

# AVALIAÇÃO DOS ESPAÇOS VAZIOS EM LEITO DE PELOTAS CRUAS E SUA RELAÇÃO COM OS PARÂMETROS DE CONTROLE OPERACIONAL DO PELOTAMENTO MEDIDO EM POT GRATE\*

Marcos Vinícios da Silva Cavalcante<sup>1</sup>  
Renato Minelli Figueira<sup>2</sup>  
Sérgio Fernando Nunes<sup>3</sup>  
Maurício Cota Fonseca<sup>4</sup>  
Bruno Sabadini Bernardo<sup>5</sup>

## Resumo

A permeabilidade de um leito de partículas esféricas é uma função direta dos espaços vazios,  $\mathcal{E}$ , formados pelo empacotamento destas partículas que compõe o leito. Na literatura são encontrados estudos que envolveram leitos com um ou até dois diâmetros de partículas esféricas, contudo na pelotização o produto do disco pelotizador é uma população de aglomerados esféricos, também chamados de pelotas, com diversos diâmetros diferentes tornando a previsibilidade da medição de  $\mathcal{E}$  imprecisa. Este estudo tem como objetivo entender qual a faixa de percentual de espaços vazios,  $\% \mathcal{E}$ , existem nos leitos encontrados na indústria de pelotização, e ainda a relação desta métrica com alguns parâmetros de controle operacional e ainda indicar testes na linha de produção para otimizar a produção de pelotas e também controlar os custos de produção.

**Palavras-chave:** Espaços vazios; Leitos de pelotas; Qualidade; Custos.

## EVALUATION OF VOID IN BED RAW PELLETS AND ITS RELATIONSHIP WITH THE PARAMETERS OF OPERATIONAL CONTROL MEASURED IN POT GRATE

### Abstract

The permeability of a bed of spherical particles is a direct function of the voids,  $\mathcal{E}$ , formed by packing these particles that compose it. In the literature has been found studies involving beds with one or two diameters of the spherical particles, however, the product from pelletizing disc is a population of spherical agglomerates, also called pellets, with several different diameters becomes the predictability of the measurement of  $\mathcal{E}$  inaccurate. This study aims to understand what of the percentage range of voids,  $\mathcal{E}\%$ , there are in the beds found in the pellet industry, and also the relationship of this metric with some common operating control parameters and also indicate tests in line production to optimize the production of pellets and also control production costs.

**Keywords:** Voids; Pellets bed; Permeability; Quality; Costs.

<sup>1</sup> Eng.de controle e automação, Mestrando em engenharia metalúrgica e dos materiais na UFMG, Eng. de processos, Dep. pelotização, Samarco Mineração S.A, Anchieta, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Eng.Metalurgista, M.Sc., Ph.D., MBA Finanças, Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>3</sup> Eng.Metalurgista, M. Sc, Engenheiro Especialista, Gerencia Geral de Operações, Samarco Mineração S/A, Anchieta, ES, Brasil

<sup>4</sup> Eng.Metalurgista, M. Sc, Engenheiro Especialista, Gerencia Geral de tecnologia e eco eficiência Ubu, Samarco Mineração S/A, Anchieta, ES, Brasil

<sup>5</sup> Laboratorista, Engenharia de processo, Samarco Mineração S/A, Anchieta, ES, Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Processo Produtivo Relevante

#### 1.1.1. Pelotamento

A disposição e a forma de operação do disco permitem a classificação das pelotas em função do diâmetro, devido à combinação da força centrífuga e do próprio peso das pelotas formadas. *A carga é alimentada numa determinada posição do disco, que pode ser alterada, e as pelotas sofrem rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, acarretando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas*, Nunes [1]. *Os raspadores também funcionam como direcionadores de fluxo (Figura 1), orientando a trajetória dos aglomerados de diferentes tamanhos até sua descarga, na região oposta à região de alimentação*, Meyer [2].

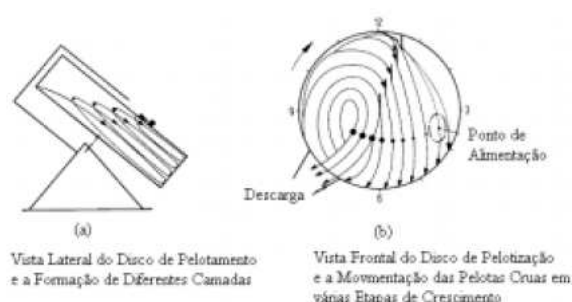


Figura 1. Disco de pelotização [2].

