



# SIMULAÇÃO DE ARRASTE EÓLICO DURANTE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE MINÉRIO DE FERRO<sup>1</sup>

Henrique Akira Ishii<sup>2</sup>  
 Laurindo de Salles Leal Filho<sup>3</sup>  
 Ricardo Cabral de Azevedo<sup>4</sup>  
 Thiago Cesar de Souza Pinto<sup>5</sup>  
 Marcos de Abreu Lima<sup>6</sup>  
 Sérgio Melo Machado<sup>7</sup>

## Resumo

Geração e dispersão de poeira a partir de concentrado de minério de ferro durante o transporte por via ferroviária constituem um problema ambiental que demanda estudos para minimização. Neste trabalho, a geração e a dispersão foram estudadas, em função do teor de umidade, em três tipos de concentrado de minério de ferro (Brucutu, Cauê e Fábrica Nova), com a utilização de modelo de vagão (escala 1:50) em unidade experimental de túnel de vento (comprimento = 6 m; diâmetro = 0,5 m; ventilador axial com motor de 10 HP; velocidade do vento de até 27,7 m/s). Baseando-se nos resultados de cada material em termos de umidade natural, comportamento da água presente nos minérios (água adsorvida, água capilar e água livre), granulometria e forma das partículas e composição mineralógica das amostras, desenvolveu-se um modelo semi-empírico que relaciona a geração de pó com as características do material.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Poeira; Transporte ferroviário.

## SIMULATION OF DUST GENERATION BY WIND DURING RAILWAY TRANSPORTATION OF IRON ORE

### Abstract

Dust generation and emission from iron ore concentrate during railway transportation are an environmental concern requiring major research for minimization. Three iron ore concentrates (Brucutu, Cauê and Fábrica Nova) were used to study the dust generation and emission, varying the moisture content. The experiments were performed in an experimental wind tunnel equipment (length = 6 m; diameter = 0.5 m; axial fan with 10 HP motor; wind speed up to 27.7 m/s) using a 1:50 scale model. A semi-empirical model relating dust generation and material characteristics was determined based on the results from each material in terms of natural moisture content, water behavior (adsorbed, capillary and free water), particle size and morphology and mineralogical composition.

**Key words:** Iron ore, Dust, Railway transportation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Metalurgista, M.Sc, Ph.D. Pesquisador no Depto. Eng. de Minas e de Petróleo da Esc. Politécnica da USP.

<sup>3</sup> Eng. Minas, M.Sc, Ph.D. Prof. Titular, Depto. Eng. de Minas e de Petróleo da Esc. Politécnica da USP.

<sup>4</sup> Eng. Minas, M.Sc, Ph.D. Prof., Depto. de Eng. Minas e de Petróleo da Esc. Politécnica da USP.

<sup>5</sup> Eng. Químico, M.Sc. Professor Adjunto da Universidade Santa Cecília. Doutorando no Depto. de Eng. de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

<sup>6</sup> Eng. Químico. Vale – Depto. de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

<sup>7</sup> Eng. Ferroviário. Vale – Depto. de Operações EFVM

8

## 1 INTRODUÇÃO

A geração de poeira (material particulado) é um problema que afeta os processos de mineração em geral.<sup>(1)</sup> O material particulado pode ser carregado para a atmosfera, dependendo da sua origem, características físicas e condições ambientais,<sup>(2)</sup> causando efeitos não somente na produtividade e segurança, como também na saúde humana, além de problemas ambientais.<sup>(1,3)</sup>

Durante o transporte nas etapas de processamento mineral, a maior parte do material particulado permanece aderida à superfície do restante do material, de dimensões maiores, de acordo com Cheng e Zukovich.<sup>(4)</sup> O transporte do minério de ferro por via ferroviária, por sua vez, apresenta um componente adicional, representado pelo arraste eólico, pelo qual o material particulado é retirado da carga e carregado para a atmosfera pela ação do vento.

