jangada, localizada em Brumadinho-MG, e analisar a viabilidade da separação magnética como método de concentração ou de pré-concentração deste material.

2 Geologia da Área

O Quadrilátero Ferrífero é um distrito mine-rário, principalmente de ferro e ouro, localizado na borda sudeste do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977) e pode ser dividido, segundo Dorr (1969) e Carneiro *et al.* (1998), em três grandes unidades litoestratigráficas: complexos metamórficos granito-gnáissicos diferenciados de idade Arqueana e denominados: Bação, Bonfim, Caeté, Congonhas e Belo Horizonte; Supergrupo Rio das Velhas com suas seqüências supracrustais metavulcano-sedimentares de idade Arqueana; e Supergrupo Minas constituído de seqüências metassedimentares de idade Paleoproterozóica.

A área estudada localiza-se no segmento oeste da Serra do Curral, domínio de baixo grau metamórfico (Herz, 1978; Pires, 1995; Alkmim & Marshak, 1998; Rosière *et al.*, 2001), onde as formações Gandarela, Cauê, Batatal e Moeda estão estratigraficamente invertidas (ver Figura 1).

A Formação Moeda ocupa o limite sul/sudeste da área de estudo e apresenta-se em inconformidade sobre as rochas graníticas do Complexo Bonfim. É constituído por quartzito acinzentado com lentes de conglomerados e filitos, sendo seu contato com a formação superior gradacional. A Figura 2 apresenta a coluna estratigráfica da área, e a Figura 3 exhibe mapa e seções da mina de Jangada.

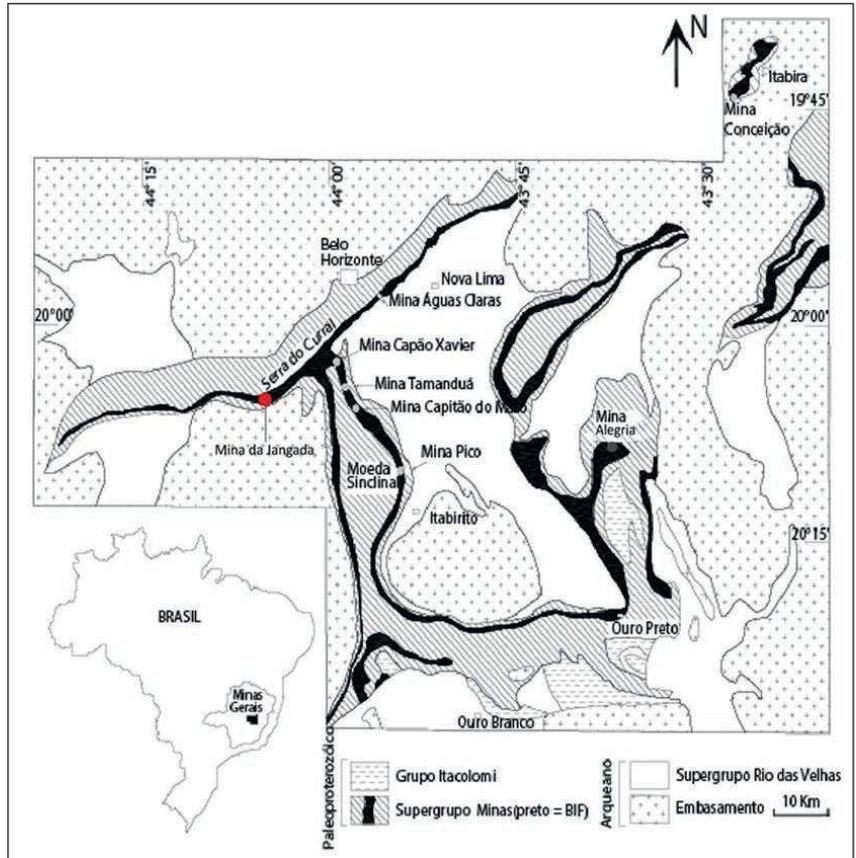


Figura 1 Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero com a indicação da Serra do Curral e da área de trabalho (círculo vermelho) (modificado de Spier *et al.*, 2008).

Ao sul da área estudada, afloram gnaisses do Complexo Bonfim. O quartzito da Formação Moeda ocupa o limite sul/sudeste da área de estudo e apresenta-se em inconformidade sobre as rochas graníticas do embasamento. É constituído por quartzito acinzentado com lentes de conglomerados e filitos, sendo seu contato com a formação superior gradacional.

O contato entre o filito da Formação Batatal com Formação ferrífera bandada (FFB) é de natureza transicional, migrando de filito carbonático para dolomito ferruginoso e/ou itabirito dolomítico. A FFB é composta por itabiritos goethíticos /anfíbolíticos, carbonáticos e silicosos, hospedeira de grandes volumes de minérios hematíticos friáveis e compactos de alto teor associados aos itabiritos dolomíticos. A rocha intrusiva, mapeada no noroeste da mina de Jangada, possui textura fanerítica fina a média, que apresenta foliação de borda, espessura aproximadamente 1 a 5 metros, direção NW/SE e mergulha para SE. Coberturas Fanerozóicas presentes na área consistem em argilitos avermelhados, colúvios e diamictitos com blocos de hematitito e/ou itabirito, e com matriz suportada com argila avermelhada.

EP	Sgr	Gr	Fm	DESCRÇÃO	
TERCIÁRIO				Argilito avermelhado/ Laterita	
				Colúvio e diamictito	
				Discordância erosiva	
	PROTEROZOICO INFERIOR	SUPERGRUPO MINAS	Gr. Itabira	Fm. Gendrela M3	Indiviso
				M2	Quartzo-Dolomito
			Formação Caeté	M2	Itabirito goethítico
				M2	Itabirito quartzito
				M4	Hematíticos friável e compacto
				M1	Itabirito dolomítico
		Gr. Carajás	M2	Itabirito quartzo-carbonático	
			M2	Dolomito	
			Fm. Batatal M1	Filitos sericitico e carbonáticos, e mármores	
Fm. Moeda			Quartzitos finos		
ARQUEANO	EMBASAMENTO			Discordância erosiva. Desencolamento basal	
				Complexo Bonfim granito-gnaissicos	

Figura 2 Coluna estratigráfica da área de estudo.

