

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE SEPARAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO DO PÓ DE BALÃO*

*Alisson Rodrigo dos Santos¹
Fernando Gabriel da Silva Araújo²
Erivelto Luís de Souza³
Rubén António Llobell Solé⁴*

Resumo

O presente trabalho objetiva analisar a viabilidade técnica de recuperar parte do pó de balão, composto por finos de carvão e hematita, submetido primeiramente a tratamento termoquímico e posteriormente a campo magnético uniforme. Foram analisadas amostras oriundas de pó de balão de alto forno funcionando com carvão mineral e alto forno com carvão vegetal. Os finos de carvão, recuperados na separação magnética, podem ser utilizados na sinterização, pelletização e até mesmo reinjetados nas ventaneiras. Essa reutilização tem um efeito muito importante, pois cada tonelada de fino carregado pela ventaneira corresponde a uma economia de carvão que não será carregado pelo topo, deixando mais volume útil livre para a carga de minério. O pó de balão foi submetido a um processo de redução da hematita em magnetita, em atmosfera adequada para a preservação de carbono, a fim de aumentar a susceptibilidade magnética e permitir a separação magnética. Os finos de minério residuais da recuperação dos finos de carvão não são perdidos, podem ser utilizados na fabricação de briquetes ou reutilizado na sinterização e pelletização. Após a redução, o material foi submetido à separação magnética, mostrando-se assim viável tecnicamente a separação e reaproveitamento dos finos de carvão e minério.

Palavras-chave: Redução; Pó de balão; Finos de carvão.

ANALYSIS OF VIABILITY OF SEPARATION AND CONCENTRATION OF COAL FINES FROM OFF GASES DUST

Abstract

The present work had as objective to analyze the technical viability of recovering part of the off gases dust, composed of coal fines and hematite fines, when first submitted to thermochemical treatment and later to uniform magnetic field. Samples of off gases dust were analyzed from blast furnace running with coal and blast furnace with charcoal. Coal fines, recovered in the magnetic separation process, can be redirected to the sintering, pelletizing and even reinjected in the blast furnace. This re-use has a very important effect because each tone of fine charged by the injection at furnace blast corresponds to an equal or greater weight of coal that will not be charged from the top, leaving more useful volume free for the ore load. The off gases dust was subjected to a process of reduction of the hematite in magnetite, in an atmosphere suitable for the preservation of carbon, in order to increase the magnetic susceptibility and allow the magnetic separation. The residual ore fines from the recovery of coal fines are not lost, it can be used in the manufacture of briquettes or reused in sintering and pelletizing. After the reduction, the material was subjected to magnetic separation, thus it was technically viable to separate and reuse the fines from coal and ore.

Keywords: Reduction; Gas off dust; Coal fines.

¹ FUPAC / REDEMAT, UFOP, Praça Tiradentes 20, Centro 35400-000, Ouro Preto, Brasil

² REDEMAT, UFOP, Praça Tiradentes 20, Centro 35400-000, Ouro Preto, Brasil

³ CAP, UFSJ, Rodovia MG 443, km 7, Fazenda do Cadete 36420-000, Ouro Branco, Brasil

⁴ DEPEC, Fundação Gorceix, Rua Conde de Bobadela, 142, Centro 35400-000, Ouro Preto, Brasil

1 INTRODUÇÃO

O reaproveitamento de resíduos gerados durante o processo industrial trata não apenas do interesse econômico, mas também em dar uma correta finalidade aos resíduos gerados pela indústria siderúrgica, de forma a minimizar o impacto ambiental.

Um levantamento realizado pela FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais [1] sobre os resíduos sólidos inventariados em Minas Gerais, mostra que a indústria siderúrgica e metalúrgica mineira gera uma quantidade de resíduos grande a cada ano, dentre os quais destaca-se o pó de balão, objeto de estudo desta pesquisa. Para cada tonelada de gusa, são gerados aproximadamente 30 kg de pó de balão.

Um reaproveitamento do pó de balão, através de um tratamento de redução da carga metálica e posterior separação magnética mostra-se interessante, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

Essa pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade técnica de recuperar parte do pó de balão, composto por finos de carvão e finos de hematita, quando submetido primeiramente a tratamento termoquímico em atmosfera adequada para a preservação de carbono, a fim de aumentar a susceptibilidade magnética e posteriormente a campo magnético uniforme (separação magnética). Foram analisadas amostras oriundas de pó de balão de alto forno funcionando com carvão mineral e alto forno com carvão vegetal.

Os finos de minério obtidos durante a recuperação podem ser destinados aos processos de aglomeração a seco (sinterização) e a úmido (pelotização). Estes finos podem ainda vir a compor briquetes que porventura podem ser utilizados no carregamento do alto-forno novamente.

Os finos de carvão, recuperados no processo de separação magnética, podem ser redirecionados aos processos de sinterização, pelotização e até mesmo reinjetados nas ventaneiras. Essa reutilização tem um efeito muito importante, pois cada tonelada de fino carregado pela ventaneira corresponde a um peso igual, ou maior, de carvão que não será carregado pelo topo, deixando mais volume útil livre para a carga de minério.

