

## CORRELAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DO PELLET FEED DAS MINAS DE FÁBRICA NOVA, ALEGRIA E BRUCUTU\*

Catia Casagrande<sup>1</sup>  
Diniz Ribeiro<sup>2</sup>  
Rodrigo Fina<sup>3</sup>

### Resumo

O processo de pelletização foi desenvolvido com a finalidade de aproveitar as partículas finas e ultrafinas geradas nas operações de exploração e tratamento do minério de ferro. Os principais minérios que alimentam as usinas de Pelotização de Tubarão/Vitória/ES são provenientes das minas Brucutu, Fábrica Nova, Alegria, Conceição e Cauê. Os estudos de caracterização mineralógica e testes tecnológicos são realizados para auxiliar o processamento de minérios. Entretanto, alguns minérios possuem grande variabilidade de participação de minerais em sua composição, gerando necessidade de ajustes no processamento dos mesmos. Ter a previsibilidade mineralógica dos minérios é muito importante para atuar no processo com antecedência, realizando ajustes operacionais caso necessário, a fim de ganhar qualidade e reduzir custos. O método de cálculo normativo mineralógico é uma técnica nova que utiliza os resultados de análise química como base para quantificar minerais presentes no minério de ferro. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade da metodologia de cálculo mineralógico normativo por meio de correlação com a microscopia ótica. As amostras analisadas foram pellet feed das minas de Fábrica Nova, Alegria e Brucutu. O estudo mostrou que existem diferenças entre as técnicas, entretanto os resultados foram promissores e satisfatórios.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Calculo normativo mineral; Microscopia.

### CORRELATION MINERALOGICAL AND CHEMISTRY OF PELLET FEED OF THE FABRICA NOVA, ALEGRIA E BRUCUTU MINES

### Abstract

The pelletizing process was developed in order to take advantage of the fine and ultrafine particles in the exploration operations and iron ore process. The main iron ores that feed the pelletizing plants in Tubarão / Vitória / ES is from the Brucutu, Fábrica Nova, Alegria, Conceição and Cauê mines. Studies of mineralogical characterization and technological tests are performed to assist the iron ores process. However, some iron ores have great variability of minerals in their composition, creating the need for adjustments in process. To have the mineralogical predictability of minerals is very important to perform the process in advance, performing operational adjustments if necessary in order to gain quality and reduce costs. The mineralogical normative calculation method is a new technique which uses the results of chemical analysis as the basis for quantifying minerals present in the ore. The aim of this study was to evaluate the applicability of mineralogical calculation methodology by correlation with optical microscopy. The samples analyzed were pellet feed from the mines of Fábrica Nova, Alegria e Brucutu. The study showed that there are differences between the techniques, but the results were promising and satisfactory.

**Keywords:** Iron ore; Pelletizing process; Mineralogical normative calculation; Optical microscopy.

<sup>1</sup> Engenheira Geóloga, Mestre, Engenheira Sênior, Diretoria de Pelotização, Vale S.A., Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Geólogo, Doutor, Especialista Geoestatístico, Recursos Ferrosos, Vale S/A, Nova Lima, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro de Minas, Mestre, Engenheiro Sênior, Centro de Pesquisas Tecnológicas, Vale S.A., Mariana, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de pelletização foi desenvolvido com a finalidade de aproveitar as partículas finas e ultrafinas anteriormente descartadas nas operações de tratamento do minério de ferro. Para produção de pelotas, o minério de ferro é a matéria prima mais abundante, em torno de 97%, o que mostra a influência deste bem mineral no processo.

Existem na literatura vários estudos de caracterização mineralógica e testes tecnológicos para processamento de minérios que visam entender as influências mineralógicas no processo metalúrgico [1-6]. Entretanto, estes minérios possuem grande variabilidade de participação de minerais, gerando necessidade de ajustes no processamento dos mesmos.

Apesar do grande número de trabalhos científicos relacionados aos estudos geometalúrgicos, a presença de variáveis mineralógicas e metalúrgicas em modelos de recursos de minério de ferro não é muito comum. A estimativa destas variáveis não é também uma metodologia amplamente utilizada na indústria mineral brasileira. Poucas mineradoras de ferro no Brasil utilizam estas informações em seus modelos de recursos e de reservas minerais. Os recursos e reservas são geralmente classificados a partir de estimativas de teores e de massa [7].

A pelletização recebe minérios de várias minas com diferentes gêneses e, conseqüentemente, características diferentes quanto à participação e microestruturas dos minerais. Por receber vários tipos de minérios, a pelletização tem flexibilidade de ampliar sua carteira de produtos, atendendo todos os tipos de clientes no setor siderúrgico. Porém, para atingir a qualidade exigida, é necessário adequar o processo nas melhores condições operacionais. Sabe-se que alguns minerais influenciam diretamente nas operações unitárias da pelletização, alguns positivamente e outros que requerem maior processamento.

O Complexo Tubarão, localizado em Vitória, possui oito usinas de pelletização, sendo que as usinas I e II estão temporariamente fora de operação. As informações recebidas das minas sobre os minérios são relacionadas às características químicas e físicas. Ter a previsibilidade mineralógica dos minérios é muito importante para atuar no processo com antecedência, realizando ajustes operacionais caso necessário, visando qualidade e redução de custos.

