

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS DE MINÉRIO DE FERRO¹

Deizimara Assunção Pena²
George Eduardo Sales Valadão³
William Kaiser dos Santos⁴

Resumo

O trabalho irá demonstrar algumas técnicas utilizadas para a definição de rota de processo, tendo como base a análise mineralógica. A metodologia aplicada, leva em consideração a utilização de amostras de furo de sonda, onde se faz uma avaliação do modelo geológico da reserva e defini-se uma gama de amostras que irão representar a reserva, através de cálculos estatísticos. Após a definição das amostras, a geologia separa as mesmas e as encaminha para os centros de pesquisas, onde serão realizados as análises mineralógicas e os testes em escala bancada para avaliação da reserva e pré-definição da rota de processo a ser utilizada. Na etapa de análise mineralógica é avaliada as possíveis rotas de processo e a definição de quais tipologias serão consideradas minério útil ou minério de oportunidade. Os minérios úteis são aqueles que são passíveis de gerar produto através de uma rota de tratamento de minério, e os minérios de oportunidade são aqueles que na atualidade não são passíveis de geração de produto com a tecnologia existente. Com as amostras definidas e as possíveis rotas indicadas são realizados os testes em bancada para verificação e confirmação da melhor rota a ser testada em escala piloto. Com a rota definida após os testes bancada é realizada uma amostra de maior porte que represente a reserva, levando em conta as tipologias que foram consideradas minérios úteis, para a validação da rota em escala piloto e geração dos produtos para testes metalúrgicos.

Palavras-chave: Tratamento de minérios; Mineralogia; Caracterização tecnológica.

TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF IRON ORE PROCESS AND PRODUCTS

Abstract

The work will demonstrate some techniques used for the route definition process, based on the mineralogical analysis to define possible routes for further confirmation using bench and pilot tests. The applied method takes into account the use of samples from drill holes, with which an assessment is made of the geological model of the reserve and the range of samples that will represent the reserve through statistical calculations is defined. After the samples have been defined, the geology area separates them and sends them to the research centers, where mineralogical analyses and bench scale tests will be carried out to assess the reserves and pre-define the process route to be used. The possible processing routes for the treatment of samples and definition of which types are considered useful ore or opportunity ore is evaluated in the mineralogical analysis stage. Useful ores are those that are likely to create a product through an ore treatment route and opportunity ores are those that currently are not likely to generate a product with existing technology. After defining the samples and indicating the possible routes, bench tests are carried out to check and confirm the best route to be tested in pilot scale. With the route defined after the bench tests, a large sample that represents the reserve is then tested, taking into account the typologies that were considered useful ores to validate the route in pilot-scale and generate products for metallurgical testing.

Key words: Treatment of ores; Mineralogy; Technological characterization.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Técnica em Mineração pela Fundação Itabirana Difusora de Ensino

³ Pós-doutorado pela University of Utah

⁴ Mestre pela Universidade Federal de Minas Gerais

1 INTRODUÇÃO

A gerencia de desenvolvimento de processo de tratamento de minérios da Vale é solicitada a desenvolver rotas de processo de beneficiamento adequadas e com o menor tempo possível para subsidiar as decisões da empresa, dando a ela argumentos técnicos para definição dos melhores investimentos, seja adequar uma planta existente ou optar por uma nova planta, contribuindo assim com a melhor estratégia para o crescimento da empresa.

Buscando a redução do tempo para definição de uma rota de processo foi elaborada uma metodologia com base na análise mineralógica de amostras de furo de sonda que são avaliados pela geologia para representar a reserva geológica da futura mina.

É realizada na primeira etapa uma análise mineralógica quantitativa e qualitativa que permite conhecer o grau de liberação dos minerais e os processos de concentração mais adequados para cada amostra. A partir desta análise é indicado possíveis rotas que possam ser utilizadas para o tratamento dos minérios.

