



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



# **SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE USTULADO DE MINÉRIO HEMATÍTICO**

**PEDRO HENRIQUE NEUPPMANN**

**OURO PRETO**

**2016**

PEDRO HENRIQUE NEUPPMANN

# **SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE USTULADO DE MINÉRIO HEMATÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para graduação em Engenharia de Minas.

Orientador: José Aurélio Medeiros da Luz

OURO PRETO

2016

N494s Neuppmann, Pedro Henrique.  
Separação magnética de ustulado de minério de ferro [manuscrito] / Pedro Henrique Neuppmann. - 2017.

51f.: il.: color; grafis; tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Separação magnética de minérios. 2. Tratamento de minérios - Ustulação. 3. Minérios de ferro. I. Luz, José Aurélio Medeiros da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.778

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)

# SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE USTULADO DE MINÉRIO HEMATÍTICO

**Autor: Pedro Henrique Neuppmann**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado e aprovado dia 25 de Novembro de 2016, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:




---

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz – Orientador – UFOP



---

Marcus Alexandre de Carvalho Winitkowski da Silveira – Membro – UFOP



---

Felipe de Orquiza Milhomem – Membro – UFOP

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. José Aurélio Medeiros da Luz pela orientação e pelos conselhos durante a elaboração deste trabalho;

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas, Antônio Pedro de Freitas, Luiz Cláudio do Sacramento e Mariana Caroline Andrade Silva, pelas contribuições na realização de todos os ensaios e na preparação das amostras;

Ao técnico do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos do DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica Graciliano Dimas Francisco, e ao Prof. Geraldo Lúcio de Faria, pelo auxílio nos ensaios de ustulação e por toda disponibilidade na realização dos mesmos;

Aos membros da banca examinadora, Felipe de Orquiza Milhomem e Marcus Alexandre de Carvalho Winitskowski da Silveira por aceitarem o convite e por tantas sugestões adicionais a esse trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho consiste na avaliação do processo de ustulação redutora superficial de um minério de ferro hematítico, visando ao melhor desempenho na separação magnética. A transformação da hematita em magnetita é extremamente proveitosa para a concentração mineral, pois facilita a separação entre as fases minerais e viabiliza a utilização da separação magnética de baixo gradiente.

É apresentada também uma breve revisão sobre a mineralogia dos minérios de ferro brasileiros e sobre os métodos de concentração mais utilizados no Brasil atualmente.

Inicialmente foi realizada uma caracterização do minério e do coque, visando determinar a distribuição granulométrica dos produtos e a análise de teor para cada faixa de tamanho. O tempo de queima, temperatura de queima e percentagem de carvão adicionado foram analisadas em diversos níveis. Os dados foram analisados em seguida, sendo possível indicar qual o melhor resultado e analisar se a rota alternativa proposta possui melhor aproveitamento que a rota convencional.

Todos os parâmetros ocasionaram um aumento da perda de massa, ou seja, a transformação de hematita em magnetita ocorreu e o melhor resultado foi obtido na temperatura de 750°, no tempo de 35 minutos e com 10% de carvão adicionado. Esses parâmetros aumentaram a recuperação mássica em 5,3% para o campo de 0,93 T e em 240,3% para o campo de 0,06 T. O magnetismo gerado pelo processo de ustulação é notado visualmente pela presença de um ímã de mão.

Os ensaios de separação magnética e a preparação das amostras foram realizados no “Laboratório de Tratamento de Minérios” do DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas – enquanto os ensaios de ustulação foram realizados no “Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos” do DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica, ambos da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.

Palavras-chave: Minério de Ferro Hematítico; Ustulação Redutora Superficial; Separação Magnética;

## ABSTRACT

The present study consists in the evaluation of the process of magnetic roasting of a hematitic iron ore, aiming at the best performance in the magnetic separation. The transformation of hematite into magnetite is extremely useful for the mineral concentration, since facilitates the separation between the mineral phases and allows the use of low gradient magnetic separation.

A brief review is presented on the mineralogy of Brazilian iron ore and on the most used concentration methods in Brazil today.

Initially, a characterization of the ore and coke was carried out, aiming to determine the granulometric distribution of the products and the content analysis for each size range. The firing time, firing temperature and percentage of charcoal added were analyzed at several levels. The data were analyzed afterwards, being possible to indicate the best result and to analyze if the proposed route has better use than the conventional route.

All the parameters caused an increase in loss of mass, the transformation of hematite into magnetite occurred and the best results was obtained at the temperature of 750°, in the time of 35 minutes and with 10% of coal added. These parameters increased the mass recovery by 5.3% for the field of 0.93 T and by 240.3% for the field of 0.06 T. The magnetism generated by the roasting process is visually noticed by the presence of a magnet of hand.

The magnetic separation tests and the preparation of the samples were carried out in the "Laboratório de Tratamento de Minérios" of DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas - while the roasting tests were carried out in the "Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos" of DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica, both of the Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP.

Keywords: Hematitic Iron Ore; Magnetic Roasting; Magnetic Separation

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MECANISMO DE JIGAGEM .....	3
FIGURA 2: CONCENTRADOR HELICOIDAL DE HUMPHREYS .....	4
FIGURA 3: MESA VIBRATÓRIA .....	4
FIGURA 4: EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA – ADAPTADO DE (MULAR, HALBE, & BARRATT, 2002).....	6
FIGURA 5: SEPARADOR MAGNÉTICO DE TAMBOR - (FRANÇA, LUZ, & SAMPAIO, 2007).....	7
FIGURA 6: SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DOS MINERAIS – (BRUMATTI, 2008) .....	8
FIGURA 7: VARIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE ACORDO COM A COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA – ADAPTADO DE (HROUDA & CHLUPACOVA, 2009).....	9
FIGURA 8: RECUPERAÇÃO MÁSSICA – ADAPTADO DE GOMES (2009) .....	9
FIGURA 9: ESTÁGIOS DE REDUÇÃO DOS MINÉRIOS DE FERRO .....	12
FIGURA 10: MUFLA UTILIZADA .....	18
FIGURA 11: CURVA GRANULOMÉTRICA DOS INSUMOS .....	19
FIGURA 12: SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDADE – WHIMS (CATÁLOGO EQUIPAMENTO) .....	20
FIGURA 13: RELAÇÃO AMPERAGEM - CAMPO MAGNÉTICO .....	21
FIGURA 14: FLUXOGRAMA - ROTA DE PROCESSO .....	22
FIGURA 15: CURVA GRANULOMÉTRICA – MINÉRIO.....	23
FIGURA 16: CURVA GRANULOMÉTRICA – COQUE.....	23
FIGURA 17: MODELOS DE DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS – MINÉRIO .....	24
FIGURA 18: MODELOS DE DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS – COQUE .....	25
FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DE TEORES POR FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	26
FIGURA 20: VARIÁVEIS - PERDA DE MASSA .....	28
FIGURA 21: ORIFÍCIOS DE SAÍDA DE GÁS .....	29
FIGURA 22: INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULA NA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	30
FIGURA 23: COMPARATIVO NATURAL X USTULADO .....	32
FIGURA 24: INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE CARVÃO.....	32
FIGURA 25: INFLUÊNCIA DO TEMPO.....	33
FIGURA 26: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA .....	33
FIGURA 27: MELHORES RESULTADOS.....	34
FIGURA 28: RECUPERAÇÃO MÁSSICA EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA % DE CARVÃO PARA OS CAMPOS : .....	34
FIGURA 29: REDUÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO .....	35
FIGURA 30: MAGNETISMO RESULTANTE DA USTULAÇÃO .....	35
FIGURA 31: MICROGRAFIAS DOS PRODUTOS OBTIDOS: A) CONCENTRADO 0,06T ; B) REJEITO NÃO MAGNÉTICO.....	36
FIGURA 32: ANÁLISE DOS ERROS OBTIDOS NOS ENSAIOS .....	36
TABELA 1: PANORAMA DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA NO BRASIL .....	7
TABELA 2: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	9
TABELA 3: SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DOS MINERAIS .....	10
TABELA 4: FORÇA MAGNÉTICA PARA AMOSTRAS DE DIVERSOS MINERAIS.....	11
TABELA 5: CONTEÚDO METÁLICO DOS MINÉRIOS DE FERRO.....	12
TABELA 6: VARIÁVEIS DE USTULAÇÃO.....	13
TABELA 7: VARIÁVEIS ENSAIADAS .....	18
TABELA 8: TESTES – 750° C.....	19
TABELA 9: DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS – MINÉRIO .....	24
TABELA 10: DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS – COQUE.....	25
TABELA 11: PICNOMETRIA – A GÁS .....	26
TABELA 12: USTULAÇÃO .....	27
TABELA 13: DADOS DA EQUAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO .....	30
TABELA 14: SEPARAÇÃO MAGNÉTICA .....	31



# SUMÁRIO

<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
A. OBJETIVOS GERAIS.....	1
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	1
<b>2. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
A. MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO.....	3
B. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MINERAIS.....	8
C. MINÉRIOS FINOS E ULTRAFINOS .....	11
D. MINERALOGIA DOS MINÉRIOS DE FERRO .....	11
E. REDUÇÃO DOS ÓXIDOS DE FERRO.....	12
F. USTULAÇÃO REDUTORA SUPERFICIAL.....	13
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>16</b>
A. CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	16
B. ENSAIOS DE USTULAÇÃO.....	18
C. ENSAIOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	20
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
A. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	23
B. ENSAIOS DE USTULAÇÃO.....	27
C. ENSAIOS DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA .....	29
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>38</b>
A. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS INSUMOS .....	38
B. USTULAÇÃO .....	38
C. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	38
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>39</b>
<b>9. ADENDO .....</b>	<b>40</b>

# 1. OBJETIVOS

## a. Objetivos Gerais

- Avaliação de uma rota de processo alternativa para o beneficiamento do minério de ferro hematítico fino - fração inferior a 106  $\mu\text{m}$ ;
- Caracterização granulométrica e química do minério de ferro estudado;

## b. Objetivos Específicos

- Estudo do processo de ustulação magnética nos minérios de ferro hematíticos;
- Avaliação da interação entre as variáveis: tempo de queima, temperatura de queima e percentual de carvão;
- Estudo do processo de separação magnética de alto a baixo campo com aplicação no processamento do minério ustulado.

## 2. INTRODUÇÃO

As reservas conhecidas de minério de ferro de alto teor estão em processo de esgotamento, sendo necessário o estudo de novas técnicas para o processamento de minérios mais pobres e compactos. Em contrapartida, a descoberta de minérios itabiríticos esteve em ascensão nos últimos anos, possibilitando a manutenção da produção mineral brasileira e a exploração de minérios de ferro cada vez mais pobres.

Os minérios de ferro hematíticos são processados atualmente por métodos gravíticos, por flotação ou por separação magnética de alto gradiente de campo. A separação gravítica é aplicada para situações em que o minério é liberado em frações bem grossas, caso cada dia menos comum no cenário brasileiro. A flotação é o método atualmente mais usado e com maior seletividade, embora seja um método extremamente caro, utilizando reagentes químicos. A separação magnética de alto gradiente de campo está em ascensão, possuindo um investimento inicial muito elevado, embora possua um custo operacional baixo e seja de fácil manuseio e utilização.

O processamento de minérios predominante magnéticos é feito utilizando separadores magnéticos de baixo gradiente de campo, equipamentos de fácil obtenção no mercado nacional e com investimentos iniciais moderados e custos operacionais bem baixos. O grande desafio encontrado é a escassez de minérios magnéticos que possibilitem a aplicação de tal método.

Desta forma, este trabalho visa tornar magnética a superfície da hematita por processo de redução parcial por carbono e possibilitar a implantação de um sistema de separação magnética de baixo gradiente de campo para o beneficiamento dos minérios originariamente hematíticos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### a. Métodos de Concentração de Minério de Ferro

##### i. Concentração Gravítica

Os métodos gravíticos apresentam custos de investimento (*capex*) mais baixos, não utilizam produtos químicos, apresentando um impacto ambiental relativamente pequeno. É importante ressaltar que o consumo de água é bastante elevado, o que gera uma necessidade de recirculação de água eficiente.

O primeiro método gravítico mencionado é a jigagem. Para os minérios de ferro compostos basicamente por quartzo e hematita, é fácil a separação admitindo-se uma granulometria mínima de 150  $\mu\text{m}$  (100 #).

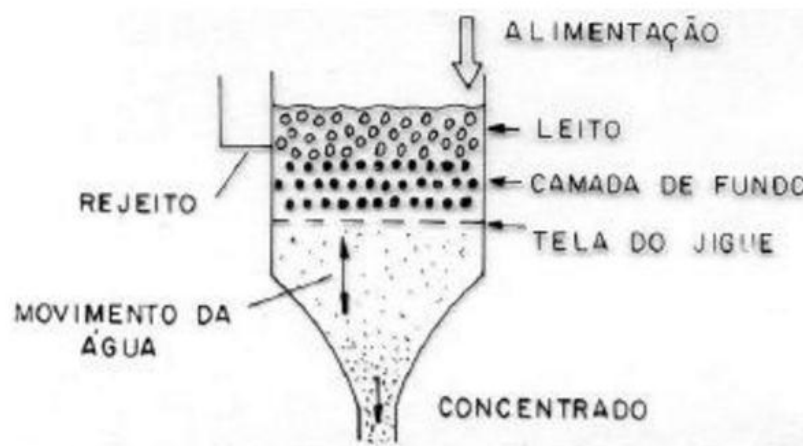


Figura 1: Mecanismo de Jigagem

Outro método utilizado é a concentração gravítica por concentrador helicoidal de Humphreys, impropriamente referida como espiral de Humphreys. Equipamento muito eficiente para a separação das espécies minerais (em granulação não muito menor que 100  $\mu\text{m}$ ), muito seletivo, porém possui baixa capacidade (em torno de 1,5 a 2,0 t/h), baixa mobilidade, baixa flexibilidade e ainda custos elevados de investimento. Tais desvantagens têm levado a diminuição do emprego desse equipamento. Chaves recomenda a utilização de espirais de tamanho intermediário e limitação de tamanho de 38  $\mu\text{m}$  para o beneficiamento dos minérios de ferro (Chaves A. , 2013).



Figura 2: Concentrador Helicoidal de Humphreys

A mesa vibratória consiste no último método gravítico utilizado e possui um movimento oscilatório perpendicular ao fluxo de água. A separação ocorre devido à velocidade do fluido sob uma superfície riflada. A mesa vibratória permite uma visualização nítida da operação, possibilitando ajustes durante o processo. A maior desvantagem desse método é a baixa capacidade de produção, entre 50 e 300 (kg/h) /m<sup>2</sup>.

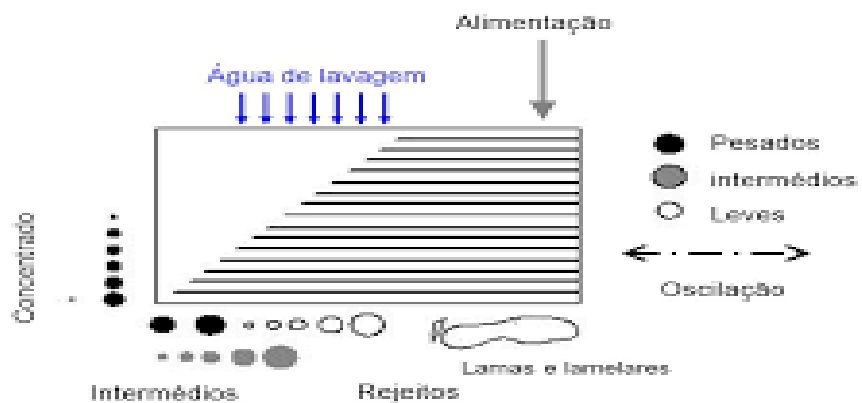


Figura 3: Mesa Vibratória

## ii. Flotação

A flotação de minério de ferro é o método mais utilizado para a faixa granulométrica fina.

