

# EFEITO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO

Kessel Godinho de Sá <sup>(1)</sup>

Geraldo Magela da Costa <sup>(2)</sup>

Claúdio Batista Vieira <sup>(3)</sup>

## Resumo

Concentrados de minérios de duas minas da Samarco Mineração foram estudados a fim de se investigar a influência da composição mineralógica sobre a resistência a compressão de pelotas para redução direta. O teor de hematita especular, martita (hematita porosa), goethita e magnetita foram quantificados em nove amostras e então correlacionados com a resistência à compressão das pelotas queimadas destes concentrados em um forno experimental "pot grate". As pelotas queimadas mostraram um acréscimo na resistência a compressão com o aumento dos teores de hematita especular, entretanto martita, magnetita e goethita mostraram uma influência negativa na resistência compressão média.

**Palavras-chave:** Minério de ferro, hematita especular, resistência à compressão

## Effect of the mineralogical composition on the compression strength of iron-ore pellets

### Abstract

Run-of-mine concentrates from two mines of Samarco Mineração (Brazil) were studied in order to investigate the influence of their mineralogical composition on the compression strength of pellets for direct reduction. The contents of specular hematite, porous hematite, goethite and magnetite were evaluated in nine samples and correlated with the compression strength of fired pellets produced from them in an experimental pot grate furnace. The fired pellets showed an increase in the compression strength with increasing the amounts of specular hematite, whereas amrtite (porous hematite), magnetite and goethite showed a negative influence in the average compression strength.

**Key-words:** iron ore, specular hematite, compression, strength

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre todas as características intrínsecas que envolvem uma pelota de boa qualidade, a sua resistência à compressão assume singular importância. As várias etapas do manuseio das pelotas e seu comportamento no interior dos fornos são sensivelmente afetados por suas propriedades físicas, e servem, em uma primeira avaliação, como indicativo dos índices de produtividade.

Assim, a influência da composição mineralógica dos concentrados originais sobre a resistência à compressão das pelotas se faz importante, de forma a adequar a composição das matérias primas para encontrar as melhores taxas de produtividade e especificações estabelecidas.

Este trabalho apresenta um estudo investigativo sobre as correlações entre a mineralogia dos óxidos de ferro dos diferentes tipos mineralógicos, estabelecidos para as minas do Complexo Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A. e o parâmetro físico resistência à compressão das pelotas na faixa granulométrica entre 12 e 16 mm para processos de redução direta.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de concentrados de minérios de ferro foram obtidas a partir do processo de concentração em planta piloto do minério ROM proveniente das minas do Complexo de Alegria. As características físicas dos concentrados foram:

- 80% passante em 325 #;
- Blaine (superfície específica) entre 1490 e 1900 g.cm<sup>-2</sup>.

(1) Samarco Mineração SA, Mariana, MG.

(2) Departamento de Química, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

(3) Departamento de Eng. Metalúrgica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

As especificações químicas dos concentrados foram para produção de pelotas para fornos de redução direta. As análises químicas de ferro total e Fe<sup>2+</sup> foram realizadas por titulação com dicromato de potássio (duplicata), enquanto que os outros elementos foram determinados por ICP.

As análises termogravimétricas (ATG) e de DTA foram obtidas simultaneamente em um equipamento Du Pont modelo SDT 2960. A temperatura foi variada entre 20 °C e 1100 °C, usando um fluxo constante de ar sintético (100 ml/min.) e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e cerca de 30 mg de amostra.

As análises mineralógicas foram feitas em pastilhas em duas frações granulométricas (+ 325# e -325#) em um microscópio ótico de luz refletida Leica, modelo MPS30 com magnificação de 200 vezes.<sup>(2)</sup> Em cada uma dessas frações foram identificadas e contadas, no mínimo, 500 partículas, entre partículas totalmente liberadas e mistas, tanto entre minerais minérios entre si, quanto desses com o quartzo. Os dados de contagem e identificação obtidos diretamente do microscópio fornecem uma percentagem volumétrica que foi ponderada com as densidades dos respectivos minerais e peso de cada fração granulométrica, obtendo-se deste modo uma percentagem em peso.

Para a preparação das pelotas cruas para a queima, as amostras de concentrado foram desaguadas, desagregadas e colocadas em lonas para secar até a umidade de trabalho (8 a 10 %) e então homogeneizadas. Uma massa de aproximadamente 120 kg foi retirada para a produção de pelotas cruas para a queima.