Após a análise mineralógica são realizados testes em bancada com amostras de pequeno volume, para verificação das rotas sugeridas pela mineralogia.⁽¹⁾

Além da caracterização mineralógica e dos ensaios em bancada é realizado um teste contínuo em escala piloto para confirmação das rotas e definição dos parâmetros. Este teste é realizado com grande volume respeitando a composição proposta pelas amostras selecionadas e aprovadas nos testes em bancada, assim se obtém uma amostra que represente o *run of mine*, toda esta etapa ocorre com efetiva participação da geologia.

A caracterização tecnológica de minérios é uma abordagem de extrema importância e de imediato retorno, dados os seguintes fatos:⁽²⁾

- mercado siderúrgico muito exigente, com elevada competitividade entre as minerações;
- minério pobre de elevada complexidade textural, estrutural, química e mineralógica; e
- necessidade de máximo aproveitamento dos recursos minerais, com visões ambientais e econômicas.

Após a análise mineralógica, as amostras de pequena massa são utilizadas para realização de testes em bancada, para averiguação das rotas sugeridas pela mineralogia, após confirmação das rotas para atender as amostras selecionadas, é preparado uma amostragem de grande volume, para testes em escala piloto com o *run of mine*. O *run of mine* é composto pelas amostras selecionadas e aprovadas nos testes em bancada, a proporção das tipologias é definida pelo banco de dados da mina.

Com a amostra de grande porte pronta é realizado os testes em escala piloto para validação da melhor rota e desenvolvimento do projeto.

As amostras utilizadas para exemplificar este trabalho são da mina de Fábrica em Congonhas.

2 METODOLOGIA

2.1 Definição das Amostras

As amostras foram definidas pela equipe de geologia da Vale, planejamento a longo prazo, onde foram sugeridas 30 amostras para representar a reserva das minas de

João Pereira e Alto Bandeira, que serão as reservas minerais que iremos utilizar como base para apresentar a metodologia de trabalho em discussão.

Para validação das amostras escolhidas pela equipe da geologia realizamos uma análise estatística pelo método de distribuição normal e quantil/quantil comparando as amostras escolhidas com o banco de dados da reserva.

As amostras escolhidas para a avaliação mineralógica e para os testes em bancada estão apresentadas na Tabela 1, e a avaliação das amostras fazendo a comparação com as amostras do banco de dados total estão apresentadas na Tabela 2 e nas Figuras 1, 2 e 3, onde demonstra que as amostras são representativas com relação ao banco de dados geológico da época.

Tabela 1. Amostras escolhidas pela Geologia para análise mineralógica e testes em bancada que representam o corpo geológico

AMOSTRAS SELECIONADAS				
N.º	Furo	Metragem		
		de	até	comp
1	JPS0209	41,80	49,64	7,84
2	JPS0485	129,25	141,54	12,29
3	FDAD00043	9,40	17,85	8,45
4	FDAD00043	0,00	9,40	9,40
5	FDJP0013	0,00	7,80	7,80
6	JPS0715	79,20	92,40	13,20
7	JPS0648	36,51	43,81	7,30
8	JPE0679	46,22	52,22	6,00
9	JPS0642	75,98	81,98	6,00
10	JPE0676	24,80	37,83	13,03
11	FDJP0221	37,15	46,50	9,35
12	FDJP0008	48,05	60,20	12,15
13	JPS0647	34,00	47,06	13,06
14	JPE0681	30,00	36,33	6,33
15	JPS0714	46,30	59,80	13,50
16	JPE0676	16,62	24,80	8,18
17	JPS0639	38,08	51,34	13,26
18	JPS0972	0,00	13,10	13,10
19	JPS0714	59,80	73,30	13,50
20	JPS0972	13,10	24,75	11,65
21	JPS0642	55,57	69,07	13,50
22	JPS0713	52,97	66,00	13,03
23	JPS0651	62,08	75,58	13,50
24	JPS0641	37,00	44,00	7,00
25	JPS0643	28,54	37,54	9,00
26	JPS0714	73,30	86,00	12,70
27	FDJP0015	14,30	24,30	10,00
28	FDJP0091	35,80	48,45	12,65
29	JP0707	92,40	104,40	12,00
30	FDJP0162	25,20	35,20	10,00

