

A EXPERIÊNCIA DA INTRODUÇÃO DA FILTRAGEM DE PELLET FEED EM CARAJÁS¹

Diógenes De Girolamo²

Marcos Goossens³

RESUMO

O dimensionamento de instalações de filtragem através de testes de laboratório, ou seja “leaf-test” já foi bastante estudado por diversos autores e principalmente por fabricantes de equipamentos e é comprovadamente eficiente (1; 2; 3; 4).

As peculiaridades do minério de ferro de Carajás propiciaram uma simplificação da teoria acima, através da possibilidade de plotagem direta de uma curva “Taxa unitária de filtragem x Umidade de torta”, o que facilita em muito o estudo econômico do processo.

Este procedimento pode ser adotado, com algumas ressalvas, para outros tipos de minérios.

O trabalho se propõe a apresentar o modelo utilizado para o dimensionamento da unidade piloto de filtragem de Carajás para em seguida apresentar alguns dados obtidos em escala industrial.

Palavras Chave: Filtragem, Pellet Feed, “leaf-test”

¹Trabalho a ser apresentado ao I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, Ouro Preto - MG; 14 a 17 de outubro de 1996.

²Engenheiro de Minas, CIA VALE DO RIO DOCE / SUMIC

³Engenheiro de Minas, CIA VALE DO RIO DOCE / SUMIC

1 - INTRODUÇÃO

O processo de beneficiamento de minério de ferro na SUMIC contemplava apenas a britagem e classificação a úmido, sendo que os finos (Aprox. 20% do ROM), representados pelo overflow do classificador espiral, eram descartados para uma barragem de rejeitos^(6;7).

O aproveitamento destes finos foi descartado no início do projeto, devido à falta de mercado, que resultava da qualidade final do produto. Quando do avanço da lavra, foram diminuídos os teores do principal contaminante, o fósforo, teve início um novo estudo de aproveitamento, denominado PROJETO PELLET FEED CARAJÁS.

Este estudo foi considerado imperativo não só do ponto de vista econômico e ambiental mas também como uma grande oportunidade para a diversificação de produtos do Sistema Norte, adequando-o a um cenário de mudanças nos processos siderúrgicos onde ocorre um aumento da demanda mundial por pelotas, principalmente no mercado de redução direta.

Sendo assim, o estudo iniciou-se a partir do underflow das seis baterias de ciclonagem existente no prédio do peneiramento secundário que a princípio destinavam-se a aumentar a recuperação.

Este trabalho apresenta alguns resultados obtidos na introdução da filtragem industrial de Pellet Feed em Carajás, bem como a metodologia adotada para seu dimensionamento.

2 - METODOLOGIA DE CÁLCULO

2.1 Dimensionamento tradicional

A taxa de filtração fornecida por um filtro é dada pela equação:

$$TF = W \times 60 \times 0,8 / \text{Tempo total de ciclo, onde:} \quad (1)$$

W = Peso seco de torta por metro quadrado de área filtrante (kg/m²);

60 = Fator de transformação minutos para horas;

0,8 = Fator de Scale-Up sugerido pela EIMCO (a DOOR-OLIVER sugere usar 0,65);

Tempo total de ciclo = tempo necessário para o filtro completar uma rotação (em min).

Na prática, para determinar-se W e o tempo total de ciclo, são realizados ensaios de filtração em escala de laboratório em um conjunto contendo um filtro com 0,1 pé² de área filtrante e uma bomba de vácuo de laboratório, com dispositivo para medir a depressão do vácuo e a vazão do ar, conhecido como "leaf-test". Deve-se agitar manualmente a polpa de modo a mantê-la em suspensão⁽⁵⁾.

Na execução dos ensaios, vários itens devem ser determinados, como:

- Concentração de sólidos;
- Distribuição granulométrica;
- Tecido utilizado;
- Depressão do vácuo (Formação e Secagem);
- Peso de torta úmida e espessura;
- Umidade final da torta;
- Volume de filtrado;
- Concentração de sólidos no filtrado;
- Tempo de formação;
- Tempo de secagem;
- Vazão de ar;
- Observações sobre a condição de descarga.

