

## 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

#### 4.1.1. Concentrado Magnetítico

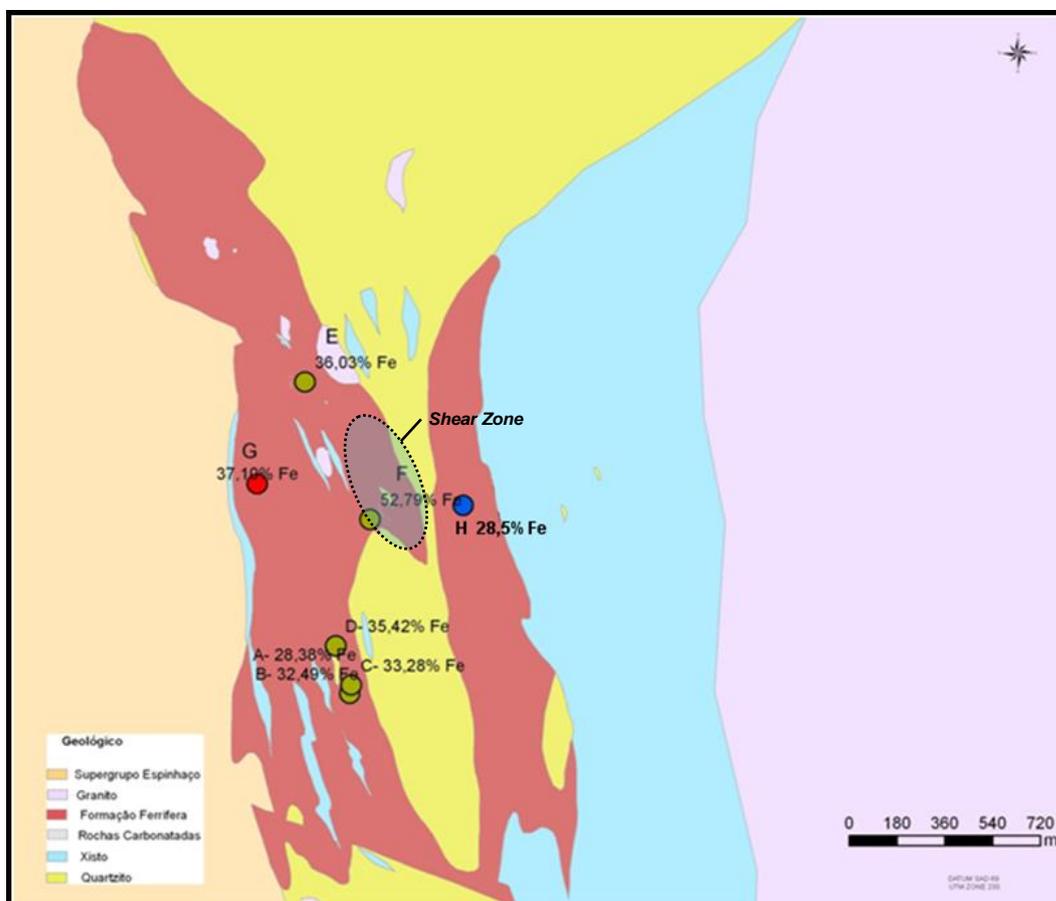
O minério de ferro utilizado neste trabalho é um minério, predominantemente, magnetítico de uma jazida mineral brasileira com um teor médio de 34% de Ferro e recursos estimados de 2,5 bilhões de toneladas, e com potencial para aumentar até 4 bilhões de toneladas. Atualmente, esta jazida encontra-se em fase de pesquisa mineral e no curto prazo será realizada campanha de sondagem para certificar os recursos.

A formação ferrífera constituinte na jazida possui um aspecto típico conhecido como BIF – *banded iron formation* (**Figura 36**), com bandas escuras ricas em magnetita e bandas claras formadas por carbonatos, anfibólios e quartzo. É composta por dois corpos paralelos, ambos com mais de 400 m de profundidade. O primeiro corpo com dimensões aproximadas de 3.000 m de comprimento e 350 m de largura possui uma área denominada “*Shear Zone*”, onde foi verificada a existência de um minério de alto teor (>50% Fe). O segundo corpo mineral possui aproximadamente 1.500 m de comprimento e 300 m de largura.



**Figura 36** – Aspecto típico da formação ferrífera

A **Figura 37** apresenta o mapa geológico da área e indica o posicionamento de cada amostra coletada no corpo geológico para este trabalho e seus respectivos, teores de ferro.



**Figura 37** – Mapa geológico e posicionamento das amostras coletadas

Para um conhecimento mais aprofundado das características deste minério, foi realizada uma CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA composta por diversos testes. A amostra utilizada para a caracterização tecnológica foi a Amostra G, que é um minério bruto (ROM) coletado na superfície e apresenta a seguinte análise química (**Tabela 13**), realizada por método de fluorescência de Raios-X, no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Poli/USP.

**Tabela 13** – Análise química do minério ROM (Amostra G)

Fe <sub>TOTAL</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	P	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	PF
37,1	44,91	0,26	nd	1,23	0,065	0,02	0,01	0,11	0,02	0,04	0,24	0,02	0,64

Baseado no conhecimento adquirido com os testes de caracterização do minério foi proposta uma rota com operações unitárias típicas, para tratamento do minério magnetítico visando à obtenção dos concentrados (*pellet feed*) que serão pelletizados. A **Figura 38** apresenta o fluxograma desenvolvido, baseado em um peneiramento de partículas maiores, espirais, separação magnética de baixa e média intensidade, e flotação em coluna (apenas para produtos para redução direta).

O fluxograma prevê a obtenção de um *sinter feed*, que apesar de já ser um produto, neste trabalho como o objetivo do tratamento do minério é produzir *pellet feed* para pelletização, ele retornou ao fluxograma sendo moído a uma granulometria inferior a 150 µm e submetido às etapas separação magnética. Aumentando assim a massa de *pellet feed* que será utilizada na pelletização.

As amostras de ROM foram coletadas em pontos distintos na área e divididas em dois grupos, um formado por amostras coletadas na superfície, nos pontos A, B, C, D, E, e F, o qual será denominado de Amostra X; e outro, retirado de uma galeria, denominado de Amostra H.

A **Tabela 14** apresenta para cada minério ROM (Amostra X e H), a quantidade utilizada na rota de tratamento para produção do *pellet feed* e seus respectivos, teores de ferro.

**Tabela 14** – Amostras de ROM

<b>ROM</b>	<b>Kg</b>	<b>%Fe</b>
Amostra X	750	35,1
Amostra H	760	28,5

A Amostra X e a Amostra H foram submetidas, separadamente, a rota de beneficiamento proposta até a etapa de separação magnética, não sendo utilizada a flotação devido à baixa capacidade produtiva da coluna de flotação presente no laboratório. Como resultado final foi obtido um conjunto de concentrados (*pellet feed*) resultado das diversas passagens no separador magnético a úmido com aumento progressivo da intensidade de campo magnético. Os campos magnéticos utilizados foram 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 e 12.000 gauss.