Os insumos necessários a pelletização (carvão mineral, calcário calcítico e bentonita) foram adicionados e a homogeneização da mistura feita em uma betoneira. A mistura preparada foi pelletizada em um disco pelletizador com diâmetro de 990 mm, profundidade da panela de 30 mm, inclinação de 47° e velocidade de 20 r.p.m.

As pelotas cruas formadas foram peneiradas em uma malha de 2 mm, sendo o retido separado para a queima e o passante

desagregado e retornado para o disco pelletizador para que fosse reaproveitado até a formação de aproximadamente 76 kg de pelotas cruas, das quais foram usadas 38 kg por queima. Esta classificação visa simular a ineficiência operacional da etapa de peneiramento antes da entrada no forno industrial.

Depois de classificadas, as pelotas foram queimadas em um forno tipo “pot-grate”, no qual todo o processo é automatizado sendo que o aparelho simula as operações realizadas pelo forno industrial. As condições dos ensaios foram para uma produção de 17000 TMS (Toneladas Métricas Secas) a uma velocidade de grelha igual a 5 m/min. Observou-se que todas as condições do teste fossem idênticas para cada tipo de tal forma que a única variável fosse a matéria prima empregada.

Após a queima, a panela foi retirada, e as pelotas queimadas foram homogeneizadas e quar-teadas para os testes físicos e meta-lúrgicos, de acordo com as normas do Laboratório Físico e Metalúrgico da SAMARCO MINERAÇÃO em Ponta Ubú.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para todas as amostras observou-se que a transformação da goethita para hematita ocorreu entre 300-330 °C, enquanto que a oxidação da magnetita teve início a partir de 600 °C na amostra KE09. Os resultados médios de todos os ensaios físicos, químicos e mineralógicos de pellet feed das amostras e suas pelotas queimadas correspondentes são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros físico-químicos dos “pellet feed” e das pelotas queimadas. E = especularítico, M = martítico, G = goetítico, Mag = magnetítico, Anf = anfibolítico

PELLET FEED									
Amostra	KE01	KE02	KE03	KE04	KE05	KE06	KE07	KE08	KE09
Tipo	E/M	M/E	M/G	M	ANF	M/G	ANF	M/E/G	MAG
Mina	9	9	9	9	9	1,2 e 6	1,2 e 6	1,2 e 6	1,2 e 6
Especularita (%)	64	32	14	11	2	2	5	22	11
Martita (%)	28	54	54	73	71	72	61	50	50
Goethita (%)	7	12	28	14	25	23	31	22	25
Magnetita (%)	1.4	2.4	3.8	1.8	2.0	2.8	3.5	6.2	13.4
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	1487	1577	1826	1549	1822	1890	1567	1631	1859
PELOTAS QUEIMADAS									
Fe (%)	67.98	67.86	67.77	67.78	67.75	67.89	67.79	67.75	67.82
FeO (%)	0.18	0.11	0.26	0.09	0.2	0.21	0.11	0.32	0.32
P (%)	0.031	0.033	0.099	0.051	0.067	0.033	0.042	0.033	0.038
Basicidade binária (Ca/SiO <sub>2</sub> )	0.47	0.47	0.45	0.49	0.45	0.48	0.49	0.49	0.47
Compressão (kg/pelotas) -16,0 + 12,5 mm	334	303	269	281	294	266	274	288	265

Fonte: Sá (2003, p.41) <sup>(1)</sup>

Um perfil térmico típico obtido durante a queima das amostras é mostrado na Figura 1. Os termopares T5, T6 e T7 estão localizados na porção superior, intermediária e inferior da panela, respectivamente. As abreviaturas SA, SD, PQ, Q e R, indicam os ciclos de secagem ascendente, secagem descendente, pré queima, queima e resfriamento, respectivamente. Cada amostra gerou dois perfis térmicos dos quais foram calculadas as temperaturas médias ao longo do teste, gerando assim perfis térmicos médios característicos de cada amostra.