Existem três tipos de flotação de minério de ferro:

- Flotação catiônica reversa de quartzo;
- Flotação aniônica direta de ferro;
- Flotação aniônica reversa de quartzo;

A flotação catiônica reversa de quartzo é o método mais utilizado, utilizando aminas como coletoras do quartzo, exercendo também o papel de espumante, enquanto os amidos de milho e mandioca deprimem os minerais portadores de ferro. A flotação aniônica direta de ferro parece ser uma rota atraente, embora a depressão do quartzo ainda seja considerada um desafio. A flotação aniônica reversa de quartzo foi empregada no passado, quando as aminas ainda não eram de uso conhecido nas usinas de tratamento de minérios brasileiras. (Chaves & Filho, 2013).

A flotação apresenta um custo operacional muito elevado, pois necessita da modificação da superfície mineral através da adição de reagentes químicos. É o método de maior seletividade e apresenta um conhecimento muito difundido nas usinas brasileiras em geral. Atualmente todos os circuitos de beneficiamento de finos apresentam células ou colunas de flotação.

O fenômeno denominado “slimes coating”, ou recobrimento de partículas pelos finos naturais (lamas) é muito comum nas plantas de beneficiamento de minério de ferro e muito prejudicial ao processo de flotação. As lamas aumentam o consumo de reagentes, diminuem a seletividade do processo e ainda reduzem os parâmetros cinéticos da flotação. É necessária uma deslamagem eficiente para se evitar a perda de recuperação na flotação sob as condições apresentadas. Contudo, a etapa de deslamagem retira do circuito as frações finas e, portanto acarreta perda de massa com elevado teor de ferro contido, esta sendo destinada às barragens em grande escala.

### iii. Separação Magnética

A separação magnética é um método de concentração mineral aplicado a diversas substâncias em variadas granulações. É baseado na diferença de suscetibilidade magnética natural das partículas minerais, quando submetidas a campos magnéticos induzidos.

Os equipamentos de separação magnética são divididos entre os métodos de alta intensidade (a rigor, de alto gradiente de campo magnético) e de baixa intensidade (a rigor, de baixo gradiente de campo magnético), existindo também métodos a seco e a úmido. As operações a seco abrangem as faixas de granulação mais grossas, ao passo que as operações a úmido abrangem as frações finas.

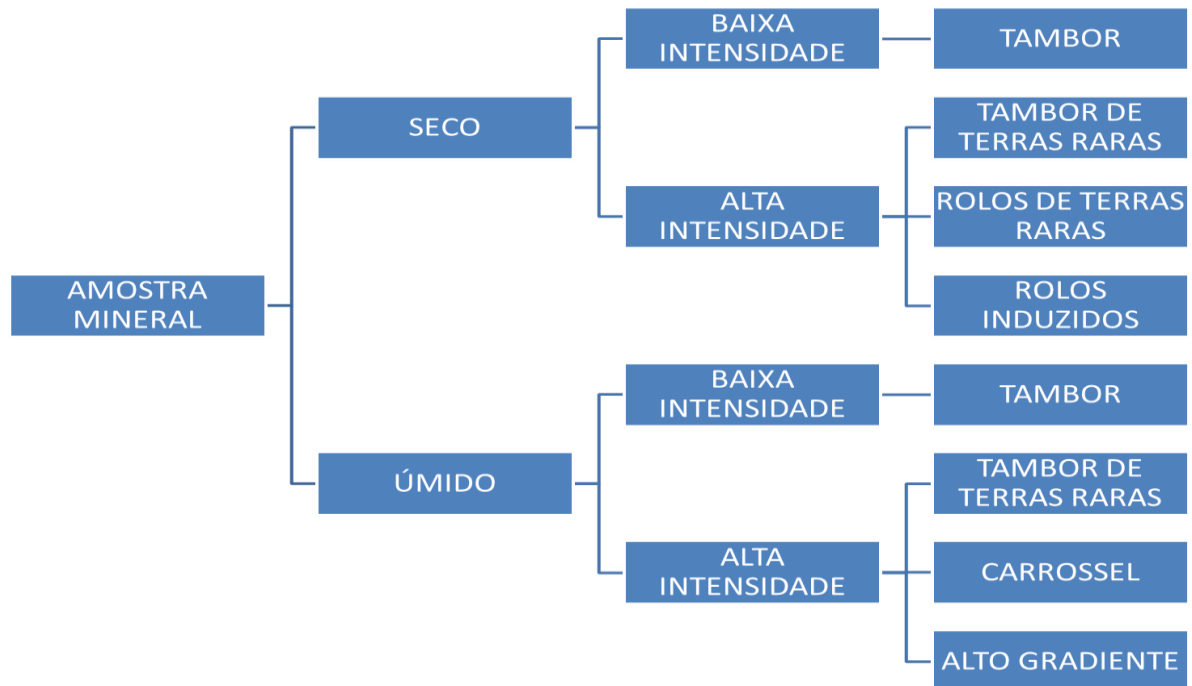


Figura 4: Equipamentos de Separação Magnética – adaptado de (Mular, Halbe, & Barratt, 2002).

Segundo (Oliveira M. , 2011), os separadores de tambores consistem basicamente de ímãs instalados sob uma superfície cilíndrica rotativa. Nas operações a úmido, os tambores ficam parcialmente submersos em um tanque. Os tambores são utilizados para a separação de espécies ferromagnéticas, como a magnetita dos demais minerais, atingindo campos magnéticos da ordem de 0,25 tesla.

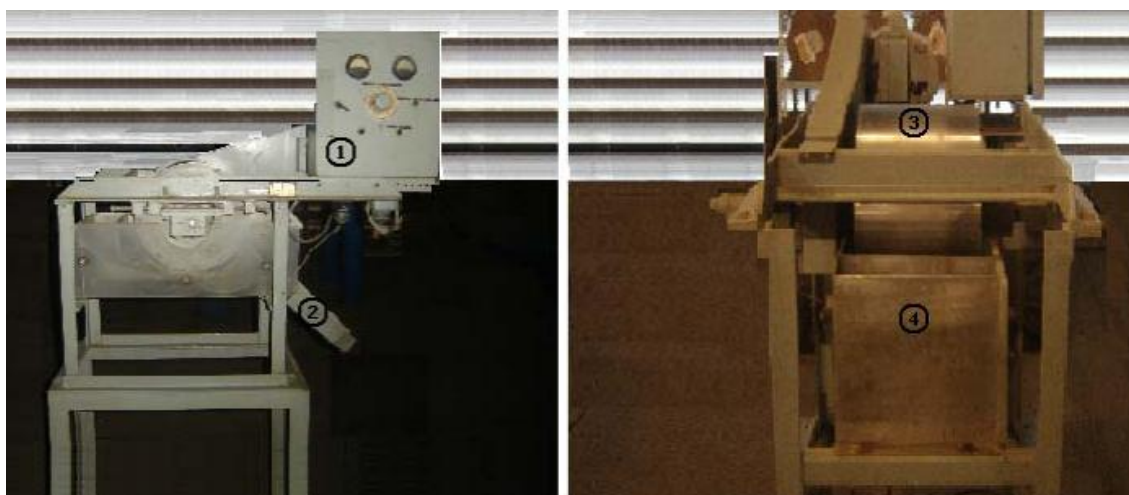


Figura 5: Separador Magnético de Tambor - (França, Luz, & Sampaio, 2007).

O separador do tipo carrossel representa o maior avanço da separação em alta intensidade e foi projetado para grandes vazões. É um equipamento muito grande, pesado e por isso possui limitações de espaço, exigindo um layout diferente dentro de uma usina de tratamento de minérios. A operação do separador é bastante simples, porém alguns parâmetros devem ser monitorados periodicamente. O alto gasto energético é um entrave à utilização de métodos magnéticos desse tipo.

Tabela 1: Panorama da Separação Magnética no Brasil

<b>MINA</b>	<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>ALIMENTAÇÃO (mm)</b>	<b>CAMPO MAGNÉTICO (tesla)</b>
Fábrica	Jones DP317	-1,00	0,9
Feijão	Jones DP317	-1,00	0,9
Pico	WDRE	-1,00	0,6
Timbopeba	WDRE	-1,00	0,6
Conceição	Jones DP317	-1,00 + 0,15	0,9
Cauê	Jones DP317	-1,00 + 0,15	0,9
Jangada	WDRE	-1,00 + 0,15	0,6
Mutuca	Ferrous Wheel	-0,15	1,2
Jangada	Ferrous Wheel	-0,15	1,2
Conceição	Jones DP317	-0,15	0,9
Cauê	Jones DP317	-0,15	0,9

(Oliveira P. S., 2006)

Atualmente são utilizadas diversas rotas de processamento mineral via separação magnética no Brasil. Para a fração -0,15 mm são utilizados campos de 1,2 tesla e 0,9 tesla. É esperado que a redução da hematita possibilitasse a recuperação deste minério em campos da ordem de 0,15 a 0,25 tesla.



## b. Propriedades Magnéticas dos Minerais

Os materiais podem ser divididos de acordo com a susceptibilidade magnética, grandeza esta que caracteriza o material segundo uma resposta a um campo magnético induzido.

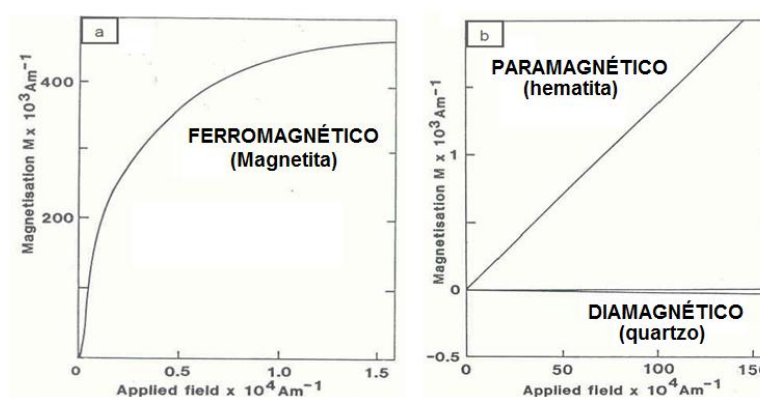


Figura 6: Susceptibilidade Magnética dos Minerais – (Brumatti, 2008)

Os materiais diamagnéticos não apresentam susceptibilidade magnética, possuindo assim repulsão ao campo aplicado independentemente da temperatura. O diamagnetismo é uma decorrência direta da lei de Lenz, pela qual se sabe que partículas em movimento submetidas a gradientes magnéticos tendem a restaurar sua condição anterior, dando surgimento a uma reação de repulsão. Essas reações fazem com que as partículas sejam repelidas pela zona de concentração de linhas de força. Este é um fenômeno universal da matéria, sendo que qualquer partícula, a rigor, deve ter um comportamento diamagnético, caracterizado pela susceptibilidade magnética negativa e de baixa magnitude.

Alguns materiais, entretanto, possuem desaparelhamento de elétrons nos seus átomos constituintes, exibindo um momento de dipolo magnético. Estes são ditos materiais paramagnéticos. Os materiais paramagnéticos são caracterizados por uma pequena susceptibilidade positiva, visto que o efeito paramagnético é muito superior ao efeito diamagnético, mascarando-o completamente.

Por fim, quando o desaparelhamento eletrônico é muito intenso, atingindo elevados valores positivos de susceptibilidade magnética, os materiais são ditos ferromagnéticos. Os materiais ferromagnéticos apresentam forte atração para as regiões de concentração de linhas de campo magnético

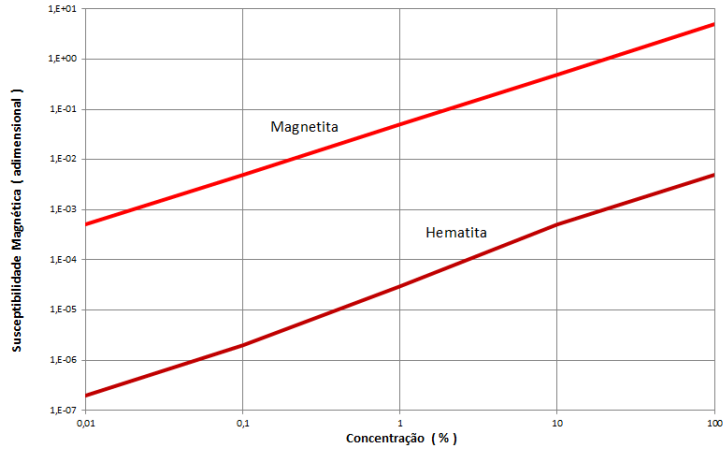


Figura 7: Variação de Susceptibilidade Magnética de acordo com a Composição Mineralógica – adaptado de (Hrouda & Chlupacova, 2009).

(Gomes, 2009) estudou um minério de ferro predominantemente hematítico com mineralogia descrita na tabela Tabela 2. Os teores de hematita variaram entre 59 % e 63 %, enquanto os teores de magnetita variam entre 5 % e 7 %. É possível observar na figura **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** que a magnetita é toda recuperada a partir dos campos magnéticos da ordem de 0,1 tesla.

Tabela 2: Composição Mineralógica

	Hematita	Martita	Magnetita	Goethita	Limonita	Quartzo	Gibbsita	Caulinita	Outros
<b>AM 1</b>	62,98	23,82	6,96	3,4	0,81	0,98	0,78	0,05	0,21
<b>AM 2</b>	59,74	17,57	5,18	9,21	1,19	5,85	0,65	0,16	0,44

(Gomes, 2009)

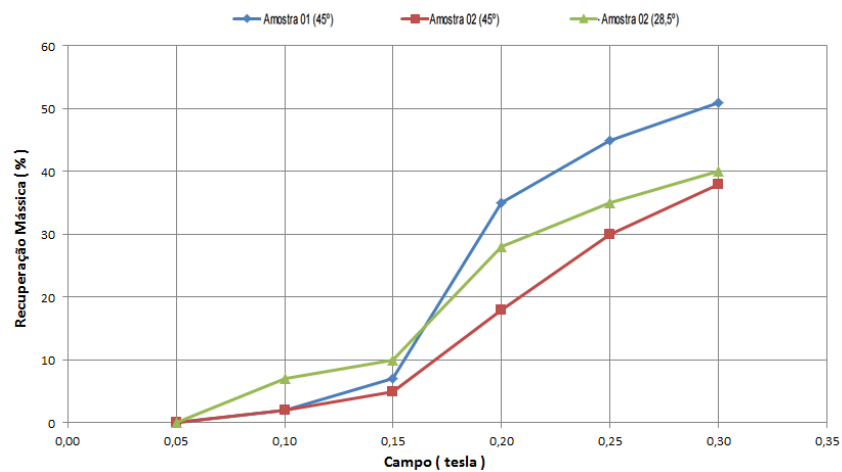


Figura 8: Recuperação Mássica – adaptado de Gomes (2009)

(Schneider, C.L. & Calixto, 2006) abordam o conceito de volume magnético, este usualmente utilizado para partículas minerais devido ao volume ser uma soma dos valores obtidos para cada espécie isoladamente. O volume magnético de cada componente é dado por:

Onde:

$$V_m^i = \frac{0.5 * k_i * V}{1 + N k_i}$$

$V_m^i$  – Volume magnético do mineral i (m<sup>3</sup>)  
 $V$  – Volume da partícula (m<sup>3</sup>)  
 $k_i$  – Susceptibilidade magnética do mineral (adimensional)  
 $N$  – Fator de forma (0,333 - Esférica)

Para partículas esféricas com 0,5 mm de diâmetro, temos que o volume magnético da magnetita vale  $5,2 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>, o da hematita vale  $6,4 \times 10^{-13}$  m<sup>3</sup> e o do quartzo vale  $-4,9 \times 10^{-16}$  m<sup>3</sup>. Já para partículas compostas por hematita e quartzo, com volumes iguais de cada fase, o volume magnético se assemelha ao volume da hematita pura. O mesmo ocorre para misturas magnetita/hematita.