O método do Cálculo Normativo Mineral (CNM) é considerado uma ferramenta simples, útil e adequada para obter a previsibilidade dos minerais magnetita, goethita total, hematita e quartzo. A utilização desta metodologia pode auxiliar na otimização do processo de pelletização, possibilitando a redução do consumo de energia térmica, aumento de produção, melhoria da qualidade do produto final.

Os mecanismos que envolvem o processo de tratamento térmico de pelotas formadas por misturas de minério hematítico com presença de magnetita, fundentes e antracito são catalisados por diversas reações. As formações de hematita secundária a partir da oxidação da magnetita, de hematita recristalizada através da hematita primária e de fases metalúrgicas por reações químicas (silicatos e ferritos) são processos ligados diretamente à obtenção da resistência física da pelota. Estudos indicaram que a resistência da pelota é fornecida pelas ligações cristalinas entre as partículas durante o processo de coalescência e maturação da microestrutura da pelota [8]. Os autores relataram influência do processo de formação da hematita secundária, gerador de energia, e de recristalização da hematita primária, demandador de energia.

Durante o tratamento térmico das pelotas, a oxidação da magnetita gera aproximadamente 498KJ/Kg. Esta energia adicional tem influência direta neste processo [9]. Entretanto, a queima acima de 1350°C possibilita a dissolução térmica da hematita secundária para magnetita secundária, principalmente em pelotas com aditivos, podendo causar o sobreaquecimento e amolecimento do núcleo destas pelotas com formação de fases que provocam o seu enfraquecimento [10].

O efeito de liberação de energia devido à participação da magnetita no *feed* foi percebido na usina industrial da pelotização em Tubarão, causando superaquecimento da pelota queimada. A falta de previsibilidade mineralógica do *feed* relacionado à proporção deste mineral pode influenciar negativamente na qualidade metalúrgica e custo energético.

O mineral goethita pode ser encontrado em diversas formas: botriodral, microporosa e terrosa (textura fina, com teores de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  variáveis e com diferentes modos de ocorrência: inter e intragranular).

A martita, a hematita tabular e a goethita contribuem para o aumento da área de superfície específica dos concentrados obtidos e a goethita terrosa contribui para o aumento da quantidade de finos durante o processo de cominuição [11].

A martita é originada da oxidação quase completa de cristais de magnetita, apresentando morfologia de finas lamelas dispostas nas partículas. A transformação de magnetita para hematita secundária é responsável pela formação de superfície irregular observada nas partículas e poros. Devido a esta morfologia, minérios com participação de martita apresentam melhores resultados nos testes de moagem, seguido da hematita tabular e agregados policristalinos contendo goethita [12].

Minerais porosos, como goethita terrosa e microcristalina, e martita influenciam positivamente na cominuição do *feed*. Entretanto para os processos de filtragem, pelotamento e queima, o efeito é negativo. Os finos gerados de minerais porosos podem obstruir os filtros, impactando na produtividade do processo. Além disso, a alta porosidade dos minerais pode absorver mais água na produção da pelota crua, aumentando a umidade da mesma. Com isso, exigindo mais energia no processo de pré-queima para remoção da água. Em Tubarão, o efeito dos minerais porosos é observado nos processos de cominuição, pelotamento e queima.

Em resumo, a previsibilidade mineralógica dos minérios recebidos em Tubarão é de suma importância para o processo de pelotização. Buscar ferramentas que auxiliem nesta previsão confirma a importância da geometalurgia.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da metodologia de cálculo mineralógico normativo por meio do estudo de correlação e regressão destas variáveis mineralógicas normativas com aquelas obtidas pelo método de microscopia ótica usando amostras de *pellet feed* das minas de Fábrica Nova, Alegria e Brucutu.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram enviadas ao Centro de Pesquisas Tecnológicas (CPT) da Vale, 45 amostras de *pellet feed* oriundas das usinas de Alegria, Fábrica Nova (Timbopeba) e Brucutu. Estas amostras foram homogeneizadas, quarteadas, sendo coletadas alíquotas para serem caracterizadas química e mineralogicamente.

Realizou-se a quantificação mineralógica das 45 amostras, sendo as mesmas deslamadas em Becker anteriormente ao embutimento em resina, para a remoção de partículas ultrafinas que prejudicam a análise. A quantificação da composição mineralógica foi realizada por meio de microscopia ótica de luz refletida por

estimativa de área, tendo sido confeccionadas seções polidas das amostras. Para a obtenção de fotomicrografias foi empregado analisador de imagens conectado ao *software* Qwin (LEICA).

Para a validação das quantificações mineralógicas foi efetuada comparação entre a análise química obtida em laboratório (via fluorescência de raios X) e a composição química calculada através da quantificação mineralógica. Cada espécie mineral possui uma composição química média, segundo a Figura 1 [13].