**Tabela 15** – Massa e análise química (%) dos concentrados magnetíticos

PELLET FEED	Kg	Fe	FeO <sup>1</sup>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PF
X 500	59,5	65,5	11,75	6,14	< 0,10	0,03	0,73	<0,10	<0,10	0,20	0,18	<0,10	0,86
X 1000	105,0	66,5	9,21	4,87	0,10	0,03	0,64	<0,10	< 0,10	0,17	0,23	<0,10	gf
X 2000	78,7	66,8	8,00	3,49	0,16	0,04	0,33	<0,10	< 0,10	0,22	0,15	<0,10	0,24
X 4000	15,6	66,5	8,95	4,84	0,12	0,04	0,63	<0,10	<0,10	0,22	0,21	<0,10	0,27
X 8000	55,2	65,6	0,51	3,78	0,26	0,07	0,36	<0,10	0,10	< 0,10	0,15	<0,10	1,33
X 12000	27,5	63,8	0,22	4,63	0,48	0,10	0,37	<0,10	0,10	0,15	0,15	<0,10	1,76
<b>TOTAL X</b>	<b>341,4</b>	<b>66,0</b>	<b>7,23</b>	<b>4,58</b>	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>	<b>0,52</b>	<b>&lt; 0,10</b>	<b>&lt; 0,10</b>	<b>0,17</b>	<b>0,18</b>	<b>&lt; 0,10</b>	
H 500	105,3	69,9	26,89	2,59	< 0,10	0,03	0,10	<0,10	0,10	0,34	0,60	<0,10	gf
H 1000	19,0	67,9	25,67	4,90	< 0,10	0,03	0,12	<0,10	0,13	0,60	0,34	<0,10	gf
H 4000	7,4	66,6	25,25	5,01	0,14	0,02	0,12	<0,10	< 0,10	0,57	0,15	<0,10	gf
H 8000	17,2	64,3	8,55	5,95	0,22	0,06	0,44	<0,10	0,11	0,32	0,14	<0,10	< 0,10
<b>TOTAL H</b>	<b>148,8</b>	<b>68,8</b>	<b>24,54</b>	<b>3,39</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,14</b>	<b>&lt; 0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,38</b>	<b>0,49</b>	<b>&lt; 0,10</b>	

gf = ganho ao fogo; <sup>1</sup> - Análise de FeO foi realizada via Titulação.

Foi criada uma nomenclatura para cada um dos concentrados magnetíticos obtidos, formada pela letra das amostras do minério bruto (X ou H) mais o valor do campo magnético (em gauss) utilizado na etapa de separação magnética.

Analisando a **Tabela 15** é possível observar a boa qualidade química dos concentrados magnetíticos obtidos após o circuito de moagem, separação gravítica e separação magnética. Certamente, com otimizações dos parâmetros operacionais dos equipamentos e utilização da flotação em coluna será possível produzir um concentrado com especificação química superior, isto é, maior teor de ferro e menor teor de sílica.

#### 4.1.2. Outros

Para formação das misturas para pelotização foram utilizadas outras substâncias, tais como calcário calcítico, carvão antracito e aglomerantes (bentonita ou aglomerante orgânico “Peridur”).

##### 4.1.2.1. Calcário Calcítico

O calcário calcítico age como fundente, se combinando com as impurezas (ganga) do minério e com as cinzas do carvão, formando as chamadas “escórias”.

Este material possui uma granulometria 100% inferior a 150 µm, com 56% abaixo de 45 µm e uma superfície específica 6.000 cm<sup>2</sup>/g.

A **Tabela 16** apresenta a composição química do calcário calcítico utilizado.

**Tabela 16** – Análise química do calcário calcítico

Insumo	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
Calcário Calcítico	5,22	45,60	4,05	0,70	40,11

Nota: PF – Perda ao fogo.

#### 4.1.2.2. Carvão Antracito

Os carvões fósseis, como o antracito, são os combustíveis sólidos mais importantes na siderurgia. Tem como principal função na pelotização o aquecimento interno da pelota.

Este material possui uma granulometria 100% inferior a 150 µm, com 70% abaixo de 45 µm e uma superfície específica 5.000 cm<sup>2</sup>/g.

A **Tabela 17** apresenta a composição química do carvão antracito utilizado.

**Tabela 17** – Análise química do carvão antracito

Insumo	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cinza	MV	CFixo	PF
Carvão antracito	5,12	7,40	5,14	0,68	0,23	16,68	11,58	71,61	83,32

Nota: Fe<sub>T</sub> – Ferro total; MV – Matéria volátil; CFixo – Carbono Fixo; PF – Perda ao fogo.

#### 4.1.2.3. Aglomerante

Foram utilizados dois tipos de aglomerantes, um orgânico, comercialmente conhecido como “Peridur” e um inorgânico, a bentonita. A bentonita possui uma granulometria 100% inferior a 150 µm, com 60,2% abaixo de 45 µm e uma superfície específica 5.000 cm<sup>2</sup>/g.

A **Tabela 18** apresenta a composição química da bentonita.

**Tabela 18** – Análise química da bentonita

Aglomerante	Fe <sub>TOTAL</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
Bentonita	5,44	57,2	1,01	15,5	8,71

Nota: PF – Perda ao fogo.

O Peridur é um composto formado por carboximetilcelulose juntamente com outros aditivos de origem vegetal para formar uma composição

aglomerante. Normalmente a carboximetilcelulose sozinha não pode ser utilizada porque é muito cara. Então o que se faz é adicionar alguns *fillers* com ou sem função específica. Não se tem a análise química, mas como é carboximetilcelulose (CMC) sabe-se que é basicamente composta de carbono hidrogênio, oxigênio e enxofre.

## **4.2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.2.1. Tratamento do Minério Magnetítico**

Objetivando desenvolver uma rota de beneficiamento mineral eficaz e de baixo custo operacional, foi realizada uma CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA deste minério magnetítico, que é composta pelos seguintes ensaios e testes:

- Grau de Liberação;
- Índice de Trabalho para Moagem e Impacto;
- Distribuição %Fe por Faixa Granulométrica;
- Ensaios de Moagem; e
- Ensaios de Concentração.

Os testes de Grau de Liberação e de Índice de Trabalho (WI) foram realizados no laboratório do **DEMIN, da Universidade Federal de Minas Gerais**, os demais testes da caracterização tecnológica, inclusive a preparação das amostras, foram realizados no laboratório da **Nomos Análises Mineraiis Ltda.** no Rio de Janeiro.