3 Materiais e Métodos

3.1 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada através de microscopia óptica, difração de raios X (DRX) complementada com química dos elementos maiores por fluorescência de raios X e microscópio eletrônico de varredura-MEV automatizado *Quanti-*

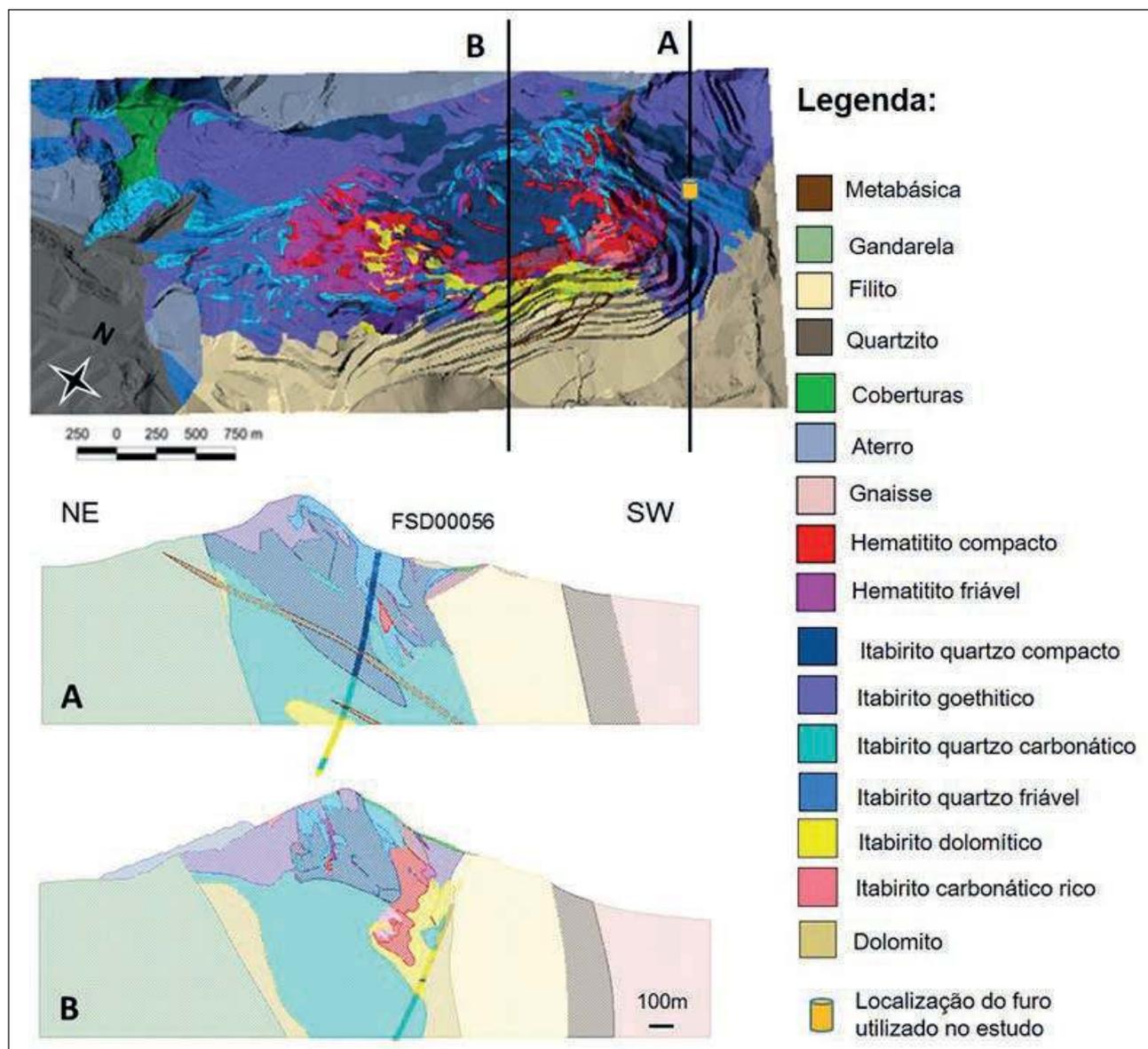


Figura 3 Mapa geológico e seções geológicas da mina de Jangada. A) seção do Furo JGD-0056, e B) seção típica do depósito.

tative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy (QEMSCAN). Todas as análises foram realizadas no laboratório do Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale S.A., na mina de Alegria, no município de Mariana.

Os teores foram determinados por análise quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), equipamento Rigaku modelo Simultix 12, em pastilha fundida com uma mistura de metaborato e tetraborato de lítio, sendo analisados os seguintes elementos: Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, TiO₂,

CaO e MgO. Já o valor de perda por calcinação (LOI) é determinado pelo método de gravimetria, em razão da variação de massa da amostra após permanecer em mufla com temperatura 1000°C por 1 hora; esta perda de massa, em geral, definido pela queima, decomposição e eliminação de materiais: orgânicos, carbonatos, água de cristalização e gases compreendidos na amostra.

Foram utilizadas duas amostras (AM87 e AM90) de itabiritos compactos carbonáticos provenientes da mina de Jangada, do furo JGD-00056. A

amostra AM87 possui um elevado conteúdo de SiO_2 , sendo classificada como itabirito quartzo-dolomítico (ISDO). A amostra AM90, por não apresentar teor significativo de SiO_2 , é aqui classificada como itabirito dolomítico (IDO). As duas amostras foram descritas petrograficamente, e elementos químicos analisados conforme Tabela 1.

A Figura 4 ilustra o fluxograma dos ensaios das duas amostras. Inicialmente, foram britadas em 25,40mm em um britador de mandíbulas, escala laboratorial, de modo que todo o material apresentasse granulometria inferior ao tamanho citado. Em seguida, o material foi homogeneizado, quarteado e separado as alíquotas para a efetuação dos testes de análise granulométrica e análise química nas diferentes faixas. As faixas escolhidas para a análise foram: -25,40mm +12,50mm; -12,50mm +8,00mm; -8,00mm +6,30mm; -6,30mm +1,00mm; -1,00mm +0,15mm; -0,15mm.