Mineral	HC - Hematitas Compactas	HM - Hematita Martítica	MA - Magnetita
Composição Química	$Fe_2O_3$ %Fe <sub>Total</sub> - 67,75 a 69,61	$Fe_2O_3$ %Fe <sub>Total</sub> - 67,75 a 69,61	$Fe_3O_4$ %Fe <sub>Total</sub> - 71,68 a 72,19
Mineral	GO - Goethita	GT - Goethita Terrosa	
Composição Química	$FeO.OH$ %Fe <sub>Total</sub> - 58,02 a 62,70 %PF - 9,97 a 10,98	$FeO.OH.nH_2O$ %Fe <sub>Total</sub> - 51,58 a 58,47 %PF - 12,67 a 14,17 %SiO <sub>2</sub> - 2,91 a 4,8 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 0 a 6,8	
Mineral	CA - Caulinita	GB - Gibbsita	Quartzo
Composição Química	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ %PF - 13,47 a 13,92 %SiO <sub>2</sub> - 45,48 a 46,07 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 38,07 a 39,82	$Al(OH)_3$ %PF - 31,8 a 34,12 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 62,8 a 65,3	$SiO_2$ %SiO <sub>2</sub> - 100%

Figura 1. Composição química média dos minerais.

A metodologia adotada para o cálculo mineralógico normativo foi proposta por Motta [7], cujas adaptações foram realizadas nos cálculos desenvolvidos por Voicu *et al.* [14] e Ribeiro [15]. A Figura 2 apresenta, de forma resumida, a sequência de quantificação mineralógica.

As proporções mineralógicas, calculadas através dos métodos ótico e normativo, foram tratadas estatisticamente no *software* Minitab, onde foram calculados também os coeficientes de correlação de Pearson cruzando as proporções mineralógicas do mesmo mineral calculadas por ambos os métodos.

O efeito do intemperismo sobre os minerais de ferro são os seguintes:

- oxidação do Fe<sup>2+</sup> presente na Magnetita, lixiviação do FeO e formação de cristais porosos de martita (hematita em pseudomorfos de magnetita);
- recristalização nos horizontes mais intemperizados de hidróxidos de ferro (goethita) pela reação da água com o Fe<sup>2+</sup> lixiviado;
- lixiviação completa dos carbonatos formando óxidos de ferro e manganês com o FeO e MnO presentes nesses minerais;
- formação de argilominerais aluminosos (caulinita e gibbsita) com alumina proveniente de rochas encaixantes (básicas, filitos) e coberturas com solo laterítico.

Na proposta atual do Cálculo Normativo Mineralógico (CNM) não se considera a alumina na estrutura cristalina da goethita (tipo terrosa). Outros minerais podem conter Fe<sup>2+</sup> ou FeO na sua composição: carbonatos de ferro (anquerita), anfibólios frescos (minnesotaita, tremolita, actinolita, etc). Esses minerais não são encontrados nos horizontes intemperizados do minério de ferro economicamente lavráveis.

<p><b>Cálculo Mineralógico Normativo (CNM) utilizando proporções de pesos moleculares (% P.M.) dos elementos/óxidos para rochas de Minério de Ferro – fácies óxido-silicatado [adaptado a partir de Voicu et al. (1997) e Ribeiro (2003)]</b></p>
<p><b>Apatita [Fórmula: <math>Ca_5(PO_4)(F,Cl,O)</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (utilizando <math>P_2O_5</math>) -&gt; % P.M. de CaO em (<math>5CaO + P_2O_5 + H_2O</math>) multiplicado pelo teor de CaO. Resíduos: <math>P_2O_5</math> (I) e <math>H_2O</math> (I). Se <math>P_2O_5</math> (I) &lt; 0 temos apatita=0</li> <li>• (utilizando <math>P_2O</math>) -&gt; % P.M. de <math>P_2O</math> em (<math>5CaO + P_2O_5 + H_2O</math>) multiplicado pelo teor de <math>P_2O</math>. Resíduos: CaO (I), <math>H_2O</math> (I) e wavellita = 0. Se <math>P_2O_5</math> (I) &lt; 0 então apatita = 0</li> </ul>
<p><b>Wavellita [Fórmula: <math>Al_2(PO_4)_2(OH,F) \cdot 5H_2O</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % P.M. de <math>P_2O_5</math> em (<math>P_2O_5 + Al_2O_3</math>) multiplicado pelo teor de <math>P_2O_5</math>. Resíduos: <math>Al_2O_3</math> (I)</li> </ul>
<p><b>Talco [Fórmula: <math>Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % P.M. de MgO em (<math>3MgO + 4SiO_2 + H_2O</math>) multiplicado pelo teor de MgO. Resíduos: <math>SiO_2</math> (I) e <math>H_2O</math> (II).</li> </ul>
<p><b>Caulinita [Fórmula: <math>Al_2Si_2O_5(OH)_4</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (utilizando <math>Al_2O_3</math>) -&gt; % P.M. de <math>Al_2O_3</math> em (<math>2SiO_2 + 2H_2O + Al_2O_3</math>) multiplicado pelo teor de <math>Al_2O_3</math> (I). Resíduos: <math>Al_2O_3</math> (II), <math>SiO_2</math> (II) e <math>H_2O</math> (III). Se <math>SiO_2</math> (II) &gt; 0 então gibbsita = 0</li> <li>• (utilizando <math>SiO_2</math>) -&gt; % P.M. de <math>SiO_2</math> em (<math>2SiO_2 + 2H_2O + Al_2O_3</math>) multiplicado pelo teor de <math>SiO_2</math> (I). Resíduos: <math>Al_2O_3</math> (II), <math>SiO_2</math> (II) e <math>H_2O</math> (III).</li> </ul>
<p><b>Gibbsita [Fórmula: <math>Al(OH)_3</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % P.M. de <math>Al_2O_3</math> (II) em (<math>3H_2O + Al_2O_3</math>) multiplicado pelo teor de <math>Al_2O_3</math> (II). Resíduos: <math>Al_2O_3</math> (III) e <math>H_2O</math> (IV).</li> </ul>
<p><b>Magnetita [Fórmula: <math>Fe_3O_4</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % P.M. de FeO em <math>Fe_3O_4</math> multiplicado pelo teor de <math>H_2O</math> (IV). Quando não possuir análise de <math>Fe_3O_4</math>: Cálculo Indireto por Equação de Regressão entre <math>Fe^{2+}/FeT</math> e Profundidade). Resíduo: Fe (I) = Teor Fe total – Fe magnetita</li> </ul>
<p><b>Goethita [Fórmula: <math>FeO \cdot OH</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % P.M. de <math>H_2O</math> em (<math>H_2O + Fe_2O_3</math>) multiplicado pelo teor de <math>H_2O</math> (IV). Resíduos: Fe (II) = Fe (I) – Fe goethita. Se <math>H_2O</math> (IV) &lt; 0 então: goethita = 0, Fe (II) = Fe (I).</li> </ul>
<p><b>Hematita [Fórmula: <math>Fe_2O_3</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hematita = Fe (II) * 1.43</li> </ul>
<p><b>Quartzo [Fórmula: <math>SiO_2</math>]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• quartzo = <math>SiO_2</math> (II)</li> </ul>
<p><b>Minerais de Manganês [Óxidos e hidróxidos]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se (<math>MnO_2 &gt; 0</math>) Psillomelano = <math>MnO_2</math></li> </ul>
<p><b>Soma = Apatita + Wavellita + Caulinita + Gibbsita + Talco + Quartzo + Psillomelano + Goethita + Magnetita + Hematita</b></p>