Tabela 3: Susceptibilidade Magnética dos Minerais

Mineral	Faixa Usual x 10 <sup>-6</sup>	Valor Médio x 10 <sup>-6</sup>
<b>Magnetita</b>	1.000.000 a 5.700.000	3.350.000
<b>Hematita</b>	500 a 40.000	20.000
<b>Quartzo</b>	-13 a -17	-15

(Hunt, Moskowitz, & Banerjee, 1995)

Partículas mistas possuem o valor de volume magnético aproximadamente igual ao do mineral com maior susceptibilidade magnética. Portanto, operações de separação magnéticas devem ocorrer com graus de liberação elevados para se evitar a contaminação do concentrado com partículas mistas. Pequenas quantidades de magnetita na estrutura de uma partícula mista já determina o caráter altamente magnético desta partícula na separação magnética e por esse motivo a redução, mesmo que parcial e superficial, já produz resultados satisfatórios.

(Luz, Sampaio, & França, 2010) apresentaram um estudo comparativo entre as forças magnéticas encontradas entre campos variáveis entre 1,800 T e 18,000 T para os minerais: quartzo, hematita e magnetita. É observado que a magnetita apresenta susceptibilidade magnética elevada em relação à hematita e que o quartzo possui susceptibilidade negativa, comprovando seu caráter unicamente diamagnético.

Tabela 4: Força magnética para amostras de diversos minerais

	<b>ENSAIO 1</b>	<b>ENSAIO 2</b>
<b>Campo (tesla)</b>	0,18	1,80
<b>Quartzo</b>	-0,000154	-0,0154
<b>Hematita</b>	0,000643	0,643
<b>Magnetita</b>	15,8	158

(Luz, Sampaio, & França, 2010)

### **c. Minérios Finos e Ultrafinos**

Existem várias divergências entre autores sobre a definição do tamanho das partículas consideradas finas. (Somasundaran, 1980) classificou as partículas como finas – entre 10  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , ultrafinas – entre 1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  e coloides – menores que 1  $\mu\text{m}$ .. As lamas do beneficiamento mineral são compostas principalmente por partículas ultrafinas e coloides.

É necessário um rigoroso controle das etapas de cominuição para fornecer a granulometria adequada exigida para a concentração. Normalmente são obtidos níveis mais elevados de recuperação na faixa entre 20 e 105  $\mu\text{m}$  e níveis mais baixos para os extremos, embora não seja possível generalizar os limites de tamanho.

### **d. Mineralogia dos Minérios de Ferro**

O ferro é encontrado na natureza sob a forma de óxidos e sulfetos, prioritariamente. Foram destacados neste trabalho os minerais magnetita e hematita devido à sua importância nos maiores depósitos brasileiros.

Tabela 5: Conteúdo Metálico dos Minérios de Ferro

Mineral	Fórmula Química	Conteúdo de Ferro (%)
<b>Magnetita</b>	$Fe_3O_4$	<b>72.4</b>
<b>Hematita</b>	$Fe_2O_3$	<b>69.9</b>
Goethita	$FeO(OH)$ ou $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	62.9
Pirrotita	$Fe_{1-x}S$ (x=0 a 0.2)	58.2 – 63.5
Siderita	$FeCO_3$	48.2
Pirita	$FeS_2$	46.6
Ilmenita	$FeTiO_3$	36.8

(Ma, 2012)

A hematita ( $Fe_2O_3$ ) é um óxido com 69,99 % de ferro e 30,01 % de oxigênio em sua forma pura, correspondendo ao maior estado de oxidação do ferro. Apresenta estrutura hexagonal compacta (HC) e possui cor acinzentada e traço castanho avermelhado. Sua massa específica é aproximadamente  $5.100 \text{ kg/m}^3$ . A hematita tem caráter paramagnético, sendo separável de outros minerais com menor susceptibilidade magnética na presença de campos magnéticos com elevados gradientes de campo.

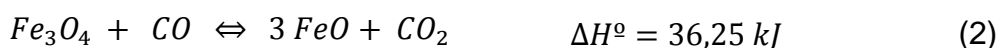
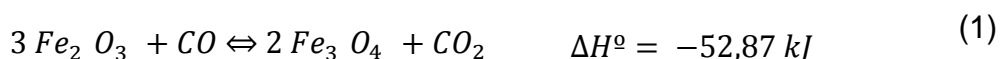
A magnetita ( $Fe_3O_4$ ) é um óxido com 72,00 % de ferro e 28,00 % de oxigênio. Normalmente, possui cor cinza escura a preto, de massa específica da ordem de  $5.200 \text{ kg/m}^3$ . É fortemente magnética, propriedade explorada neste trabalho e que possibilita a separação mais fácil nas empresas mineradoras. A magnetita apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada. Durante a redução parcial (transformação de hematita para magnetita) ocorre a modificação da estrutura para cúbica de face centrada (CFC), o que implica na geração de trincas e fraturas.

### e. Redução dos Óxidos de Ferro

A redução dos óxidos de ferro pelo monóxido de carbono acontece em três estágios, como mostrado na figura 9.



Figura 9: Estágios de redução dos minérios de ferro



Pode-se notar que as reações 1 e 3 são exotérmicas, enquanto a reação 2 é endotérmica. Embora a reação 1 seja exotérmica, a reação entre o oxigênio presente na atmosfera e o carbono adicionado à mistura é endotérmica e necessita de elevada quantidade de calor para ocorrer.

#### f. Ustulação Redutora Superficial

A ustulação é um método de redução realizada em temperaturas abaixo do ponto de fusão dos metais. No presente caso, objetiva-se transformar a hematita em magnetita através da adição de carbono, na forma de coque. A redução neste caso deve ocorrer apenas na superfície do mineral, não se objetivando, a obtenção de ferro metálico.

(Sharma & Sharma, 2014) estudaram a ustulação magnética em um minério goethítico e a posterior separação magnética por tambores de baixo a médio gradiente de campo. O minério era constituído por 59 % de ferro, 3,64 % de alumina, 3,87 % de sílica e 0,089 % de fósforo. Foi avaliado o tempo de queima, a temperatura de queima, a granulação do minério e do carvão, além do percentual de carvão na mistura. Os resultados estão sistematizados na tabela 6 e figura 7.

Tabela 6: Variáveis de Ustulação

VARIÁVEIS	MÍNIMO	MÁXIMO
Tempo de Queima	5 min	40 min
Temperatura	300 °C	650 °C
Quant. de Carvão	1 g	10 g
Granulometria Minério	0,044 mm	0,26 mm

(Sharma, 2014)

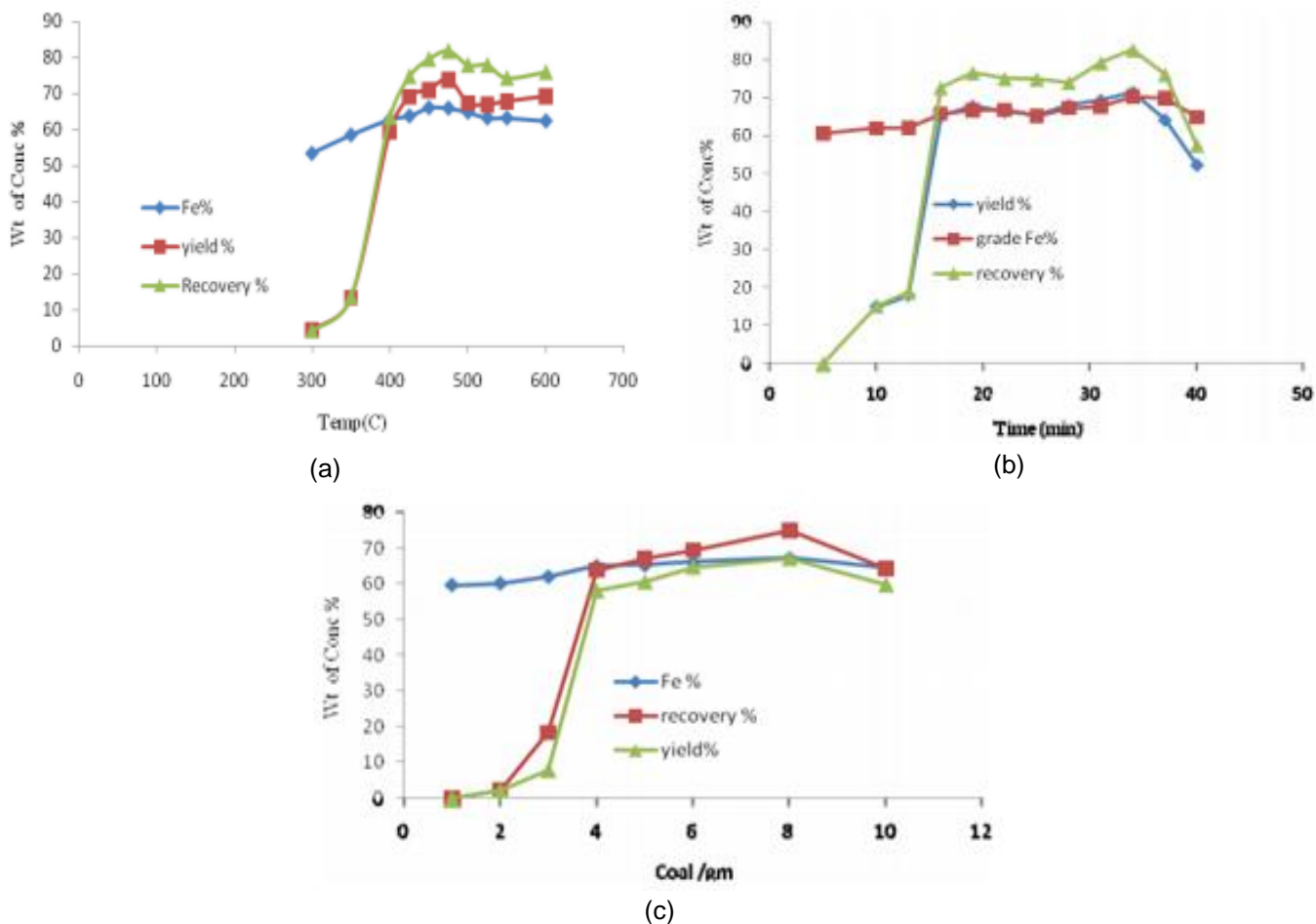
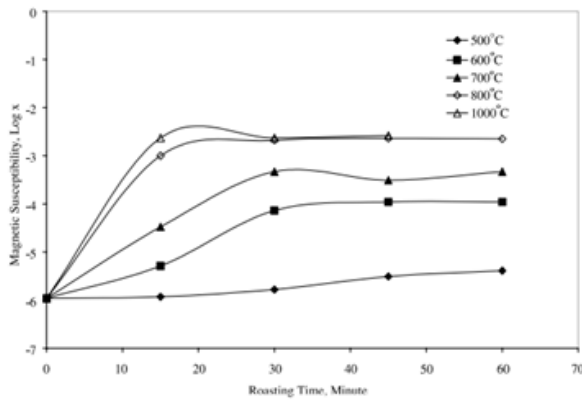
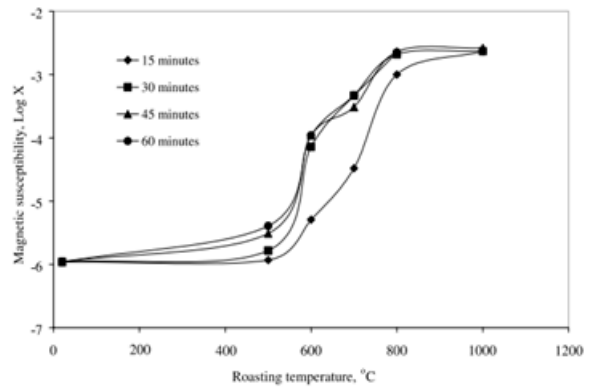


Figura 7 – a) Influência da Temperatura, b) Influência do Tempo e c) Influência do Percentual de Carvão – adaptada de (Sharma, 2014).

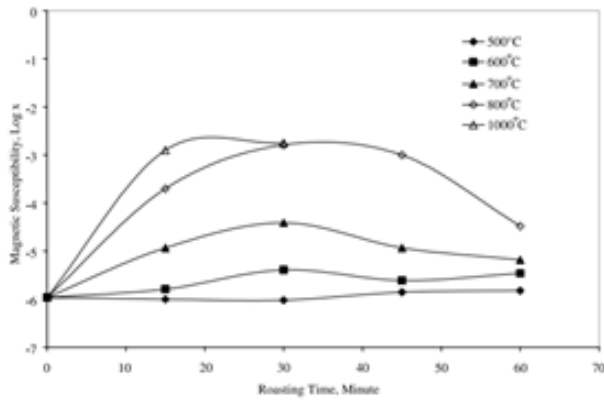
(Cui, Liu, & Etsell, 2002) estudaram a ustulação de um minério hematítico. A ustulação oxidante não promoveu melhora na susceptibilidade magnética enquanto a ustulação redutora promoveu aumentos com variações de tempo, temperatura e dosagens de carvão. Foi possível observar que existiu um aumento na susceptibilidade magnética da hematita em temperaturas acima de 500° C. Em temperaturas entre 800° e 1000° C, a hematita apresentou susceptibilidade equivalente à magnetita nos tempos superiores a 30 minutos, independente da razão de carvão. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 8.



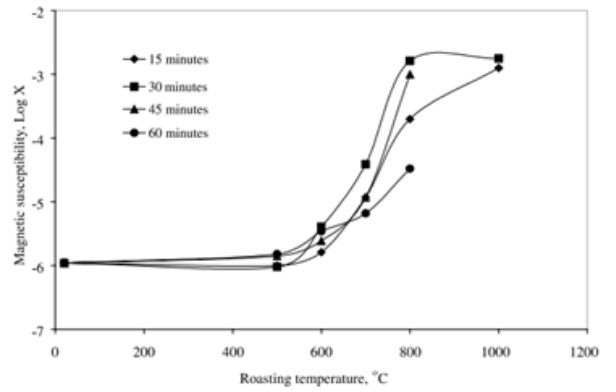
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8 – (a) Influência do Tempo (20 % Carvão), b) Influência da Temperatura (20 % Carvão), c) Influência do Tempo (10 % Carvão), d) Influência da Temperatura (10 % Carvão) - Parâmetros Ustulação – (Cui, Liu, & Etsell, 2002).