Neste caso, nem todos os métodos de controle de material particulado utilizáveis no local de extração podem ser aplicados, devido às características do transporte em si, como o espaço disponível nos vagões, disposição e movimentação da carga e efeito do meio externo durante o deslocamento ao longo da ferrovia. Embora a instalação de tampa em cada vagão de carga represente a solução ideal para conter a geração de poeira, os custos envolvidos em tal instalação e na manutenção, além das alterações operacionais envolvidas, acarretariam um aumento significativo ao preço do material transportado.<sup>(5)</sup>

A adição de água ou outros materiais que aumentem o teor de umidade superficial é um dos métodos que diminuem a geração de material particulado, ao aumentar a coesão entre o material particulado e o restante do material,<sup>(4,6,7)</sup> sendo aplicável ao caso de minério transportado por via ferroviária.

A água pode atuar como agente supressor de poeira, por meio dos seguintes mecanismos:<sup>(4)</sup>

- molhar o material; e
- capturar o material particulado gerado e já carregado para a atmosfera.

Na prática, a captura do material particulado é muito menos eficiente do que a ação de molhamento da água.<sup>(2,4)</sup>

A água presente em uma determinada carga pode ser classificada em três tipos:

- água adsorvida;
- água gravitacional ou livre; e
- água capilar.

A água adsorvida forma uma camada recobrendo as partículas constituintes da carga. O potencial atrativo causa pressões tais que esta camada de água adsorvida encontra-se firmemente unida ao material sólido, sendo denominada de camada solidificada, originando a coesão verdadeira. A água gravitacional, ou livre, move-se sob a ação da força da gravidade ou outras forças externas aplicadas. No caso de ação somente da gravidade, a água flui naturalmente para baixo. A água capilar, por sua vez, é responsável pela coesão aparente, ou coesão, devido à ação da tensão superficial ao longo da linha de contato entre a partícula sólida e o filme de água. Desta maneira, como a água adsorvida pode ser considerada uma extensão da fase sólida e a água livre é eliminada naturalmente, é a presença da água capilar que mantém a carga unida, impedindo que o material particulado seja arrastado para a atmosfera.<sup>(6-9)</sup>

Na Figura 1 ilustra-se uma curva típica de peso específico aparente ( $\rho$ ) em função da umidade ( $H$ ), indicando-se os limites dos intervalos de umidade em que se encontram cada tipo de água.

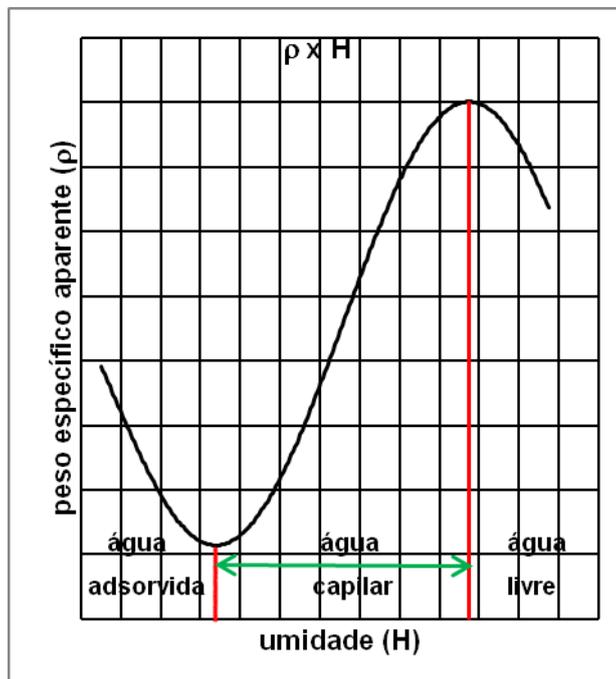


Figura 1 – Curva típica  $\rho \times H$ .

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado no LFQI – Laboratório de Fenômenos de Transporte e Química de Interfaces do Depto. de Eng. de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, em três tipos de concentrado de minério de ferro fornecidos pela Vale, Brucutu (PXBR), Cauê (PXCA) e Fábrica Nova (PXFN). A umidade natural, a distribuição granulométrica, o fator de esfericidade e o peso específico aparente em função da umidade de cada material foram determinados experimentalmente nas seguintes condições:

- *Umidade natural*: secagem de amostra de 500 g em estufa a 100 °C, até obtenção de massa constante;
- *Distribuição granulométrica*: peneiramento manual a úmido de amostra de 500 g, em peneiras de 0,150 mm (100#), 0,105 mm (150#) e 0,037 mm (400#);
- *Fator de esfericidade*: este foi o critério adotado para levar em consideração a morfologia das partículas de minério de ferro no modelamento da geração de poeira. A determinação foi obtida em equipamento específico para tal fim, aplicando-se a lei de Darcy em percolação de ar através de meio poroso em regime laminar;
- *Peso específico aparente em função do teor de umidade*: amostras secas de 1.000 g ou de 1.500 g de cada um dos três lotes de concentrado foram utilizadas nos ensaios para determinação do peso específico aparente ( $\rho$ ) em função do teor de umidade ( $H$ ). Para cada amostra, variou-se o teor de umidade controlando-se a adição de água ao concentrado, determinando-se a densidade aparente correspondente. Também foi adotado o procedimento de, a partir de um teor

adicionado de umidade, secar o material em estufa para perda parcial do conteúdo de água, para a determinação da densidade aparente correspondente.

Informações a respeito da composição mineralógica e hábito das partículas dos minerais portadores de ferro foram fornecidas pela Vale, que caracteriza regularmente o hábito das partículas que compõem os concentrados de minério de ferro que produz, principalmente no que tange ao mineral hematita, que pode se apresentar tanto na forma de placas (tipo especular ou lamelar) como em formas irregulares e alongadas, como o tipo granular ou sinuoso. A forma influencia no arrasto das partículas por um fluido, seja ele o ar ou a água:

- partículas de hábito placoide (tipos especular e lamelar da hematita) se mostram mais susceptíveis ao transporte eólico; e
- as partículas que exibem formas não-placoides são menos susceptíveis ao transporte eólico.

A geração de poeira foi estudada em unidade experimental de túnel de vento (Figura 2) adquirida pela Vale junto à empresa THX Eng. Consultoria. As características do equipamento são apresentadas na Tabela 1:

**Tabela 1** – Informações sobre a unidade experimental de túnel de vento

Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Potência do motor (ventilador axial)	Velocidade (m/s)	
			Máxima	Faixa de trabalho
6	0,5	10 HP (7,5 kW)	27,7 (100 km/h)	11,1 m/s a 19,4 m/s (40 km/h a 70 km/h)



**Figura 2** – unidade experimental de túnel de vento da THX.

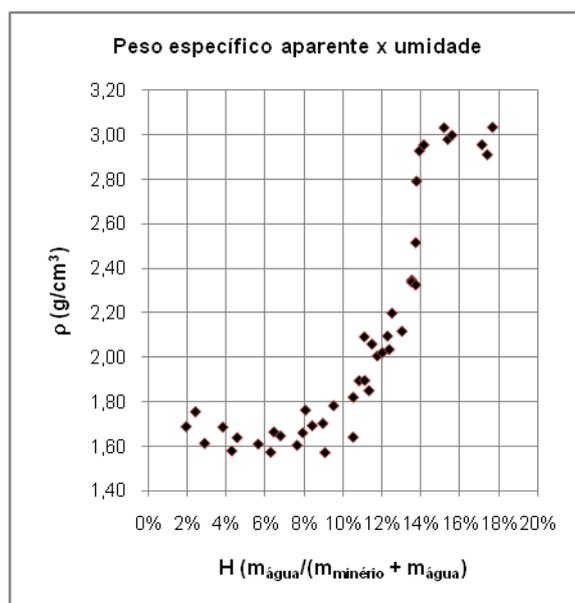
Três teores de umidade foram utilizados para cada tipo de concentrado: umidade natural, 11% e 15% (ambos na faixa de água capilar: próximo ao limite inferior e superior, respectivamente). A carga de minério com estes valores de umidade foi colocada em modelo de vagão em escala 1:50 (comprimento = 17,2 cm; largura = 4,8 cm; altura total = 4,9 cm), determinando-se a perda de massa em função do tempo em três velocidades: 11,1 m/s (40 km/h), 16,7 m/s (60 km/h) e 19,4 m/s (70 km/h). Em determinados tempos, o modelo era retirado do túnel, para mensuração da massa, calculando-se a variação em relação à massa inicial. Em seguida, o vagão era recolocado no túnel, até se chegar ao tempo total de ensaio estipulado (90 min).