1.1 Pó de balão

O pó de balão é um resíduo da limpeza dos gases gerados no alto-forno, composto principalmente, por finos de carvão e minério de ferro. Estes finos são arrastados durante o processo de passagem dos gases pela carga do alto-forno. Para a limpeza desses gases utiliza-se um sistema de limpeza a seco dos gases do alto-forno. Um esquema representativo do sistema de limpeza a seco pode ser visto na Figura 1.

A composição química aproximada do resíduo pó de balão é apresentada na Tabela 1.

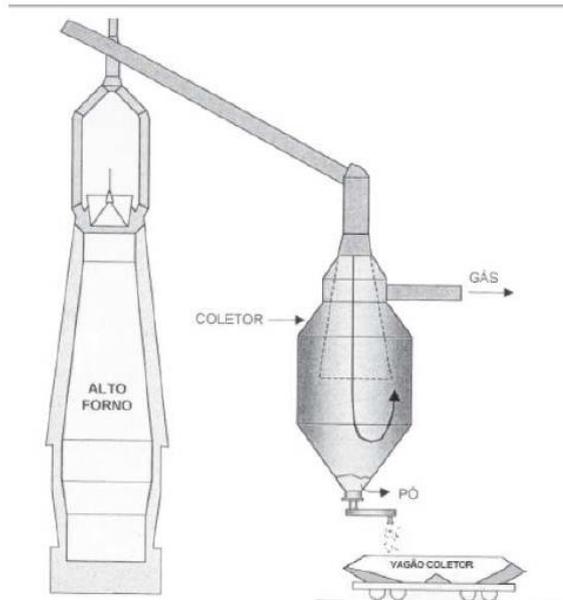


Figura 1 - Esquema do coletor de pó de balão para limpeza do gás do topo do alto-forno.

Fonte: Oliveira e Martins[2]

Tabela 1. Composição química aproximada do resíduo pó de balão

Elementos	Porcentagem (%)
Fe ₂ O ₃	57,0
SiO ₂	12,0
Al ₂ O ₃	2,0
P ₂ O ₅	0,05
CaO	3,0
MgO	0,1
Carvão Vegetal	20,0

Fonte: Oliveira e Martins [2]

1.2 Minério de ferro

O ferro é considerado um dos elementos básicos na constituição da terra. Na crosta terrestre, conhecida até aproximadamente 16 km, o oxigênio é o elemento mais abundante, seguido do silício, do alumínio e do ferro, este último em quarto lugar. A quantidade de ferro que ocorre na crosta terrestre sob diferentes combinações atinge aproximadamente 4,11% em peso ou 0,48% do volume da crosta, e encontra-se espalhado heterogeneamente pelos continentes e fundo dos mares e oceanos [3].

Nem todo o ferro disponível é economicamente viável de ser explorado. Para que este possa ser explorado, deve-se haver uma quantidade razoável de concentrado em uma determinada região, constituindo as jazidas de minérios de ferro.

O ferro ocorre na forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos e como constituinte de uma grande variedade de materiais. Segundo Mazon [4], os minerais de ferro economicamente mais importantes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Minerais de ferro economicamente mais importantes

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico em ferro (%)
Hematita	Fe ₂ O ₃	69,9
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72,4
Limonita	FeO.OH.nH ₂ O	< 62,9 (*)
Goethita	FeO.OH	62,9
Siderita	FeCO ₃	48,3

Fonte: Adaptado de Mazon [4]

(*) quanto maior *n* → menor %Fe

1.3 Beneficiamento de minérios

O beneficiamento de minérios trata-se da separação de partículas minerais, baseando-se nas variações relativas de tamanho e composição. Essa separação é obtida pela passagem do fluxo de partículas através de um equipamento, o separador. Nesse processo, uma força é aplicada nas partículas e, baseado nas diferentes propriedades dos minerais (tamanho, formato, densidade, condutividade elétrica, susceptibilidade magnética, entre outras), elas são afetadas de maneiras diferenciadas, resultando na separação das partículas minerais. Os processos de separação procuram tirar o máximo proveito das diferenças existentes nas propriedades das partículas minerais presentes [5].

1.4 Separação magnética

O magnetismo é o fenômeno onde alguns materiais exercem uma força ou influência de atração ou repulsão sobre outros materiais. Este fenômeno é conhecido há milhares de anos e tem início com pesquisas de Tales de Mileto. Todas as substâncias são influenciadas, em maior ou menor grau, pela presença de um campo magnético [6].

O método de separação magnética baseia-se numa característica do material conhecida como susceptibilidade magnética, que é a resposta do mineral à aplicação de um campo magnético. Em função desta propriedade, os materiais são classificados em duas categorias, a saber: os que são atraídos e os que são repelidos pelo campo magnético [7].

De acordo com Sampaio e Luz [7] os materiais podem ser classificados em:

- *Minerais ferromagnéticos* – são materiais que são fortemente atraídos por um ímã. Um exemplo de mineral ferromagnético é a magnetita (Fe₃O₄).
- *Minerais paramagnéticos* – são materiais que são fracamente atraídos por um ímã. A hematita (Fe₂O₃) é um exemplo de material paramagnético.
- *Minerais diamagnéticos* – são materiais que são repelidos quando submetidos a um campo magnético. O quartzo, a calcita, a magnesita, entre outros, são exemplos de minerais diamagnéticos.