Após as análises granuloquímicas, como não houve liberação do óxido de ferro em nenhuma fração analisada, procedeu-se à moagem do material em moinho de bolas. Os testes de moagem foram realizados com 60% de sólidos em um moinho tubular com 40% do volume ocupado por bolas de 25mm de diâmetro. Após a moagem, as amostras foram homogeneizadas e quarteadas separando as alíquotas para os próximos ensaios de granulometria, microscopia e separação magnética. Sendo o primeiro ensaio a análise granulométrica do produto da moagem, para verificação da distribuição granulométrica do material.

A preparação do material para a realização da análise mineralógica em microscópio óptico envolve embutir em resina epóxi e polimento em politriz manual gerando a seção polida de grãos. A análise mineralógica foi realizada em um microscópio petrográfico LEICA, modelo DMPL, no Laboratório de Metalogenia do CPMTIC-IGC-UFGM. O método

utilizado para a quantificação mineralógica foi a estimativa percentual da área ocupada por cada mineral identificado no campo visual analisado, através da contagem por ponto, linha e áreas, dividindo-se o campo visual em subcampos de igual percentual de área e em seguida, a conversão para 100% da seção polida.

A microscopia de luz refletida é empregada para a identificação de minerais opacos, sendo os transparentes quantificados pela análise mineralógica do MEV automatizado com o sistema QEMSCAN (através do software *iMeasure*). Na análise com QEMSCAN utilizaram-se as mesmas seções polidas, porém recobertas com camada condutora de carbono. O equipamento é composto por um conjunto de detectores de sinais de elétrons retroespalhados e de raios X por dispersão de energia (EDS) gerados a partir de um feixe de elétrons incidente sobre uma amostra. Imagens de elétrons retroespalhados permitem identificar os minerais pelo tom de cinza, e o EDS pela composição química. Após tratamento de dados no software *iExplorer* foram obtidas: quantificação mineralógica modal, análise de liberação, associações minerais, análise química por mineral, imagens digitais das composições minerais diferenciadas por cor, e imagens por elétrons retroespalhados.

Os difratogramas de raios X foram coletados em um difratômetro da marca PANalytical, no intervalo de 5° a 80° (2θ), usando tubo de anodo de Co. As fases mineralógicas foram identificadas e interpretadas pelo software High Score Plus. Para a análise difratométrica, as amostras foram pulverizadas abaixo de $45 \mu\text{m}$.

3.2 Separação Magnética

Os testes de separação magnética objetivaram a concentração dos óxidos de ferro. Foi utilizado o concentrador eletromagnético estático em escala de

	Metragem				Análise Química (%)								
					Fe	SiO_2	P	Al_2O_3	Mn	TiO_2	CaO	MgO	LOI
AM 87	431,05	443,05	12	IDOS	29,16	42,60	0,031	0,16	0,15	0,001	2,16	6,03	7,53
AM 90	522,4	534,5	12,1	IDO	37,48	0,81	0,028	0,14	0,34	0,001	9,32	14,75	21,96

Tabela 1 Análise de fluorescência de raios X dos elementos maiores do Furo JGD-00056; em negrito as amostras selecionadas para estudos de caracterização mineralógica (Banco de dados Vale S.A. 2016).

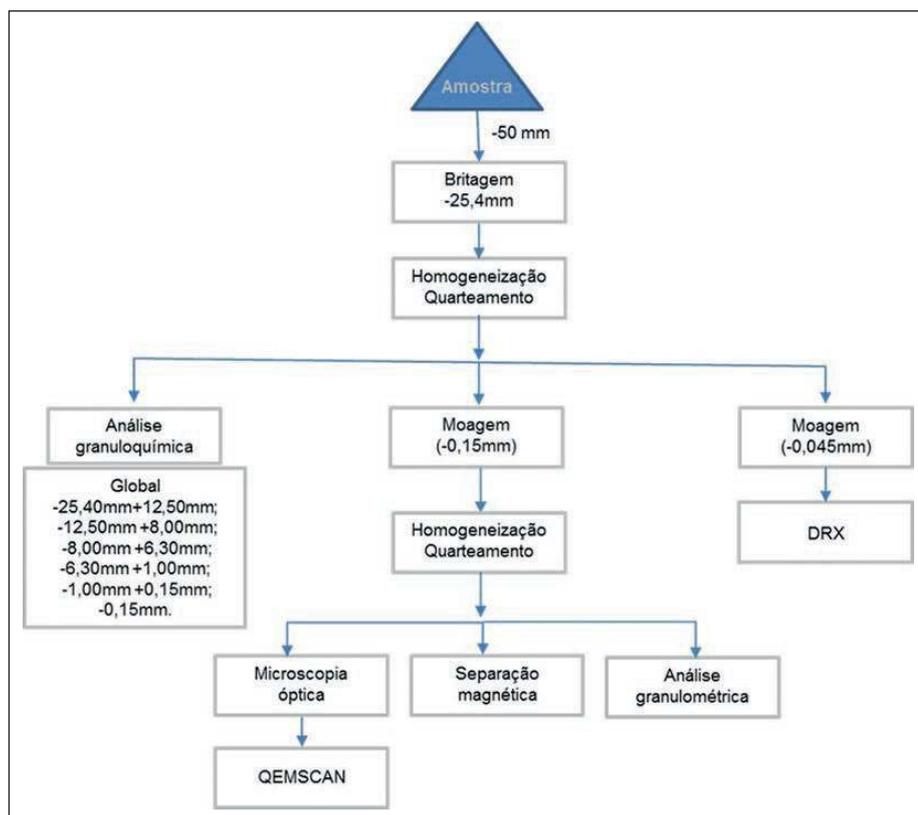


Figura 4 Fluxograma dos ensaios realizados para as amostras selecionadas.

laboratório equipamento, L4 da Inbrás, com os parâmetros detalhados na Tabela 2. Este possui como mecanismo físico de concentração uma matriz de separação fixa entre dois polos magnéticos induzidos. A polpa é inserida na caixa de alimentação e passa através de uma pequena abertura (*gap*) entre o tanque e o tambor em rotação. O concentrado que fica aderido ao tambor devido ao campo magnético é arrastado até a região onde termina o mesmo, e através dos bicos sprays de lavagem são removidos para a calha de descarga de concentrado. O máximo da intensidade de campo magnético depende do *gap*, quanto maior *gap* menor o campo magnético.