### 3 RESULTADOS

O peso específico aparente ( $\rho$ ) de um leito de partículas comporta-se com relação ao seu teor de umidade ( $H$ ) conforme ilustram as Figuras 3-5. Nessas curvas  $\rho \times H$ , destacam-se os três tipos de água presentes: água adsorvida, água capilar e água livre. Utilizando-se as curvas representadas nas Figuras 3-5 e a umidade natural dos concentrados de minério de ferro da Vale (PXBR, PXCA e PXFN), são obtidos os resultados da Tabela 2.

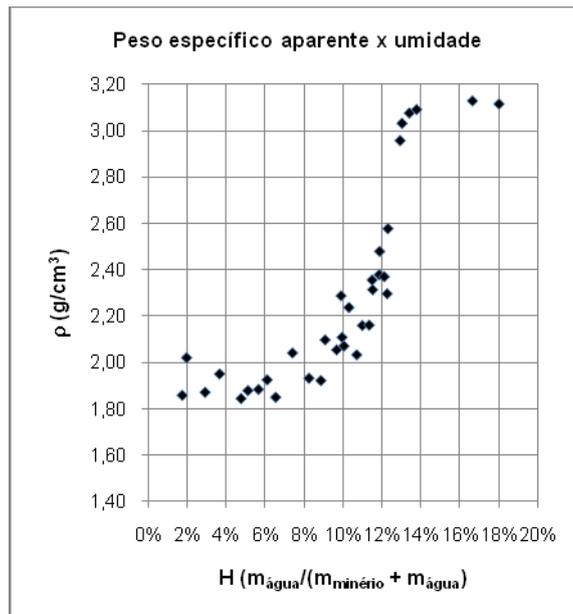
**Tabela 2** – Comportamento da água presente em leitos de concentrado de minério de ferro

Concentrado	Umidade natural (%)	Intervalos de umidade (H)		
		Água adsorvida	Água capilar	Água livre
PXBR	6,1	$H < 7\%$	$7\% < H < 17\%$	$H > 17\%$
PXCA	7,3	$H < 6\%$	$6\% < H < 17\%$	$H > 17\%$
PXFN	8,3	$H < 7\%$	$7\% < H < 17\%$	$H > 17\%$

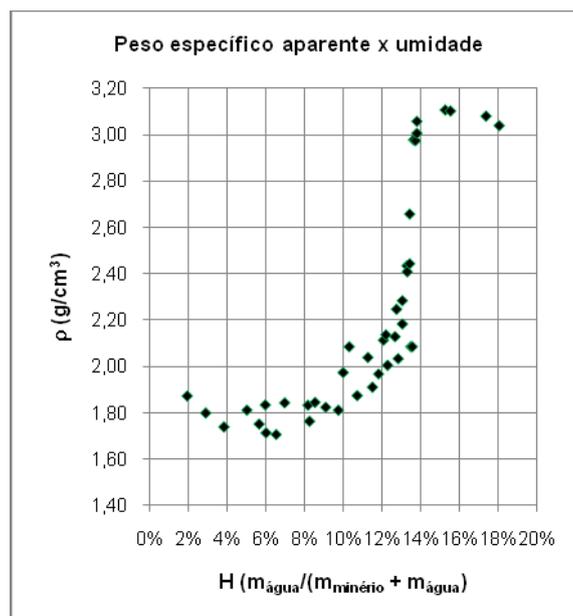


**Figura 3** – Comportamento do peso específico aparente ( $\rho$ ) versus umidade do concentrado ( $H$ ) para a amostra PXBR.

Os três concentrados apresentam pouca (PXCA e PXFN) ou nenhuma (PXBR) água capilar. Deste modo, eles apresentam condições extremamente favoráveis para a geração de poeira por ação do vento durante o transporte ferroviário.



**Figura 4** – Comportamento do peso específico aparente ( $\rho$ ) versus umidade do concentrado (H) para a amostra PXCA.



**Figura 5** – Comportamento do peso específico aparente ( $\rho$ ) versus umidade do concentrado (H) para a amostra PXFN.

A distribuição granulométrica das partículas dos três concentrados e o fator de esfericidade, para as três faixas de tamanho, são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Observa-se na Tabela 3 que os três concentrados podem ser colocados em ordem crescente de distribuição granulométrica (do mais fino para o mais grosso): PXFN < PXCA < PXBR. Esta ordem coincide com a magnitude da umidade (H) natural desses mesmos concentrados: PXFN (H = 8,3%) > PXCA (7,3%) > PXBR (6,1%).