A Figura 2 mostra a indução magnética de diferentes partículas minerais em função do campo magnético. Através da Figura 2, pode-se perceber que os materiais ferromagnéticos apresentam resposta rápida da indução magnética com o campo (curva a). Os materiais paramagnéticos respondem fracamente (curva b), enquanto que materiais diamagnéticos apresentam um valor negativo (curva c).

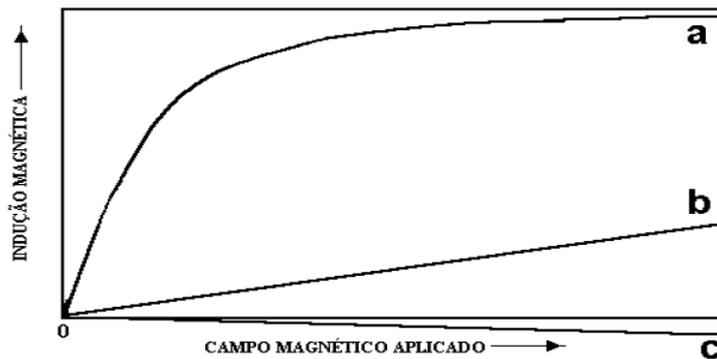


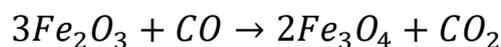
Figura 2–Indução magnética para diferentes partículas minerais (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.

Fonte: Sampaio e Luz [7]

A separação magnética consiste em aproveitar da susceptibilidade magnética do ferro e separá-lo do carvão. Para uma melhor resposta do ferro, nesta pesquisa propôs-se a ativação das propriedades ferrimagnéticas do fino de minério, por meio da redução da hematita para magnetita. [8]

1.5 Tratamento termoquímico

A separação magnética consiste em aproveitar da susceptibilidade magnética do ferro e separá-lo do carvão. Para uma melhor resposta do ferro, nesta pesquisa propôs-se a ativação magnética do ferro, que consiste em expor o material a um fluxo de gás redutor, com atmosfera adequada para preservação do carvão, para que parte dos finos de óxido III, presentes no material, se convertam em magnetita. A reação para aumentar a resposta magnética para o óxido de ferro pode ser expressa como:



As Figuras de 3(a), 3(b) e 3(c) mostram um esquema dos finos do pó de balão expostos a um fluxo de gás redutor antes e após a transformação de hematita em magnetita.

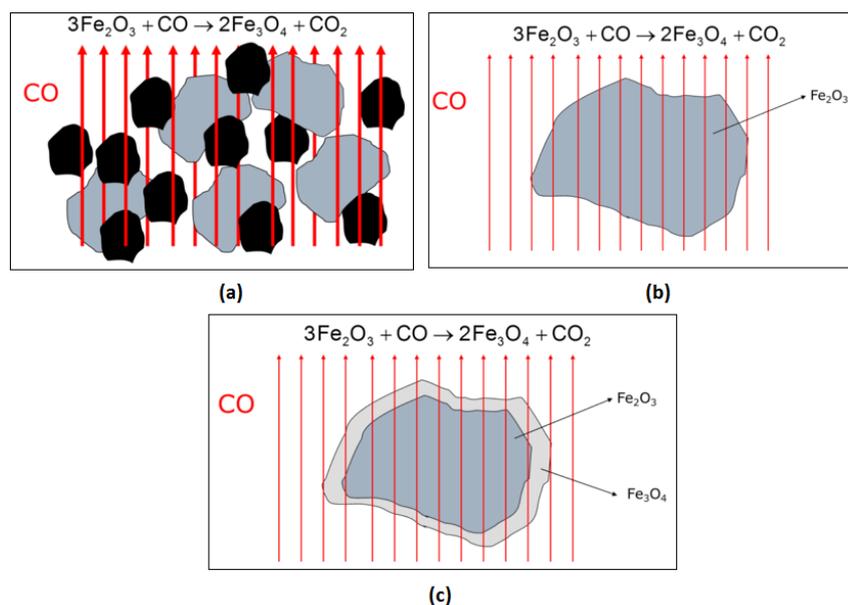


Figura 3– (a) Finos de ferro e carvão num leito fluidizado; (b) Minério de ferro antes da transformação; (c) Ferro com camada transformada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a pesquisa foram utilizados pó de balão proveniente de alto forno movido a carvão mineral (denominado PBM) e também pó de balão cuja origem foi de alto forno a carvão vegetal (denominado PBV), ambos situados em siderúrgicas de Minas Gerais. Um fluxo de desenvolvimento do trabalho é apresentado na Figura 4.