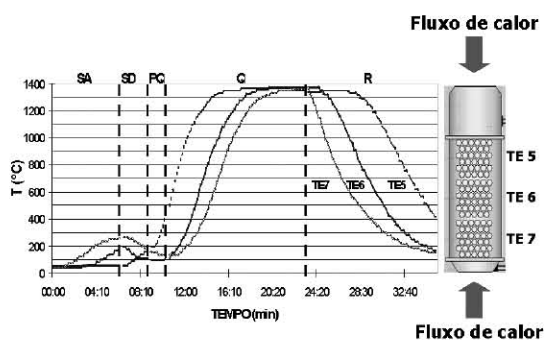


Figura 1. Perfil térmico típico dos termopares do forno de pot-grate.  
Fonte: Sá (2003, p.49)

Na análise dos perfis térmicos médios destacam-se as grandes diferenças de temperaturas alcançadas pelas amostras durante os ciclos. As amostras com maior percentual de hematita especular (KE01 e KE08) apresentaram as maiores temperaturas médias no ciclo de queima e a amostra KE09 apresentou a menor temperatura média (Tabela 2).

Tabela 2. Temperaturas médias (°C) no ciclo de queima (\* não medida).

Amostra	KE01	KE02*	KE03	KE04	KE05	KE06	KE07	KE08	KE09
Média	1078	-	992	1000	982	965	983	1013	959
Des.pad	341	-	375	389	382	413	412	391	416
Mínimo	275	-	229	153	195	160	161	203	170
Máximo	1364	-	1365	1359	1368	1357	1363	1370	1369

Fonte: Sá (2003, p.51) <sup>(1)</sup>

Tabela 3. Quadro estatístico descritivo de resistências à compressão acima de 300 kg/pelotas.

Amostra	KE01	KE02	KE03	KE04	KE05	KE06	KE07	KE08	KE09
Média	372	363	352	350	358	358	343	350	337
Des.pad	41	48	33	40	45	35	31	33	42
Mínimo	300	306	300	300	302	307	300	303	302
Máximo	439	502	422	436	475	427	425	423	499
Contagem	70	50	35	44	49	37	45	51	35

Fonte: Sá (2003, p.46) <sup>(1)</sup>

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão de cem pelotas foram agrupados nas faixas de valores menores que 200 kg/pelotas; entre 200 e 300 kg/pelotas e acima de 300 kg/pelotas. As amostras com maior porcentagem de hematita especular (KE01, KE02- tipos Especularítico/ Martítico e Martítico/ Especularítico de Alegria 9- e KE08- tipo Martítico/ Especularítico/ Goethítico de Alegria 6) apresentaram uma maior frequência de pelotas com valores de resistência à compressão acima de 300 kg/pelotas (Tabela 3).

#### 4. DISCUSSÃO

Uma correlação linear significativa foi observada entre a resistência à compressão média e o teor de hematita especular, conforme mostrado na Figura 3.

A hematita especular de morfologia predominante lisa e compacta, quando na sua recristalização, forma grãos maiores com contornos arredondados e que conferem às pelotas maior resistência mecânica,<sup>(3)</sup> principalmente nas pelotas de baixa basicidade, similares as deste trabalho.<sup>(4)</sup>

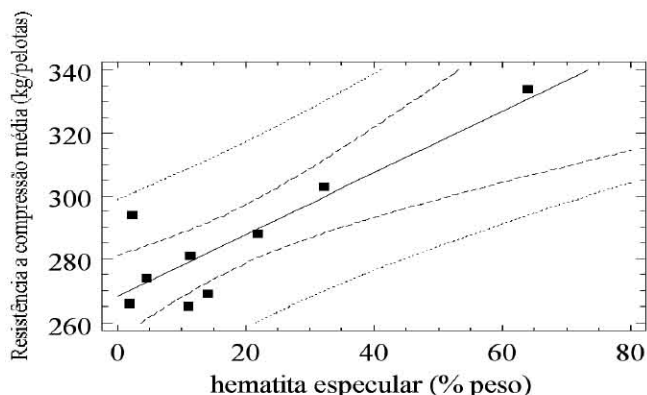


Figura 2. Correlação linear entre a resistência à compressão média e os teores de hematita especular ( $R^2 = 0,76$ ,  $n = 9$ ).  
Fonte: Sá (2003, p.62) <sup>(1)</sup>

Através de regressão linear múltipla (Figura 4) observou-se que a resistência à compressão média está correlacionada com as outras mineralogias de acordo com a equação:

$$\text{Compressão média (Kg/pelotas)} = 364.87 - 0.81*H_p - 1.13*G_o - 2.40*M_a$$