Etapa	GAP (mm)	Campo magnético aplicado (Gauss)	Água de lavagem do rejeito (mL/10s)
<i>Rougher</i>	3,8	500	1000
<i>Scavenger</i>	1,5	4530	1000

Tabela 2 Parâmetros adotados na separação magnética. GAP distância do campo entre o tanque e o tambor magnético.

Foi realizada apenas a etapa *rougher* na amostra ISDO, e etapa *rougher* e *scavenger* na amostra

IDO. Os testes foram realizados em duplicata para evitar a propagação de erros. Após a realização dos testes, os produtos e rejeitos da separação magnética foram enviados à análise química (FRX) para determinação dos teores obtidos.

4 Resultados e Discussão

A Tabela 3 mostra os resultados da análise granulométrica das amostras ISDO e IDO, não se nota variação representativa dos principais elementos entre as faixas. A amostra ISDO se apresenta como um material bastante rico em SiO₂ (42,29%), com teor de Fe global analisado de 28,68% e quantidade significativa de CaO e LOI, o caracterizado como um material quartzo-carbonático. Já a amostra IDO apresenta conteúdos muito baixos de SiO₂ (0,89%), com o teor de Fe, global analisado, um pouco maior do que a amostra IDO. No entanto, a quantidade de carbonato na amostra IDO é muito superior à existente na amostra ISDO.

A Figura 5 mostra a curva granulométrica obtida das duas amostras após a realização da moagem

Amostra	Fração	Retido Simples (%)	Análise Química (%)								
			Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	LOI
ISDO	-25,40 + 12,50 mm	72,07	29,07	41,46	0,033	0,14	0,144	0,001	6,28	2,32	7,58
	-12,50 + 8,00 mm	13,13	29,02	42,23	0,034	0,15	0,137	0,001	5,85	2,15	6,99
	-8,00 + 6,30 mm	3,02	29,54	39,46	0,033	0,17	0,158	0,001	6,56	2,43	8,22
	-6,30 + 1,00 mm	9,17	29,17	41,56	0,039	0,20	0,149	0,003	6,11	2,24	7,38
	-1,00 + 0,15 mm	1,37	29,87	42,22	0,032	0,21	0,186	0,003	5,93	2,15	7,01
	-0,15 mm	1,24	23,43	44,90	0,029	0,17	0,213	0,001	8,21	2,92	10,91
	Global Calculado	100,00	29,03	41,56	0,034	0,15	0,145	0,00	6,24	2,30	7,54
	Global Analisado	100,00	28,68	42,29	0,033	0,13	0,145	0,002	6,15	2,25	7,34
IDO	-25,40 + 12,50 mm	71,63	35,66	0,68	0,040	0,05	0,312	0,001	15,80	9,05	22,49
	-12,50 + 8,00 mm	13,06	34,42	0,80	0,034	0,04	0,324	0,001	16,34	9,39	23,49
	-8,00 + 6,30 mm	3,15	33,92	2,40	0,034	0,08	0,331	0,001	16,12	9,14	23,01
	-6,30 + 1,00 mm	9,75	34,34	1,80	0,036	0,04	0,327	0,001	16,50	9,30	23,31
	-1,00 + 0,15 mm	1,39	35,51	1,45	0,034	0,10	0,326	0,001	15,99	8,67	22,30
	-0,15 mm	1,02	29,19	2,88	0,027	0,10	0,353	0,001	17,99	10,14	25,71
	Global Calculado	100,00	35,25	0,89	0,038	0,05	0,316	0,001	15,97	9,13	22,75
	Global Analisado	100,00	35,27	0,69	0,035	0,05	0,320	0,001	15,89	9,10	22,61

Tabela 3 Análise granuloquímica das amostras ISDO e IDO.

abaixo de 0.150mm por 45 minutos. Representando mediana para tamanho dos grãos em torno de 25 μ m e 45 μ m para a amostra ISDO e IDO, respectivamente.

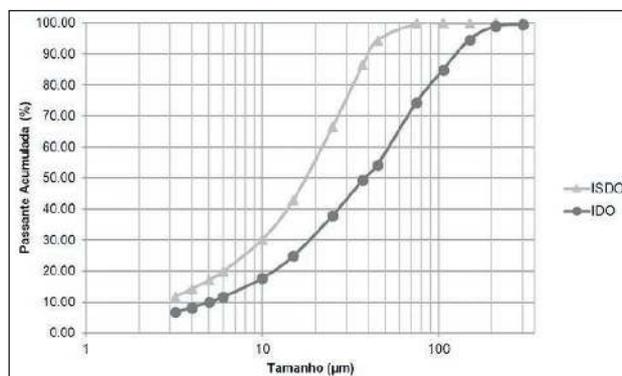


Figura 5 Curva granulométrica do produto da moagem das duas amostras.

Foi realizada análise ao microscópio óptico em luz refletida do produto da moagem, para indicar o grau de liberação do quartzo. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos nesta análise.

Os resultados mostram que o grau de liberação do quartzo da amostra ISDO é de 83,57%, considerado inicialmente um valor satisfatório para

Amostra	Quartzo Livre	Quartzo Misto	Total	Grau de Liberação do Quartzo
ISDO	29,75	5,85	35,61	83,57%
IDO	0,24	0,21	0,45	53,69%

Tabela 4 Determinação do grau de liberação do quartzo das amostras após a moagem abaixo de 0.015mm.

a realização da etapa de separação magnética. Já o grau de liberação do quartzo obtido na amostra IDO não é satisfatório, sendo igual a 53,69%. No entanto, devido à baixa quantidade de quartzo presente nesta amostra (0,45%; obtido por microscopia óptica), o baixo grau de liberação do quartzo não afetará os resultados obtidos na etapa de separação magnética.