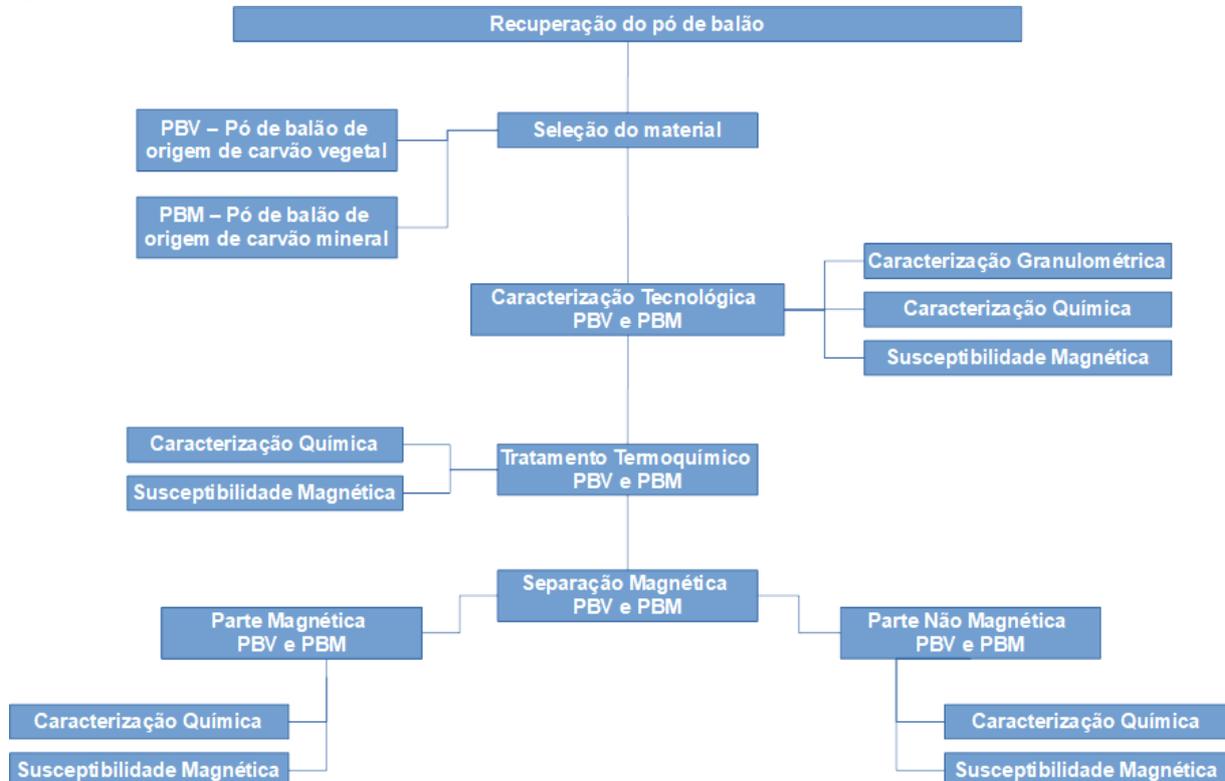


Figura 4—Fluxo de desenvolvimento dos ensaios para separação dos finos.

Inicialmente, para cada amostra de pó de balão (tanto PBM como PBV) foi realizado o quarteamento a fim de uma homogeneização da amostra. Após a homogeneização, uma parte da amostra foi desumidificada em estufa e então foram separadas amostras para a caracterização granulométrica, a caracterização química e susceptibilidade magnética do material bruto.

O tratamento termoquímico, com uma amostra de 500g, foi realizado em Forno para Testes Iso Linder, marca Fortlab, modelo FTL-1000/CLP. A composição do gás redutor, apresentada na Tabela 3, foi escolhida de modo a preservar o carbono da amostra, procurando realizar apenas a redução da hematita em magnetita. Foi adotada uma taxa de aquecimento da rampa de 15°C por minuto, até atingir a temperatura de processo de 800°C. O tempo de redução foi de 30 minutos, injetando-se 5L de gás por minuto.

Tabela 3. Composição da atmosfera para o tratamento termoquímico

Gás	Porcentagem (%)
N ₂	38,0
CO	50,0
CO ₂	10,0
H ₂	2,0

Taxa de aquecimento da rampa = 15°C/minuto, → Temperatura de processo 800°C
Tempo de redução = 30 minutos → Gás redutor 5L/min.

Após o tratamento termoquímico, foram separadas amostras para análise química e susceptibilidade magnética. Então, foi realizada a separação magnética do material em baixo campo magnético, de 800 G. Amostras foram separadas para análise química e susceptibilidade magnética, tanto da parte magnética como da parte não magnética.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A granulometria para o pó de balão de origem mineral é mostrada na Tabela 4 e na Figura 5.