Tabela 2. Dados estatísticos das amostras escolhidas e das amostras do banco de dados geológicos

**RESUMO DOS BANCOS
 (MÉDIA / DEVIÓ PADRÃO / MEDIANA)**

Amostras Banco Geológico

	Fe	SiO2	P	Al2O3	Mn	PPC
Media	51,11	22,04	0,06	1,57	0,36	2,57
Desv Padrão	10,48	16,81	0,05	1,67	1,43	2,08
Mediana	52,22	19,28	0,05	0,94	0,04	1,94

Amostras Escolhidas Geologia

	Fe	SiO2	P	Al2O3	Mn	PPC
Media	51,00	22,73	0,056	1,531	0,093	2,48
Desv Padrão	10,19	16,35	0,026	1,486	0,17	1,77
Mediana	53,15	18,57	0,051	0,986	0,042	1,82

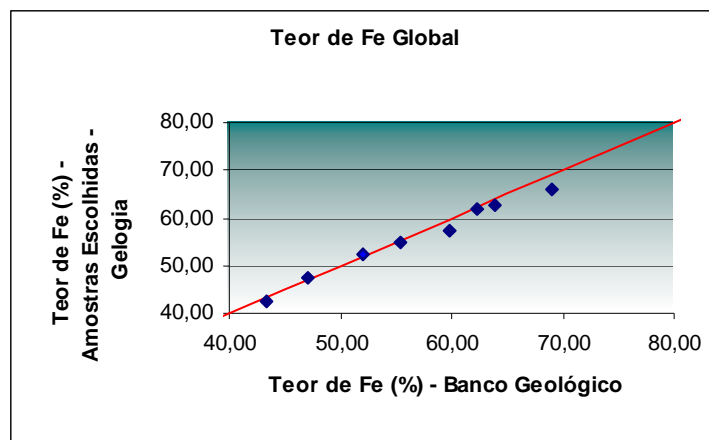


Figura 1. Gráfico quantil/quantil do teor de Fe nas amostras escolhidas com relação ao banco de dados geológico.

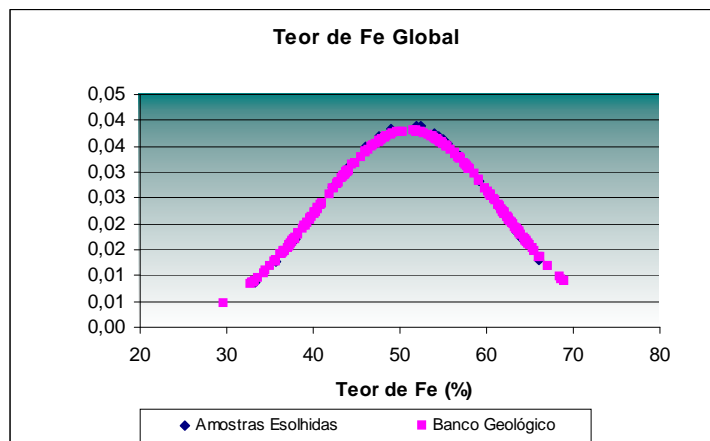


Figura 2. Gráfico da distribuição normal comparando o teor de Fe nas amostras escolhidas com o banco de dados geológico.