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos da análise mineralógica realizada em microscópio óptico de luz refletida; esta técnica permite diferenciar os tipos de hematitas e goethitas pela textura. No que se refere à presença dos óxidos de ferro, a amostra ISDO é tipicamente magnetítica (50,89%), apresentando frações de hematita (4,03%), com destaque para a morfologia de hematita lamelar (1,80%) e goethita (0,59%). Já na amostra IDO, predomina hematita (61,44%), com morfologias principais de hematita

lobada (30,93%), e hematita granular (20,49%). Em relação aos minerais de ganga, o quartzo é predominante na amostra ISDO, com 35,61%, e outros minerais compõem com 8,81% da amostra, enquanto que a amostra IDO apresenta 0,45% de quartzo e 34,29% de outros minerais. Os minerais que não foram iden-

tificados no microscópio óptico de luz refletida são, majoritariamente, dolomita e calcita, identificados tanto nas análises de DRX quanto do QEMSCAN (Tabela 6 e Figura 6).

As fotomicrografias das figuras 6 e 7 foram obtidas no microscópio óptico e de imageamento do QEMSCAN, respectivamente, das duas amostras analisadas. As figuras 5A e 5B ilustram a predominância de magnetita e quartzo na amostra ISDO, e as figuras 5C e 5D de hematita e outros minerais na amostra IDO. Nas fotomicrografias é possível observar a associação entre magnetita, hematita, quartzo e carbonatos; onde existe a tendência do contato de forma lobada entre os cristais. Aparentemente, não há homogeneidade no contato entre partículas mistas, assim como na distribuição da porosidade destas. Nesta situação, a cominuição tende a gerar fraturas aleatórias, podendo ocorrer liberação apenas ao atingir o tamanho médio dos cristais. Por esse motivo, indicou-se a cominuição do material, de modo a se obter uma maior liberação dos grãos, tendo 100% dos grãos no tamanho menor que 45µm.

Mineral	Amostra		Mineral	Amostra	
	ISDO	IDO		ISDO	IDO
Hematita Especular	0,15	2,72	Goethita	0,59	0,00
Hematita Lamelar	1,80	7,31	Quartzo	35,61	0,45
Hematita Granular	0,86	20,49	Mineral de manganês	0,00	0,00
Hematita Lobada	1,22	30,93	Caulinita	0,00	0,00
Hematita Total	4,03	61,44	Gibbsita	0,00	0,00
Martita	0,07	0,00	Mica	0,00	0,00
Magnetita	50,89	3,82	Outros Minerais	8,81	34,29

Tabela 5 Análise mineralógica das amostras analisadas por microscopia óptica.

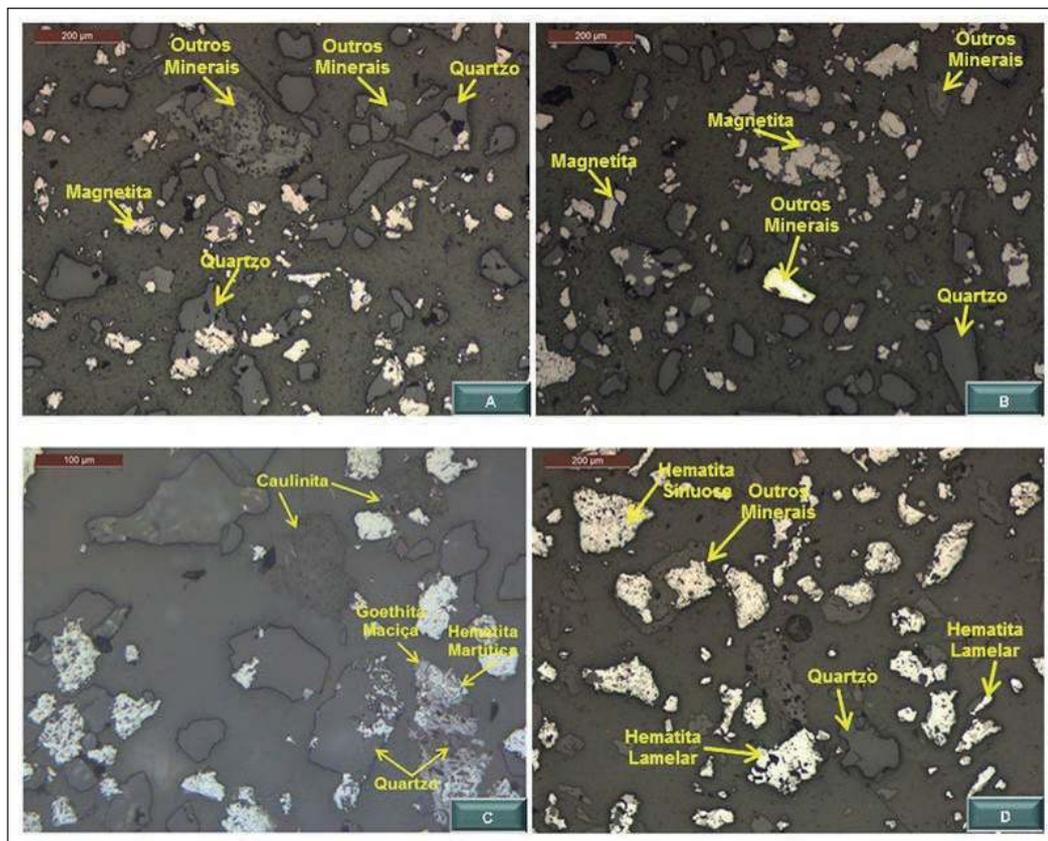


Figura 6 Fotomicrografias em luz refletida, nicóis cruzados. A e B imagens da amostra de ISDO. C e D imagens da amostra de IDO.

Analisando a imagem da Figura 7A, ISDO, se observa que a maioria dos grãos de óxidos de Fe possuem granulometria média de aproximadamente 40µm, mais finos em relação à ganga e aos óxidos da Figura 7B (amostra IDO). As principais partículas mistas com óxidos de Fe são compostas de quartzo, outros silicatos, calcita e dolomita, sendo esta a ordem de predominância. Grãos de óxido de ferro se apresentam fraturados com as fraturas preenchidas por quartzo e calcita.