Figura 2. Sequência do cálculo normativo mineralógico para os elementos de minérios de ferro (Motta, [7]).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras do estudo realizado pela Gerência de Desenvolvimento de Processo e Tratamento de Minério foram usadas para correlacionar mineralogia ótica e normativa. Na Tabela 1 são apresentados os resultados das análises químicas, incluindo FeO, das amostras da mina de Alegria. Enquanto que os resultados das amostras da mina de Fábrica Nova são apresentados na Tabela 2. A tabela 3 apresenta os resultados de análises químicas das amostras da mina de Brucutu.

**Tabela 1.** Resultados de análises químicas dos *pellet feeds* de Alegria.

Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	PPC
66,84	1,25	0,073	0,58	0,087	0,092	0,04	0,001	1,10	2,34
66,70	1,45	0,065	0,40	0,061	0,071	0,02	0,001	0,69	2,19
67,54	1,09	0,062	0,49	0,093	0,068	0,02	0,001	0,84	2,23
67,99	0,94	0,057	0,38	0,079	0,097	0,02	0,001	1,56	1,97
66,38	1,42	0,069	0,47	0,113	0,092	0,02	0,001	1,09	2,57
67,49	1,07	0,066	0,50	0,091	0,091	0,02	0,001	0,99	2,38
67,58	0,92	0,066	0,46	0,067	0,096	0,02	0,001	1,01	2,3
68,14	0,80	0,059	0,40	0,085	0,066	0,02	0,001	0,81	1,99
67,62	1,73	0,056	0,44	0,096	0,072	0,03	0,001	1,33	1,88
67,82	1,07	0,050	0,35	0,100	0,065	0,03	0,021	1,08	1,83
66,30	1,21	0,076	0,48	0,116	0,095	0,02	0,001	0,96	2,88
67,48	2,11	0,056	0,39	0,085	0,067	0,02	0,001	1,20	1,75
66,95	1,20	0,069	0,49	0,082	0,104	0,02	0,001	0,98	2,42
65,20	3,62	0,070	0,45	0,123	0,108	0,03	0,000	1,10	2,35
65,14	3,32	0,070	0,44	0,113	0,104	0,02	0,000	0,97	2,44