Tabela 4. Granulometria do pó de balão mineral

Abertura da malha (µm)	Peso seco (gramas)	Distribuição (%)		
		Retido simples	Acumulado	Passante
2380,0	0,46	0,10	0,10	99,90
1190,0	0,73	0,16	0,26	99,74
840,0	1,90	0,42	0,68	99,32
590,0	6,11	1,35	2,04	97,96
420,0	18,94	4,19	6,23	93,77
297,0	46,67	10,33	16,56	83,44
210,0	80,51	17,82	34,39	65,61
149,0	81,61	18,07	52,45	47,55
105,0	54,16	11,99	64,44	35,56
74,0	58,63	12,98	77,42	22,58
53,0	43,95	9,73	87,15	12,85
44,0	10,33	2,29	89,44	10,56
1,0	47,69	10,56	100,00	0,00
Peso total:	451,69	100,00		

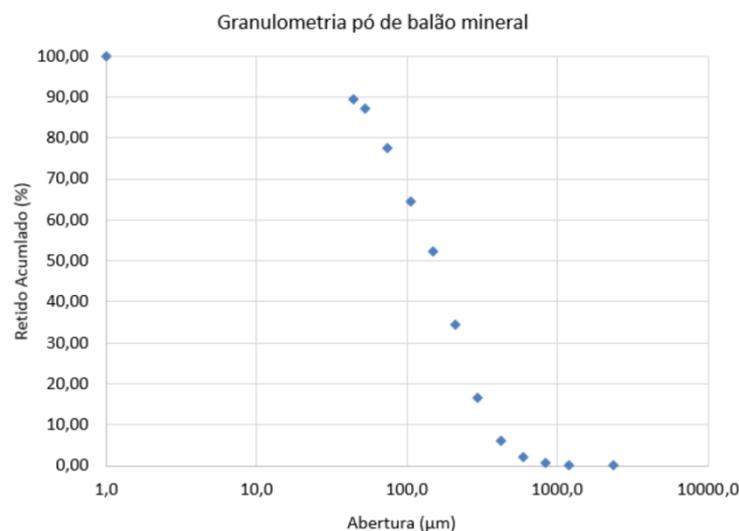
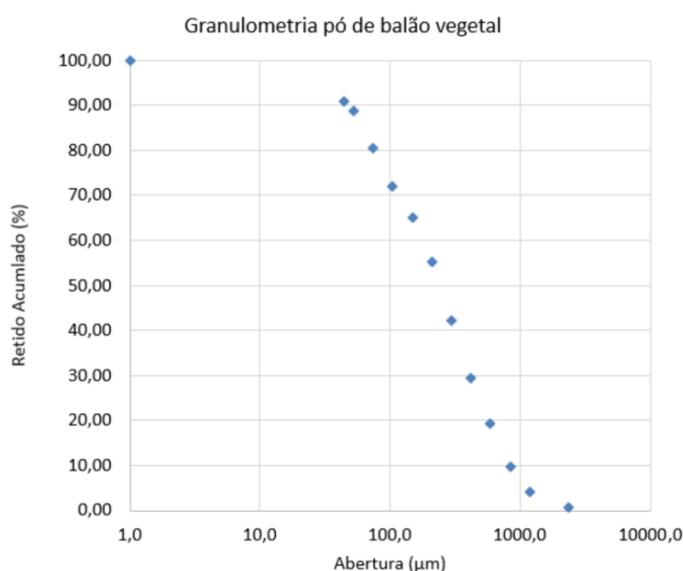


Figura 5—Granulometria para o pó de balão de origem mineral.

A granulometria para o pó de balão de origem vegetal é mostrada na Tabela 5 e na Figura 6.

Tabela 5. Granulometria do pó de balão vegetal

Abertura da malha (µm)	Peso seco (gramas)	Distribuição (%)		
		Retido simples	Acumulado	Passante
2380,0	2,83	0,65	0,65	99,35
1190,0	14,85	3,42	4,07	95,93
840,0	24,84	5,73	9,80	90,20
590,0	40,88	9,42	19,22	80,78
420,0	43,90	10,12	29,34	70,66
297,0	55,43	12,78	42,12	57,88
210,0	56,81	13,09	55,21	44,79
149,0	43,31	9,98	65,19	34,81
105,0	29,70	6,85	72,04	27,96
74,0	37,10	8,55	80,59	19,41
53,0	35,93	8,28	88,87	11,13
44,0	8,41	1,94	90,81	9,19
1,0	39,88	9,19	100,00	0,00
Peso total:	433,87	100,00		

**Figura 6**–Granulometria para o pó de balão de origem vegetal.

As Tabelas 6 e 7 são apresentadas a seguir e mostram o percentual de carbono (C), óxido de ferro (FeO) e ferro total (Fe Total) para as amostras de pó de balão para as diversas fases da pesquisa.

Tabela 6. Quantidade de C, FeO e Fe Total presentes nas amostras de pó de balão mineral

Amostra	%C	%FeO	%Fe Total
Pó de balão antes do tratamento termoquímico (bruto)	34,7	2,27	34,82
Pó de balão após tratamento termoquímico	32,8	14,53	35,94
Pó de balão após tratamento termoquímico e separação magnética – parte magnética	7,19	26,64	56,21
Pó de balão após tratamento termoquímico e separação magnética – parte não magnética	69,6	3,48	5,27

Tabela 7. Quantidade de C, FeO e FeTotal presentes nas amostras de pó de balão vegetal

Amostra	%C	%FeO	%Fe Total
Pó de balão antes do tratamento termoquímico (bruto)	36,1	5,69	32,79
Pó de balão após tratamento termoquímico	32,7	44,70	37,51
Pó de balão após tratamento termoquímico e separação magnética – parte magnética	12,7	74,17	59,91
Pó de balão após tratamento termoquímico e separação magnética – parte não magnética	32,5	48,13	35,84

Os testes de susceptibilidade magnética para a amostra de pó de balão de origem mineral são apresentados nas Figuras 7 a 10.