## 4. METODOLOGIA

### a. Caracterização e Preparação da Amostra

Foram recebidos 40 kg de amostra de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero. A amostra foi homogeneizada e quarteada de forma a obter alíquotas representativas da amostra global. O quarteamento foi feito a fim de se obter amostras de tamanho menor para os ensaios necessários.

A massa específica foi determinada pelo método de picnometria a gás. Técnica laboratorial muito utilizada para determinar a densidade de sólidos, possibilitando também determinar o teor de um mineral e aproximando de uma análise química prévia. (Nunes, Couto, & França) obtiveram resultados de teores considerando o minério constituído apenas por duas fases minerais (hematita e quartzo).

$$\text{teor de hematita} = \frac{1 - \frac{\rho_{\text{amostra}}}{\rho_{\text{quartzo}}}}{\frac{\rho_{\text{amostra}}}{\rho_{\text{hematita}}} - \frac{\rho_{\text{amostra}}}{\rho_{\text{quartzo}}}}$$

Onde:

$\rho_{\text{amostra}}$  – densidade obtida pela picnometria;  
 $\rho_{\text{hematita}}$  – densidade da hematita – 5.100 t/m<sup>3</sup>  
 $\rho_{\text{quartzo}}$  – densidade do quartzo – 2.650 t/m<sup>3</sup>

A caracterização granulométrica consistiu em peneiramentos a úmido do material, a fim de determinar a distribuição de tamanhos desde as faixas mais grossas até a fração fina.

Para a determinação da granulometria do minério, foi adotada a teoria de amostragem proposta por (Gy, 1982). O cálculo da massa máxima permitida é essencial para evitar a sobrecarga das peneiras e fornecer uma eficiência aceitável no peneiramento das amostras.

$$M_{\text{máx}} = n \cdot \left( \frac{d_i + d_s}{2} \right) \cdot A \cdot \rho$$

Onde:

$n$  – Número de Camadas – ( $n=1$ )  
 $d_i$  – Abertura da Peneira em Análise (cm)  
 $d_s$  – Abertura da Peneira Imediatamente Superior (cm)  
 $A$  – Área da Peneira (cm<sup>2</sup>)  
 $\rho$  – Massa específica do minério

A escala Tyler/ABNT foi utilizada para o peneiramento, usando as peneiras a seguir: 6,35 mm, 3,36 mm, 2,38 mm, 1,68 mm, 1,40 mm, 1,19 mm, 1,00 mm, 0,841 mm, 0,595 mm, 0,298 mm, 0,105 mm e 0,074 mm. As diversas frações granulométricas obtidas podem ser analisadas a partir da figura seguinte.

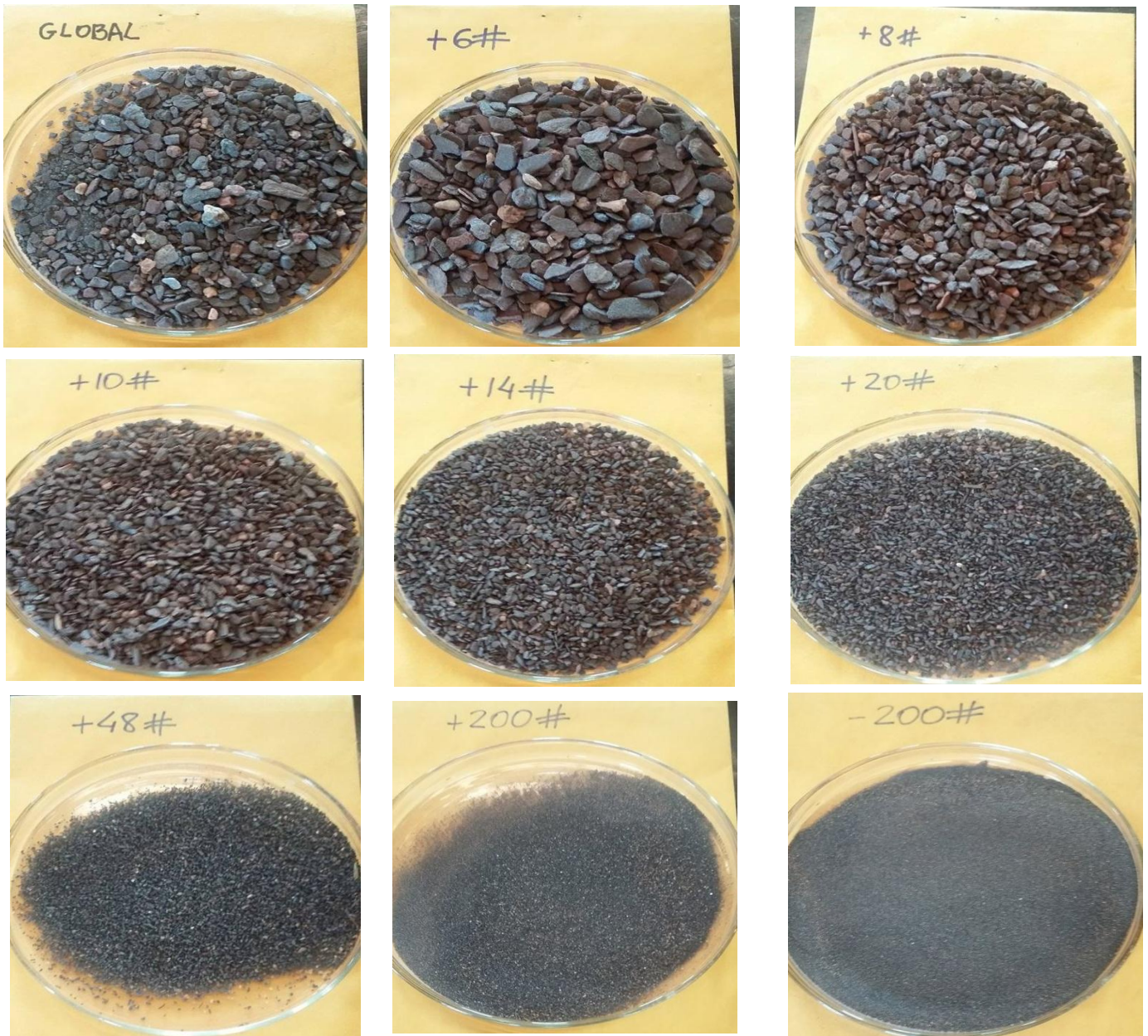


Figura 9: Minério de Ferro

O coque é um combustível de alto rendimento obtido a partir do carvão mineral e utilizado para fornecimento de energia às siderúrgicas. Este é misturado junto à carga metálica nos altos-fornos para a produção de monóxido de carbono (CO), principal agente redutor do minério de ferro.

A preparação do coque consistiu em uma determinação de densidade por picnometria a gás, juntamente com a caracterização granulométrica e a posterior adequação de tamanho através de britador de mandíbulas, moinho de disco e moinho rotativo de anéis, também chamado de moinho orbital de panela a seco.

## b. Ensaio de Ustulação

Foram realizados ensaios em mufla no “Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos” do DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica – UFOP nas condições apresentadas na Tabela 7. Todas as amostras foram preparadas previamente e os ensaios foram realizados em ordem aleatória. Os insumos utilizados nos ensaios são minério de ferro e coque, ambos preparados numa granulometria inferior a 106  $\mu\text{m}$  (<150#). Aleatoriamente, o teste realizado em duplicata foi o teste 6.

Tabela 7: Variáveis Ensaçadas

Ensaio	Temperatura ° C	% Carvão %	Tempo Minutos
1	450	6	15
2	450	10	15
3	450	8	25
4	450	6	35
5	450	10	35
6	500	8	15
6 B	500	8	15
7	500	6	25
8	500	8	25
9	500	10	25
10	500	8	35
11	550	6	15
12	550	10	15
13	550	8	25
14	550	6	35
15	550	10	35
16	650	6	15
17	650	10	15
18	650	8	25
19	650	6	35
20	650	10	35



Figura 10: Mufla Utilizada

Durante a análise dos resultados dos ensaios de ustulação, viu-se necessário fazer uma série adicional de testes em temperatura de 750°C. Foram realizados 5 ensaios nas condições apresentadas na tabela abaixo. Na temperatura de 650°C foi possível observar o início da ustulação da hematita e por isso acreditou-se que o desempenho seria mais elevado nas temperaturas superiores. Nos testes realizados com temperatura de 750°C, foi introduzido um cadinho com carvão adicional de modo que tornasse o ambiente interno da mufla o mais redutor possível. O carvão em excesso consumiria todo o oxigênio presente no interior da mufla, visto que o equipamento não possui vedação completa nas aberturas. O consumo foi medido através da pesagem do cadinho antes e após a realização dos testes.

Tabela 8: Testes – 750° C

Ensaio	Temperatura ° C	% Carvão %	Tempo Minutos
21	750	6	15
22	750	6	35
23	750	8	25
24	750	10	15
25	750	10	35

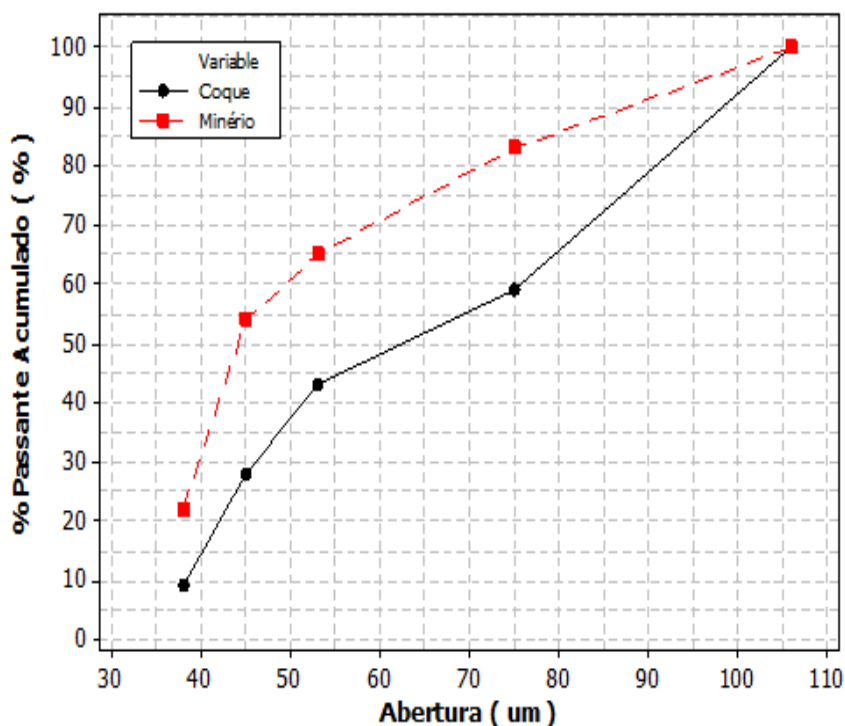


Figura 11: Curva Granulométrica dos Insumos

### c. Ensaio de Separação Magnética

Os ensaios de separação magnética foram realizados em separador magnético “Carpco Wet High-Intensity Magnetic Separator Model 3X4L”, no “Laboratório de Tratamento de Minérios” do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - UFOP. O equipamento funciona de forma a separar as espécies minerais de acordo com as propriedades magnéticas. O minério é passado por esferas de 35 mm com o campo ajustado conforme a condição pré-estabelecida. O mineral não magnetizado é recolhido abaixo das matrizes e após a passagem da água de lavagem para retirada dos minerais aprisionados, o campo é desligado e o minério magnético é recolhido em recipiente separado. O mesmo é realizado para os demais 3 campos ensaiados, sendo o rejeito retornado à etapa posterior seguindo uma rota em circuito scavenger. Retornando-se o rejeito, evita alterações devido ao campo residual das partículas quando submetidos a um campo induzido no equipamento. Uma única amostra fornece cinco produtos, sendo quatro deles magnéticos em cada campo específico e um não magnético.

O princípio de operação do equipamento utilizado é apresentado na figura abaixo.

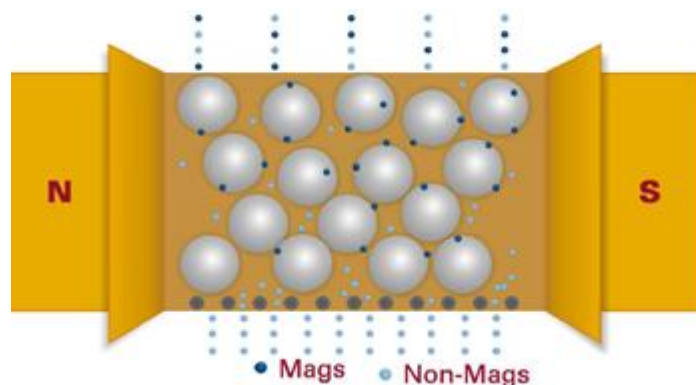


Figura 12: Separador Magnético de Alta Intensidade – WHIMS (Catálogo Equipamento)

O equipamento utiliza a indução de campo magnético por bobinas eletromagnéticas e foi realizada a medição do campo magnético através de um gaussímetro (Gaussmeter TLMP – HALL – 15 – Versão 5.3 – Nº 101009).

A figura Figura 13 apresenta a correlação entre a amperagem lida no visor do equipamento e o valor de campo lido no gaussímetro. Busca-se através destas medições, estabelecer uma equação que descreva o campo magnético induzido pelo equipamento.

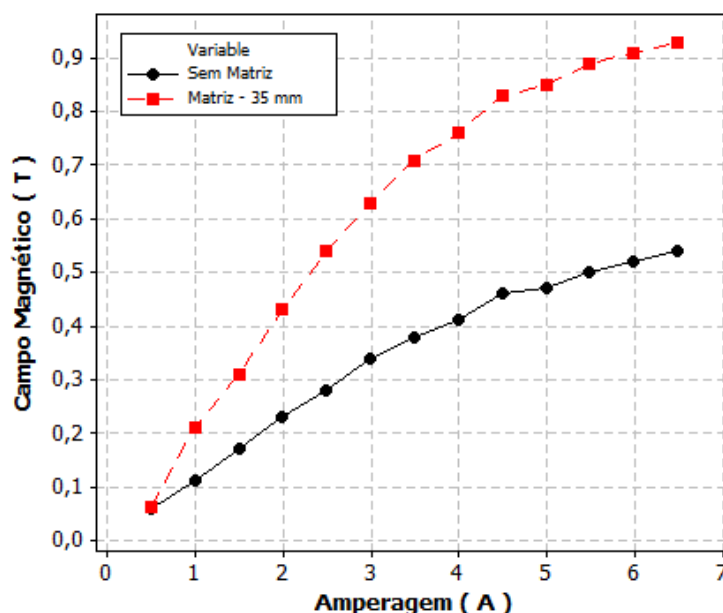


Figura 13: Relação Amperagem - Campo Magnético.

Foram realizados testes iniciais com distintas granulometrias para avaliar o efeito da granulometria sobre a recuperação mássica do processo. O campo escolhido para os ensaios foi 0,2 T com amperagem de 1,0 A.