Todos estes dados são agrupados em uma tabela padrão conforme apresentado na Tabela 1. Nessa tabela existe também o cálculo da taxa unitária, feito da maneira que será apresentada no item 2.3.

Durante os primeiros testes, deve-se manter constante o tempo de secagem, variando-se o tempo de formação. Com isso, pode-se obter a primeira informação desejada, que é fornecida por um gráfico W em função da espessura de torta, conforme apresentado no Gráfico 1. Este dado é utilizado diretamente na equação 1.

Além disso, é possível plotar o Gráfico 2, W em função do tempo de formação. Conforme mostrado no anexo, plotando-se os pontos em um gráfico log-log, obtém-se uma reta.

Posteriormente, deve-se fixar um tempo de formação (que forneça uma espessura adequada) e variar o tempo de secagem. Através destes ensaios pode-se plotar o Gráfico 3, umidade em função do quociente Tempo de secagem / W , denominado fator de correlação F_c , que no fundo é uma simplificação do fator F_a apresentado por alguns autores^(1; 2; 3; 4). Através do mesmo pode-se determinar qual é a menor umidade de torta que se pode atingir para aquelas condições de espessura de torta e vácuo de secagem⁽⁸⁾.

Uma vez terminados os testes e montados os gráficos, o dimensionamento do filtros de discos se dá diretamente do valores obtidos em laboratório da seguinte forma:

- a. Escolhe-se a espessura de torta com que se quer trabalhar;
- b. A partir do Gráfico 1, obtém-se o peso seco de torta por metro quadrado (W);
- c. A partir do Gráfico 2, obtém-se o tempo de formação (em segundos) necessário para formar uma torta com peso W ;
- d. A partir do Gráfico 3, entrando com o valor de umidade que se quer atingir, determina-se o fator de correlação F_c . Uma vez que o fator de correlação é igual ao tempo de secagem dividido pelo peso da torta/ m^2 (W), para uma dada espessura (e portanto para um dado W), pode-se calcular o tempo de secagem necessário;
- e. De posse dos tempos de formação e secagem, deve-se verificar qual é denominado crítico para o ciclo. Isto é feito dividindo-se estes tempos pela % do ciclo total possível de ser fornecida a esta etapa. No caso de Carajás, adotou-se 28% do ciclo para formação e 45% do ciclo para a secagem. O quociente que fornecer maior valor será determinado tempo de ciclo necessário;
- f. A partir do valor de tempo de ciclo obtido em e e do peso de torta por metro quadrado (W) obtido em b , pode-se calcular diretamente a taxa de filtragem em Kg/hm^2 através da equação 1, sendo a umidade obtida no item d .

2.2 Exemplo de dimensionamento:

- a. Adota-se a espessura de trabalho igual a 12,5 mm;
- b. A partir do Gráfico 1, verifica-se que o peso seco de torta/m² para esta espessura é igual a 25,5 kg/m² (segundo equação de regressão);
- c. A partir do Gráfico 2, verifica-se que o tempo de formação necessário é de 5,2 s;
- d. A partir do Gráfico 3, verifica-se que para a umidade desejada (10 %), o fator de correlação necessário é igual a 1. Logo, como o tempo de secagem necessário é igual a 25,5 s;
- e. Tempo de ciclo baseado na formação = $5,2 / 0,28 = 18,57$ s e
Tempo de ciclo baseado na secagem = $25,5 / 0,45 = 56,66$ s .
- f. O tempo de ciclo será então determinado pela secagem = $56,66 / 60 = 0,94$ min.
A taxa de filtração a ser obtida é $TF = 25,5 \times 60 \times 0,8 / 0,94 = 1302$ kg/hm².
(Este valor só é válido para a espessura de 12,5 mm, umidade de torta de 10 %, e vácuo de secagem igual ao do teste (0,66 atm).
- g. Para produzir-se aproximadamente 1.000.000 t / ano (4700 h/ano) necessitamos de 163.4 m², desta forma optou-se por comprar dois filtros de discos modelo 8'x 10"x 10 discos, de fabricação Miningtech, com 100 m² de área útil filtrante cada.
- Caso se deseje saber a taxa de filtração para outra umidade deve-se recomençar os cálculos a partir do item *d*.
- Caso se deseje saber a taxa de filtração para outra espessura deve-se recomençar os cálculos a partir do item *a*.
- Caso se deseje saber a taxa de filtração para outro valor de vácuo, deve-se refazer todos os ensaios de laboratório.