Medição de Susceptibilidade

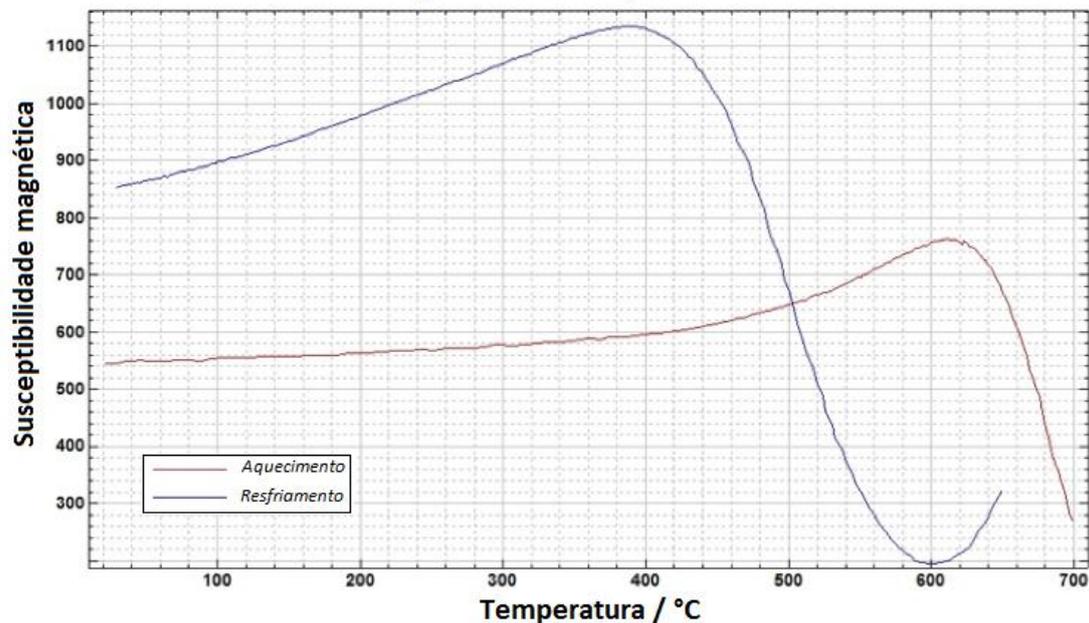


Figura 7–Susceptibilidade Magnética para pó de balão mineral, amostra bruta.

Medição de Susceptibilidade

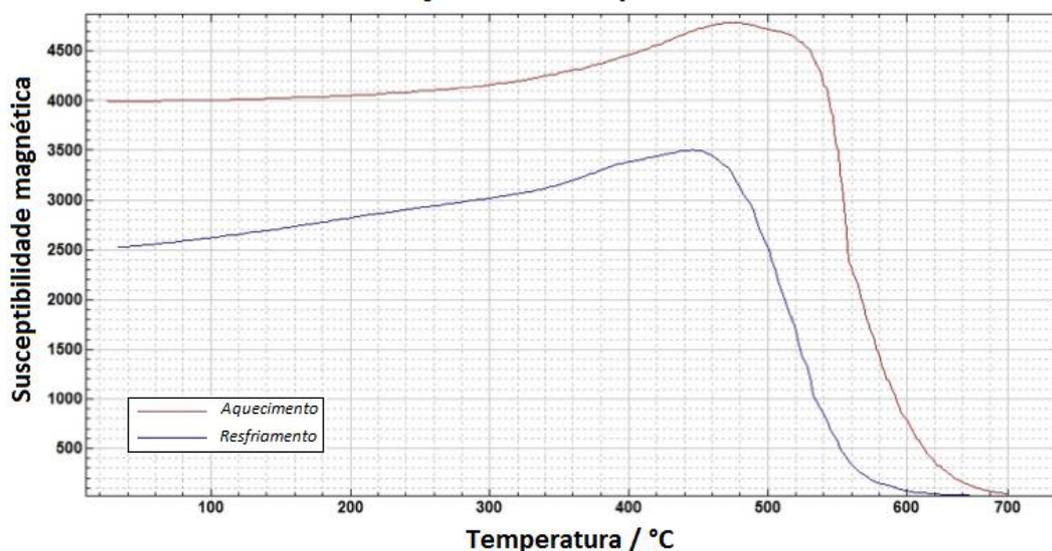


Figura 8–Susceptibilidade Magnética para pó de balão mineral após tratamento termoquímico.

Comparando-se os gráficos das Figuras 7 e 8, pode-se observar um aumento significativo na susceptibilidade magnética da amostra, o que mostra êxito no tratamento termoquímico.