**Tabela 3** – Distribuição granulométrica dos três concentrados

Concentrado	% de massa retida nas peneiras		
	+0,105 mm (+150#)	-0,105 +0,037 mm (-150# +400#)	-0,037 mm (-400#)
PXBR	25,6%	59,5%	14,9%
PXCA	13,1%	64,1%	22,8%
PXFN	9,1%	55,8%	35,1%

Observa-se na Tabela 4 que a esfericidade ( $\psi$ ) das partículas grossas, médias e finas aumenta quando o seu tamanho diminui. Isto quer dizer que as partículas mais finas apresentam hábito menos placóide do que as partículas mais grossas. Mais ainda, colocando os três concentrados em ordem crescente de esfericidade, temos: PXBR < PXCA < PXFN.

**Tabela 4** – Fator de esfericidade ( $\psi$ ) das partículas minerais por faixa de tamanho

Concentrado	Fator de esfericidade ( $\psi$ )		
	+0,105 mm (+150#) (grossas)	-0,105 +0,037 mm (-150# +400#) (médias)	-0,037 mm (-400#) (finas)
PXBR	0,28	0,46	0,54
PXCA	0,37	0,50	0,55
PXFN	0,43	0,57	0,60

O hábito das partículas de minerais portadores de ferro que estão presentes nos concentrados PXBR, PXCA e PXFN é apresentado na Tabela 5. Observa-se que os concentrados PXBR e PXCA apresentam maior quantidade de partículas com hábito placóide (soma das partículas de hábito especular + lamelar) do que o concentrado PXFN, obedecendo à ordem crescente: PXFN (30%) < PXCA (67%) < PXBR (79%). Deste modo, espera-se que as partículas do concentrado PXFN, após serem destacadas do leito, sejam transportadas pelo ar por menores distâncias do que as partículas dos minérios PXCA e PXBR. Quanto menos esférica é uma partícula, menor o valor do parâmetro  $\psi$ . Placas e discos apresentam  $\psi \sim 0,1$ .

**Tabela 5** – Hábito das partículas dos minerais portadores de ferro

Concentrado	Hábito das partículas		
	Placóide		Outros
	Especular	Lamelar	
PXBR	26%	53%	21%
PXCA	18%	49%	33%
PXFN	5%	25%	70%

Uma vez que partículas especulares são aquelas que mais brilham, foi possível observar visualmente que o brilho natural dos concentrados obedece à mesma sequência do percentual de partículas especulares neles contida: PXBR (maior brilho natural) > PXCA > PXFN (menor brilho natural).

A composição mineralógica dos três minérios é sumarizada na Tabela 6. Observa-se que a composição mineralógica do concentrado PXFN difere da mineralogia dos concentrados PXCA e PXBR. O primeiro (PXFN) é mais rico em hidróxidos hidratados de ferro (goethita) e mais pobre em óxidos de ferro (hematita + magnetita) do que os últimos (PXCA e PXBR).

**Tabela 6** – Composição mineralógica dos concentrados

Concentrado	Óxidos de ferro		Goethita	Quartzo	Outros
	Hematita	Magnetita			
PXBR	88%	1%	9%	1%	1%
PXCA	91%	traços	5%	1%	3%
PXFN	73%	4%	20%	1%	2%

Nas Figuras 6 e 7 ilustra-se a variação no aspecto da carga no modelo de vagão, devido à ação do vento, entre os tempos 0 e 90 minutos.


**Figura 6** – Modelo de vagão com carga de minério PXBR (teor de umidade = 11%, velocidade = 19,4 m/s; tempo = 0 min).

**Figura 7** – Modelo de vagão com carga de minério PXBR (teor de umidade = 11%, velocidade = 19,4 m/s; tempo = 90 min).

A partir dos dados experimentais de perda de massa ao longo do tempo, para cada concentrado de minério de ferro, variando-se a umidade inicial da carga e a velocidade do vento no túnel de vento, determinou-se um modelo correlacionando a perda de massa à umidade do material ( $H$ ), esfericidade ( $\psi$ ), % de finos < 0,037 mm ( $F$ ) e velocidade do vento ( $V$ ), para o tempo 90 min.