**Tabela 2.** Resultados de análises químicas dos *pellet feeds* de Fábrica Nova.

Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	PPC
67,93	0,98	0,050	0,400	0,130	0,058	0,02	0,000	0,49	2,08
67,34	0,80	0,060	0,560	0,131	0,067	0,02	0,000	0,37	2,22
66,68	1,19	0,060	0,480	0,138	0,060	0,02	0,000	0,31	2,32
67,37	0,98	0,060	0,660	0,111	0,068	0,02	0,000	0,30	2,48
68,10	0,62	0,050	0,320	0,160	0,046	0,02	0,000	0,36	2,05
67,16	1,27	0,060	0,660	0,118	0,070	0,02	0,000	0,28	2,66
67,69	0,85	0,060	0,570	0,150	0,071	0,02	0,000	0,29	2,34
67,11	1,37	0,050	0,390	0,169	0,051	0,02	0,000	0,18	2,23
67,53	0,89	0,060	0,480	0,209	0,067	0,02	0,000	0,13	2,38
67,49	1,31	0,050	0,410	0,133	0,055	0,02	0,000	0,36	2,29
68,10	0,62	0,050	0,340	0,165	0,046	0,03	0,000	0,52	2,14
66,87	0,76	0,050	0,470	0,118	0,068	0,02	0,000	0,51	2,24
66,75	1,47	0,060	0,590	0,145	0,064	0,01	0,000	0,44	2,30
67,49	0,98	0,060	0,500	0,117	0,068	0,02	0,000	0,59	2,17
67,11	0,98	0,060	0,560	0,137	0,072	0,02	0,000	0,42	2,57

**Tabela 3.** Resultados de análises químicas dos *pellet feeds* de Brucutu.

Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	PPC
68,51	0,78	0,024	0,31	0,044	0,076	<0,045	0,007	0,68	0,71
68,22	1,28	0,024	0,32	0,027	0,070	<0,045	0,006	0,66	0,62
65,95	4,27	0,027	0,36	0,03	0,063	<0,045	0,009	0,66	0,79
68,56	1,08	0,021	0,30	0,035	0,093	<0,045	0,006	1,14	0,53
68,55	0,74	0,024	0,32	0,039	0,096	<0,045	0,006	1,12	0,62
68,33	1,91	0,022	0,29	0,036	0,068	<0,045	0,008	1,09	0,51
69,04	1,03	0,022	0,27	0,054	0,050	<0,045	0,008	1,03	0,66
68,23	1,61	0,025	0,31	0,035	0,071	<0,045	0,008	1,36	0,52
68,40	1,28	0,025	0,32	0,039	0,068	<0,045	0,008	0,91	0,73

Em geral, nota-se a variabilidade química de todos os minérios. Em relação ao teor de Fe e SiO<sub>2</sub>, o *pellet feed* de Brucutu apresentou maior variabilidade.

Observou uma grande correlação entre o PPC e Fe em relação ao *pellet feed* Brucutu (0,97); enquanto que os minérios de Alegria e Fábrica Nova apresentaram correlações mais baixas nestes dois parâmetros, 0,62 e 0,48; respectivamente.

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados de análise mineralógica através da microscopia ótica das amostras da mina de Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

**Tabela 4.** Resultados de mineralogia das amostras da mina de Alegria.

Hematita	Magnetita	Goethita	Quartzo	Outros
67,54	9,54	19,29	2,05	1,59
78,57	5,07	13,33	1,79	1,15
67,73	11,49	18,22	1,75	0,81
63,35	20,41	14,91	1,05	0,16
66,11	17,82	13,15	2,33	0,55
73,34	8,68	15,88	1,29	0,81
66,86	15,43	15,62	1,52	0,57
79,77	7,63	10,57	0,95	1,01
76,98	9,37	10,27	2,03	1,14
69,17	15,00	13,69	1,86	0,22
64,81	11,07	22,11	1,52	0,38
70,18	10,54	16,21	2,61	0,46
64,35	14,72	18,93	1,75	0,24
68,04	10,93	16,46	3,40	0,87
67,10	10,16	19,22	2,93	0,59

**Tabela 5.** Resultados de mineralogia das amostras da mina de Fábrica Nova.

Hematita	Magnetita	Goethita	Quartzo	Outros
82,45	4,35	10,95	1,52	0,63
74,29	3,42	19,79	1,28	1,11
78,65	2,30	15,83	1,37	1,52
70,42	12,76	14,18	1,25	1,32
70,34	10,96	17,81	0,50	0,30
72,20	2,85	21,32	2,11	1,36
69,18	7,90	20,74	1,13	1,01
79,39	3,71	13,85	1,74	1,09
80,93	2,65	14,32	0,60	1,08
73,61	9,67	14,38	1,56	0,60
81,45	5,56	11,81	0,37	0,56
73,32	9,15	15,46	1,26	0,54
79,60	3,65	13,97	1,70	0,73
78,58	3,84	15,74	0,80	0,77
69,38	9,09	19,10	1,39	0,91

**Tabela 6.** Resultados de mineralogia das amostras da mina de Brucutu.

Hematita	Magnetita	Goethita	Quartzo	Outros
91,09	1,66	3,62	1,19	2,43
91,76	1,38	3,43	1,07	2,36
89,99	1,25	4,38	1,19	3,19
85,98	1,38	6,32	0,63	5,69
88,76	1,31	4,97	0,54	4,43
87,68	1,38	5,50	0,64	4,79
82,50	1,90	7,84	0,32	7,44
88,77	1,65	4,79	0,86	3,93
86,83	0,76	6,21	3,62	2,59
87,45	3,87	4,34	0,47	3,87
87,16	2,54	5,15	0,41	4,74
88,68	3,07	4,12	1,62	2,50
88,95	2,25	4,40	0,20	4,20
87,72	4,05	4,11	0,88	3,23
88,07	2,54	4,77	0,90	3,72