Medição de Susceptibilidade

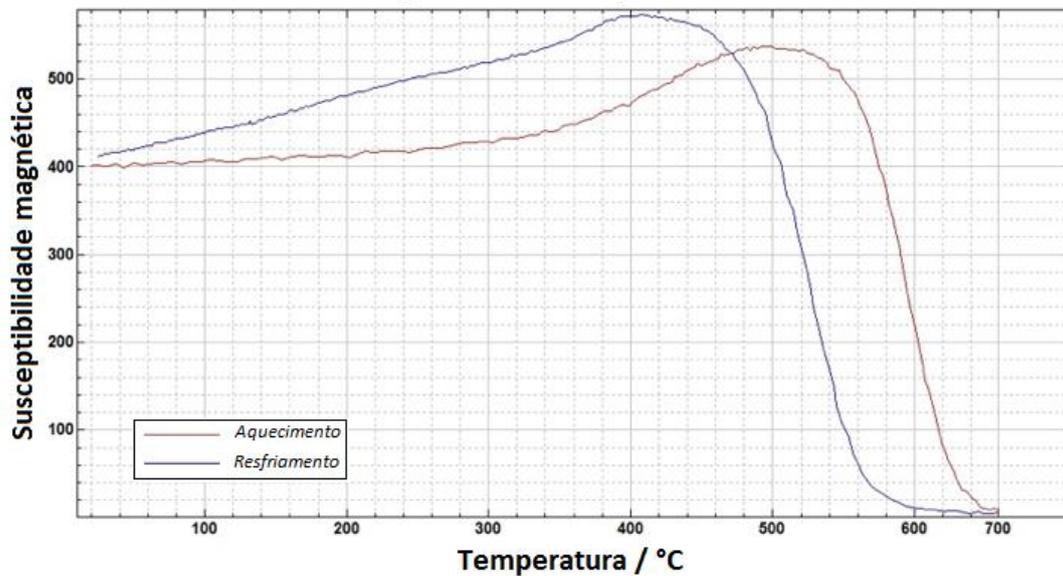


Figura 9—Susceptibilidade Magnética para a parte não magnética do pó de balão mineral após tratamento termoquímico e separação magnética.

Pelas Figuras 9 e 10 pode-se observar que o processo de separação magnética foi eficiente.

Medição de Susceptibilidade

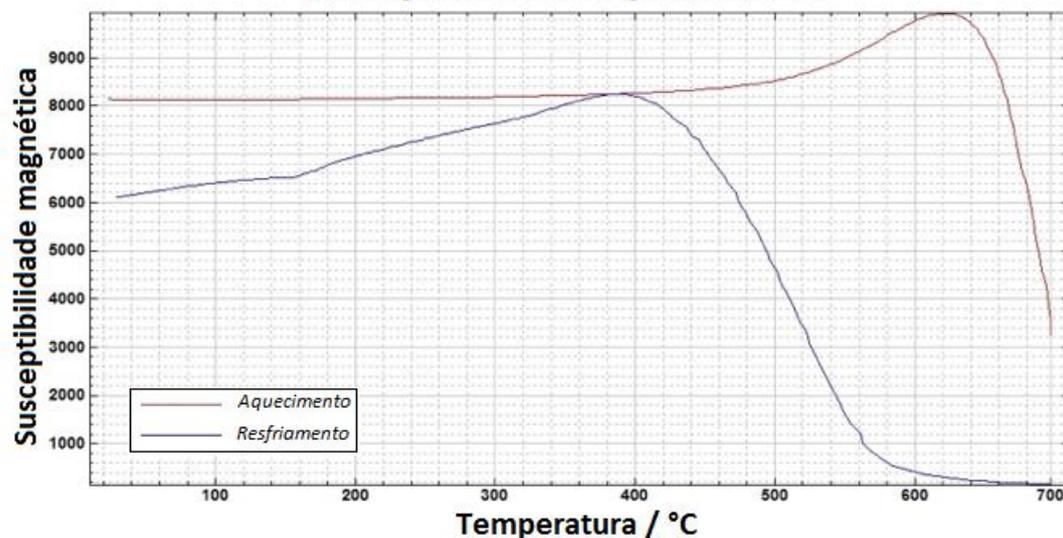


Figura 10—Susceptibilidade Magnética para a parte magnética do pó de balão mineral após tratamento termoquímico e separação magnética.

Para a amostra de pó de balão de origem vegetal, os testes de susceptibilidade magnética são apresentados nas Figuras 11 e 12.