#### **4.2.1.1. Preparação da Amostra**

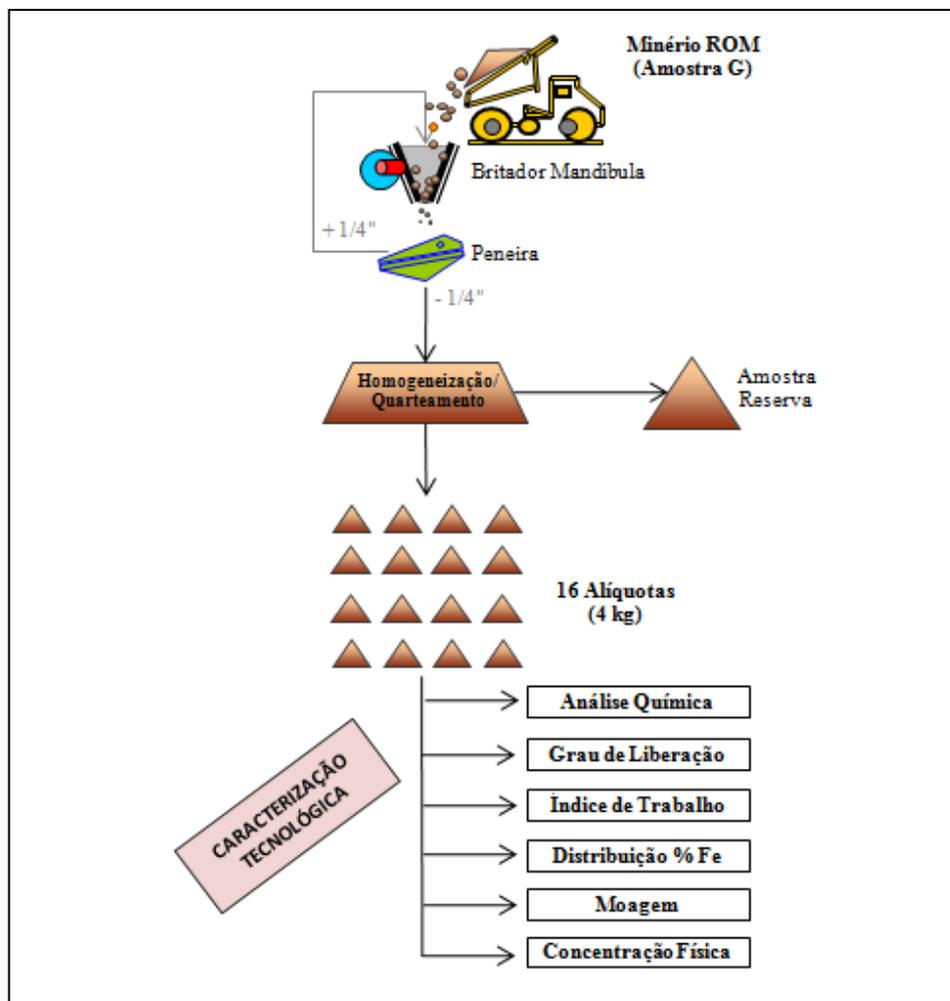
Uma quantidade aproximada de 200 kg de ROM da Amostra G foi britada em um britador de mandíbulas de 30 cm de largura por 40 cm de altura com regulagem da abertura de 4 ½". O material alimentado tinha cerca de 4" a 5", gerando produtos com cerca de 2".

Este material foi então alimentado em outro britador de mandíbulas de 15 cm de largura por 20 cm de altura com regulagem da abertura de 3", gerando produto abaixo de 3/8".

O material abaixo de 3/8" foi reprocessado em britador de rolos até atingir a granulometria de 100% passante em 1/4".

Após homogeneização foi formada uma pilha alongada e realizado o quarteramento (Jones) da amostra em alíquotas de 4 kg.

O esquema da preparação da amostra é apresentado na **Figura 39**.



**Figura 39** – Preparação do minério *ROM* (Amostra G) para ensaios de caracterização tecnológica

#### 4.2.1.2. Análise Química

Uma alíquota de 4 kg foi retirada para a realização da análise química do minério ROM (Amostra G). A alíquota foi totalmente cominuída abaixo de 200 mesh Tyler (74  $\mu$ m) e, posteriormente, homogeneizada e quarterada até a obtenção de uma amostra representativa.

Os teores apresentados foram determinados no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Poli/USP por análise quantitativa em amostra

fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração de minério de Fe TBL, em espectrômetro por fluorescência de Raios-X Axios Advanced, marca PANalytical. A análise de Perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.050°C por 1 hora.

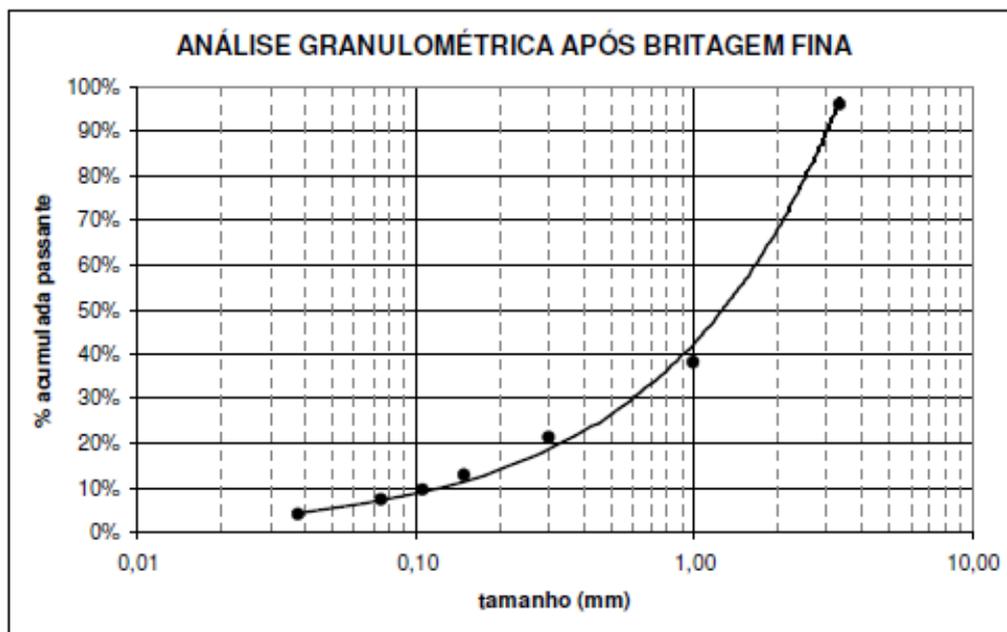
#### 4.2.1.3. Distribuição %Fe por Faixa Granulométrica

Uma alíquota de 4 kg foi retirada para analisar a distribuição do teor de ferro por faixa granulométrica. Foi utilizada uma sequência de 10 peneiras, com as seguintes malhas: 5#, 9#, 16#, 32#, 65#, 100#, 150#, 200#, 325# e 400#, e em cada fração obtida foi realizada análise do teor de ferro total contido por método de titulação com dicromato de potássio.