A representação gráfica do modelo, com os valores previstos exibidos em comparação com os resultados experimentais obtidos nos ensaios no túnel de vento, é mostrada na Figura 8.

Utilizou-se o software Statistica 9.1, da StatSoft, Inc. para o modelamento, chegando-se à seguinte equação:

$$\%Perda = k \cdot H^{-4,58} \cdot \psi^{-22,93} \cdot F^{9,02} \cdot V^{3,18}$$

Sendo:

- $k = 1,02 \cdot 10^{-18} \text{ [s/m]}^{3,18}$ ;
- $H$  = umidade do material;
- $\psi$  = esfericidade;
- $F$  = % de finos (< 0,037 mm = -400#);
- $V$  = velocidade do vento [m/s].

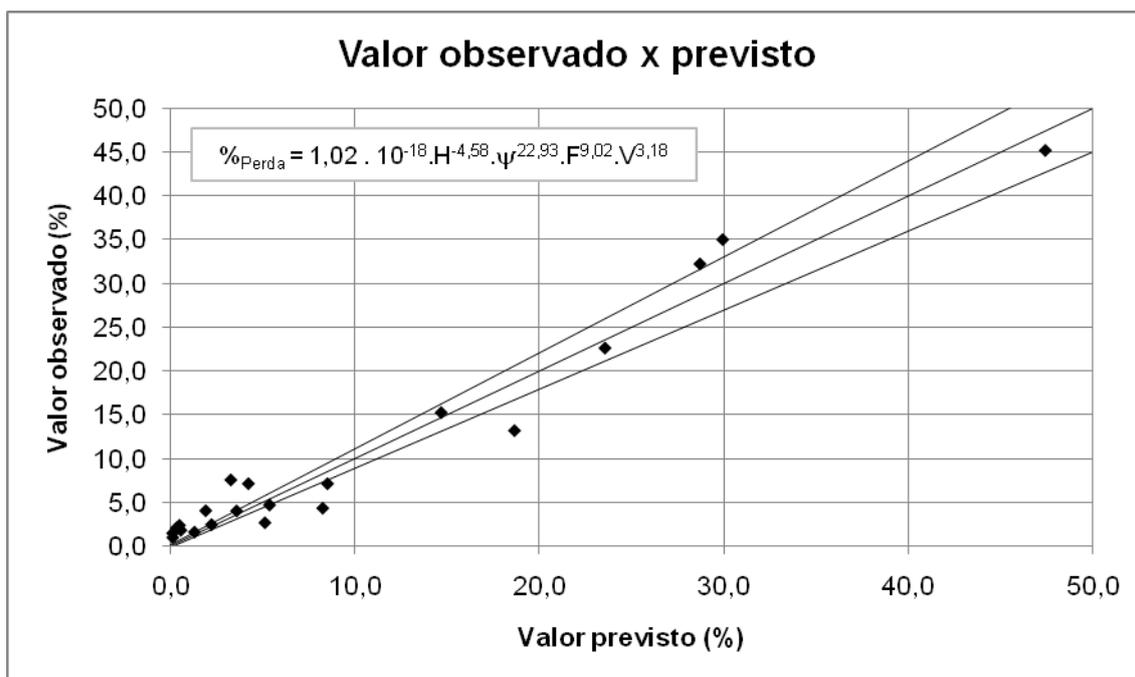
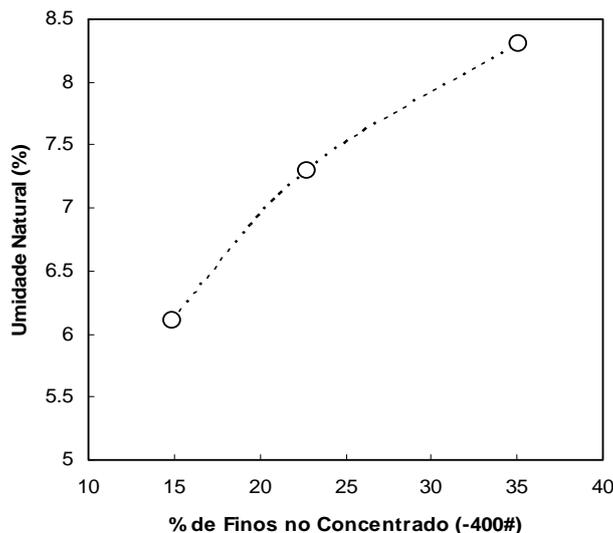


Figura 8 – Valor observado experimentalmente x valor previsto pelo modelo.