O método de determinação da eficiência do ensaio de ustulação foi o ensaio de separação magnética. As amostras ustuladas foram submetidas a ensaios com uma faixa de campos magnéticos, de forma a conhecer o comportamento do minério sob diversos pontos de operação.

A alimentação dos ensaios de separação magnética foi feita a úmido com 30% de sólidos em massa e a alimentação do ensaio era composta do produto da ustulação adicionando a quantidade de carvão de cada ensaio. Foi necessária a adição de 250 mL de água de lavagem para a limpeza do material e remoção das impurezas presentes durante a realização dos experimentos.

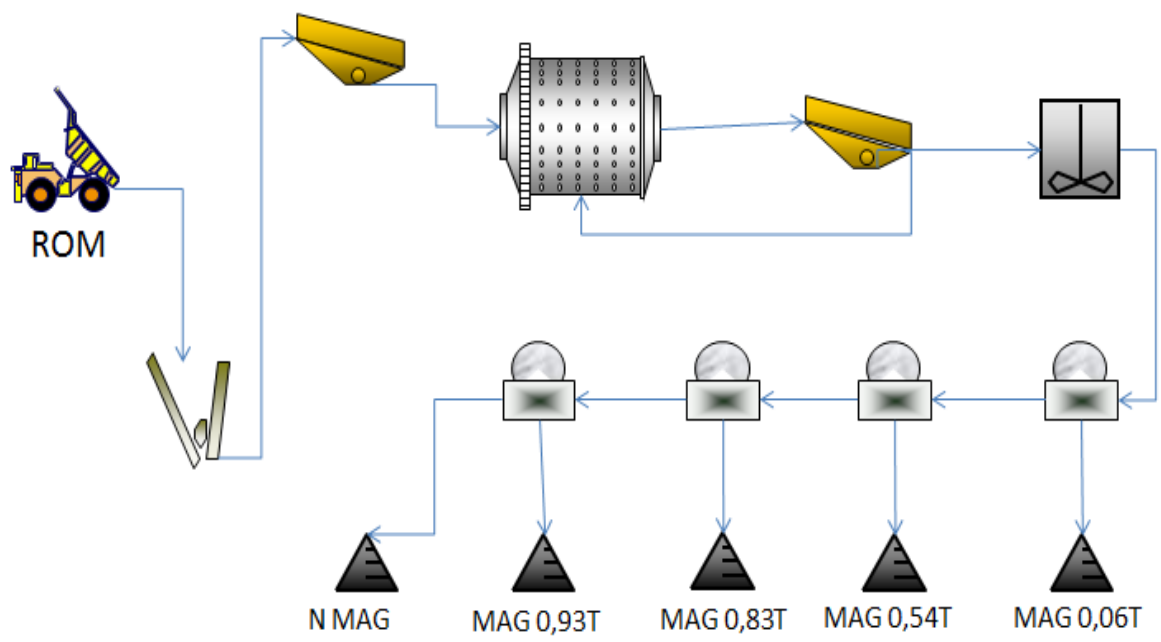


Figura 14: Fluxograma - Rota de Processo

## 5. RESULTADOS

### a. Caracterização das Amostras

É observado que o minério apresenta granulação grossa, necessitando de uma cominuição para adequação ao processo subsequente de separação magnética. O coque também apresentou uma granulação grossa, sendo necessária a redução da granulação até atingir 100 % passante em 106  $\mu$ m. Os peneiramentos foram feitos em duplicata e os resultados de ambos (P1 e P2) são apresentados a seguir, juntamente com a média dos peneiramentos realizados. É possível observar que os peneiramentos apresentaram resultados bem próximos, mostrando que o peneiramento foi realizado corretamente.

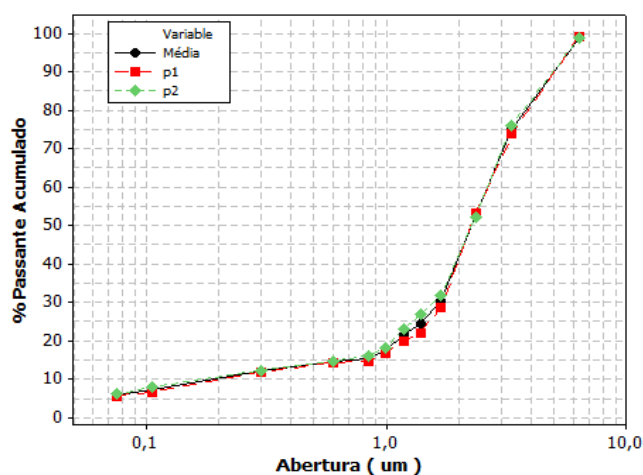


Figura 15: Curva Granulométrica – Minério

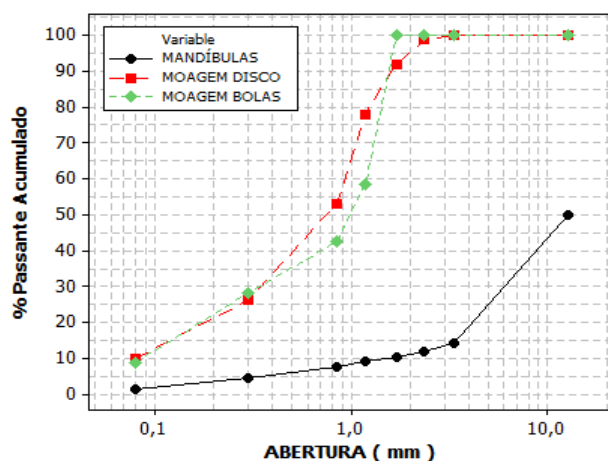


Figura 16: Curva Granulométrica – Coque

Através dos dados obtidos, foi possível identificar o modelo de distribuição granulométrica que mais se adequava ao material analisado. Os modelos de distribuição granulométrica testados foram Rosin-Rammler, Hill, Harris, Gates-Gaudin-Schumann e Gaudin-Meloy. (Luz J. , 2014)

Para o minério, os modelos de Gates-Gaudin-Schumann e Gaudin-Meloy não apresentaram boa correlação com os dados obtidos e por isso não serão apresentados nos gráficos e resultados posteriores. Para o coque, os modelos de Rosin Rammler e de Hill foram os únicos que apresentaram boa adequação.



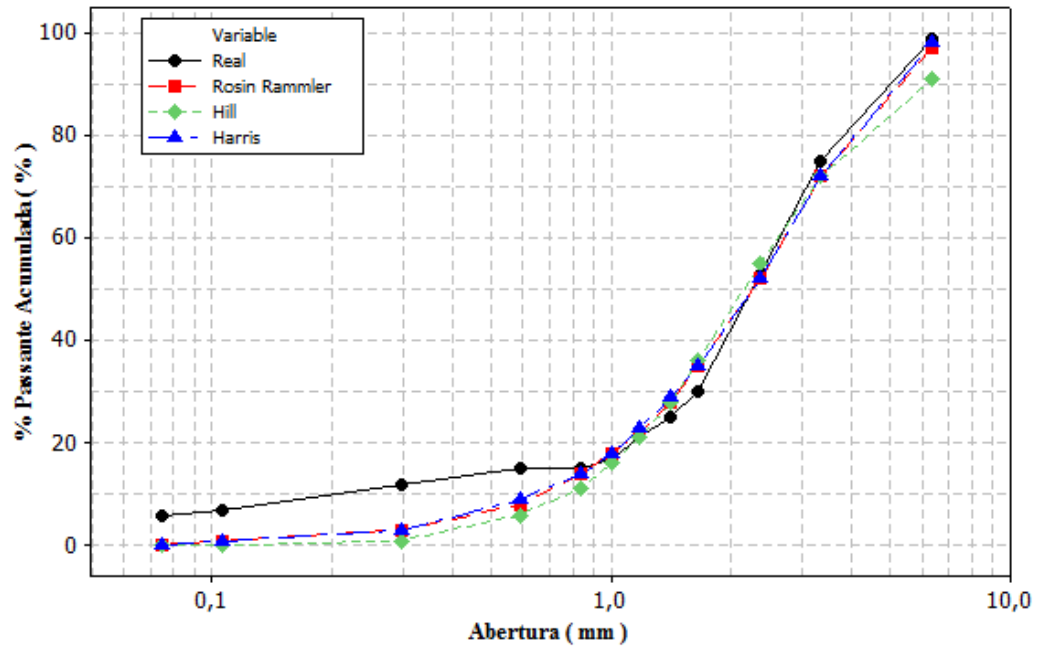


Figura 17: Modelos de Distribuições Granulométricas – Minério

Tabela 9: Distribuições Granulométricas – Minério

Rosin-Rammler	Hill	Harris
$1 - \exp \left( \ln (0,5) * \left( \frac{x}{a} \right)^b \right)$	$\frac{x^a}{(x^a + b^a)}$	$1 - \left( 1 - \left( \frac{x}{a} \right)^b \right)^c$
a = 2,259018 / b = 1,554156	a = 2,161621 / b = 2,162820	a = 10 / b = 1,432062 / c = 5,377614
r <sup>2</sup> - 0,9738	r <sup>2</sup> - 0,9562	r <sup>2</sup> - 0,9761

A distribuição de Harris obteve 97,61 % de aderência, a de Rosin-Rammler obteve 97,38 % e a de Hill obteve 95,62 %. As distribuições obtiveram uma adequação considerada baixa ao modelo devido à grande presença de finos no minério estudado.

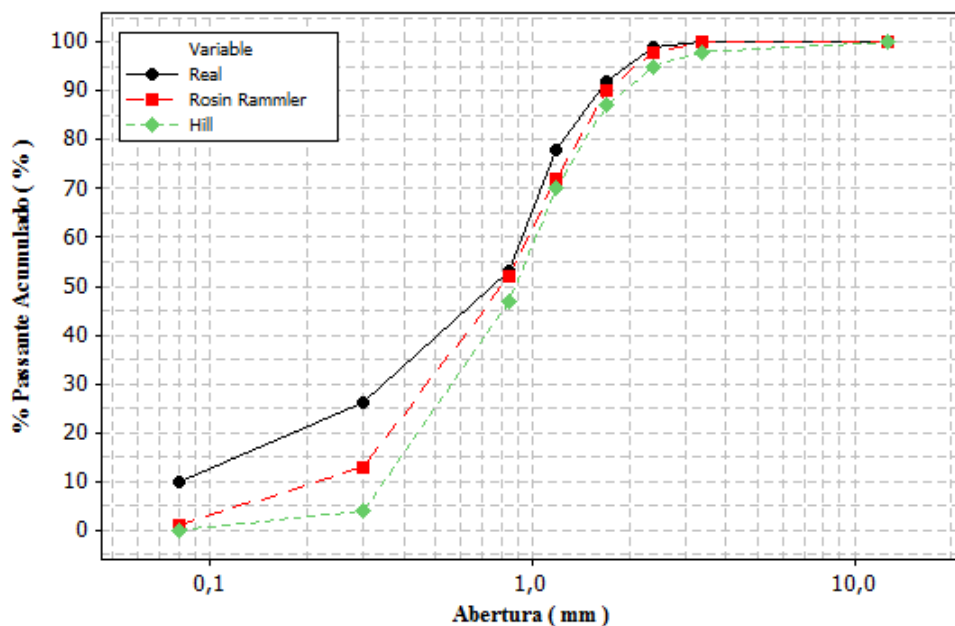


Figura 18: Modelos de Distribuições Granulométricas – Coque

Tabela 10: Distribuições Granulométricas – Coque

Rosin-Rammler	Hill
$1 - \exp \left( \ln (0,5) * \left( \frac{x}{a} \right)^b \right)$	$\frac{x^a}{(x^a + b^a)}$
a = 0,92626238 / b = 1,6264105	a = 2,956153 / b = 0,884535
r <sup>2</sup> - 0,9962	r <sup>2</sup> - 0,9943

A distribuição de Rosin-Rammler obteve 99,62 % de aderência, enquanto a de Hill obteve 99,43 %. As distribuições obtiveram uma adequação muito boa ao coque.

Os resultados da picnometria forneceram os valores de massa específica para o ROM e para o coque metalúrgico. Foi realizado um ensaio de determinação de massa específica por picnometria para a amostra global e depois foi calculado o valor de massa específica através de média ponderada por faixas granulométricas, levando em conta o percentual volumétrico e o valor de massa específica para cada faixa.

Tabela 11: Picnometria – A Gás

FAIXA GRANULOMÉTRICA		% MASSA	MASSA ESPECÍFICA		TEOR	
µm	mm	%	Adimensional	Hematita	Ferro	Quartzo
	<b>Coque</b>		1,51	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>
	<b>Global Analisada</b>		4,55	87,00%	60,90%	13,00%
<b>+6</b>	+3,35	25,13%	4,43	83,78%	58,65%	16,22%
<b>+8</b>	+2,36 – 3,35	22,20%	4,66	89,71%	62,80%	10,29%
<b>+10</b>	+1,70 – 2,36	22,40%	4,67	90,08%	63,06%	9,92%
<b>+14</b>	+1,18 – 1,70	8,83%	4,68	90,25%	63,18%	9,75%
<b>+20</b>	+0,85 – 1,18	6,13%	4,80	93,17%	65,22%	6,83%
<b>+48</b>	+0,30 – 0,85	3,27%	4,94	96,50%	67,55%	3,50%
<b>+200</b>	+0,075 – 0,30	6,18%	4,60	88,30%	61,81%	11,70%
<b>-200</b>	-0,075	5,87%	4,44	83,91%	58,74%	16,09%
	<b>Global Calculada</b>		4,60	88,45%	61,92%	11,55%

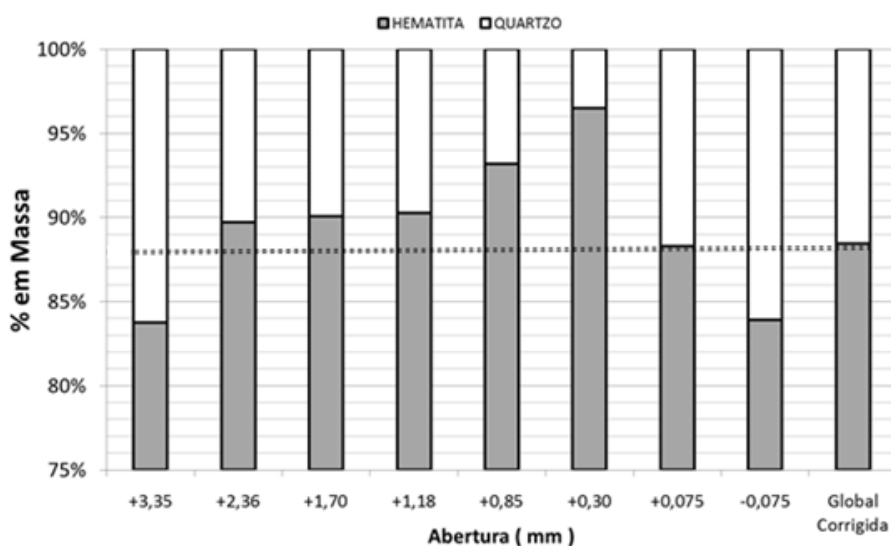


Figura 19: Distribuição de Teores por Faixa Granulométrica

## b. Ensaio de Ustulação

A tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de ustulação, com as condições de cada ensaio, as massas iniciais e finais, assim como a perda de massa obtida. É importante ressaltar que a perda de massa é ocasionada pelas condições de realização do ensaio, mas também pelo fenômeno de redução da hematita em magnetita. No processo de modificação da estrutura da hematita em magnetita existe a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O aumento das três variáveis de análise (temperatura, proporção de carvão e tempo) ocasionou um aumento na perda de massa.