A Figura 3 mostra os resultados de variabilidade de magnetita (microscopia ótica) dos *pellets feed's* Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

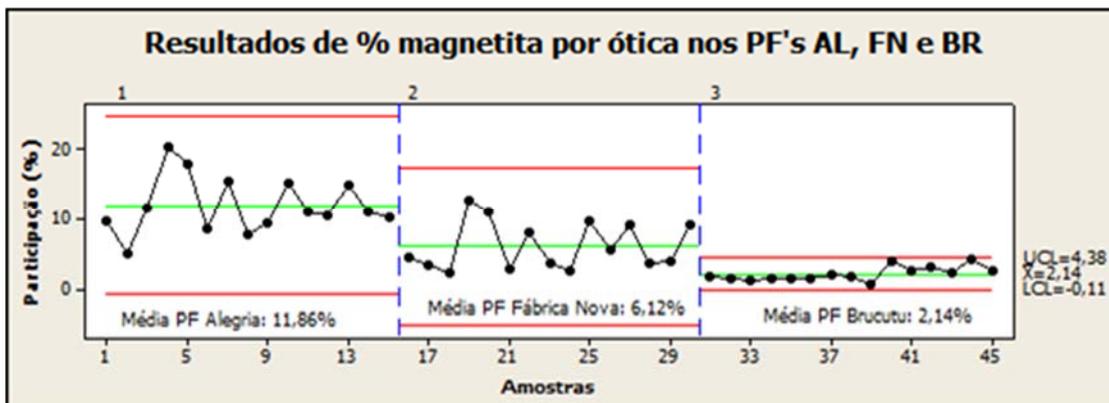


Figura 3. Resultados de variabilidade da magnetita dos *pellets feed's* Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

Observa-se na Figura 3 que a maior participação de magnetita encontra-se nos PF Alegria e Fábrica Nova. Isto também ocorre para goethita, como visto na Figura 4.

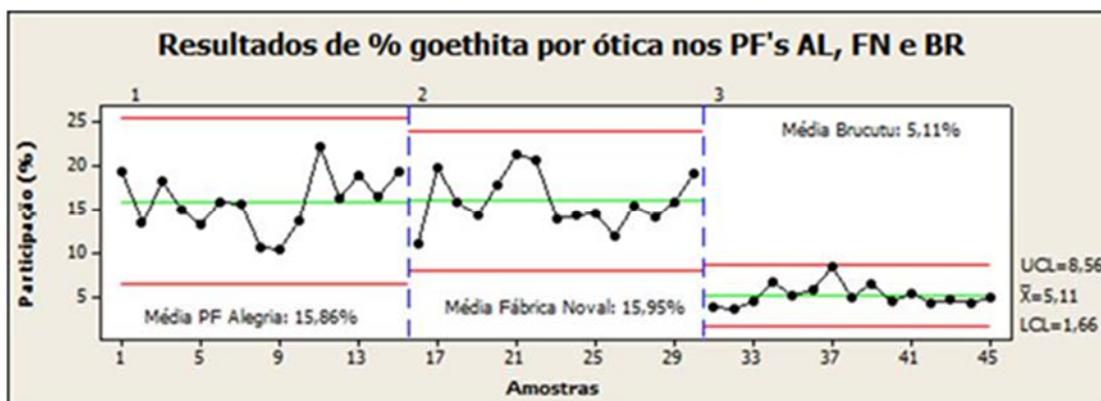


Figura 4. Resultados de variabilidade da goethita dos *pellets feed's* Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

Tanto os resultados de magnetita quanto de goethita, apresentam maior variabilidade nas minas de Alegria e Fábrica Nova, comparando com a mina de Brucutu. A Figura 5 apresenta resultados de hematita dos pellets feed's Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

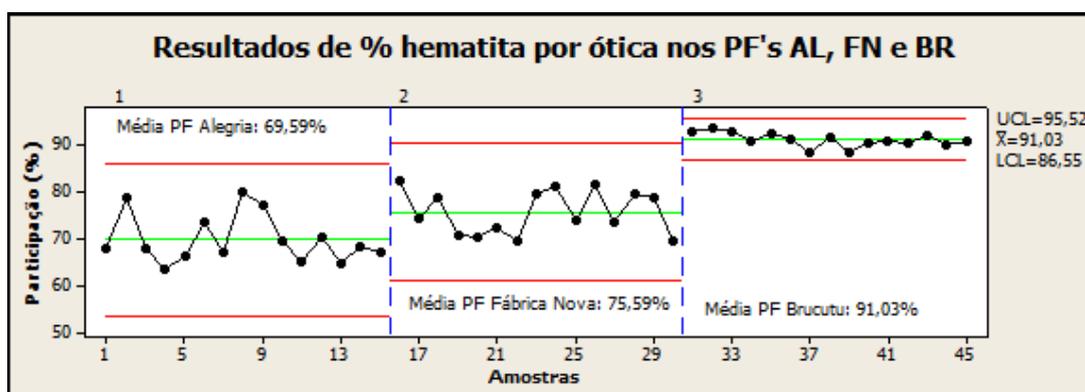


Figura 5. Resultados de variabilidade da hematita dos *pellets feed's* Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

Nota-se na Figura 5 que os resultados dos minérios do Complexo Mariana, referente às minas de Alegria e Fábrica Nova apresentam teores de hematita menor, devido a gênese, comparado com os minérios da Mina de Brucutu.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados estatísticos (média, desvio padrão, mediana, valores mínimo e máximo) das amostras das minas de Alegria e Fábrica Nova.