A figura 7B, IDO, mostra cristais de óxidos de Fe com tamanho médio 75µm, mais grossos quando comparados à ganga e aos óxidos de Fe do ISDO. As partículas mistas com óxidos de ferro predominam os minerais, nesta ordem, dolomita, calcita e outros carbonatos. Os óxidos de ferro são porosos preenchidos pelos carbonatos. Os cristais de calcita, se apresentam muito finos na ordem de 10µm, bordeando os cristais de óxidos de Fe e outros carbonatos (de dolomita e outros carbonatos).

Nas duas amostras analisadas, os contatos dos minerais de ganga com óxido de Fe predominam como lobados, porém, nas imagens da Figura 7B apresentam-se mais regulares que Figura 7A.

O tratamento dos dados do QEMSCAN pelo software *iMeasure* desaglomera as partículas e quantifica as associações mineralógicas de todos minerais presentes, informando a porcentagem de cada

Quantificação Mineralógica (%) QEMSCAN							
Minerais	Amostra		Minerais	Amostra			
	ISDO	IDO		ISDO	IDO		
Silicatos	Quartzo	34,94	0,09	Óxidos de Fe	Óxidos de Fe	51,17	70,00
	Clorita	0,02	0,04		Gibbsita	0,01	0,05
	Biotita	0,08	0,03		Mineral de manganês	0,03	0,06
	Anfíbolios	0,39	0,16	Carbonatos	Dolomita	9,97	20,2
	Caulinita	0,02	0,05		Calcita	0,59	1,32
	Feldspatos	1,01	0,00		Outros Carbonatos	0,45	7,17
	Muscovita	0,01	0,00	Outros	Apatita	0,04	0,08
	Talco	0,01	0,05		Pirita	0,09	0,00
Outros Silicatos	0,96	0,20	Outras Fases		0,22	0,48	

Tabela 6 Quantificação mineralógica via QEMSCAN.

mineral ocorrente em uma partícula mista, correlacionando assim com o grau de liberação. A Tabela 7 ilustra as associações medidas com os minerais óxidos de ferro, sendo o *background* a resina da seção, podendo-se considerar a partícula liberada. O IDSO tem seus óxidos de Fe mais liberados que IDO, pois o contato com o *background* é 77,69% e 70,49%, respectivamente. Como já observado na microscopia

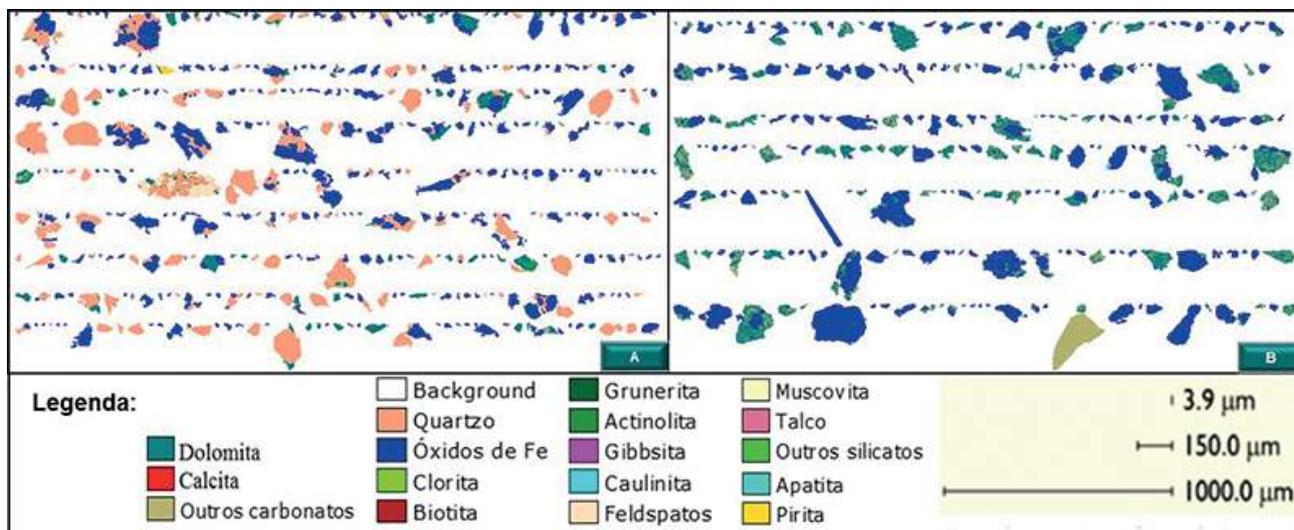


Figura 7 Imagens digitais dos minerais obtidas via QEMSCAN presentes em ISDO (A) e IDO (B).

óptica, a principal ganga para ISDO é o quartzo e para IDO os carbonatos.

Os resultados das análises de DRX (Figura 8) confirmam a quantificação do QEMSCAN, e também indicam que a dolomita é o carbonato predominante nas duas amostras. Dolomita ferroana foi identificada apenas na ISDO. A interpretação dos difratogramas sugere ainda a presença de calcita magnésiana na amostra IDO.

Os resultados obtidos na etapa de separação magnética da amostra ISDO (Tabela 8) mostram que

Associação Mineralógica na Seção (%)			
ISDO	Óxidos de Fe	IDO	Óxidos de Fe
Background	77,69	Background	70,49
Quartzo	10,92	Quartzo	0,08
Óxidos de Fe	0,00	Óxidos de Fe	0,00
Clorita	0,04	Clorita	0,10
Biotita	0,31	Biotita	0,16
Grunerita	0,05	Grunerita	0,42
Actinolita	0,19	Actinolita	0,04
Gibbsita	0,02	Gibbsita	0,18
Caulinita	0,01	Caulinita	0,06
Feldspatos	0,04	Feldspatos	0,00
Muscovita	0,00	-	-
Talco	0,00	Talco	0,03
Outros silicatos	2,62	Outros Silicatos	0,45
Ilmenita	0,00	Ilmenita	0,00
Óxidos de Mn	0,02	Óxidos de Mn	0,02
Dolomita	3,62	Dolomita	14,52
Calcita	4,05	Calcita	10,57
Outros Carbonatos	0,01	Outros Carbonatos	1,64
Apatita	0,10	Apatita	0,11
Pirita	0,06	-	-
Zircão	0,01	Zircão	0,00
Outras fases	0,24	Outras fases	1,11