2.3 Dimensionamento Carajás

A teoria acima pode ser simplificada através da plotagem direta de uma curva “taxa unitária de filtração x umidade da torta”, o que além de simplificar o procedimento acima, facilita em muito o estudo econômico do processo.

Verificou-se que o pellet feed Carajás necessita de um tempo de formação que é geralmente muito pequeno, isto é, forma torta muito rapidamente ($T_f = 2$ a 4 s).

Desta forma, pode-se afirmar que, neste caso, sempre o tempo de secagem será o tempo crítico do ciclo, determinando o tempo total de ciclo que se fará necessário.

A equação (1) pode ter seu denominador mudado de Tempo total de ciclo por tempo de secagem dividido por 0,45 (% do ciclo destinado à secagem, para filtro vertical de discos).

$$TF = W \times 60 \times 0,8 / \text{Tempo de secagem} / 0,45 \quad (2)$$

Como $W / \text{Tempo de secagem}$ é igual a $1 / \text{Fator de correlação}$, podemos substituir novamente na equação (2) e teremos:

$$TF = 60 \times 0,8 \times 0,45 / \text{Fator de correlação} \quad (3)$$

É possível então plotar-se curvas Taxa unitária de filtração x Umidade de torta, conforme apresentado no Gráfico 4.

Estas curvas são válidas para determinada espessura e mesmo vácuo utilizado no teste de laboratório.

Este tipo de gráfico apresenta três grandes vantagens:

- a. elimina o problema de recálculo quando se deseja saber a taxa de filtração para outra determinada umidade de torta;
- b. é possível plotar estas curvas para várias espessuras de torta, formando-se uma família de curvas, o que elimina o problema de recálculo quando se deseja saber a taxa de filtração para outras espessuras;
- c. permite realizar mais facilmente uma análise econômica de um sistema filtração-secagem, determinando-se a umidade que otimiza o sistema, isto é aquela umidade em que é melhor parar de filtrar e começar a secagem.

Esta análise é realizada, plotando-se esta curva (transformada para custo de filtragem) juntamente com a curva de custo de secagem, conforme apresentado no item 2.4.

A utilização da curva “Taxa de filtragem x Umidade” também pode ser feita em casos onde o tempo de formação é sempre crítico, sendo que neste caso se poderia utilizar por exemplo 0,28 em lugar de 0,45 na equação (3), para representar a porcentagem do tempo total de ciclo destinada à formação da torta.

Com a utilização da função condicional (SE ou IF) em planilhas de cálculo, pode-se usar o método indistintamente, mesmo para minérios em que ambos os tempos podem ser determinantes, dependendo da umidade considerada.

No Gráfico 5⁽⁶⁾ são apresentadas as curvas obtidas por este método para diversos produtos, calculadas segundo esse método, bem como a curva obtida no processo industrial.