A partir das massas obtidas em cada fração, foi elaborada uma curva de distribuição granulométrica corrigida – ROSIN-RAMMLER.

#### 4.2.1.4. Grau de Liberação

O grau de liberação foi determinado por contagem de partículas em lupa, usando-se o método de GAUDIN. A curva granulométrica utilizada para a determinação do grau de liberação é apresentada na **Figura 40**.



**Figura 40** – Análise granulométrica para determinação do grau de liberação

#### 4.2.1.5. Índice de Trabalho (WI)

##### Índice de Trabalho de Bond para Moagem (BWI)

Obedecendo à norma ABNT – NBR 11376, foi utilizado um moinho padrão, com diâmetro e comprimento iguais a 12 polegadas, 70 RPM, 285 bolas de aço (peso de 20,125 kg e massa específica de 7,83 g/cm<sup>3</sup>) distribuídas conforme já apresentado na **Tabela 8**. A moagem é realizada a seco, em circuito fechado, com carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio.

Primeiramente deve-se fazer uma análise granulométrica (com alíquota suficiente para três análises). A média das análises é tomada como a granulometria da alimentação. Separa-se uma parte da pilha inicial para pequenos ajustes de massa.

A seguir deve-se tomar da pilha uma amostra de 700 cm<sup>3</sup> que corresponderá à alimentação inicial. Calcula-se então o IPP (*Ideal Potential Product*) que corresponde à massa dos 700 cm<sup>3</sup> dividida por 3,5, ou seja, a “alimentação nova” correspondente a uma carga circulante de 250 %.

Moer a alimentação durante 100 rotações ou, no caso de já existirem testes anteriores, durante o número de rotações resultante destes ensaios.

Descarregar o material e peneirar a seco na malha – teste (100 mesh). Pesar a massa retida e a passante. Anotar o peso da massa passante, o peso da alimentação nova, que é a alimentação inicial menos a massa retida, e o passante líquido (produzido nesta etapa de moagem, passante do peneiramento da malha teste menos a massa menor que esta malha contida na alimentação do moinho).

Registrar o GBP (*Ball Mill Grindability*) que é a massa produzida por revolução. Esta massa é calculada pela divisão do passante líquido pelo número de rotações.

Colocar no moinho a alimentação nova (retirada da pilha inicial e da pilha de ajuste fino) juntamente com o retido. O número de rotações desta etapa é geralmente maior e calculado a partir do ciclo anterior para produzir um passante na malha-teste igual a 1/ 3,5 da carga total do moinho.

O ciclo deve ser repetido até que a massa de material menor que a malha – teste (obtida com certo número de rotações) se mantenha constante, ou sofra uma inversão no seu comportamento com o número de rotações. Ou seja, a alimentação nova torna-se igual ao IPP (*Ideal Potential Product*).

Repetir então o ciclo mais duas ou três vezes com o mesmo número de rotações, tomando os passantes produzidos para posterior quarteamento e análise granulométrica. A distribuição granulométrica do produto será a média dos três últimos passantes.

Calcular o índice de Bond para moagem, BWI, de acordo com a seguinte fórmula:

$$BWI = \frac{44,5}{Am^{0,23}GBP^{0,82} \left( \frac{10}{P} - \frac{10}{F} \right)}$$

### Índice de Britabilidade (CWI)

Para o teste, foram utilizadas nove amostras representativas de minério, passantes em uma malha quadrada de 76 mm e retidos em malha quadrada de 50 mm. Estes pedaços são então quebrados pelo impacto de dois pêndulos. A energia imprimida é aumentada até que ocorra a quebra.

É anotado para cada amostra sua espessura média (t), densidade relativa (d) e o ângulo de queda do pêndulo. E com estes dados, calculado o CWI individual e a média das nove amostras, representa o CWI do minério.

O índice de britabilidade de Bond (CWI em kWh/t) é então calculado através da seguinte fórmula desenvolvida experimentalmente por Bond:

$$CWI = 2,59 \frac{Eb}{t(d * 1,1)}$$

#### 4.2.1.6. Ensaio de Moagem

Foram realizados ensaios de moagem para seis diferentes tempos, a saber: 1, 2, 4, 8, 16 e 32 minutos, utilizando-se para cada um deles uma alíquota de 4,0 kg britada a -6,35 mm. De maneira a ser evitada a geração de ultrafinos (material abaixo de 400 mesh) por tempo excessivo de moagem, cada alíquota (4,0 kg) foi passada em um britador de rolos de maneira a que todo o material estivesse abaixo de 1 mm.

Estes ensaios foram realizados com moinho de moinho de 202 mm de diâmetro e 405 mm de comprimento, rotação de 63 RPM, enchimento de 35% em volume e carga de bolas conforme apresentado na **Tabela 19**.

**Tabela 19** – Distribuição das bolas de moagem

Diâmetro (mm)	Massa (kg)
25,70	8,37
21,00	12,28
17,60	7,20
15,60	7,15
<b>Total</b>	<b>35,00</b>

Para cada um dos seis tempos de moagem foram traçadas as curvas granulométricas, determinados os P80 de cada um desses tempos de moagem e, posteriormente, montada a curva de tempo de moagem versus P80 para este minério de ferro.

#### 4.2.1.7. Ensaio de Concentração Física

A partir da curva tempo de moagem versus P80 obtido no ensaio de moagem, outras cinco alíquotas de 4 kg foram então moídas de maneira a se obter amostras para a realização dos ensaios de concentração, cada uma delas moída, respectivamente, nos seguintes P80: 35 mesh, 42 mesh, 60 mesh, 100 mesh e 150 mesh. Os tempos de moagem para a obtenção das amostras para a realização dos ensaios de concentração estão apresentados na **Tabela 20**.

**Tabela 20** – Tempo de moagem vs P80

TEMPO DE MOAGEM	P80 (µm)	P80 (mesh)
0' 00"	420	35
2' 03"	354	42
9' 29"	250	60
26' 49"	150	100
41' 08"	105	150

O ensaio de concentração física tem como objetivo verificar a eficiência dos processos de separação gravítica e magnética para cada fração granulométrica de maneira que possa orientar no desenvolvimento de uma rota de beneficiamento adequada.

Com as cinco alíquotas moídas nos tempos determinados, o ensaio de concentração foi realizado com uma análise granulométrica para cada alíquota. As alíquotas com P80 igual a 35, 42 e 60 mesh tiveram analisado a distribuição do teor de ferro em cada fração e uma posterior análise da separação em meio denso (bromofórmio,  $\rho = 2,8$ ) de cada fração granulométrica.