#### 1.1.2. Mesas de classificação de diâmetro de pelotas

Após a saída das pelotas cruas dos discos pelotizadores, um sistema de classificação e transporte (mesa de rolos) permite a separação granulométrica de diâmetros de 2.0 a 16.0 mm, figura 2.

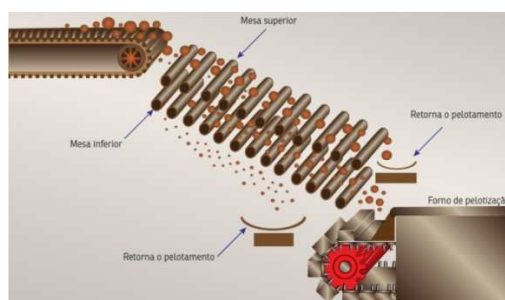


Figura 2. Sistema de classificação na alimentação do forno de endurecimento - Usina 03 [3].

#### 1.1.3. Perfil térmico para o processo de queima

Ao chegar no forno de grelha móvel, as pelotas são submetidas à um ciclo térmico constituído pelas etapas de secagem (ascendente e descendente), pré-queima, queima, pós-queima e resfriamento (primário e secundário). *É notável a diferença de temperatura entre as camadas de pelotas da parte superior, intermediária e inferior do leito*, Cota [4].

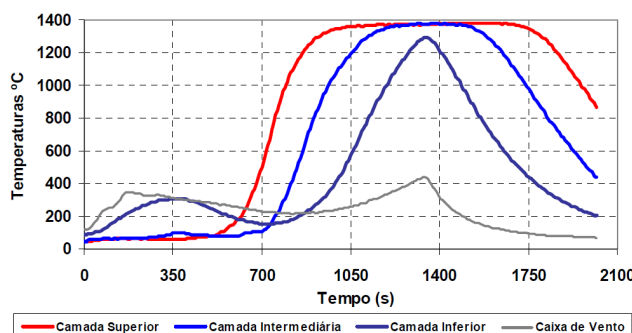


Figura 3. Perfil de temperatura nas camadas durante o ciclo de queima em Pot-Grate [4].

## 1.2. Espaços Vazios em Leitos de Partículas Esféricas

No final da década de 1940, *Ergun* [5], equação 1, unificou as expressões de Blake-Kozeny e Burke-Plummer, demonstrando que a queda de pressão em leitos era composta por mais de uma contribuição, uma era associada aos atritos viscosos, que predominava na região laminar, e outra, associada aos efeitos de inércia, que predominava no regime turbulento como demonstra a equação 1:

$$\frac{(P_o - P_L)}{L} = \frac{150(1-\epsilon)^2 \mu V_o}{\epsilon^3 \phi^2} + \frac{1,75(1-\epsilon) \rho V_o^2}{\epsilon^3 \phi} \quad (1)$$

Logo abaixo, na tabela 1, são encontradas algumas das previsões de  $\epsilon$  com os dados experimentais disponíveis:

**Tabela 1.** Frações de espaços vazios encontrados em leitos montados com esferas de mesmo diâmetro, para valores máximos usando diâmetros maiores, e para valores mínimos usando diâmetros menores [6]

Referência	$\epsilon$ (Fração)	
	Mínimo	Máximo
Andersson (1963)	0,348	0,410
Bernard and Wilhelm (1950)	0,386	0,425
Ergun and Orning (1949)	0,330	0,350
Burke and Plummer (1928)	0,363	0,421
Eisfeld e Schnitzlein (2000)	0,382	0,443

**Tabela 2.** Algumas relações de tortuosidade em leitos fixos encontrados na literatura, segundo Lanfrey [7]

Correlação	Referência
$T = \pi/2$	Bartell and Osterhof (1928)
$T = \sqrt{2}$	Carman (1937)
$T = \sqrt{1 - \ln(\epsilon^2)}$	Boudreau (1996)
$T = 1 - 0,41 \ln(\epsilon)$	Comiti and Renaud (1989)