Apartir da análise dos valores obtidos para a perda de massa foi possível notar que o teste 15 (550°C – 10% C – 35 min) apresentou um valor anômalo em relação aos demais testes realizados, logo ele não é considerado nas análises posteriores em relação à perda de massa.

Tabela 12: Ustulação

Ensaio	Temperatura ° C	% Carvão %	Tempo Minutos	Massa		Perda de Massa (%)
				Inicial	Final	
1	450	6	15	53,00	52,48	0,98%
2	450	10	15	55,00	54,41	1,07%
3	450	8	25	54,00	53,01	1,83%
4	450	6	35	53,00	52,39	1,15%
5	450	10	35	55,00	53,6	2,55%
6	500	8	15	54,00	53,5	0,93%
6 B	500	8	15	54,00	53,27	1,35%
7	500	6	25	53,00	52,13	1,64%
8	500	8	25	54,00	53,3	1,30%
9	500	10	25	55,00	54,26	1,35%
10	500	8	35	54,00	52,11	3,50%
11	550	6	15	53,00	52,14	1,62%
12	550	10	15	55,00	53,61	2,53%

Ensaio	Temperatura °C	% Carvão %	Tempo	Massa Inicial	Massa Final	Perda de Massa (%)
13	550	8	25	54,00	53,13	1,61%
14	550	6	35	53,00	52,04	1,81%
15	550	10	35	55,00	52,25	5,00%
16	650	6	15	53,00	51,42	2,98%
17	650	10	15	55,00	54,01	1,80%
18	650	8	25	54,00	52,81	2,20%
19	650	6	35	53,00	51,72	2,42%
20	650	10	35	55,00	53,46	2,80%
21	750	6	15	53,00	52,07	1,75%
22	750	6	35	53,00	51,48	2,87%
23	750	8	25	54,00	52,71	2,39%
24	750	10	15	55,00	53,23	3,22%
25	750	10	35	55,00	53,09	3,47%

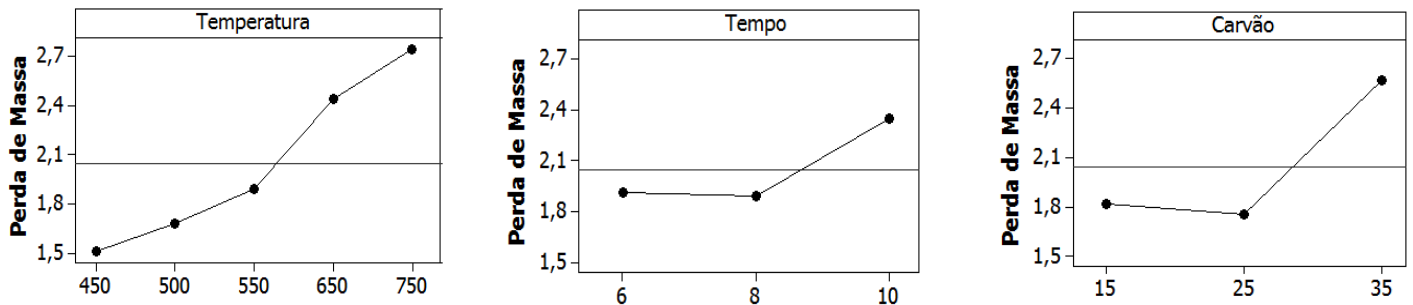


Figura 20: Variáveis - Perda de Massa

A reação da hematita com o carbono libera gases que precisam passar pela camada de minério resultando em orifícios semelhantes aos obtidos em temperatura de 750°C como mostrado na figura Figura 21: ORIFÍCIOS DE SAÍDA DE GÁS.

O carbono adicionado na mufla para eliminar o oxigênio presente foi consumido em 12,90g, resultado em 17,2g de O<sub>2</sub> retirado do ambiente do forno e 30,1g de CO liberado apenas pelo excesso de carvão no interior do forno. Esta quantidade de CO formada é suficiente para determinar a predominância de CO em relação à CO<sub>2</sub> durante a realização de testes.

$2 C$	+	$O_2$	$\Leftrightarrow$	$2 CO$
24g / mol		32 g/mol		56g / mol
12,90g		17,2g		30,1g

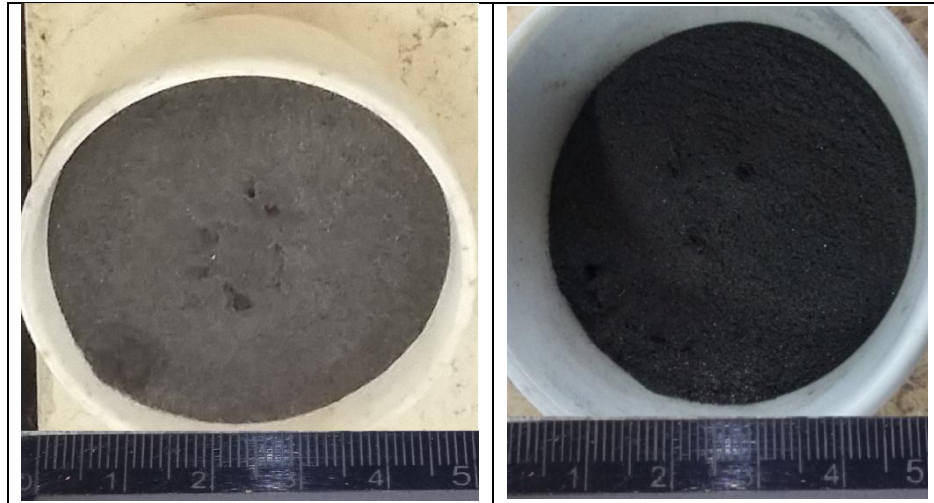


Figura 21: Orifícios de Saída de Gás

### c. Ensaio de Separação Magnética

A medição do campo foi feita e conseguiu-se ajustar uma curva Sigmoidal para os ensaios com as matrizes e sem as matrizes. A equação encontrada é da forma:

$$H = a - b * e^{\ln\left(\frac{1}{2}\right) * \left(\frac{i}{c}\right)^n}$$

Onde:

H – campo magnético (T)

i – amperagem (A)

a, b, c e n - constantes obtidas

Tabela 13: Dados da Equação de Campo Magnético

Campo magnético com matriz:				Campo magnético sem matriz:			
Erro padrão:	0,00842	T		Erro padrão:	0,00446	T	
Desvio máximo:	0,015396022	T		Desvio máximo:	0,00785524	T	
Coefficiente de correlação:	0,99947853	T		Coefficiente de correlação:	0,99952732	T	
a=	0,97888	Desvio padrão de a:	0,013177	a=	0,62638	Desvio padrão de a:	0,0167651
b =	0,98304	Desvio padrão de b:	0,0171455	b =	0,62289	Desvio padrão de b:	0,0186868
c =	2,25376	Desvio padrão de c:	0,0399189	c =	2,79637	Desvio padrão de c:	0,0936702
n =	1,39376	Desvio padrão de n:	0,0411258	n=	1,24159	Desvio padrão de n:	0,0402969

O resultado dos ensaios realizados previamente com o minério natural é apresentado na figura abaixo. Pode-se afirmar que a recuperação mássica sofre uma queda para as frações finas (menores que 106  $\mu\text{m}$ ) e grossas (maiores que 297  $\mu\text{m}$ ) se comparado à fração global.

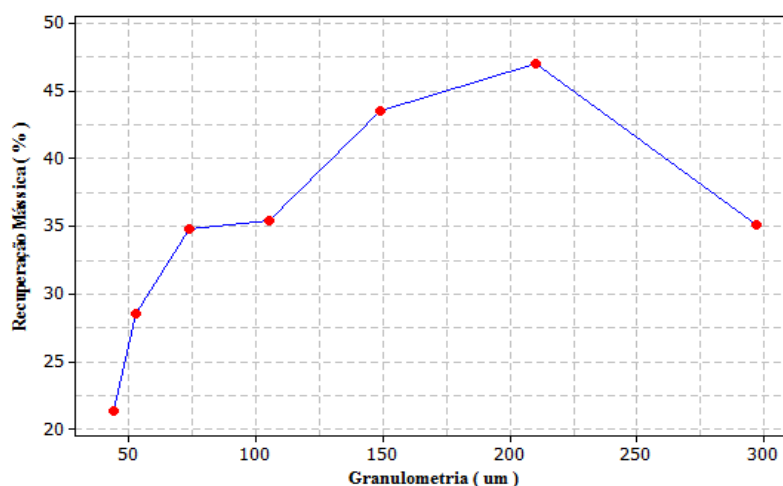


Figura 22: Influência do tamanho de partícula na separação magnética

O minério hematítico ustulado foi submetido a ensaios de separação magnética de baixo a alto campo e os resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 14: Separação Magnética

Ensaio	Temperatura	% Carvão	Tempo	% Magnética Acumulada			
				0,06 T	0,54 T	0,83 T	0,93 T
1	450	6	15	8,37	60,72	75,21	78,46
2	450	10	15	14,09	67,90	74,90	76,23
3	450	8	25	11,27	61,33	73,78	77,73
4	450	6	35	13,98	43,36	70,06	77,68
5	450	10	35	11,50	55,90	70,15	76,67
6	500	8	15	16,92	55,41	72,40	78,38
6 B	500	8	15	11,91	59,25	78,34	81,07
<b>MÉDIA ENSAIO 6</b>				<b>14,41</b>	<b>57,33</b>	<b>75,37</b>	<b>79,72</b>
7	500	6	25	16,32	60,23	78,48	81,59
8	500	8	25	13,83	42,45	70,76	77,38
9	500	10	25	12,89	59,88	74,14	77,32
10	500	8	35	12,11	54,84	74,64	78,18
11	550	6	15	16,54	60,46	77,46	81,72
12	550	10	15	17,03	52,35	74,75	78,56
13	550	8	25	12,41	60,65	79,76	81,94
14	550	6	35	13,28	55,58	78,55	83,67
15	550	10	35	7,69	34,44	66,73	76,27
16	650	6	15	19,32	47,39	74,86	81,44
17	650	10	15	20,06	59,48	78,09	83,33
18	650	8	25	17,30	57,26	75,51	82,99
19	650	6	35	9,13	61,25	78,84	83,00
20	650	10	35	24,12	64,62	82,77	87,18
21	750	6	15	25,48	68,28	87,34	89,14
22	750	6	35	51,85	88,71	92,28	92,97
23	750	8	25	57,80	86,41	89,50	90,89
24	750	10	15	23,61	80,93	88,28	89,22
25	750	10	35	71,48	86,97	89,73	90,43
BRANCO				15,33	65,42	83,20	86,29
BRANCO B				26,67	66,43	81,69	85,45
<b>MÉDIA BRANCO</b>				<b>21,00</b>	<b>65,92</b>	<b>82,45</b>	<b>85,87</b>



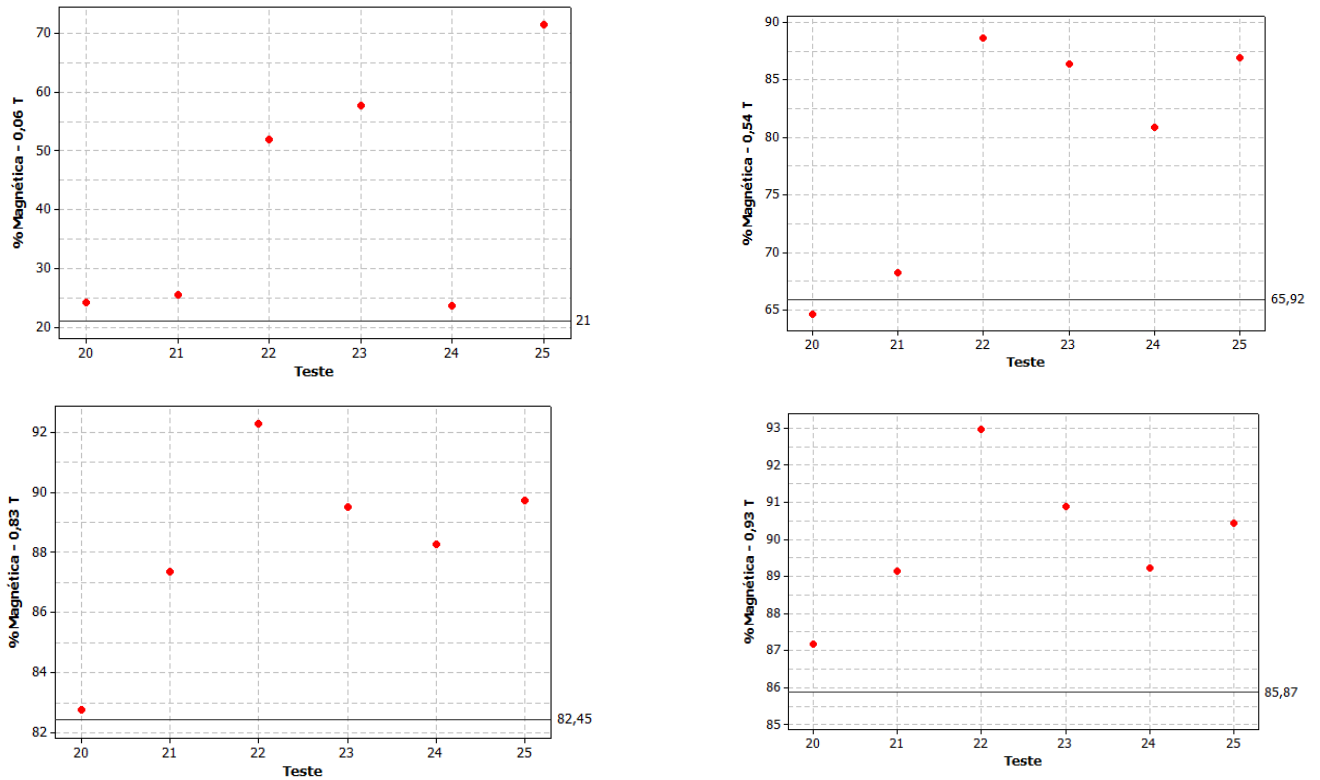


Figura 23: Comparativo Natural x Ustulado

Através dos gráficos a seguir, é possível verificar que o tempo e a proporção de carvão não influenciaram muito na recuperação mássica. Para o campo de 0,06 T, tanto a porcentagem de carvão elevada quanto o tempo de queima elevado apresentaram resultados superiores ao minério natural. Em contrapartida, para campos elevados, o comportamento não se mostrou satisfatório e apresentou resultados inferiores ao obtido para o minério natural.