Por último, a alíquota com P80 igual a 35 mesh, já separada em frações de leve e pesado por faixa granulométrica, teve cada fração submetida a uma análise mineralógica detalhada com o auxílio do separador magnético “*Frantz*”, onde cada fração foi separada de acordo com a susceptibilidade magnética das partículas. A intensidade de corrente elétrica aplicada para geração do campo magnético foi aumentada gradativamente, utilizando-se nove correntes, são elas: 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,80 e 1,00 A.

#### **4.2.2. Pelotização**

Os ensaios de Pelotização foram realizados no laboratório da **Radieng Consultoria Ltda**, no município de Serra – ES.

A partir dos concentrados magnéticos obtidos do tratamento do minério, foi decido produzir três tipos de pelotas, duas com características adequadas à redução em alto forno, chamadas de AF I e AF II, e outra, adequada à redução direta, a pelota RD. A **Tabela 21** apresenta a análise química da composição feita com os oito concentrados magnéticos que gerou os *pellet feed* AF I, AF II e RD, principal insumo de cada mistura para formação dos três tipos de pelotas. As análises químicas de FeO foram realizadas via titulação no laboratório Nomos Análises Mineraias e a dos demais elementos, inclusive perda ao fogo (PF) foi realizada via fluorescência de Raios-X no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Poli/USP.

**Tabela 21 – Análise química (%) dos *pellet feed* para pelotização**

PELLET FEED	Fe	FeO <sup>1</sup>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PF	Massa (kg)
H 500	69,90	26,89	2,59	< 0,10	0,03	0,10	<0,10	0,10	0,34	0,60	<0,10	gf	30,00
H 1000	67,90	25,67	4,90	< 0,10	0,03	0,12	<0,10	0,13	0,60	0,34	<0,10	gf	12,00
H 4000	66,60	25,25	5,01	0,14	0,02	0,12	<0,10	< 0,10	0,57	0,15	<0,10	gf	7,35
H 8000	64,30	8,55	5,95	0,22	0,06	0,44	<0,10	0,11	0,32	0,14	<0,10	< 0,10	17,15
X 1000	66,50	9,21	4,87	0,10	0,03	0,64	<0,10	< 0,10	0,17	0,23	<0,10	gf	20,00
<b>AF I</b>	<b>67,45</b>	<b>18,86</b>	<b>4,31</b>	<b>0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>0,30</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>gf</b>	<b>86,50</b>
X 2000	66,80	8,00	3,49	0,16	0,04	0,33	<0,10	<0,10	0,22	0,15	<0,10	0,24	78,70
X 4000	66,45	8,95	4,84	0,12	0,04	0,63	<0,10	<0,10	0,22	0,21	<0,10	0,27	15,55
X 8000	65,60	0,51	3,78	0,26	0,07	0,36	<0,10	0,10	<0,10	0,15	<0,10	1,33	10,00
<b>AF II</b>	<b>66,63</b>	<b>7,42</b>	<b>3,72</b>	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>	<b>0,38</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>0,16</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>104,25</b>
H 500	69,90	26,89	2,59	< 0,10	0,03	0,10	<0,10	0,10	0,34	0,60	<0,10	gf	75,00
<b>RD</b>	<b>69,90</b>	<b>26,89</b>	<b>2,59</b>	<b>&lt; 0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>0,10</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,34</b>	<b>0,60</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>gf</b>	<b>75,00</b>

Fluorescência de Raios-X (LCT da Poli/USP); <sup>1</sup> - Titulação (Nomos Análises Minerais); gf - ganho ao fogo.

Vale ressaltar as qualidades químicas dos concentrados obtidos, com fósforo abaixo de 0,04, baixa alumina e álcalis e, apenas, sílica elevada, mas que otimizando os parâmetros operacionais, principalmente nas separações gravítica, magnética e, por último, ainda utilizando da coluna de flotação é esperado uma redução sem muita dificuldade.

A **Tabela 22** compara os *pellet feed* de duas grandes mineradoras nacionais de ferro, uma estrangeira (sueca, que explora magnetita) e os *pellet feed* AF I, AF II e RD, gerados neste trabalho para pelotização.

**Tabela 22 – Análise comparativa dos *pellet feed* produzidos com os de duas grandes mineradoras nacionais e uma estrangeira**

	MINERADORA A			MINERADORA B		MINERADORA C				METAL		
	PF Carajás	PF Tubarão	PF Guaíba	PF1	PFBS	KBF	MAF	KPF	MPF	PF AF I	PF AF II	PF RD
<b>ANÁLISE QUÍMICA</b>												
<b>Fe</b>	65,30%	66,50%	65,80%	66,93%	67,19%	69,80%	70,70%	66,90%	66,70%	67,45%	✓ 66,63%	✓ 69,90%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	1,40%	2,50%	2,70%	1,27%	1,02%	1,15%	0,65%	1,90%	1,90%	4,31%	● 3,72%	● 2,59%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,70%	0,70%	1,00%	0,39%	0,40%	0,18%	0,28%	0,30%	0,35%	0,10%	✓ 0,16%	✓ <0,10%
<b>P</b>	0,040%	0,035%	0,055%	0,043%	0,041%	0,045%	0,025%	0,030%	0,014%	0,04%	✓ 0,04%	✓ 0,03%
<b>Mn</b>	0,650%	0,150%	0,250%	0,054%	0,050%	0,080%	0,040%	0,060%	0,040%	0,30%	✓ 0,38%	✓ 0,10%
<b>PF</b>	2,20%	0,70%	1,60%	2,41%	2,29%	ND	ND	ND	ND	gf	<0,10%	gf
<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA</b>												
<b>+1,0 mm</b>	1,0%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%	ND	ND	ND	ND	0,0%	0,0%	0,0%
<b>-0,15 mm</b>	95,0%	84,0%	90,0%	99,68%	99,7%	ND	ND	ND	ND	100,0%	100,0%	100,0%
<b>-0,045 mm</b>	65,0%	35,0%	55,0%	87,2%	86,2%	ND	ND	ND	ND	88,3%	90,9%	91,3%

ND - não disponível; gf - ganho ao fogo

FONTES: Booklet Empresas

Na preparação das misturas, duas decisões importantes precisaram ser tomadas, primeiro a escolha do tipo de aglomerante a ser utilizado e depois, escolher uma basicidade binária para a pelota. Para as pelotas RD buscou-se inserir na mistura a menor quantidade possível de ganga, principalmente SiO<sub>2</sub>, assim, optou-se pela utilização de um aglomerante orgânico, CMC,

comercialmente vendido com o nome de Peridur; e quanto à basicidade binária (Bas<sup>2a</sup>) da pelota, foi decido pela produção de uma pelota ácida, com basicidade binária próxima a 0,45. Para as pelotas AF I e AF II optou-se pela utilização de um aglomerante inorgânico, a bentonita; e uma basicidade binária próxima de 0,70, que é um valor mais comercial.