#### 4 DISCUSSÃO

Apesar da distinta composição mineralógica, a umidade natural dos três minérios é muito semelhante (Tabela 2), indicando que a mineralogia não constitui um fator preponderante na umidade natural de um leito de partículas e, conseqüentemente, não exerce grande influência na geração de poeira. É importante ressaltar que a quantidade de quartzo presente nos concentrados pode influenciar muito a umidade natural, visto que as partículas de quartzo encontram-se na forma hidrofóbica e, por isto, repelem água. Uma vez que o teor de quartzo nos concentrados foi muito pequeno (~1%, conforme pode ser visto na Tabela 6) esta variável, embora muito importante, não influencia no comportamento da umidade natural.

Deste modo, parece que a granulometria do leito de partículas, muito mais que a mineralogia, determina a umidade natural da amostra. Também foi possível verificar uma evidente correlação entre teor de umidade natural versus % presente de finos nos concentrados, conforme ilustra o comportamento da Figura 9. Pode-se admitir que os fatores mais relevantes para geração e transporte de poeira nos vagões são a % de finos, o teor de água capilar e a esfericidade, que foram as variáveis escolhidas para o modelamento presente.



**Figura 9** – Umidade natural dos concentrados versus % de finos (material com granulometria passante na peneira de 0,037 mm [400#]).

## 5 CONCLUSÃO

Uma vantagem do modelo determinado reside no fato de envolver variáveis que são controláveis (umidade, por meio de adição ou retirada de água) ou previsíveis *a priori* (esfericidade e fração de finos, que são valores intrínsecos do material, mensurados na caracterização dos concentrados de minério de ferro).

Verificou-se que o modelo semi-empírico apresenta aderência razoável (há ocorrência de dispersão fora do intervalo  $\pm 10\%$ ) em relação aos valores obtidos experimentalmente no túnel de vento, o que indica que mais estudos são necessários para a obtenção de um modelo que efetivamente represente a situação analisada.

## Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento à Vale pelo apoio na realização deste trabalho e à Fundespa pela concessão de bolsa para um dos autores.

## REFERÊNCIAS

- 1 PETAVRATZI, E., KINGMAN, S., LOWNDES, I. Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations. *Minerals Engineering*, v.18, p.1183-99, 2005.
- 2 PREVENTION AND CONTROL EXCHANGE – HAZARD PREVENTION AND CONTROL IN THE WORK ENVIRONMENT: AIRBORNE DUST, World Health Organization, Geneva, Aug.1999.
- 3 SMANDYCH, S., THOMSON, M., GOODFELLOW, H. Dust control for materials handling operations: A systematic approach. *American Industrial Hygiene Association Journal*, v.59, n.2, p.139-46, 1998.
- 4 KISSEL, F. N. Handbook for Dust Control in Mining – Information Circular 9465. U.S. Department of Health and Human Services, Pittsburgh, Jun.2003, 132p., disponível em <http://www.cdc.gov/niosh/nas/rdrp/appendices/chapter3/a3-23.pdf>. Data de acesso: 10.06.2010.



- 5 MAR, L. Successfully tackling dust emissions from Callide mine coal trains. Australian Bulk Handling Review, Nov-Dec.2009, disponível em <http://www.bulkhandling.com.au/news/print-editions/november-december-09/successfully-tackling-dust-emissions-from-callide-mine-coal-trains>. Data de acesso: 10.06.2010.
- 6 PINTO, C. S. Curso básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos, São Paulo, 2000, 247p.
- 7 VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. McGraw-Hill, São Paulo, 1978, 509p.
- 8 LEAL FILHO, L. S., CHAVES, A. P.; PEREIRA, L. G. E. Aspectos Teóricos da Filtragem e do Desaguamento. In: CHAVES, A. P. *et al.* Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, v.2, Signus Editora / Brasil Mineral, São Paulo, 1996, p.416-24.
- 9 LEAL FILHO, L. S., MARTINS, M., VILLANOVA, I. Estudo de Novos Depressores para Minerais de Ferro da CVRD – Relatório Final. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2007, 34p.