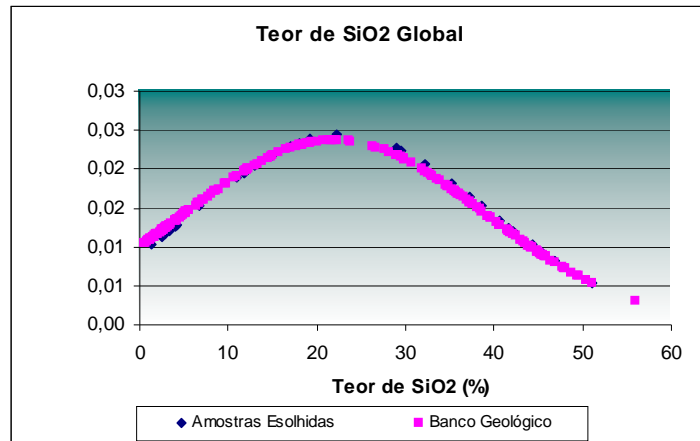


Figura 3. Gráfico da distribuição normal comparando o teor de SiO₂ nas amostras escolhidas com o banco de dados geológico.

Após a validação das amostras escolhidas as mesmas são separadas pela geologia e enviadas para os centros de pesquisa.

2.2 Caracterização Mineralógica

Após a definição das amostras a serem analisadas pela área de caracterização tecnológica, as mesmas são homogêneas, quarteadas e analisadas a composição mineralógica através de microscópio óptico de luz refletida e transmitida Marca Leica Microsystems Wetzlar GmbH, MODELO DM LP e a composição química através de análise raio-X pastilha prensada ou fundida.⁽³⁾ Iremos apresentar uma das análises mineralógicas para exemplificação do método, conforme apresentado na Tabela 3 e na Figuras 4.

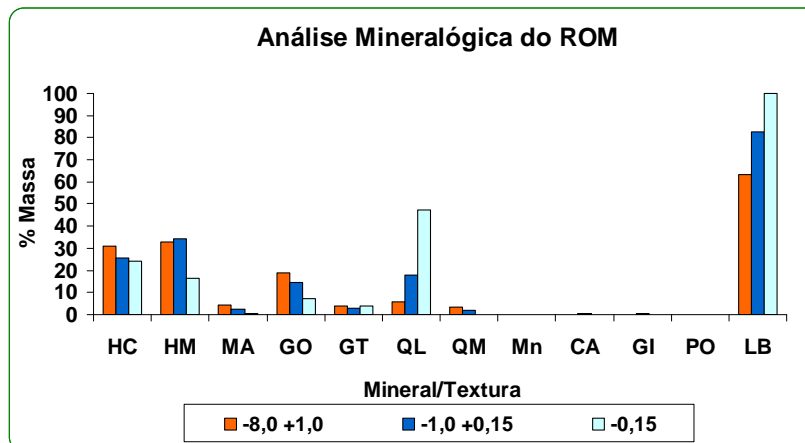


Figura 4. Análise Global do ROM cominuído (menor que 8mm).

Tabela 3. Resumo da análise mineralógica do ROM.

Análise Mineralógica Quantitativa (%Massa)												
Fração (mm)	HC	HM	MA	GO	GT	QL	QM	Mn	CA	GI	PO	LB
-8,0 +1,0	30,83	32,87	4,28	18,79	3,85	5,96	3,34	0,00	0,00	0,09		63,53
-1,0 +0,15	25,50	34,10	2,60	14,29	3,03	17,89	2,02	0,03	0,27	0,27		82,39
-0,15	24,26	16,57	0,33	7,05	4,04	47,56	0,00	0,03	0,02	0,15		100,00
Global	26,32	24,13	1,83	11,58	3,81	30,80	1,28	0,02	0,06	0,15		96,00

Legenda:
 HC = Hematitas Compactas (HL, HG, HS) GT = Goethita terrosa GI = Gibbsita LB = Liberação de Quartzo
 HM = Hematita martítica QL = Quartzo livre CI = Cianita HL = Hematita Lamelar
 MA = Magnetita QM = Quartzo misto MI = Mica HG = Hematita Granular
 GO = Goethita CA = Caulinita PO = Porosidade HS = Hematita sinuosa

Após a análise mineralógica realiza-se a avaliação com foco de qual tecnologia utilizar para o tratamento da amostra. Na amostra da tabela III, podemos avaliar que a fração menor que 8,0 mm maior que 1,0 mm (-8+1 mm) e na menor que 1mm e maior que 0,15 mm (-1+0,15 mm) não podem ser concentradas devido ao baixo grau de liberação das partículas, devendo o ser moído abaixo de 0,15 mm e concentrado para produção de *pellet feed*.