Para a produção das misturas, foram adicionados os seguintes percentuais em relação à massa de *pellet feed*. No caso do uso de bentonita, pelotas AF I e AF II, usou-se 0,4%; para as pelotas RD, que utilizou Peridur, usou-se 0,04%. Em todas as pelotas foi utilizada a mesma adição de carvão antracito de 1,3%. A **Tabela 23** apresenta a quantidade em quilogramas de insumos utilizados na produção das três misturas. A **Figura 41** mostra o tambor utilizado para homogeneização da mistura.



**Figura 41** – Tambor para homogeneização da mistura

A umidade da mistura para pelotamento foi determinada em teste realizado em um pneu com 5 kg de amostra dando como resultado 8,5%. O resultado do teste é baseado no desempenho do pelotamento quando as pelotas crescem sem a necessidade de adição de água.

**Tabela 23** – Massa em kg dos insumos de cada mistura

INSUMOS (kg)	RD	AF I	AF II
<i>Pellet Feed</i>	75,0	86,5	103,0
AGLOMERANTE:			
<i>Orgânico – Peridur (0,04%)</i>	0,03	-	-
<i>Inorgânico – Bentonita (0,4%)</i>	-	0,346	0,412
Calcário Calcítico	1,725	5,017	5,459
Carvão Antracito (1,3%)	0,975	1,125	1,339

A **Tabela 24** apresenta as especificações químicas calculadas para as misturas e, depois, a **Tabela 25** mostra o resultado das análises químicas para o cálculo da basicidade binária das misturas prontas, realizadas no laboratório **Bureau Veritas do Brasil (Geochemical Laboratory)** e que confirmam os resultados esperados pelos cálculos, ficando dentro de um erro aceitável.

**Tabela 24** – Especificações químicas calculadas para as misturas

Misturas	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	Bas2 <sup>a</sup>
AF I	62,47%	4,54%	0,23%	2,97%	0,53%	0,034%	0,65
AF II	62,05%	3,99%	0,29%	2,63%	0,35%	0,047%	0,66
RD	67,43%	2,68%	0,07%	1,24%	0,41%	0,029%	0,46

**Tabela 25** – Análises químicas da basicidade binária das misturas

Mistura	CaO	SiO <sub>2</sub>	Bas2 <sup>a</sup>
AF I	2,92%	4,59%	0,64
AF II	2,69%	4,00%	0,67
RD	1,23%	2,97%	0,41

A mistura para pelotização precisa estar 100% abaixo de 100 mesh (150 µm) e, buscou-se pelo menos, 80% abaixo de 325 mesh (45 µm), visando assim obter melhores propriedades físico-metalúrgicas. A **Tabela 26** apresenta uma análise granulométrica das três misturas.

**Tabela 26** – Análise granulométrica das misturas

Mistura	<45 µm	<150 µm
AF I	88,3%	100,0%
AF II	90,9%	100,0%
RD	91,3%	100,0%

As pelotas cruas foram produzidas em disco (**Figura 42**) com seguintes parâmetros operacionais:

- Diâmetro do disco: 1,0 m;
- Velocidade de rotação: 15,6 RPM;
- Ângulo de inclinação: 49,90°;
- Taxa de alimentação: 2,8 kg/ minuto; e
- Tempo de pelotamento: aproximadamente 35 minutos.



**Figura 42** – Disco de pelotização

Para a queima das pelotas, simulada em fornos de escala piloto, foi decidido utilizar dois processos:

- Grelha reta + rotativo versão BSIET – Beijing Shougang International Engineering Technology, para as pelotas RD e AF I; e
- Grelha reta Lurgi-Dravo/Outotec, para a pelota AF II.

As **Figuras 43** e **44** apresentam, respectivamente, os fornos de grelha reta e o forno rotativo utilizados para queima das pelotas.

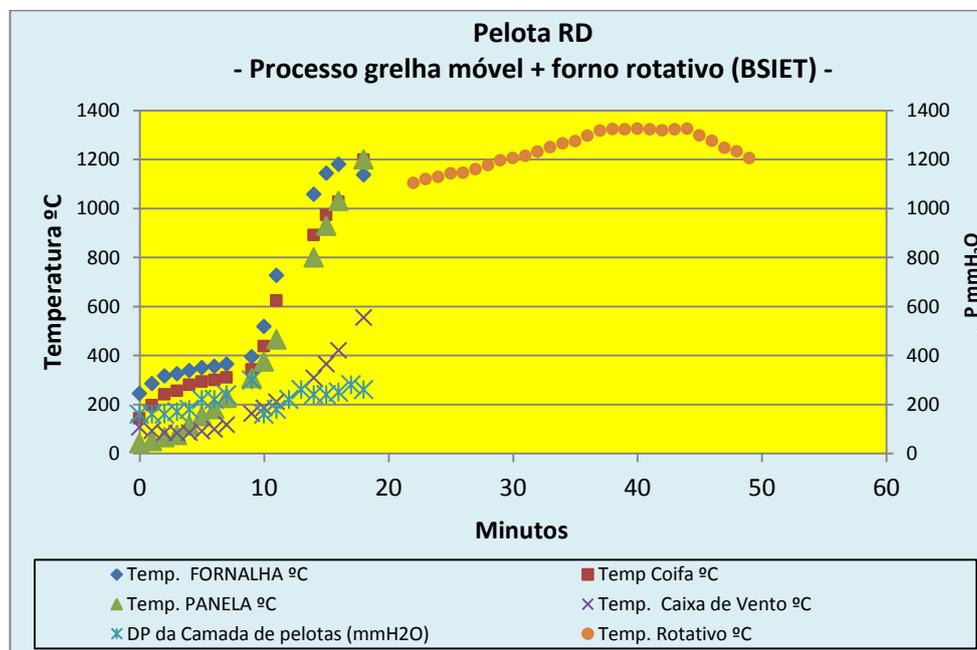


**Figura 43** – Forno de grelha reta



**Figura 44 – Forno rotativo**

Para o teste da amostra RD foi utilizada temperatura de queima de 1.320°C e para os testes das amostras AF I e AF II foi utilizada temperatura de queima de 1.350°C. As **Figuras 45, 46, e 47** mostram os perfis térmicos de queima das pelotas RD, AF I e AF II, respectivamente.