Tabela 7 Associação mineralógica obtida pelas transições de pixels medidas nas partículas desaglomeradas via software *iMeasure*.

houve concentração de ferro presente na amostra, com aumento do teor de 28,03% para 56,43% Fe. A recuperação mássica no concentrado (44,83%) e metalúrgica de Fe (88,24%) foi muito boa, levando em consideração o alto crescimento do teor de Fe no concentrado. A eficiência de separação obtida neste teste foi de 74,07%. Estes resultados já eram esperados, uma vez que a maior parte dos minerais portadores de ferro desta amostra é composta por magnetita, ferromagnética, que é fortemente atraída pelo campo magnético, mesmo em baixa intensidade. No que se refere aos minerais de ganga, houve uma concentração de SiO₂ no rejeito, porém ainda com quantidade significativa no concentrado (15,90%), que se deve em parte ao grande aporte de magnetita que arrasta o quartzo livre, indicando a necessidade de testar um separador com intensidade de campo mais baixo do que o utilizado (o que não foi possível uma vez que o laboratório não possuía). Em relação aos minerais carbonáticos presentes, houve também uma boa separação, com a maior parte destinada ao rejeito, de acordo com os teores de CaO e LOI analisados. A análise da composição química do rejeito obtido mostrou um teor baixo de Fe (5,87%), o que é considerado positivo do ponto de vista ambiental, com o máximo aproveitamento possível do material de interesse e o descarte mínimo deste tipo de material no depósito de rejeito.

Os resultados obtidos nos testes realizados com a amostra IDO são apresentados na Tabela 9, na etapa *rougher*. Houve uma concentração do Fe com o aumento do teor de 36,32% para 65,46%. No entanto, a recuperação mássica da etapa *rougher* não foi elevada (24,44%), podendo ser explicada pela alta seletividade (IS = 20,3) do Fe no concentrado. Devido à baixa quantidade de massa destinada ao concentrado, a recuperação metalúrgica de Fe também não foi elevada (44,06), mesmo com o teor de Fe muito alto no concentrado. A eficiência de separação obtida na etapa *rougher* foi de 40,77%. Estes resultados são considerados positivos, levan-

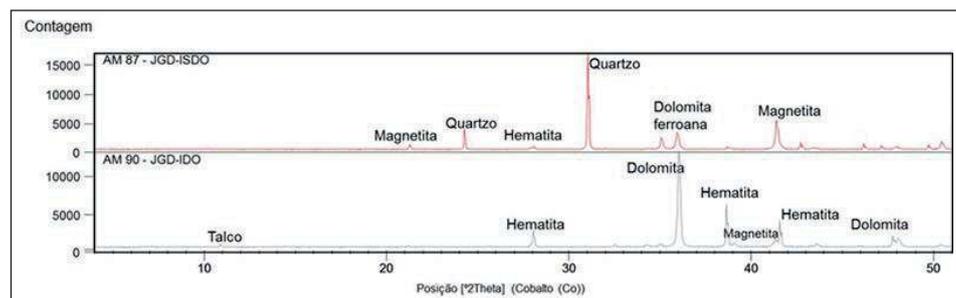


Figura 8 Difratograma da amostra de ISDO e da amostra de IDO.

Tabela 8 Balanço de massa e metalúrgico do teste de separação magnética realizado com a amostra ISDO. Observação: a LOI com de 0,01% no concentrado se deve ao ganho de massa pela oxidação da magnetita na calcinação.

Fluxo	Massa (%)	Análise Química (%)								
		Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	LOI
Alimentação	100,00	28,03	43,32	0,030	0,10	0,148	0,010	6,010	2,372	7,46
Concentrado	43,83	56,43	15,90	0,013	0,01	0,054	0,022	1,917	0,694	0,01
Rejeito	56,17	5,87	64,72	0,044	0,17	0,222	0,001	9,203	3,681	13,28
Recuperação Metalúrgica		88,24	16,09	18,73	4,39	15,95	94,49	13,98	12,82	0,06

do em consideração o campo magnético aplicado à amostra (500G) e o fato de que a mineralogia dos óxidos de ferro presentes nesta amostra é composta basicamente por hematita, que apresenta baixa susceptibilidade magnética. Na avaliação dos teores dos minerais de ganga, percebe-se que houve uma rejeição muito eficiente dos carbonatos presentes na amostra, segundo os teores de CaO (2,33%) e LOI (2,47%) obtidos no concentrado.

O concentrado obtido na etapa *rougher* se encontra dentro das especificações de teores de Fe, e dos principais contaminantes para minério de ferro. Devido a seu baixo teor de SiO₂, pode ser utilizado por exemplo como *feed* para produção de pelota de redução direta; não sendo necessária a realização de etapa *cleaner* no concentrado nesta amostra. No entanto, devido ao teor de Fe significativo no rejeito (26,89%) e à grande quantidade de massa obtida no rejeito, foi realizada uma etapa *scavenger* com o emprego de maior campo magnético (4530 G), visando recuperar parte do Fe destinado inicialmente para o rejeito. Os resultados mostraram que houve uma recuperação de boa parte deste Fe, com au-

mento do teor de Fe de 26,89% para 52,87%, com recuperação mássica da etapa *scavenger* de 36,94% e recuperação metalúrgica do Fe igual a 72,63%. O concentrado obtido nesta etapa pode ser recolocado no circuito de separação magnética juntamente com a alimentação inicial, elevando o teor inicial do material empregado na etapa *rougher*, e diminuindo a quantidade de Fe destinado ao rejeito. O concentrado final, somando as fases *rougher* e *scavenger*, tem recuperação mássica global de 52,35% e metalúrgica no Fe de 84,69%. Este pode ser tratado como produto, participando de “*blendings*”, seja injetado no *coarse* sinter feed (atualmente o mercado já absorve produto com 58% de Fe) ou com outros *pellets feeds* com teores de Fe mais elevados.