Este tipo de análise é realizado para todas as amostras que foram escolhidas pela geologia e assim é possível definir qual a qualidade química e física dos produtos finais a serem geradas pela planta de tratamento.

Após a validação das amostras e/ou escolha das amostras que atendem a especificação dos produtos é realizada os testes em bancada para confirmação da caracterização mineralógica.

Para termos uma referência da composição dos minerais que apresentam nas reservas de minério de ferro, abaixo uma breve descrição dos principais minerais.⁽⁴⁾

Hematita: Óxido férrico, Fe_2O_3 (67,45% a 69,61% Fe). Pode conter titânio. Não é fusível. Torna-se fortemente magnética pelo aquecimento em chama redutora.

Magnetita: Fe_3O_4 ou $FeFe_2O_4 \cdot Fe$ (71,68% a 72,19% Fe). A composição da magnetita, usualmente, corresponde àquela mostrada pela fórmula. Contudo, algumas análises mostram presença de magnésio e manganês bivalente.

Goethita: Óxido de ferro e hidrogênio, $HFeO_2$ (58,02% a 62,70% Fe). O Manganês está, muitas vezes, presente em quantidade acima de 5%. As variedades maciças contêm, muitas vezes, água adsorvida ou água capilar.

Quartzo: Apresenta a fórmula química SiO_2 (46,7% de Si e 53,3% de O). Entre todos os minerais, o quartzo é um composto químico de pureza quase completa e possui propriedades físicas constantes. Contudo, as análises espectrográficas mostram que mesmo seus cristais mais perfeitos têm traços de lítio, sódio, potássio, alumínio, ferro férrico, manganês bivalente e titânio.

Caulinita: É um silicato de alumínio hidratado, $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ (38,07% a 39,82% Al_2O_3 , 45,48% a 46,07% SiO_2 e 13,47% a 13,92% PF). Insolúvel. Apresenta cor azul quando umedecida com nitrato de cobalto e calcinada (alumínio).

Gibbsita: $Al(OH)_3$ (62,8% a 65,3% Al_2O_3 , 31,8% a 34,12% PF). Insolúvel. Assume a cor azul quando é umedecida com nitrato de cobalto e posteriormente aquecida (alumínio).

As Tabelas 4 e 5 trazem a descrição sucinta de alguns minerais da assembléia de minério de ferro, relacionando a fórmula química, composição e propriedades destes minerais.

Tabela 4. Relação entre a fórmula química, composição e propriedades de alguns minerais que contém ferro em sua composição ⁽⁵⁾

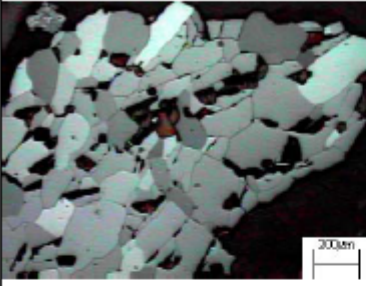
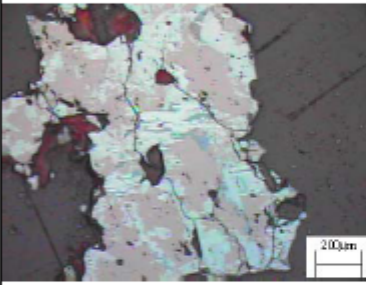
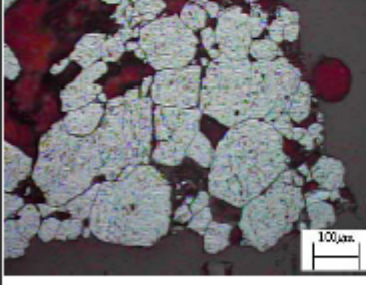