**Figura 45 – Perfil térmico de queima das pelotas RD**

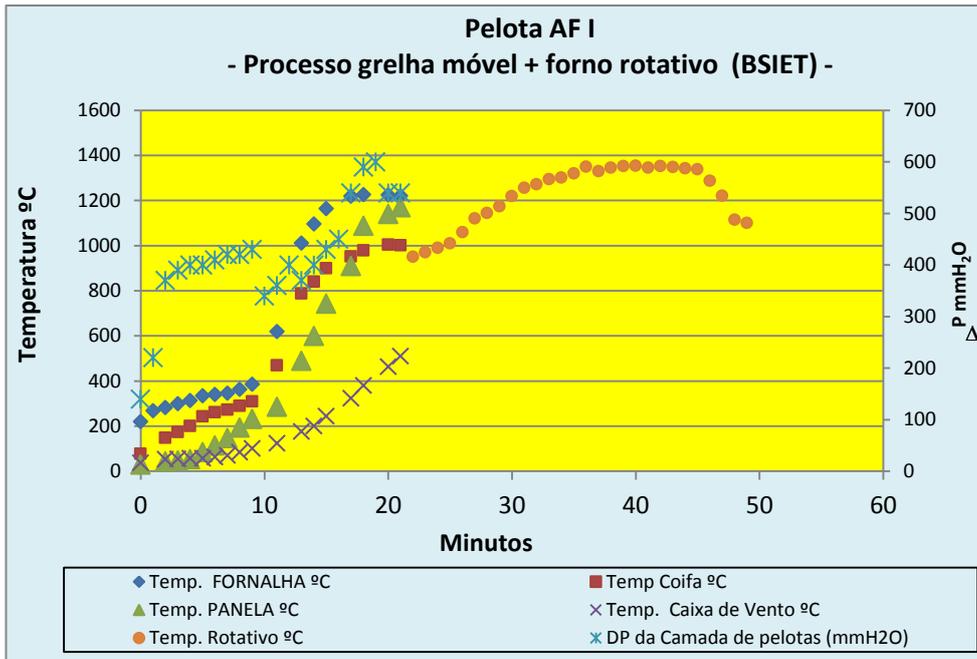


Figura 46 – Perfil térmico de queima das pelotas AF I

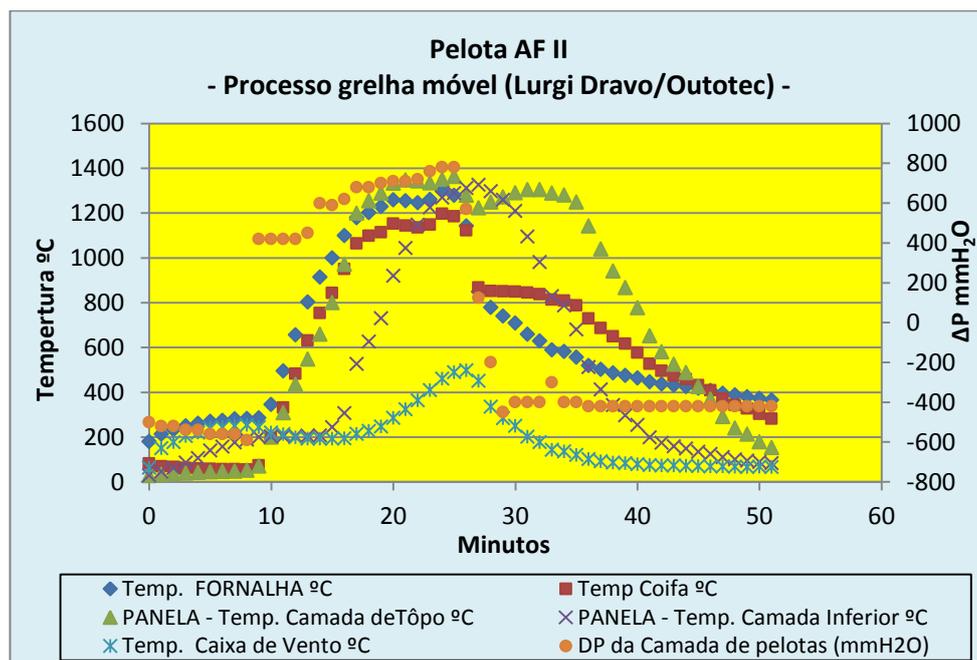


Figura 47 – Perfil térmico de queima das pelotas AF II

Após a queima, foi realizado no laboratório **Bureau Veritas do Brasil (Geochemical Laboratory)** uma análise química via método de fluorescência de Raios-X para cada um dos três tipos de pelotas produzidas. As pelotas levadas para análise foram quarteadas sucessivas vezes para retirada de alíquotas representativas com cerca de 200 gramas de pelotas.

#### **4.2.2.1. Ensaio Físicos**

Foram analisadas as seguintes qualidades físicas das pelotas produzidas:

- Umidade (pelota crua);
- Número de Quedas (pelota crua);
- Resistência à Compressão (pelota crua / pelota seca / pelota queimada);
- Granulometria (pelota queimada);
- Porosidade (pelota queimada); e
- Abrasão / Tamboramento (pelota queimada).

Os ensaios físicos foram realizados no laboratório da **Radieng Consultoria Ltda**, com exceção da medida de porosidade, realizada no laboratório do **DEMa / PUC-Rio**.

##### **4.2.2.1.1. Umidade (Pelota Crua)**

A umidade da pelota crua é determinada com a secagem de aproximadamente 100 gramas de pelotas cruas em uma estufa a uma temperatura de 105 – 110°C por 30 minutos. Medindo a massa (g) destas pelotas cruas antes e após a secagem.

##### **4.2.2.1.2. Número de Quedas (Pelota Crua)**

O número de quedas indica a frequência que as pelotas cruas podem cair de uma altura de 46 cm antes de apresentar fissuras perceptíveis ou desintegrar-se. As pelotas cruas são individualmente lançadas sobre a placa de aço. O número de quedas é determinado para cada pelota. A média dos valores de quedas para 10 pelotas, com granulometria entre 9,5 mm e 12,5 mm, produz o número de quedas.

##### **4.2.2.1.3. Resistência à Compressão (Pelota Crua)**

A resistência média à compressão das pelotas cruas é obtida pela compressão de pelo menos 10 pelotas entre placas de aço paralelas até sua quebra. A resistência à compressão é o valor médio obtido das pelotas testadas.

De forma simples, este teste é realizado em uma balança com indicação de peso por meio de um ponteiro. A pelota a ser testada é colocada sobre a placa inferior de aço da balança e é gradualmente comprimida com uma placa de aço enquanto a posição do ponteiro é observada. A quebra da pelota é indicada pela volta do ponteiro da balança. A carga de peso máxima observada corresponde à resistência a compressão medida em daN / pelota (1 daN = 1 kgf).

A **Figura 48**, a seguir, apresenta o equipamento utilizado para determinação da resistência à compressão das pelotas cruas.