O Gráfico 6⁽⁶⁾ apresenta as curvas granulométricas de cada um desses produtos, que supostamente são as responsáveis pelo comportamento diferenciado entre os mesmos. A título apenas de ilustração, a análise química de dois desses produtos é a seguinte:

elemento	PFCJ Atual	Conc. Gravítico
Fe (%)	66.00	67.27
SiO ₂ (%)	0.65	0.57
P (%)	0.045	0.033
Al ₂ O ₃ (%)	1.70	0.82
Mn (%)	0.60	0.49
PPC (%)	2.00	1.27

2.4 Exemplo de comparação filtragem/secagem:

O custo de filtragem é proporcional à taxa unitária de filtragem segundo equação:

$$\text{Custo filtragem (US\$/t)} = 0,36/\text{taxa unitária} \quad (4)$$

(determinado a partir de dados operacionais)

Por sua vez, a taxa unitária de filtragem é função da umidade escolhida, segundo equação (5):

$$\text{Taxa de filtragem (t/hm}^2\text{)} = 0,0004 e^{0,812 \times \text{umidade}} \quad (\text{coef. correlação} = 0,99)$$

(determinada a partir de dados experimentais, para o pellet feed produzido por ciclones de 4", com espessura de torta = 12.5 mm) (5)

Tabelando esses valores para diversas umidades, temos:

umidade final (%)	área unitária (t/h/m ²)	custo total de filtragem (US\$/t)	custo de redução em 1% (US\$/t)
12	6.8	0.05	-
11	3.0	0.12	0.07
10	1.3	0.27	0.15
9	0.6	0.60	0.34
8	0.3	1.36	0.76
7	0.1	3.06	1.70

Para a secagem temos:

$$C_{\text{sec}} = M \times \Delta\text{Umidade} \times C_e \times (1/P_c) \times P, \text{ onde:} \quad (6)$$

C_{sec} = Custo energético da secagem (US\$/h);

M = massa de torta a ser seca (kg/h);

$\Delta\text{Umidade}$ = redução desejada de umidade(%);

C_e = Consumo energético (kCal / kg H₂O);

P_c = Poder calorífico (kCal / kg óleo);

P = Preço em US\$ por kg óleo (US\$/ kg).

Considerando $M = 1000 \text{ kg/h}$; $\Delta\text{umidade} = 1 \%$; $C_e = 1000 \text{ kgH}_2\text{O}$ (dado médio para secadores); $P_c = 10000 \text{ Kcal/kg óleo}$; e $P = 0.15 \text{ US\$/kg}$, temos:

$$1000 \cdot .01 \cdot 1000 \cdot (1/10000) \cdot 0.15 = 0.00015 \text{ US\$/kg minério} = \text{US\$ } 0.15 / \text{t minério.}$$

Supondo que o custo energético representasse 70% dos custos operacionais, teríamos um custo total de secagem igual a $0.15/0.7 = \text{US\$ } 0.21 / \text{t minério}$

Comparando esse valor com os valores tabelados para filtração, concluímos que a partir de umidades abaixo de 9%, seria mais econômico secar o minério que prosseguir na filtração do mesmo.

Logicamente na decisão deve ser conduzido todo um estudo de viabilidade que considere além dos custos operacionais, os custos de capital decorrentes do investimento.

3 - CONCLUSÕES

O método de cálculo proposto pode ser aplicado com vantagens a um número grande de minérios. O gráfico Taxa Unitária x Umidade permite ter uma visão mais clara do processo na determinação do ponto econômico de filtração.

Deve ser ressaltado que este método não pode ser utilizado quando F_a não puder ser simplificado por F_c . Isto ocorre quando existe variação de vácuo, ou seja em filtração descontínua, ou quando a vazão de ar for maior que 20 cfm/sq ft (pés cúbicos por minuto / pé quadrado de filtro).⁽⁴⁾

Em especial, quando se tem uma secagem subsequente à filtração, o ponto econômico é determinado com maior precisão.

Os Gráficos 5 e 6 mostram a grande influência da granulometria na umidade final do produto, em especial a parte fina da distribuição granulométrica é muito influente.

O erro verificado entre a curva obtida para o produto atual no leaf-test e a operação industrial do filtro (Gráfico 5) deve-se, entre outros, ao fato de que esse filtro possui apenas 32% de seu ciclo destinado à secagem, ao contrário dos 45% considerados no cálculo do leaf-test. Fazendo-se essa correção, as curvas seriam mais próximas.