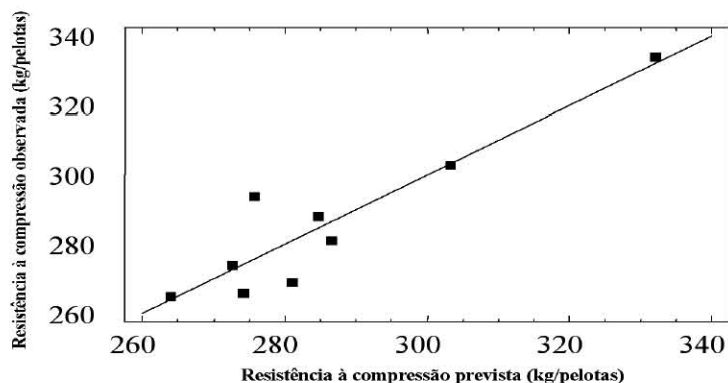


Figura 3. Resistência à compressão observada versus compressão prevista de acordo com a equação de correlação linear múltipla ( $R^2 = 0,85$ ,  $n = 9$ ).  
Fonte: Sá (2003, p.63) <sup>(1)</sup>

Pela análise dos fatores na Tabela 4, corrigidos da equação acima para a amplitude de variação das mineralogias nas amostras estudadas, podemos inferir com 95% de confiabilidade estatística que o teor de magnetita contribui mais para a redução da resistência à compressão média das pelotas analisadas que a magnetita ou goethita.

Tabela 4. Quadro de significância estatística para resistência a compressão média.

Mineral	Fator na equação	Amplitude de variação (%)	P-value	Fator corrigido (%)
Martita	0,81	45,1	0,06	0,37
Magnetita	2,40	12	0,11	0,29
Goethita	1,13	24,6	0,13	0,28

Fonte: Sá (2003, p.64) <sup>(1)</sup>

A influência negativa da magnetita é reportada na literatura<sup>(5,6)</sup> devido a sua oxidação não isotérmica entre o núcleo e superfície de pelotas de concentrados magnetíticos, onde se encontraram diferenças de cerca de 20 K, de forma que, localmente, podemos obter temperaturas acima da temperatura de piroconsolidação da hematita (1350 °C).

Temperaturas acima de 1350 °C foram observadas nos ensaios (Tabela 3) possibilitando a dissociação térmica da hematita em magnetita secundária. Esta dissociação térmica da hematita, principalmente em pelotas com aditivos, pode causar um sobreaquecimento e amolecimento do núcleo destas pelotas e a formação de uma estrutura vítrea que provoca o enfraquecimento da estrutura.

A fase de resfriamento envolve a re-oxidação da magnetita e conseqüente transformação para hematita. O processo de transformação acontece ao longo dos planos cristalográficos {111} e

envolve uma diferença de volume e forças de cisalhamento atuando na interface das fases criando planos de fraqueza que facilitam o fraturamento. <sup>(7)</sup>

A influência da goethita pode ser atribuída a transformação da mesma para hematita em temperaturas próximas a 300 °C. A expulsão da água estrutural resulta na formação de microporos e, posteriormente, macroporos.<sup>(8)</sup> O produto desta transformação tende a ser uma hematita que preserva o aspecto morfológico da goethita original, ou seja, uma hematita microporosa.<sup>(3)</sup> O aumento percentual de partículas microporosas como as hematitas advindas da goethita e martita aumentam a cimentação intragranular em detrimento da cimentação intergranular, pelo preenchimento desta porosidade adicional com a fase escória.<sup>(3)</sup> Por regressão linear simples também foi identificada uma correlação positiva significativa entre as resistências às compressões médias na faixa acima de 300 kg/pelotas vs a temperatura máxima no ciclo de secagem ascendente (Figura 4).

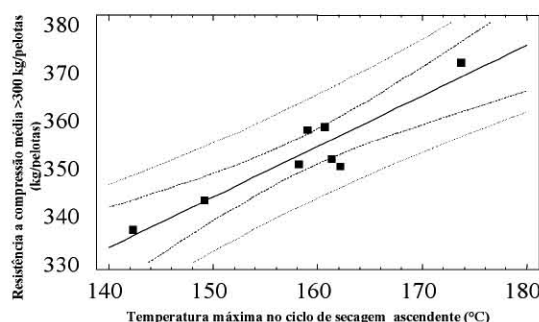


Figura 4. Correlação entre compressão média acima de 300 kg/ pelotas e a temperatura máxima na fase de secagem ascendente ( $R^2 = 0,76$ ,  $n = 9$ ).  
Fonte: Sá (2003, p.70) <sup>(1)</sup>

Esta correlação pode ser atribuída ao fenômeno denominado "spalling" que é causado pela rápida secagem do núcleo ("Goethite Spalling") ou da superfície da pelota ("Free-Water Spalling") em minérios de alto conteúdo em goethita, principalmente em altas taxas de transferência de calor.<sup>(9)</sup> Pelas análises termogravimétricas foi verificado que a Goethita se converte totalmente em hematita em temperaturas acima de 300 °C.<sup>(1)</sup> Nos testes realizados as temperaturas máximas atingidas durante o ciclo de pré-queima foram abaixo de 250 °C (Tabela 5), de onde se conclui que ainda existia goethita não transformada em hematita no ciclo de queima da pelota.