**Figura 48** – Equipamento para determinação da resistência à compressão das pelotas cruas

#### **4.2.2.1.4. Resistência à Compressão (Pelota Seca)**

Este ensaio físico é semelhante ao realizado para as pelotas cruas descrito no item **4.2.2.1.3**, a única diferença é a secagem da pelota crua em estufa a uma temperatura de 105 – 110°C por 30 minutos.

#### 4.2.2.1.5. Resistência à Compressão (Pelota Queimada)

Este ensaio está de acordo com a norma ISO TC 102/SC 3 DP 4700.

No intuito de determinar a resistência à compressão, uma pelota é colocada entre duas placas de aço de maneira similar ao ensaio de compressão para as pelotas cruas e a carga de compressão é aumentada com o tempo. Pelotas com formatos mais esféricos são selecionadas para garantir o mesmo ponto de carga. Foram usadas 60 pelotas com granulometria entre 9,5 mm a 12,5 mm para cada teste. No caso das plantas de grelha móvel, o ensaio é realizado para as camadas de pelotas: superior, médio e inferior. A resistência média das 60 pelotas, individualmente, é então considerada como resistência a compressão.

A **Figura 49** apresenta a imagem do equipamento utilizado para este ensaio de resistência à compressão das pelotas queimadas. A compressão da pelota entre as placas de aço é feita manualmente com o auxílio de um macaco hidráulico e, assim que a pelota desintegra-se, a resistência à compressão é indicada no visor da balança.



**Figura 49** – Equipamento para determinação da resistência à compressão das pelotas queimadas

#### 4.2.2.1.6. Porosidade

Foi realizado nos laboratórios do **Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da PUC-Rio**.

O grau de porosidade (P) das pelotas é obtido através da seguinte equação:

$$P = \frac{D_{verd} - D_{apar}}{D_{verd}} * 100$$

A Densidade Verdadeira ( $D_{verd}$ ) foi medida por um picnômetro a hélio e para o cálculo da Densidade Aparente ( $D_{apar}$ ), o volume da pelota foi medido com o auxílio de um paquímetro e considerando que a pelota é uma esfera perfeita.

$$D_{apar} = \frac{Peso}{Volume} \quad e \quad Volume = \frac{4}{3}\pi r^3$$

#### 4.2.2.1.7. Granulometria

Para a análise da granulometria das pelotas queimadas, foi utilizada uma amostra representativa de 5 kg de pelotas e três peneiras, com as seguintes malhas: 16,0 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, que geram ao todo quatro faixas granulométricas:

- >16,0 mm,
- <16,0 mm e >12,5 mm;
- <12,5 mm e >9,5 mm, e
- <9,5 mm.

#### 4.2.2.1.8. Abrasão / Tamboramento

Simula o manuseio e transporte das pelotas queimadas. Este ensaio obtém resultados iguais aos obtidos pela norma ISO STANDARD 3271 1975 E, é realizado com uma amostra representativa de 1,5 kg de pelotas com tamanho superior a 6,3 mm, que são introduzidas em um tambor com 494 mm de diâmetro e 240 mm de comprimento.

Duas aletas internas de 240 x 30 x 5 mm, diametralmente opostas, são localizados no interior do tambor que é girado por 16 (dezesesseis) minutos a uma velocidade de 29 RPM. Posteriormente, as pelotas são peneiradas e as frações +6,3 mm e - 0,5 mm são verificadas. A percentagem das frações separadas em proporções ao peso alimentado é o valor do índice de tamboramento (+6,3 mm) e índice de abrasão (- 0,5 mm). Todos os valores devem ser checados pela repetição do teste.

A **Figura 50** apresenta o equipamento utilizado para determinação dos índices de abrasão e tamboramento.



**Figura 50** – Equipamento para ensaio de abrasão e tamboramento

#### 4.2.3. Redução

O ensaio de redução das pelotas queimadas foi realizado no laboratório do **Departamento de Engenharia dos Materiais da PUC – Rio**. As condições operacionais do ensaio, que tem como base a norma de redutibilidade ISO 7215, seguem descritas abaixo.

- Amostras: 3 pelotas em um cadinho de alumina
- Faixa granulométrica: 10,0 – 12,5 mm
- Tempo de Redução: 180 min
- Temperatura de Redução: 900°C
- Vazão dos Gases: 1,5 L/min
- Mistura dos Gases: 30% CO + 70% N<sub>2</sub>

- Pré-aquecimento do forno com  $N_2$  e cadinho com as 3 pelotas sendo lentamente introduzido até o centro do forno (tempo de 8 minutos).



**Figura 51** – Forno (COMBUSTOL) utilizado para o ensaio de redução

Após o ensaio de redução foram analisadas as seguintes qualidades metalúrgicas para as pelotas reduzidas:

- Grau de Redução (GR); e
- Grau de Metalização (GM).

Também foi realizada uma análise metalográfica das pelotas reduzidas.

#### **4.2.3.1. Grau de Redução**

O grau de redução (GR) é calculado a partir da fração de oxigênio removido ( $O_{2,i} - O_{2,t}$ ) sobre o oxigênio inicial ( $O_{2,i}$ ). O oxigênio removido é dado pela diferença de massa da pelota antes, seca em uma estufa a uma temperatura de 105 – 110°C por 30 minutos, e depois do ensaio de redução. O oxigênio inicial é dado pela soma da massa de oxigênio presente no  $Fe^{3+}$  ( $Fe_3O_4$ ) e no  $Fe^{2+}$  ( $FeO$ ), obtidos pela estequiometria de massa atômica do oxigênio nestas substâncias e a análise química dos percentuais de  $Fe_{TOTAL}$  e  $FeO$ , via titulação.

$$GR = \frac{(O_{2,i} - O_{2,t})}{O_{2,i}} * 100$$

#### 4.2.3.2. Grau de Metalização

O grau de metalização (GM) é a quantidade de ferro metálico sobre o ferro total da pelota reduzida. Após o ensaio de redutibilidade, uma das três pelotas reduzidas é analisada quimicamente, por titulação, o teor de ferro metálico ( $Fe_M$ ) e de ferro total ( $Fe_T$ ) presente.

$$GM = \frac{Fe_M}{Fe_T} * 100$$

#### 4.2.3.3. Análise Metalográfica

Foram feitas no **Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico (LMTT) do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio** com auxílio do microscópio Óptico Axiovert 25 Zeiss, micrografias das pelotas após o ensaio de redução com objetivo de apresentar a distribuição de ferro metálico.

A preparação das pelotas para realização desta análise se dá inicialmente pelo corte da pelota ao meio, onde uma das metades é embutida em resina e, depois de curada (24 horas), sofre etapas de lixamento e polimento preparando assim a pelota para obtenção de micrografias das pelotas reduzidas.