TABELA 1 - Resultados dos teste de filtragem em escala de laboratório

TESTE : Filtragem a vácuo
 AMOSTRA : Pellet Feed - Krebs 6°

MEIO FILTRANTE : Remae 1142 - T
 FILTRO : Vertical

% DE SÓL: 65 %
 DATA : 13/03/95

Número Teste	Vácuo		Tempo de Filtragem		Cake				Filtrado			% Sólido Calculada	W Kg/m2	FC	Taxa de Filtragem t/hm2
	Vácuo Form. (atm)	Vácuo Secagem (atm)	Form. (seg)	Secagem (seg)	Espessura (mm)	P. úmido (g)	P. seco (g)	% H2O	Peso Filtrado (g)	P. seco (g)	% Sólido				
1	0,20	0,60	4	60	9	219,0	199,4	8,95	159,1	0,25	0,16	52,7	21,464	2,80	0,46
2	0,20	0,60	5	60	12,5	271,7	246,3	9,35	159,1	0,25	0,16	57,2	26,512	2,26	0,57
3	0,20	0,62	6	60	15	285,2	258,6	9,33	159,1	0,25	0,16	58,2	27,836	2,16	0,60
4	0,20	0,63	8	60	17	338,9	306,9	9,44	159,1	0,25	0,16	61,6	33,036	1,82	0,71
5	0,20	0,66	10	60	20	398,5	359,8	9,71	159,1	0,25	0,16	64,5	38,730	1,55	0,84
6	0,20	0,68	12	60	22	446,1	400,7	10,18	159,1	0,25	0,16	66,2	43,132	1,39	0,93
7	0,20	0,71	14	60	24,5	503,9	451,4	10,42	159,1	0,25	0,16	68,1	48,590	1,23	1,05
8	0,20	0,72	5	15	12,5	276,5	246,6	10,81	108,2	0,16	0,15	64,1	26,545	0,57	2,29
9	0,20	0,70	5	15	12,5	257,7	230,2	10,67	103,8	0,13	0,13	63,7	24,779	0,61	2,14
10	0,20	0,68	5	30	12,5	282,2	254,7	9,74	113,0	0,15	0,13	64,4	27,417	1,09	1,18
11	0,20	0,68	5	30	12,5	275,9	249,1	9,71	110,7	0,17	0,15	64,4	26,814	1,12	1,16
12	0,20	0,66	5	60	12,5	263,5	240,2	8,84	115,2	0,16	0,14	63,4	25,856	2,32	0,56
13	0,20	0,66	5	60	12,5	277,6	253,3	8,75	117,2	0,17	0,15	64,2	27,266	2,20	0,59
14	0,20	0,64	5	120	12,5	272,1	250,0	8,12	113,8	0,15	0,13	64,8	26,911	4,46	0,29
15	0,20	0,66	5	120	12,5	267,6	246,3	7,96	113,9	0,16	0,14	64,6	26,512	4,53	0,29
16	0,20	0,66	5	240	12,5	256,3	237,3	7,41	107,7	0,22	0,20	65,2	25,544	9,40	0,14
17	0,20	0,65	5	240	12,5	269,1	249,1	7,43	108,8	0,23	0,21	65,9	26,814	8,95	0,14