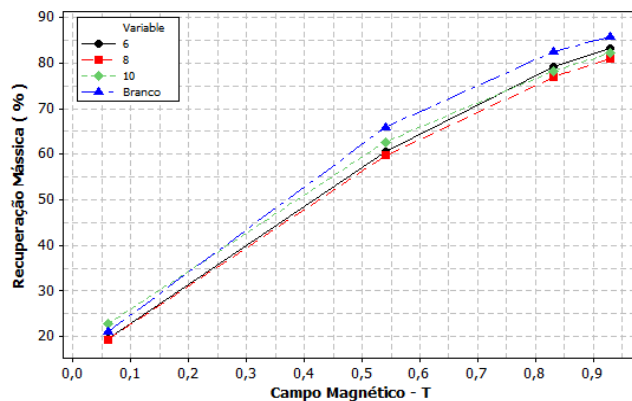


Figura 24: Influência da Percentagem de Carvão

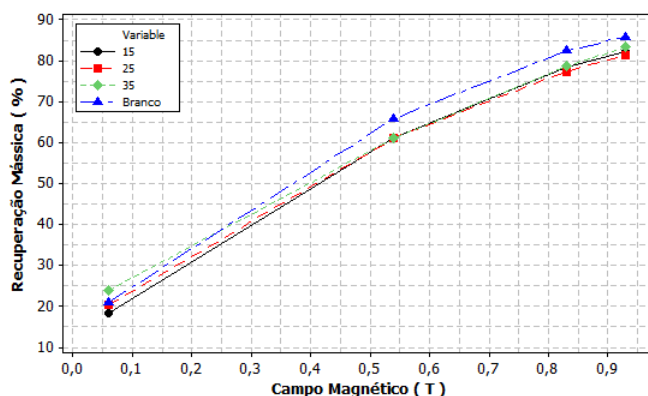


Figura 25: Influência do Tempo

Já a variável temperatura se mostrou a principal variável no processo de ustulação, quando comparada às demais. Os tempos inferiores a 750° C não apresentaram aumentos na susceptibilidade magnética do minério hematítico, enquanto a temperatura de 750° C ocasionou um aumento na recuperação mássica, como pode ser visto na Figura 26: Influência da Temperatura.

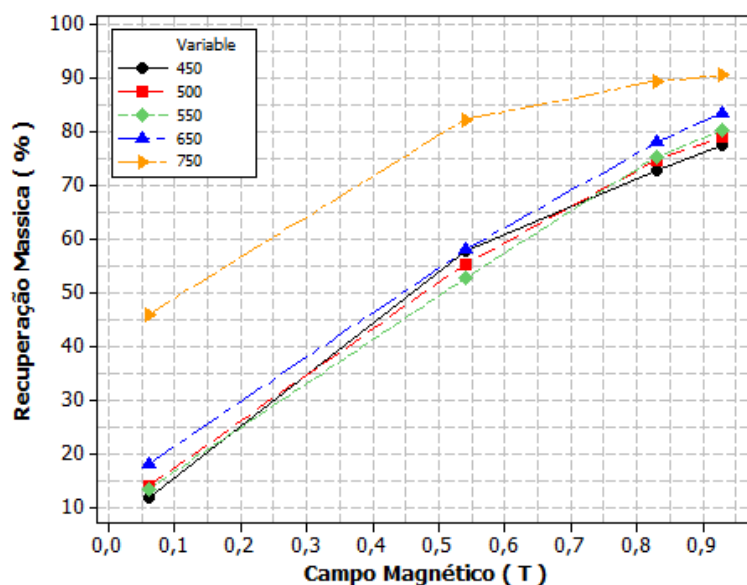


Figura 26: Influência da Temperatura

Os melhores resultados foram obtidos para a temperatura de 750 °C. Diante da diferença entre os resultados, viu-se necessário apresentar os resultados em gráfico separado. O melhor resultado obtido (750°C – 35 min – 10% Carvão) teve um desempenho superior ao minério natural em 240,3 % na condição de menor campo (0,06 T), enquanto obteve ganho de 5,3 % na condição de maior campo (0,93 T).

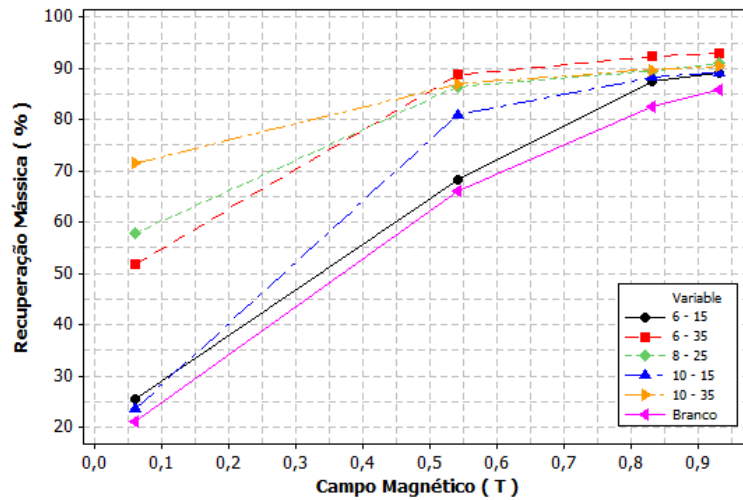


Figura 27: Melhores Resultados

Para as temperaturas mais altas, o tempo e o carvão se comportaram de maneira semelhante para todos os campos magnéticos. Para o tempo, o comportamento se mostrou bastante similar, enquanto para o carvão houve uma mudança de comportamento entre os campos mais baixos e os campos mais altos.

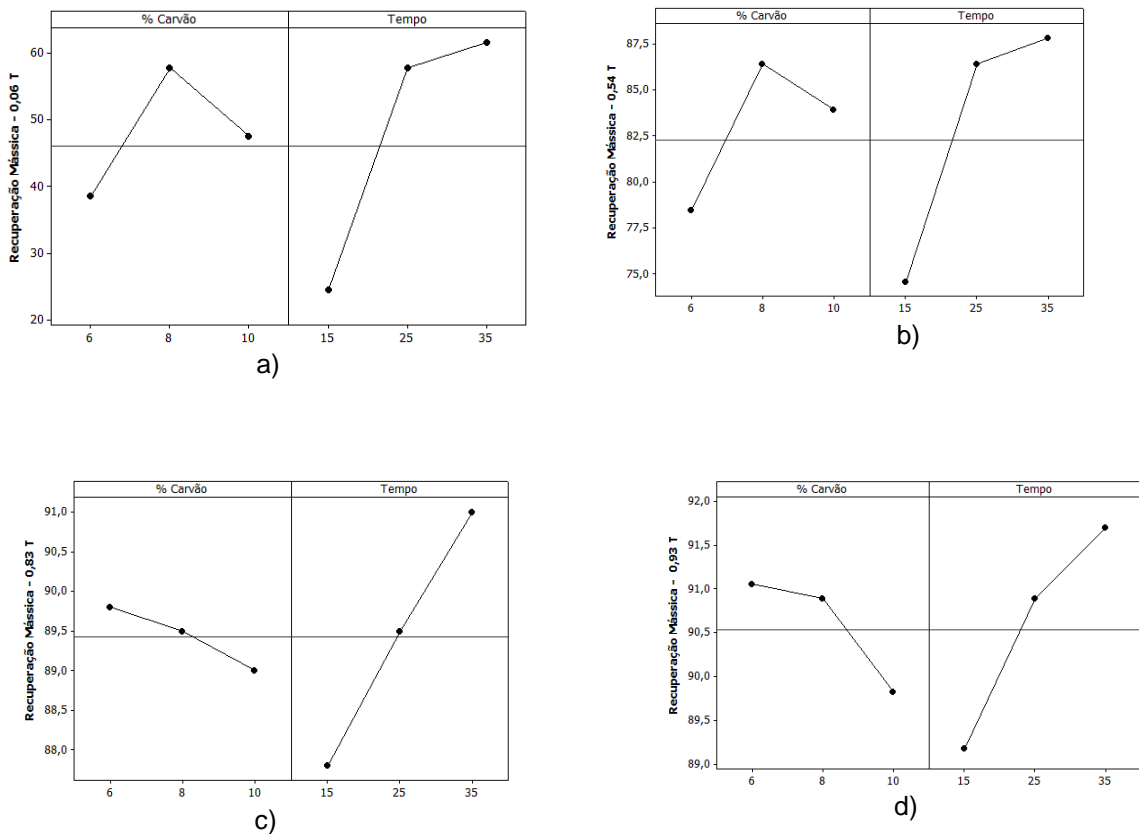


Figura 28: Recuperação Mássica em Função do Tempo e da % de Carvão para os campos : a) 0,06T ; b) 0,54 T ; c) 0,83T ; d) 0,93T

Com o processo de ustulação foi possível reduzir o campo magnético necessário para a separação entre as espécies minerais. Para atingir uma recuperação mássica de aproximadamente 72% no minério natural é necessário um campo de 0,65 T, enquanto para o minério ustulado consegue-se essa mesma recuperação em campos da ordem de 0,06 T. O campo magnético elevado é responsável pelo alto gasto energético nas instalações de separação magnética de alto gradiente. O novo campo necessário pode ser obtido em equipamentos de baixo gradiente de campo.

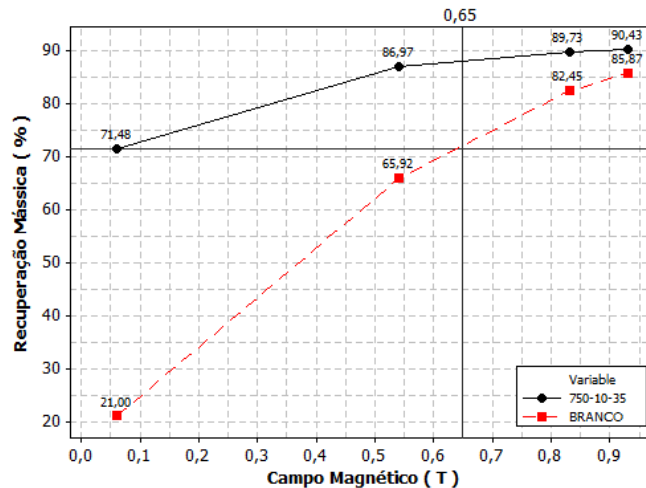
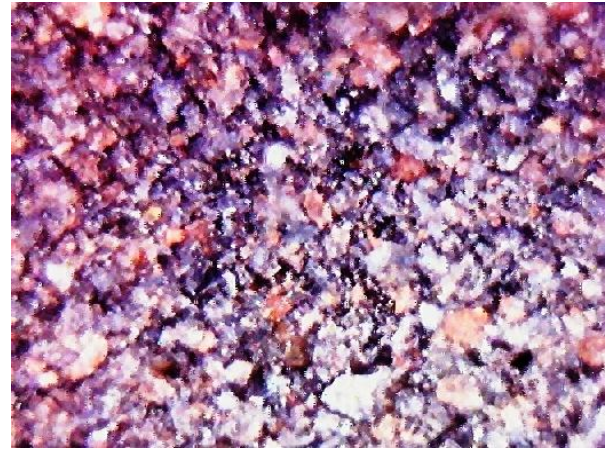
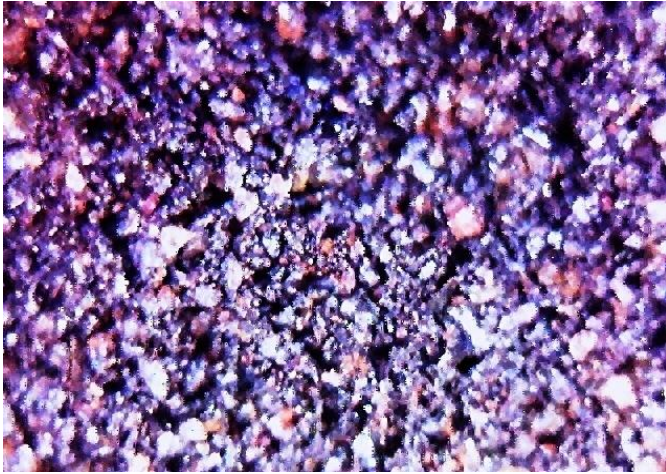


Figura 29: Redução de Campo Magnético

O minério natural apresentava pequena atração magnética, já o minério ustulado, nas melhores condições (750°C, 10% Carvão e 35 minutos), se tornou altamente magnético. A seguir são apresentadas duas micrografias do minério ustulado, sendo a figura 30 referente ao magnetismo gerado através da ustulação, enquanto a figura 31 mostra a o concentrado e o rejeito da separação magnética.



Figura 30: Magnetismo Resultante da Ustulação

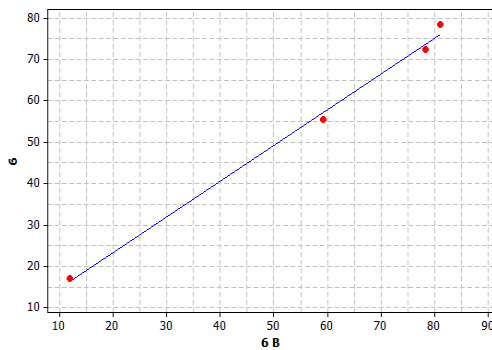


a)

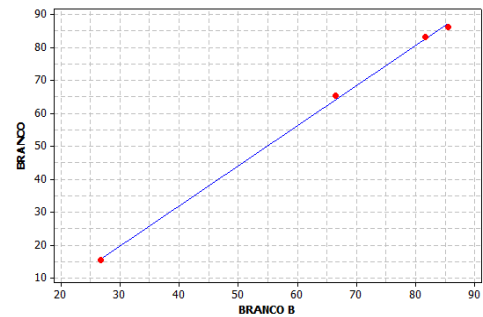
b)

Figura 31: Micrografias dos Produtos Obtidos: a) Concentrado 0,06T ; b) Rejeito Não Magnético

Os ensaios realizados neste trabalho foram analisados estatisticamente através dos testes em duplicata. As duas amostras (uma ustulada e outra natural) tiveram resultados bem semelhantes, apresentando uma correlação de 99,3 % para a amostra ustulada e 99,9 % para a amostra natural.



R-Sq = 99,5% / R-Sq (adj) = 99,3%  
P-Value = 0,002



R-Sq = 99,9% / R-Sq (adj) = 99,9%  
P-Value = 0,000

Figura 32: Análise dos erros obtidos nos ensaios

## 6. CONCLUSÃO

A caracterização realizada identificou uma amostra com 87,0 % de hematita, o que a torna uma amostra rica com 60,9 % de ferro aproximadamente. A análise granulométrica mostrou uma amostra com grande quantidade de finos. Por isso a adequação aos modelos teóricos usuais de distribuição granulométrica não se adequaram bem ao minério analisado. A distribuição granulométrica de Harris obteve o melhor ajuste aos dados obtidos. Já o coque empregado apresentou boa correlação com os modelos de distribuição de Hill e Rosin Rammler.

A perda de massa associada à operação de ustulação foi identificada e as três variáveis estudadas se mostraram sensíveis ao processo de ustulação. O aumento da temperatura, tempo e a proporção de carvão adicionado ocasionaram aumento na perda de massa, como era esperado. Foi possível também identificar os orifícios por onde saíram os gases produzidos – CO e CO<sub>2</sub> durante a transformação de hematita a magnetita pela redução por carbono.

O processo de separação magnética apresentou um ponto ótimo na granulometria de 200 µm e tanto os grossos (maior que 297 µm) e finos (menor que 106 µm) apresentaram uma queda de desempenho. O resultado demonstrado é semelhante ao encontrado na bibliografia.

Os ensaios de separação magnética alcançaram resultados satisfatórios apenas para temperaturas de 750° C. O teste de melhor resultado foi com a maior percentagem de carvão (10 %) e o maior tempo (35 minutos). O processo de ustulação aumentou a recuperação mássica em 5,3% para o campo de 0,93 T e 240,3 % para o campo de 0,06 T.