**Tabela 6.** Resultados de análises químicas do *pellet feed* de Alegria.

Parâmetros	Magnetita		Goethita		Hematita	
	Ótica	CNM	Ótica	CNM	Ótica	CNM
Média (%)	11,86	3,38	13,66	20,67	69,59	73,76
Desvio	4,07	0,68	2,52	3,02	5,20	3,52
Mediana	10,93	3,25	13,84	21,31	67,73	74,12
Mínimo (%)	5,07	2,22	9,43	15,89	63,34	67,31
Máximo (%)	20,41	5,03	17,07	27,03	79,76	78,39

De acordo com os estudos estatísticos, os resultados de hematita e goethita das amostras calculadas pelo método normativo ficaram maiores em relação às realizadas por microscopia ótica. Entretanto, para o mineral magnetita ocorreu o inverso. Nota-se que os desvios padrão dos minerais de hematita e goethita ficaram maiores em relação à microscopia ótica ao comparar com os resultados do cálculo normativo de mineralogia.

**Tabela 7.** Resultados de análises químicas do *pellet feed* de Fábrica Nova.

Parâmetros	Magnetita		Goethita		Hematita	
	Ótica	CNM	Ótica	CNM	Ótica	CNM
Média (%)	6,12	1,19	14,55	21,29	75,58	75,99
Desvio	3,45	0,41	2,55	1,69	4,74	1,80
Mediana	4,35	1,16	14,32	21,21	74,29	76,27
Mínimo (%)	2,30	0,42	10,49	18,84	69,18	72,76
Máximo (%)	12,76	1,90	19,14	24,86	82,45	79,24

As médias dos resultados de hematita analisados por microscopia ótica e cálculo normativo ficaram próximas, porém pode ser observado que ocorre maior variabilidade no primeiro método.

Mesmo comportamento ocorrido para Alegria foi visto para os *pellets feed's* de Fábrica Nova em relação à proporção de magnetita e goethita dos métodos. A magnetita do cálculo normativo apresentou menor proporção do que a magnetita ótica, em contrapartida, a participação de goethita normativa foi maior do que sua correspondente ótica.

Devido à gênese do Complexo Mariana, há maior complexidade textural de minerais de ferro, com associações entre goethita, martita e magnetita, podendo ocorrer maior variabilidade na contagem por microscopia ótica. A quantificação de magnetita por microscopia ótica em minérios martíticos é mais susceptível a desvios devido à ocorrência de relictos deste óxido de ferro nos cristais de hematita.

A Tabela 8 apresenta os resultados estatísticos do *pellet feed* Brucutu.

**Tabela 8.** Resultados de análises químicas do *pellet feed* de Brucutu

Parâmetros	Magnetita		Goethita		Hematita	
	Ótica	CNM	Ótica	CNM	Ótica	CNM
Média (%)	2,14	2,65	5,09	4,73	91,03	90,51
Desvio	1,01	0,84	1,25	0,92	1,53	1,40
Mediana	1,70	2,19	4,76	4,74	90,78	90,68
Mínimo (%)	0,77	1,77	3,49	3,65	88,22	86,34
Máximo (%)	4,16	4,38	8,30	6,42	93,45	92,34

Todos os parâmetros estatísticos das amostras de *pellet feed* Brucutu apresentaram similaridade entre o cálculo normativo e a microscopia ótica. Sabe-se que o Complexo Itabira e Brucutu apresentam minérios mais homogêneos, pouco a não martitizados, com menor quantidade de minerais porosos.

Em relação ao estudo de regressão, foram feitos gráficos e cálculo matemático para avaliar a correlação entre os resultados via microscopia ótica e cálculo normativo mineralógico.

A Figura 6 apresenta os gráficos de dispersão dos resultados de magnetita por microscopia ótica e cálculo normativo onde foram obtidas melhores correlações. E a Tabela 9 apresenta os resultados de correlações ( $R^2$ ) da magnetita, goethita e hematita das minas de Alegria, Fábrica Nova e Brucutu.