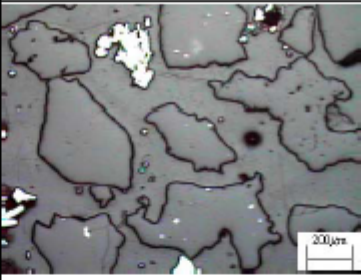


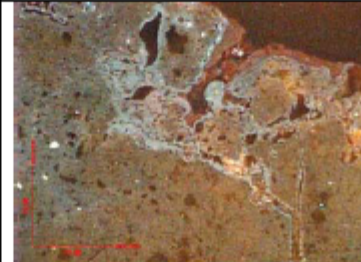
MINERAL	FÓRMULA / COMPOSIÇÃO	ILUSTRAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
HEMATITA - ESPECULAR - LAMELAR - GRANULAR - RECRISTALIZADA	Fe_2O_3 %FeT: 67,75 a 69,61		Dos cristais: <u>Textura:</u> varia de porosa a compacta. <u>Contatos :</u> podem apresentar-se pouco desenvolvidos, irregulares e imbricados, regulares e retilíneos. <u>Formato:</u> irregulares inequidimensionais, regulares equidimensionais, inequidimensionais com hábito tabular
MAGNETITA	Fe_3O_4 %FeT: 71,68 a 72,19		Cristais euhédricos, isolados ou em agregados. Cristais compactos. Apresenta susceptibilidade magnética.
HEMATITA MARTÍTICA	Fe_2O_3 %FeT: 67,75 a 69,61		Hematita com hábito de magnetita. Oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita. Geralmente porosa.
GOETHITA	$\alpha-FeO.OH$ %FeT: 58,02 a 62,70 %PF: 9,97 a 10,98		Cristais aciculares. Maciça a porosa. Reniforme, estalactítica em agregados fibrosos radiais.

Tabela 5. Relação entre a fórmula química, composição e propriedades de alguns minerais das reservas de ferro ⁽⁵⁾

MINERAL	FÓRMULA / COMPOSIÇÃO	ILUSTRAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
QUARTZO	100% SiO ₂		Fratura concóide, brilho vítreo (às vezes gorduroso). Incolor, branco ou colorido por impurezas. Granulometria dos cristais variando de fina a matacos.
CAULINITA	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈ %PF: 13,47 a 13,92 % SiO ₂ : 45,48 a 46,07 % Al ₂ O ₃ : 38,07 a 39,82		Brilho terroso, opaco; as placas de cristal são de brilho nacarado. Apresenta cor branca ou muitas vezes colorida por impurezas. Assemelha-se à argila, necessitando ensaios óticos para distinção dos demais minerais.
GIBBSITA	Al(OH) ₃ %PF: 31,8 a 34,12 % Al ₂ O ₃ : 62,8 a 65,3		Estrutura pisolítica, em concreções granulares arredondas. Aspecto terroso podendo ser o principal mineral da bauxita.
GOETHITA TERROSA	FeO.OH.nH ₂ O %FeT: 51,58 a 58,47 %PF: 12,67 a 14,17 %SiO ₂ : 2,91 a 4,8 % Al ₂ O ₃ : 0 a 6,8		Material amorfo e/ou criptocristalino. Estrutura colóide, hábito botrioidal. Textura porosa.