Através da ustulação é possível obter as mesmas recuperações em campos da ordem de 10 vezes menores. A recuperação em 0,65T para minérios naturais é atingida para campos de 0,06T para minérios previamente ustulados.

Finalmente, o processo de ustulação tornou a hematita altamente magnética, sendo possível notar a diferença com a aproximação de um ímã de mão.

## **7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

### **a. Caracterização Tecnológica dos Insumos**

- Realizar uma caracterização mais detalhada do minério, do coque e dos produtos obtidos na ustulação;

### **b. Ustulação**

- Realizar novos ensaios com temperatura, tempo e percentual de carvão variados;
- Estudar o ambiente de redução no interior da mufla;

### **c. Separação Magnética**

- Realizar ensaios de separação magnética com campos magnéticos mais refinados para melhor identificar as melhorias;
- Validar a rota de processo proposta para as escalas industrial e semi-industrial;
- Avaliar o desempenho do minério ustulado nas operações de pelotização e redução em altos fornos

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Biswas, A. K. (1981). Principles of Blast Furnace Ironmaking. *Cootha Publishing House*.
- Brumatti, M. (2008). Mineralogia Aplicada ao Beneficiamento das Zonas de Xenólitos, Mina de Cajati, SP. São Paulo.
- Chaves, A. (2013). *A Flotação no Brasil* (3ª ed., Vol. 4). São Paulo: Oficina de Textos.
- Chaves, A., & Filho, R. C. (2013). *Separação Densitária*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Cui, Z., Liu, Q., & Etsell, T. H. (2002). Magnetic Properties of Ilmenite, Hematite and Oilsands Minerals After Roasting. *University of Alberta*.
- França, S. C., Luz, A. B., & Sampaio, J. A. (2007). Ensaios de Separação Magnética e Eletrostática. *CETEM*.
- Gomes, M. (2009). Caracterização Tecnológica no Aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro.
- Gy, P. (1982). *Sampling of Particulate Materials Theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier.
- Hrouda, F., & Chlupacova, M. (2009). The Use of Magnetic Susceptibility of Rocks in Geological Exploration. Terraplus.
- Hunt, C. P., Moskowitz, B. M., & Banerjee, S. K. (1995). *Magnetic Properties of Rocks and Minerals*. America Geophysical Union .
- Luz, A. B., Sampaio, J. A., & França, S. C. (2010). *Tratamento de Minérios* (5ª ed.). Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM.
- Luz, J. (2014). *Fracionamento Granulométrico de Sistemas Particulados*. DEMIN - Ouro Preto .
- Ma, M. (2012). *Iron Ore Flotation*. Middletown, USA.
- Mular, A. L., Halbe, D. N., & Barratt, D. J. (2002). *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*. Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Nunes, D. G., Couto, H. J., & França, S. C. (s.d.). *Aplicação da Flotação em Coluna na Concentração de Minério de Ferro de Baixo Teor*. Porto Alegre / RS: UFRGS.
- Oliveira, M. (2011). *Curso de Tratamento de Minérios para Operadores da CBMM*. Araxá: MCE.
- Oliveira, P. S. (2006). *Rotas para Recuperação de Ferro Fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina de Conceição*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia - UFMG.
- Schneider, C.L., & Calixto, M. (2006). Desenvolvimento de um Modelo para Separadores Magnéticos tipo Jones. *VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*.
- Sharma, J., & Sharma, T. (2014). Beneficiation of Low Grade Iron Ore Fines By Magnetizing Roasting. *International Journal of Engineering Research and Science & Tecnology - IJERST*, 3(2).
- Somasundaran, P. (1980). *Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation. Fine Particle Processing*. New York: AIME.



## 9. ADENDO

### PENEIRAMENTO - ROM - MINÉRIO 1

#	Abertura		Peso g	Massa Máxima g	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
	Mm	Ø eq					
¼	6,350	7,665	2,40	987,31	0,9%	0,9%	99,1%
6	3,350	4,850	65,98	624,71	25,4%	26,3%	73,7%
8	2,360	2,855	53,51	367,74	20,6%	46,9%	53,1%
10	1,650	2,005	63,20	258,25	24,3%	71,2%	28,8%
12	1,410	1,530	17,23	197,07	6,6%	77,9%	22,1%
14	1,180	1,295	5,61	166,80	2,2%	80,0%	20,0%
16	1,000	1,090	8,59	140,40	3,3%	83,3%	16,7%
20	0,837	0,919	5,58	118,31	2,1%	85,5%	14,5%
28	0,59	0,714	0,29	91,90	0,1%	85,6%	14,4%
48	0,297	0,444	6,75	57,13	2,6%	88,2%	11,8%
150	0,106	0,202	13,26	25,95	5,1%	93,3%	6,7%
200	0,075	0,091	2,86	11,66	1,1%	94,4%	5,6%
	<b>FUNDO</b>		14,55	-	5,6%	100,0%	0,0%
<b>Massa Total</b>			<b>259,78</b>				

### PENEIRAMENTO – ROM - MINÉRIO 2

#	Abertura		Peso g	Massa Máxima g	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
	Mm	Ø eq					
¼	6,350	7,665	3,39	987,31	1,4%	1,4%	98,6%
6	3,350	4,850	54,27	624,71	22,5%	23,9%	76,1%
8	2,360	2,855	57,33	367,74	23,8%	47,7%	52,3%
10	1,650	2,005	49,29	258,25	20,5%	68,2%	31,8%
12	1,410	1,530	11,64	197,07	4,8%	73,0%	27,0%
14	1,180	1,295	9,74	166,80	4,0%	77,1%	22,9%
16	1,000	1,090	11,70	140,40	4,9%	81,9%	18,1%
20	0,837	0,919	4,69	118,31	1,9%	83,9%	16,1%
28	0,59	0,714	3,57	91,90	1,5%	85,4%	14,6%
48	0,297	0,444	5,67	57,13	2,4%	87,7%	12,3%
150	0,106	0,202	10,47	25,95	4,3%	92,1%	7,9%
200	0,075	0,091	4,38	11,66	1,8%	93,9%	6,1%
	<b>FUNDO</b>		14,77	-	6,1%	100,0%	0,0%
<b>Massa Total</b>			<b>240,91</b>				

## PRODUTO BRITAGEM MANDÍBULAS – COQUE

#	Abertura		Peso g	% Retido	% Retido	% Passante
	Mm	∅ eq		Simple	Acumulado	Acumulado
½	12,700	15,330	199,97	50,1%	50,1%	49,9%
6	3,350	8,025	142,83	35,8%	85,8%	14,2%
8	2,360	2,855	9,01	2,3%	88,1%	11,9%
10	1,700	2,030	6,17	1,5%	89,6%	10,4%
14	1,180	1,440	4,53	1,1%	90,8%	9,2%
20	0,850	1,015	6,50	1,6%	92,4%	7,6%
48	0,300	0,575	11,99	3,0%	95,4%	4,6%
200	0,075	0,188	12,47	3,1%	98,5%	1,5%
<b>FUNDO</b>			5,88	1,5%	100,0%	0,0%
<b>Massa Total</b>			399,35			

## PRODUTO MOAGEM DISCO – COQUE

#	Abertura		Peso g	% Retido	% Retido	% Passante Acumulado
	mm	∅ eq		Simple	Acumulado	
½	12,700	15,330	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
6	3,350	8,025	0,16	0,0%	0,0%	100,0%
8	2,360	2,855	3,70	1,0%	1,0%	99,0%
10	1,700	2,030	27,34	7,2%	8,3%	91,7%
14	1,180	1,440	52,00	13,8%	22,1%	77,9%
20	0,850	1,015	93,26	24,7%	46,8%	53,2%
48	0,300	0,575	101,42	26,9%	73,7%	26,3%
200	0,075	0,188	61,81	16,4%	90,0%	10,0%
<b>FUNDO</b>			37,56	10,0%	100,0%	0,0%
<b>Massa Total</b>			377,25			

## GRANULOMETRIA FINAL DOS INSUMOS

#	Abertura		Coque			Minério		
	µm	% Retido Simple	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado	% Retido Simple	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado	
150	106	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	
200	75	41,4%	41,4%	58,6%	17,4%	17,4%	82,6%	
270	53	16,0%	57,4%	42,6%	17,2%	34,5%	65,5%	
325	45	14,4%	71,8%	28,2%	11,1%	45,7%	54,3%	
400	38	19,3%	91,1%	8,9%	32,5%	78,1%	21,9%	
<b>FUNDO</b>		8,9%	100,0%	0,0%	21,9%	100,0%	0,0%	

## GRANULOMETRIA - SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Granulometria	Concentrado	Rejeito	Massa Total	Recuperação Mássica
<b>+297</b>	32,36	59,81	92,17	35,1%
<b>+210</b>	42,05	47,44	89,49	47,0%
<b>+149</b>	42,64	55,35	97,99	43,5%
<b>+105</b>	35,50	64,92	100,42	35,4%
<b>+74</b>	34,00	63,80	97,80	34,8%
<b>+53</b>	25,73	64,58	90,31	28,5%
<b>+44</b>	18,55	68,66	87,21	21,3%

## RESULTADOS PERDA DE MASSA

Ensaio	Condições			Massa	Massa	Perda
				Inicial	Final	
1	450	6	15	53	52,48	0,98%
2	450	10	15	55	54,41	1,07%
3	450	8	25	54	53,01	1,83%
4	450	6	35	53	52,39	1,15%
5	450	10	35	55	53,6	2,55%
6	500	8	15	54	53,5	0,93%
6 B	500	8	15	54	53,27	1,35%
7	500	6	25	53	52,13	1,64%
8	500	8	25	54	53,3	1,30%
9	500	10	25	55	54,26	1,35%
10	500	8	35	54	52,11	3,50%
11	550	6	15	53	52,14	1,62%
12	550	10	15	55	53,61	2,53%
13	550	8	25	54	53,13	1,61%
14	550	6	35	53	52,04	1,81%
15	550	10	35	55	52,25	5,00%
16	650	6	15	53	51,42	2,98%
17	650	10	15	55	54,01	1,80%
18	650	8	25	54	52,81	2,20%
19	650	6	35	53	51,72	2,42%
20	650	10	35	55	53,46	2,80%
21	750	6	15	53	52,07	1,75%
22	750	6	35	53	51,48	2,87%
23	750	8	25	54	52,71	2,39%
24	750	10	15	55	53,23	3,22%
25	750	10	35	55	53,09	3,47%

## RESULTADOS SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Ensaio	Condições				Peso					% Simples					% Acumulada			
					Massa Magnética				Não Mag.	Massa Magnética				Não Mag.	Massa Magnética			
					0,06T	0,54T	0,83T	0,93T		0,06T	0,54T	0,83T	0,93T		0,06T	0,54T	0,83T	0,93T
1	450	6	15	4,13	25,83	7,15	1,60	10,63	8,37	52,35	14,49	3,24	21,54	8,37	60,72	75,21	78,46	
2	450	10	15	7,39	28,23	3,67	0,70	12,47	14,09	53,81	7,00	1,33	23,77	14,09	67,90	74,9	76,23	
3	450	8	25	5,82	25,85	6,43	2,04	11,5	11,27	50,06	12,45	3,95	22,27	11,27	61,33	73,78	77,73	
4	450	6	35	6,93	14,56	13,23	3,78	11,06	13,98	29,38	26,69	7,63	22,32	13,98	43,36	70,06	77,68	
5	450	10	35	5,71	22,04	7,07	3,24	11,58	11,50	44,40	14,24	6,53	23,33	11,50	55,90	70,15	76,67	
6	500	8	15	8,74	19,89	8,78	3,09	11,17	16,92	38,49	16,99	5,98	21,62	16,92	55,41	72,4	78,38	
6 B	500	8	15	6,07	24,13	9,73	1,39	9,65	11,91	47,34	19,09	2,73	18,93	11,91	59,25	78,34	81,07	
6 MÉDIA				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,41	57,33	75,37	79,72
7	500	6	25	8,37	22,52	9,36	1,60	9,44	16,32	43,91	18,25	3,12	18,41	16,32	60,23	78,48	81,59	
8	500	8	25	7,12	14,73	14,57	3,41	11,64	13,83	28,62	28,31	6,63	22,62	13,83	42,45	70,76	77,38	
9	500	10	25	6,72	24,49	7,43	1,66	11,82	12,89	46,99	14,26	3,18	22,68	12,89	59,88	74,14	77,32	
10	500	8	35	6,29	22,19	10,28	1,84	11,33	12,11	42,73	19,80	3,54	21,82	12,11	54,84	74,64	78,18	
11	550	6	15	8,56	22,72	8,80	2,20	9,46	16,54	43,91	17,01	4,25	18,28	16,54	60,46	77,46	81,72	
12	550	10	15	8,71	18,07	11,46	1,95	10,97	17,03	35,32	22,40	3,81	21,44	17,03	52,35	74,75	78,56	
13	550	8	25	6,48	25,19	9,98	1,14	9,43	12,41	48,24	19,11	2,18	18,06	12,41	60,65	79,76	81,94	
14	550	6	35	6,74	21,47	11,66	2,60	8,29	13,28	42,30	22,97	5,12	16,33	13,28	55,58	78,55	83,67	
15	550	10	35	3,86	13,43	16,21	4,79	11,91	7,69	26,75	32,29	9,54	23,73	7,69	34,44	66,73	76,27	
16	650	6	15	9,42	13,69	13,40	3,21	9,05	19,32	28,07	27,48	6,58	18,56	19,32	47,39	74,86	81,44	
17	650	10	15	10,19	20,03	9,46	2,66	8,47	20,06	39,42	18,62	5,24	16,67	20,06	59,48	78,09	83,33	
18	650	8	25	8,74	20,18	9,22	3,78	8,59	17,30	39,95	18,25	7,48	17,01	17,30	57,26	75,51	82,99	
19	650	6	35	4,69	26,77	9,03	2,14	8,73	9,13	52,12	17,58	4,17	17,00	9,13	61,25	78,84	83,00	
20	650	10	35	12,32	20,69	9,27	2,25	6,55	24,12	40,51	18,15	4,40	12,82	24,12	64,62	82,77	87,18	
21	750	6	15	12,60	21,17	9,43	0,89	5,37	25,48	42,80	19,07	1,80	10,85	25,48	68,28	87,34	89,14	
22	750	6	35	25,45	18,09	1,75	0,34	3,45	51,85	36,85	3,57	0,69	7,03	51,85	88,71	92,28	92,97	
23	750	8	25	29,44	14,57	1,57	0,71	4,64	57,80	28,61	3,08	1,39	9,11	57,80	86,41	89,5	90,89	
24	750	10	15	11,89	28,86	3,70	0,47	5,43	23,61	57,32	7,35	0,93	10,78	23,61	80,93	88,28	89,22	
25	750	10	35	36,14	7,83	1,40	0,35	4,84	71,48	15,49	2,77	0,69	9,57	71,48	86,97	89,73	90,43	
BRANCO				7,44	24,30	8,63	1,50	6,65	15,33	50,08	17,79	3,09	13,71	15,33	65,42	83,2	86,29	
BRANCO				12,92	19,26	7,39	1,82	7,05	26,67	39,76	15,26	3,76	14,55	26,67	66,43	81,69	85,45	
BRANCO MÉDIO				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,00	65,92	82,45	85,87