TESTE : Filtragem a vácuo
 AMOSTRA : Pellet Feed - Krebs 6°

MEIO FILTRANTE : Remae 1142 - T
 FILTRO : Vertical

% DE SÓL: 65 %
 DATA : 13/03/95

Número Teste	Vácuo		Tempo de Filtragem		Cake				Filtrado			% Sólido Calculada	W Kg/m2	FC	Taxa de Filtragem t/hm2
	Vácuo Form. (atm)	Vácuo Secagem (atm)	Form. (seg)	Secagem (seg)	Espessura (mm)	P. úmido (g)	P. seco (g)	% H2O	Peso Filtrado (g)	P. seco (g)	% Sólido				
1	0,20	0,61	4	60	9,5	194,0	176,7	8,92	152,7	0,30	0,20	51,0	19,020	3,15	0,41
2	0,20	0,66	5	60	12,5	281,5	255,6	9,20	152,7	0,30	0,20	58,9	27,513	2,18	0,59
3	0,20	0,66	6	60	15	293,9	266,8	9,22	152,7	0,30	0,20	59,7	28,719	2,09	0,62
4	0,20	0,68	8	60	17	308,3	279,6	9,31	152,7	0,30	0,20	60,7	30,097	1,99	0,65
5	0,20	0,70	10	60	20	392,5	355,1	9,53	152,7	0,30	0,20	65,1	38,224	1,57	0,83
6	0,20	0,73	12	60	22,5	459,1	412,4	10,17	152,7	0,30	0,20	67,4	44,392	1,35	0,96
7	0,20	0,75	14	60	25	500,5	448,6	10,37	152,7	0,30	0,20	68,7	48,288	1,24	1,04
8	0,20	0,78	10	15	20	418,3	368,0	12,02	158,8	0,21	0,13	63,8	39,612	0,38	3,42
9	0,20	0,77	10	15	20	444,7	390,7	12,14	163,6	0,26	0,16	64,2	42,056	0,36	3,63
10	0,20	0,75	10	30	20	448,8	399,6	10,96	172,6	0,28	0,16	64,3	43,014	0,70	1,86
11	0,20	0,75	10	30	20	439,1	390,2	11,14	164,0	0,27	0,16	64,7	42,002	0,71	1,81
12	0,20	0,68	10	60	20	428,6	385,6	10,03	174,8	0,25	0,14	63,9	41,507	1,45	0,90
13	0,20	0,68	10	60	20	417,7	376,4	9,89	163,8	0,23	0,14	64,7	40,517	1,48	0,88
14	0,20	0,70	10	120	20	436,9	397,4	9,04	175,5	0,20	0,11	64,9	42,777	2,81	0,46
15	0,20	0,70	10	120	20	419,4	381,4	9,06	168,2	0,22	0,13	64,9	41,055	2,92	0,44
16	0,20	0,70	10	240	20	418,2	383,1	8,39	178,1	0,27	0,15	64,2	41,238	5,82	0,22
17	0,20	0,70	10	240	20	442,9	406,0	8,33	178,3	0,25	0,14	65,4	43,703	5,49	0,24