2.3 Caracterização Tecnológica

Com base na caracterização mineralógica são definidas algumas rotas de processo e com base nos ensaios em escala bancada é retirado os parâmetros a serem aplicados nos ensaios em escala piloto, como o campo magnético, dosagem de amido, amina e pH de flotação, e assim confirmar os resultados e definir a melhor rota e os parâmetros para escalonamento industrial.

A Figura 5 exemplifica uma rota de processo a ser testada em escala bancada para o minério que foi avaliado na etapa de caracterização mineralógica.

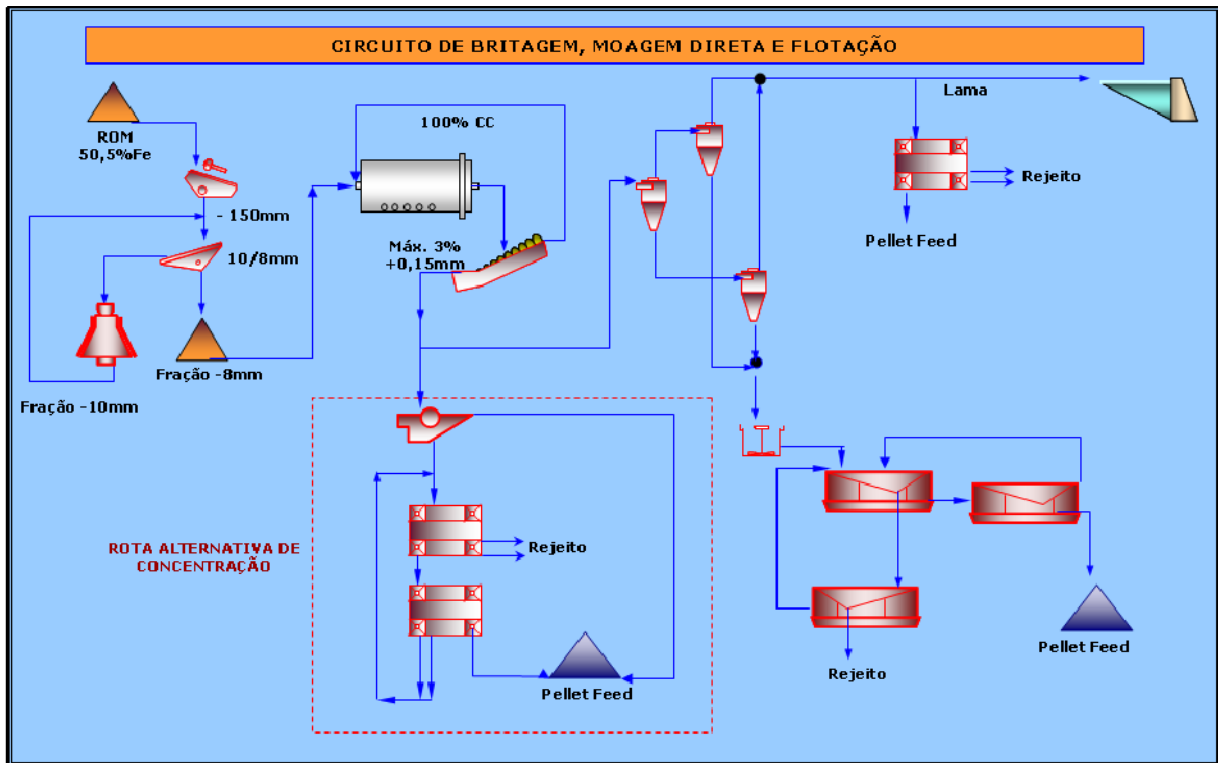


Figura 5. Fluxograma dos circuitos a serem testados em escala bancada e piloto.

Foram realizados ensaios em escala bancada para verificar a possibilidade de implantação das rotas sugeridas na caracterização mineralógica, esta proporcionou parâmetros para as duas rotas sugeridas permitindo otimizar a dosagem de reagentes e definir alguns parâmetros para a concentração magnética.