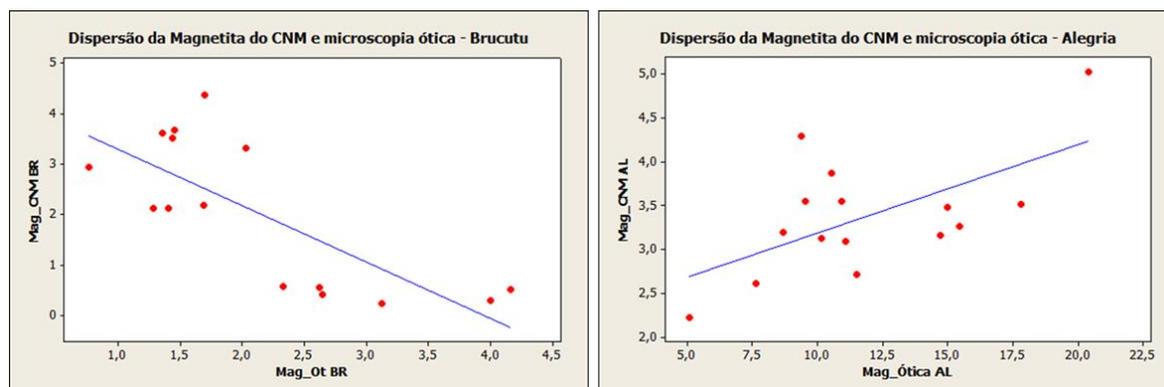


Figura 6. Gráfico de dispersão dos resultados de magnetita dos pellets feed's Alegria e Brucutu.

Tabela 9. Resultados de correlação entre microscopia ótica e CNM da magnetita, goethita e hematita.

Minas/Minerais	Magnetita	Goethita	Hematita
<b>Alegria</b>	0,60	0,64	0,52
<b>Fábrica Nova</b>	0,12	0,50	0,37
<b>Brucutu</b>	0,76	0,33	0,17

Os resultados de magnetita dos *pellets feed's* Brucutu analisados por microscopia ótica apresentaram ótima correlação com o cálculo normativo de mineralogia. Enquanto que a correlação dos *pellets feed's* Alegria apresentou menor nível de interdependência, porém pode ser considerada uma boa correlação considerando a gênese da mina.

Não houve boas correlações entre os resultados de *pellets feed's* de Fábrica Nova para todos minerais analisados: magnetita, hematita e goethita.

#### 4 CONCLUSÃO

Existe diferença significativa entre a quantificação por microscopia ótica e cálculo normativo no conjunto de amostras de *pellets feed's* de Alegria e Fábrica Nova, enquanto que as proporções mineralógicas dos *pellets feed's* de Brucutu avaliadas em ambos os métodos foram similares estatisticamente.

Para minérios concentrados de Fábrica Nova, o método cálculo normativo não apresentou boa correlação com o método ótico, enquanto que para outras minas esse método pode ser usado para auxiliar na previsibilidade da proporção mineralógica na alimentação da pelotização.

Sugere-se testar outro método indireto, Satmagan por exemplo, para melhorar a previsibilidade de magnetita, visto que a goethita apresenta correlação direta com o PPC.

Sugere-se realizar estudo do método Satmagan para previsibilidade de magnetita, visto que a goethita apresenta correlação direta com o PPC.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ribeiro, M. R. Investigação das Características dos Minérios de Ferro da CVRD que Influenciam seu Comportamento na Moagem. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 2004; 70p.
- 2 Takehara L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Tese de Doutorado. 2004; 419p.
- 3 Fonseca, M.C. Influência da Distribuição Granulométrica do Pellet Feed no Processo de Aglomeração e na Qualidade da Pelota de Minério de Ferro para Redução Direta. REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de Mestrado. 2004; 126p.
- 4 Graça L. M.; Lordão, R. C.; Roldão, D. G. Domínios Mineralógicos na Superfície das minas de Fábrica. *In*: Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 7, Ouro Preto. 2006; Anais 2: 652-658.
- 5 Casagrande, C.; Vieira, M. B.; Guachalla, S.; Mafra, W. Influência da Mineralogia no Processo de Pelotização de Minérios de Ferro. 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Belo Horizonte, 2013.
- 6 Graça, L. M. Implicações das Propriedades Mineralógicas e Microestruturais no Processo Industrial de Pelotização. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de Doutorado. 2014; 128p.
- 7 Motta, E. G. M. Definição de Domínios Mineralógicos em Minério de Ferro Utilizando Krigagem de Indicadores. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dissertação Mestrado. 2014; 220p.
- 8 Li G et al. "Recrystallization of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> During the Induration of Iron Ore Oxidation Pellets." *In* www.intechopen.com. 2012; pp.329-351.
- 9 Meyer, K. Pelletizing of Iron Ores. Wurzburg, Druckerei K. Tritseh.1980; 302p.
- 10 Sá K et al. Efeito da Composição Mineralógica na Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo. 2004; v. 1, n.2, pp 18-22.
- 11 Santos L e Brandão P. "Variações Mineralógicas, Morfológicas e Microestruturais em minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG e suas Implicações no Processo Mineral." *In* 4th Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Ouro Preto, MG. 2003; pp. 674-683.
- 12 Graça L et al. "Effect of the Morphological Types in Grinding of Iron-Ore Products." *Minerals Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*. 2015; 36:5, 324-331.
- 13 Dana J. & Hurlbut R. Manual de Mineralogia. Editora: Livros Técnicos e Científicos, São Paulo. 1969; 536 p.
- 14 Voicu, G.; Bardoux, M; Voicu, D. Mineralogical norm calculations applied to tropical weathering profiles. *Mineralogical Magazine*. 1997; 61, 185-196.
- 15 Ribeiro, D. T. Enriquecimento Supergênico de Formações Ferríferas Bandadas: Estruturas de Colapso e Desordem. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro. 2003; 123p.