Gráfico 1: Peso seco de torta / m² X Espessura de torta

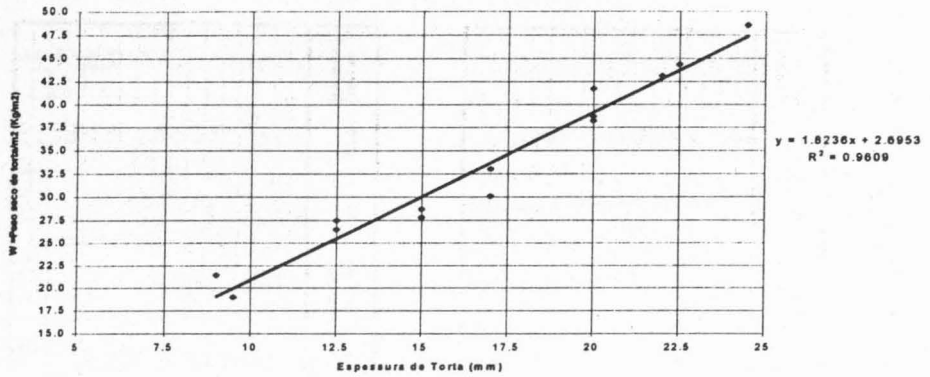


Gráfico 2: Peso seco de torta X tempo de formação

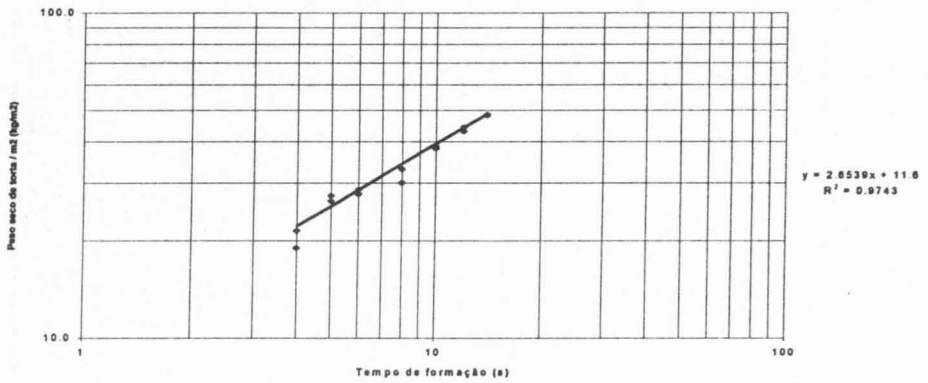


Gráfico 3: Umidade X Fator de Correlação

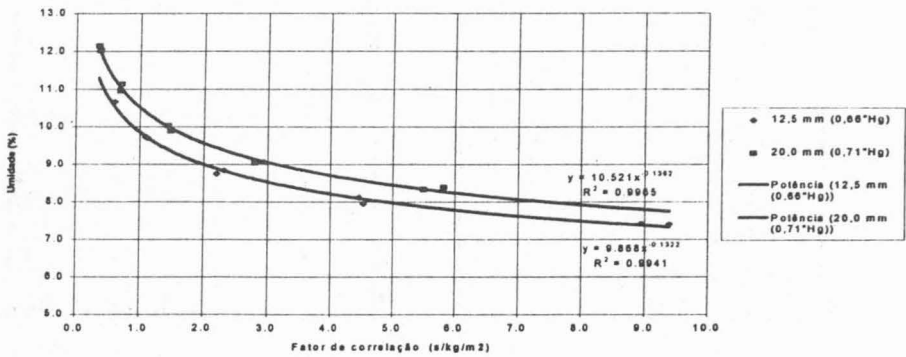


Gráfico 4: Taxa unitária de filtração X Umidade

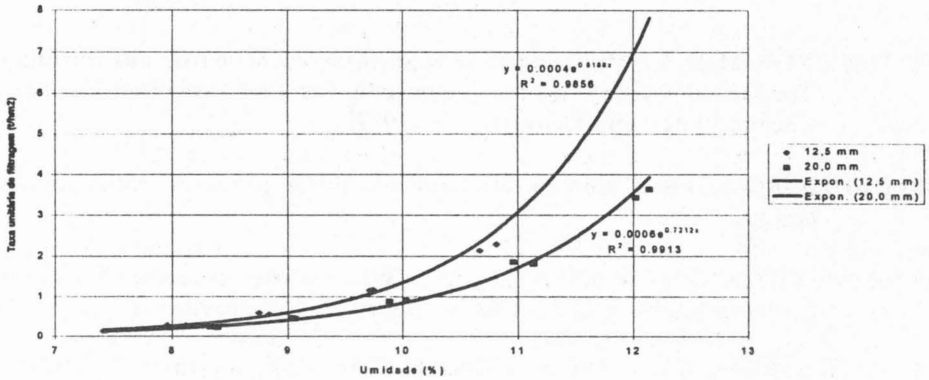


Gráfico 5: Filtração de PFCJ - Resultados

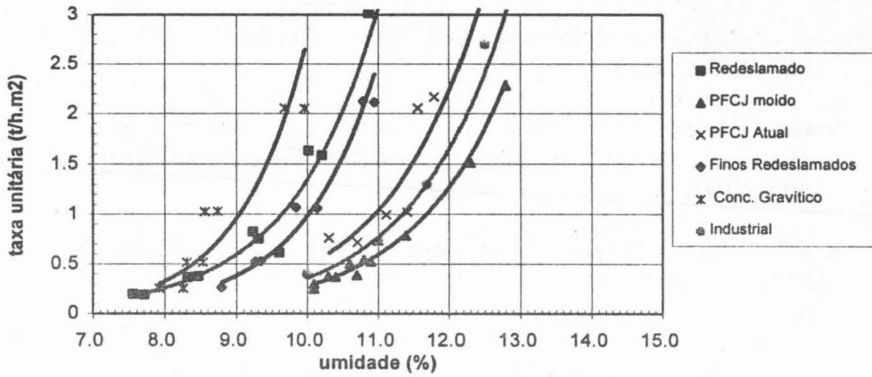
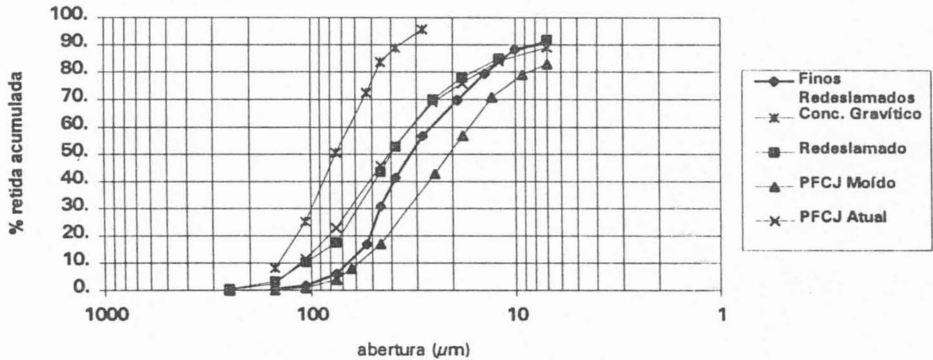


Gráfico 6: Curvas Granulométricas Produtos



BIBLIOGRAFIA

- (1) DAHLSTROM, D.A.; "**Practical use of applied theory of continuous filtration**", The second Pacific Chemical Engineering Congress, American Institute of Chemical Engineers, Denver, agosto 1977;
- (2) DAHLSTROM, D.A. ; "**How to select and size filters**"; Mineral processing plant design;
- (3) EMMETT, R.C. e SILVERBLATT, C.E. ; "**When to use continuous filtration**", Chemical Engineering Progress, vol 70, n. 12, dezembro 1974;
- (4) DAHLSTROM, D.A. ; "**SME - Mineral Processing Handbook**"; section 9, chapter 3 - Filtration; American Institute of mining, metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc.; New York, 1985.