As duas opções de rotas tiveram na etapa de testes em bancada bons resultados validando-as para a etapa seguinte de testes em escala piloto.

O circuito de concentração magnética foi o primeiro a ser testado em escala piloto, sendo composto por um estágio de concentração magnética de média intensidade, onde seu campo magnético varia de 4000 a 6000gauss e foi utilizado para este teste o separador magnético WDRE da Inbrás, tendo como objetivo a proteção dos separadores magnéticos de alta intensidade e assim retirar os minerais de magnetita ou com relíquitos de magnetita que possam causar entupimentos no estágio subsequente.

O rejeito gerado dos separadores magnéticos de média intensidade é direcionado para uma concentração com duplo estágio de concentração magnética de alta intensidade, onde seu campo varia de 9.000 gauss à 15.000 gauss e foi utilizado para esta concentração o modelo do separador magnético HP40 da Humbolt. O produto final deste circuito foi composto pelo concentrado da separação magnética de média intensidade e o concentrado do segundo estágio de separação magnética de alta intensidade.

O circuito de flotação foi testado com células mecânicas de flotação da Wenco alto-aeradas, sendo realizados os seguintes estágios: *rougher*, *cleaner* e *scavenger*. Foi utilizado também um estágio de separação magnética de alto gradiente para a recuperação da hematita contida na lama da deslamagem, e para esta concentração foi aplicando o modelo *Ferrous Whell* da Inbrás. O produto final deste circuito foi composto do concentrado da separação magnética de alto gradiente e do concentrado do estágio *cleaner* de flotação.

Com base nos testes piloto permitindo a comparação entre os circuitos que para o circuito de flotação apresentou melhor índice de qualidade do produto final e maior recuperação metalúrgica, já para o circuito de concentração magnética o produto final apresentou limitação de qualidade obtendo um teor de SiO_2 acima do especificado.

Contudo flotação atingiu a qualidade do produto e manteve a recuperação metalúrgica com relação à separação magnética, sendo assim o circuito mais adequado para o tratamento do ROM.

3 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada para realizar a caracterização tecnológica, se mostrou eficiente para otimizar os recursos na fase de pesquisa e permite uma maior confiabilidade durante a evolução das etapas, devido as avaliações e validações nas etapas.

Para que o método seja aplicado com exatidão é necessário que as amostras e o banco de dados geológico estejam coerentes com a reserva e que o planejamento de curto prazo estipule os limites da variabilidade do ROM, isto para garantir que ao iniciar a operação da planta de tratamento de minérios os equipamentos estejam com a capacidade necessária para o bom desenvolvimento da planta assim garantir a qualidade e o volume de produção do circuito.

Agradecimentos

Agradeço a Vale por me dar todo o apoio para o desenvolvimento do trabalho, gostaria de fazer um agradecimento especial ao professor George Valadão que sempre me apoiou e me instruiu e todos os funcionários da Vale e da UFMG que fazem parte deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 LIMA, N.P. Comportamento de Minérios Itabiríticos dos Complexos Alegria e Fábrica Nova Frente aos Processos de Deslamagem e Flotação. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, Março de 2001, 126 p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Área de Tecnologia Mineral).
- 2 QUEIROZ, L.A. Caracterização das Operações Unitárias de Concentração das Minas do Sistema Sul, Relatório Interno CVRD – Centro de Pesquisas Tecnológicas, Janeiro de 2002, Mariana, MG.
- 3 Manual Leica – Instruções Suplementares para os modelos LEICA DM LP (microscópio de luz polarizada) e LEICA LM (microscópio industrial) – “ Part-Nº 501-145 – Printed in Germany IX/97/LW/K.H.”.
- 4 DANA, J.D. Manual de Mineralogia. 1a Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora S., 1974, 642p.
- 5 DEER, W.A.; HOWIE R.A.; ZUSSMAN, J. An introduction to rock forming minerals. Harlow: Longman, 2ed., 1992.