Tendo em vista que os leitos de pelotas utilizados no processo de pelletização precisam de permeabilidade suficiente para passagem do fluido para realização do tratamento térmico, e que *Ergun* identificou como importante a fração de  $\epsilon$  para a previsão de delta P em leitos, e que *Eisfeld e Schnitzlein* analisou esta fração para leitos com esferas de mesmo diâmetro, e ainda *Comiti and Renaud* [8] e *Boudreau* [9] associaram esta fração com a tortuosidade do leito, foi percebido a necessidade e oportunidade de iniciar um estudo com objetivo de estimar a métrica % $\epsilon$  contidas

em leitos com diversos diâmetros de pelotas e avaliar a influência desta métrica nos aglomerados durante o tratamento térmico. O processo de formação do leito é realizado no início do forno a partir do condicionamento das pelotas cruas em carros de grelha com dimensões constantes e com altura controlada formando assim um leito contínuo com fração de vazios que podem variar em função dos desvios dos parâmetros de controle operacional, também chamados de P.C.O.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Medidor de Espaços Vazios em Laitos de Partículas Esféricas

Para as medições do % $\varepsilon$ , contidos nos leitos montados, foi utilizado o equipamento Permeability Meter Lab, chamado também de PML. O PML é um instrumento de medição de permeabilidade em leito de partículas esféricas. Trata-se de um equipamento de pequeno porte para laboratório, que a partir das informações das pressões, temperaturas, umidade relativa e velocidade do fluido, calcula os diferenciais de pressão que o leito está submetido em tempo real, e a partir da equação de Ergun se encontra o % $\varepsilon$  do leito analisado. O equipamento ainda calcula o *fator de parede* [10] ao relacionar o diâmetro médio das partículas que compõe o leito com o diâmetro do leito, e corrige a redução de perdas de pressão proporcionada pelas paredes laterais da panela. O equipamento é composto por uma panela que pode chegar a uma profundidade de 500 mm com diâmetro de 200 mm e uma grade com malha de 5 mm que suporta o leito, dois motores de indução gaiola com 0.5 cavalos de potência são responsáveis pela injeção do ar, um termo anemômetro com medição de velocidade 0-30 m.s<sup>-1</sup> e temperatura 0-50°C, dois termo higrômetros com medição de 0 a - 95% RH e -10 a 65°C, e ainda dois manômetros líquidos de escala -500 a 500 mmH<sub>2</sub>O redundante para calibrações do sistema fazem as medições necessárias. O PLC localizado no painel coleta os dados do sistema e a partir de comunicação OPC migra as informações para o notebook onde tem um supervisor e ainda são calculados e encontrados os % $\varepsilon$  existentes no leito analisado, figura 4.



Figura 4. Permeability Meter Lab [11].

Outras equações [12] que são utilizadas pelo PML além da (equação 1), representadas como densidade (equação 2), velocidade (equação 3) e a viscosidade do fluido (equação 4) :

$$\rho(T) = \rho_o \frac{T_o P_o}{T P} \quad (2)$$

$$v(T) = v_o \frac{T_o P}{T P_o} \quad (3)$$

$$\mu_{ar}(T) = 1,73 \cdot 10^{-5} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{398}{T+125} \right) \quad (4)$$

## 2.2. Medição de Espaços Vazios com Esferas de Vidro

Para a realização das medições do % $\mathcal{E}$  formados pelos leitos com esferas de vidro, foram montados leitos com esferas de 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm de diâmetro, figura 5, nesta etapa os leitos foram montados com esferas com o mesmo diâmetro separadamente, figura 6. Cada leito foi replicado mais 29 vezes, ou seja, esta etapa entregou trinta leitos de cada diâmetro, ou seja, 120 medições do percentual do % $\mathcal{E}$ .



Figura 5. Esferas de vidro com diâmetros 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm.



Figura 6. Leito com esferas de vidro com 5 mm de diâmetro no PML.