- (5) DOOR - OLIVER; "**Filtration leaf test procedure**"; DOOR-OLIVER INCORPORATED, agosto 1972;
- (6) CIA VALE DO RIO DOCE - Relatórios internos de desenvolvimento do Projeto Pellet Feed; Departamento de Informação e Desenvolvimento - DEPIB, 1994 e 1995;
- (7) GOOSSENS, M. ; "**Projeto Pellet Feed**", Anais do segundo seminário de tecnologia mineral da CIA VALE DO RIO DOCE, Belo Horizonte - MG, 1995;
- (8) BERALDO, J. L , Notas de aula, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, 1986.

THE EXPERIENCY OF THE INTRODUCTION OF FILTRATION OPERATION OF PELLET FEED IN CARAJÁS PLANT

ABSTRACT

Sizing of filtration instalations by leaf-tests have been studied by several researchers and mainly by equipment manufacturers and is proved efficient.

Some particular characteristics of Carajás iron ore provided the opportunity of making a simplification in this theory by the possibility of plotting a "Filtration rate x Discharge cake moisture" curve thas makes easy the economical study of the process.

This procedure can be adopted, with care, to other types of ore.

This work inteds to present the model that was used to size the filtration pilot plant of Carajás and then show some industrial results.

Key-words: Filtration, Pellet Feed, Leaf Test