A presença de altas porcentagens de martita (hematita porosa), que retêm grande umidade intragranular, pode gerar condições para que o outro tipo de mecanismo de fragmentação

pela secagem da água superficial, “free-water spalling”, também aconteça em um perfil térmico inadequado na fase de secagem/ pré queima.<sup>(1)</sup> A ação isolada ou combinada desses mecanismos resulta numa diminuição da resistência física da pelota.

Tabela 5. Temperaturas médias do forno de “pot-grate” no ciclo de pré-queima.

Amostra	KE01	KE02*	KE03	KE04	KE05	KE06	KE07	KE08	KE09
Média	199	-	188	131	158	136	128	157	136
$\sigma$	30	-	13	7	13	7	11	14	12
Mínimo	171	-	176	124	144	129	119	143	124
Máximo	250	-	216	145	185	151	149	185	160
Contagem	9	-	9	9	9	9	9	9	9

\* não medida

Fonte: Sá (2003, p.50)<sup>(1)</sup>

## 5. CONCLUSÕES

A hematita especular incrementa a resistência à compressão das pelotas na faixa granulométrica entre 12 e 16 mm e a martita (hematita porosa), magnetita e goethita influenciam negativamente a resistência a compressão.

O ciclo térmico utilizado permitiu a existência de goethita não transformada para hematita nas pelotas durante a fase de queima, de modo que o fenômeno de fraturamento devido a mudanças estruturais (spalling) pode ter ocorrido devido a esta goethita residual. Os ciclos do processo de queima devem ser ajustados à mineralogia do “pellet feed”, de forma a se obter as melhores taxas de produtividade e controle de especificações. As propriedades intrínsecas da pelotas queimadas podem ser modeladas a partir das características físicas, químicas e mineralógicas dos concentrados originais.

## Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela SAMARCO MINERAÇÃO S. A, FAPEMIG e CNPq.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SÁ G.K. **Estudo da influência da mineralogia dos tipos de minério da Samarco Mineração sobre a resistência a compressão de pelotas para processos de redução direta**. 2003, 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- KANEKO, K. M; FEITOSA, V. M. T; TORÍBIO, N. M; COELHO, L. H. Caracterização Mineralógica da Jazida de Ferro de Alegria I e 6. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, I., 1996, Ouro Preto. **Anais...** Belo Horizonte: ABM, 1996. p. 403-416.
- COELHO L.H. **Caracterização tecnológica de pelotas queimadas de minério de ferro: morfologia da hematita x resistência físico química**. Belo Horizonte: Samarco, 1993. [Relatório interno]
- RIGAUD, M.; PANIGRAPHY, S. C.; JENA B. Characterization of fluxed pellets produced from low silica specular hematite. **CIM BULLETIN**, Montreal, v. 85, n. 964, p.102-109, 1992.
- SIERRA, J.C.R.; BADIE, J.M.; JANA, F.C. Non-isothermal conditions inside magnetite pellet due to its oxidation by air. **Ironmaking & Steelmaking**, London, v. 21, n. 2, 114-117, 1994.
- MEYER, K. **Pelletizing of iron ores**. Berlin: Springer, 1980.
- LAGOIRO, L. E. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 16, n. 3, p.415-423, Apr. 1998.
- NAONO, H.; FUJIWARA R. Micropore formation due to thermal decomposition of acicular microcrystals of  $\alpha$ -FeOOH. **Journal of Colloid Interface Science**, New York, v. 73, n. 2, p. 406-415, Feb.1980.
- BAKER, L. A.; THOMAS, C. G.; CORNELIUS, R.J.; LYNCH, K.S.; ARSMSTRONG, E. Effect of goethite on production rate in a travelling grate pellet plant. **Transactions of the American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers (SME)**, New York, n. 254, p. 270-278, Sept. 1973.