5 Conclusões

A análise granuloquímica das amostras ISDO e IDO demonstra a impossibilidade de geração de produtos de minério de ferro como granulado e sinter-feed, dentro das especificações de qualidade determinadas atualmente pelo mercado, pois o teor de

Fluxo	Massa (%)	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	LOI
Alimentação Rougher	100,00	36,32	0,91	0,042	0,09	0,318	0,005	15,598	9,207	22,57
Concentrado Rougher	24,44	65,46	0,60	0,017	0,07	0,063	0,019	2,330	1,550	2,47
Rejeito Rougher	75,56	26,89	1,01	0,050	0,09	0,401	0,001	19,890	11,684	29,07
Recuperação Metalúrgica Etapa Rougher	-	44,06	16,12	9,91	20,10	4,84	86,01	3,65	4,11	2,68
Alimentação Scavenger	100,00	26,89	1,01	0,050	0,09	0,401	0,001	19,890	11,684	29,07
Concentrado Scavenger	36,94	52,87	0,56	0,017	0,05	0,174	0,001	7,745	4,775	11,47
Rejeito Scavenger	63,06	11,67	1,42	0,066	0,12	0,507	0,001	26,075	15,742	38,76
Recuperação Metalúrgica Etapa Scavenger	-	72,63	20,48	12,56	20,52	16,03	29,55	14,38	15,10	14,58
Concentrado global (Scavenger e Rougher)	52,35	58,75	0,58	0,017	0,06	0,122	0,009	5,217	3,269	7,27
Recuperação Metalúrgica global	-	84,69	33,30	21,22	36,50	20,09	90,14	17,51	18,59	16,86

Tabela 9 Balanço de massa e metalúrgico do teste de separação magnética realizado com a amostra IDO.

Fe nas diversas faixas varia de 23% a 29% no ISDO e para IDO 29% a 35%.

Pelas caracterizações mineralógicas e microestruturais verifica-se que, no ISDO, as fases majoritárias da amostra são magnetita e quartzo, tanto na forma de partículas livres como partículas mistas, o que gera um grau de liberação de quartzo de 83% somente abaixo de 0,150mm. Já na IDO predominam hematitas e carbonatos, com teor de SiO₂ tão baixo que está dentro de especificação de produtos e sua ganga corresponde aos carbonatos (ver tabela 4). Os resultados mostraram que a separação magnética pode ser empregada como método de concentração ou de pré-concentração para itabiritos quartzo-dolomítico e dolomítico. Na amostra ISDO, os dados apresentam uma grande recuperação do Fe contido na amostra, necessitando de etapas de limpeza do concentrado obtido. Já na amostra IDO, as informações obtidas nos testes mostram um concentrado (etapa *rougher*) com alto teor de Fe, mas com recuperação baixa, levando à realização de etapas de recuperação do ferro contido no rejeito. A qualidade dos concentrados da separação magnética das etapas *rougher* e *scavenger* gera um produto com teores baixos de SiO₂, altos de CaO e MgO, e de Fe intermediário (Tabela 8), podendo ser dosado com outros *pellets feeds*, sem alterar a qualidade química da pelota. Além disso, haveria ganhos na redução do uso de calcário, podendo gerar um novo portfólio de produto, necessitando desenvolver estudos futuros para conhecer suas características geometalúrgicas.

Ressalta-se que mesmo não tendo sido possível produzir um *pellet feed* comercial, a qualidade do concentrado final poderá ser melhorada via otimização das variáveis operacionais na separação magnética e utilizá-la como uma etapa de pré-concentração a uma possível flotação direta.

Portanto, os resultados apresentados mostram-se bastante promissores para o aproveitamento dos itabiritos quartzo-dolomítico e dolomítico, tipologias atualmente consideradas como subeconômicas pela Vale S.A. Caso este aproveitamento futuro seja viável, a reserva de minério de ferro da jazida seria acrescida em centenas de milhões de toneladas, aumentando assim sua vida útil e minimizando um

passivo ambiental, além de buscar o desenvolvimento sustentável na mineração.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à gerência de Planejamento de Curto Prazo da Vale S.A. pela motivação ao desafio do estudo, e à equipe técnica do Centro de Tecnologia de Ferrosos na Mina de Alegria pelo apoio no desenvolvimento do trabalho. E ao CPMTC-IGC-UFMG, onde parte das análises foi desenvolvida.

7 Referências

- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.
- Carmo, S.S.; Uliana, D.; Kahn, H. & Tassinari, M.M.L. 2014. Estudos de Caracterização Tecnológica em Amostras de Minério de Ferro de Baixo Teor. *Holos*, 30: 35-43.
- Carneiro M.A., Teixeira W., Junior I.M.C. & Femande R.A. 1998. Enslatic tectonics setting of the archaean Rio das Velhas Greenstone Belt: Nd and Pb isotopic evidence from Bonfim Metamorphic Complex, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(2):189-200.
- Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Geological Survey, Professional Paper 641-A:110p.
- Gonçalves, T.A.R. & Peres, A.E.C. 2015. Técnicas de Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura Automatizada (QEMSCAM) Aplicadas a Diferentes Tipologias de Minério de Ferro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 12(4): 342-349.
- Herz N. 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 641(C): 1-81.
- Pires, F.R.M. 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 67: 77-105.
- Queiroz, L.A. & Brandão, P.R.G. 2009. Aspectos mineralógicos relacionados à concentração magnética de minério de ferro itabirítico. *Metalurgia e Materiais*, 65(148): 148-154.
- Rosière, C.A.; Siemes, H.; Quade, H.; Brokmeier, H.G. & Jansen, E. 2001. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, 23(8): 1429-1440.
- Spier, C.A.; Oliveira, S.M.B.; Rosière, C.A. & Ardisson J.D. 2008. Mineralogy and trace-element geochemistry of the high-grade iron ores of the Águas Claras Mine and comparison with the Capão Xavier and Tamanduá iron ore deposits, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Mineralium Deposita*, 43: 229-254.