Medição de Susceptibilidade

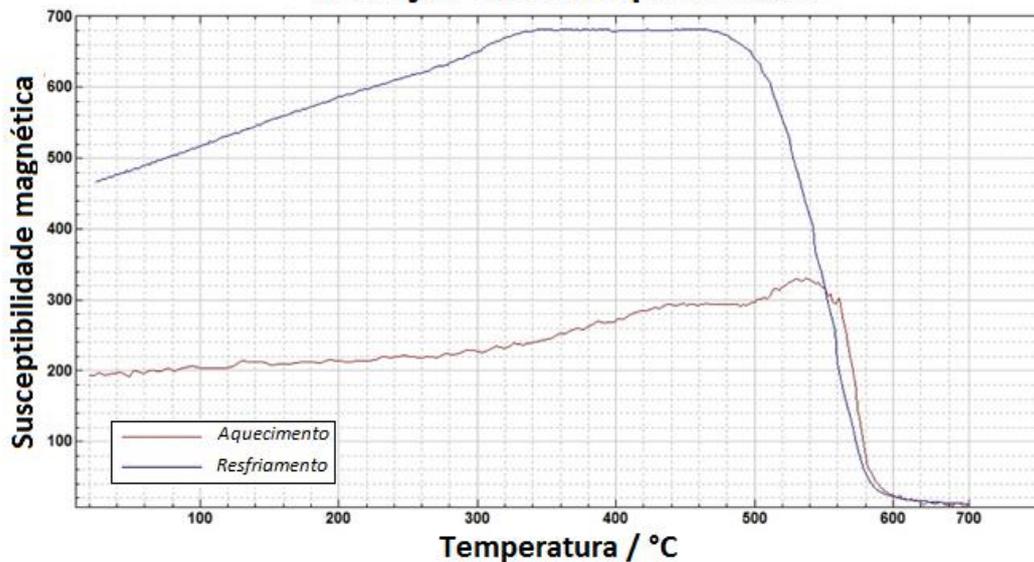


Figura 11–Susceptibilidade Magnética para pó de balão vegetal, amostra bruta.

Medição de Susceptibilidade

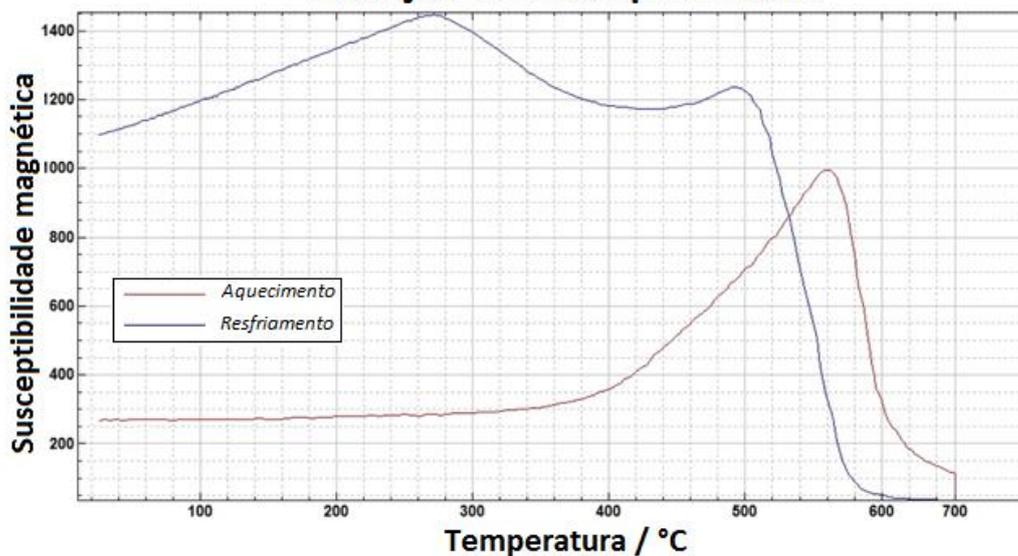


Figura 12–Susceptibilidade Magnética para pó de balão vegetal após tratamento termoquímico.

Comparando-se os gráficos das Figuras 11 e 12, observa-se que houve um pequeno aumento na susceptibilidade magnética da amostra, novos testes para esse tipo de amostra serão sugeridos.

4 CONCLUSÃO

O processo de redução da hematita para magnetita se deu adequadamente, mantendo-se a atmosfera redutora conforme parâmetros do topo de altos-fornos, demonstrando que este processo é viável para separação dos finos de carvão e minério, por meio de separação magnética, após as reduções. A redução de parte da hematita em magnetita viabiliza este procedimento. O pó de balão de carvão

vegetal apresentou uma redução mais significativa, basicamente em função de sua maior porosidade, permitindo uma redução mais eficiente dos finos de hematita. Porém a separação magnética do mesmo demanda um procedimento de moagem com mais eficiência, que promova a maior identidade das partículas de minério e carvão. O desenvolvimento de um dispositivo mais adequado para uma operação contínua é objetivo de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- 1 FEAM. *Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2015* / Fundação Estadual do meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2016.
- 2 OLIVEIRA, M. R. C.; MARTINS, J. Caracterização e classificação do resíduo sólido "pó de balão", gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG. *Química Nova*, v. 26, n. 1, p. 5–9, 2003.
- 3 PENA, J. C.; SOUZA, R. P. Matérias primas. In: *Aglomeração de Minérios de Ferro*. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1980. p. II.1.1 – II.1.555.
- 4 MAZON, R. *Efeito do tempo de residência sobre a recuperação metálica da flotação colunar reversa de minério de ferro*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.
- 5 SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. Separação magnética e eletrostática. In: *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 367–395.
- 6 CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 882 páginas.
- 7 SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. Separação magnética e eletrostática. In: *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 367–395.
- 8 GOMES, G. S. L. *Desenvolvimento de um equipamento em escala de bancada para a concentração de materiais com resposta magnética através do uso de campo girante*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.