## 2.3. Medição de Espaços Vazios em Becker

Ainda para esferas de vidro, foi adotado o procedimento de medição de % $\mathcal{E}$  redundante, montando-se um leito com esferas de vidro com mesmo diâmetro e com altura constante em um becker sobre uma balança de precisão e realizado a tara, paralelamente, sobre outra balança de precisão, foi posta uma proveta e também realizada a tara e em seguida foi preenchida até a marca de 1000 ml ( $v_1$ ) com óleo com densidade conhecida ( $\rho$  [kg/l]) e registrado o peso ( $p_1$  [g]). Em seguida o conteúdo da proveta é transferido para o becker até sua marca de 1000 ml, quando todo o  $\mathcal{E}$  do leito é preenchido até a referência do becker. Depois é registrado o peso do becker como ( $p'$  [g]) e em seguida também é registrado o volume e o peso do conteúdo residual da proveta como ( $v_2$  [ml]) e ( $p_2$  [g]). O % $\mathcal{E}$  é obtido a partir das equações 5, 6 e 7. Para conclusão desta análise foram realizadas 30 medições para cada diâmetro de 5.0, 10.0, 12.0, 16.0 mm, e registrados a média e desvio padrão do % $\mathcal{E}$  encontrado.

$$\% \varepsilon_{(v)} = \frac{1000-v^2}{10} \quad (5)$$

$$\% \varepsilon_{(p)} = \frac{p^1-p^2}{10 \times \rho} \quad (6)$$

$$\% \varepsilon_{(p')} = \frac{p'}{10 \times \rho} \quad (7)$$

## 2.4. Medição de Espaços Vazios em Leitos de Pelotas Cruas

Para ensaios com pelotas cruas os padrões de amostras foram preparados com referência nos P.C.O. tais como o diâmetro médio, faixas percentuais de granulometria e razão granulométrica que é dita como a razão do percentual da faixa granulométrica de 16.0 a 12.5 mm pelo percentual da faixa granulométrica de 12.5 a 8.0 mm. Para a obtenção dos padrões de variação de leito, foi necessário variar o diâmetro médio entre 12.0 mm a 12.5 mm, a razão granulométrica entre 0.90 a 1.12. Isso foi possível a partir da variação dos percentuais das distribuições granulométricas das faixas - 6.3 mm, 8.0 a 6.3 mm, 12.5 a 8.0 mm, 16.0 a 12.5 mm e + 16 mm, sendo este último constante fixado em 2.30%.

## 2.5. Pelotamento das Amostras

A etapa de pelotamento foi realizada em Pot-Grate e também coletando amostras na linha de produção em função da grande geração de amostras que se fez necessário para montagem dos leitos. As faixas granulométricas foram separadas por peneiras de 6.3 mm, 8.0 mm, 10.0 mm, 12.5 mm, 16.0 mm e 19.0 mm. O material foi pesado, quarteado para evitar desintegração das pelotas cruas e finalmente homogeneizado para montagem dos padrões de leito para o PML.

## 2.6. Montagem dos Leitos

Foi adotada uma altura fixa de exatamente 450 mm para altura do leito durante os ensaios. Os padrões de distribuição granulométrica adotados levaram em conta as informações existentes na pelotização para encontrar o modelo de espaços vazios. O modelo  $\varepsilon$  para leito de pelotas com múltiplos diâmetros, teve como base matemática uma matriz 6 x 6 onde os coeficientes  $a(1,...6)$ ,  $b(1,...6)$ ,  $c(1,...6)$ ,  $d(1,...6)$ ,  $e(1,...6)$  e  $f(1,...6)$  são os padrões de variação A;B;C;D;E;F dos (P.C.O) e a solução desta matriz são os espaços vazios  $\varepsilon(1,...6)$  medidos durante os experimentos e foi resultado do empacotamento formado pelos padrões de variação dos P.C.O. A partir da manipulação matematicamente foram encontrados  $(x_1, \dots, x_6)$ , que correspondem aos coeficientes dos P.C.O no modelo, segue a notação matricial do **modelo  $\varepsilon$** :

- $a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 + d_1x_4 + e_1x_5 + f_1x_6 = \varepsilon_1$
- $a_2x_1 + b_2x_2 + c_2x_3 + d_2x_4 + e_2x_5 + f_2x_6 = \varepsilon_2$
- $a_3x_1 + b_3x_2 + c_3x_3 + d_3x_4 + e_3x_5 + f_3x_6 = \varepsilon_3$
- $a_4x_1 + b_4x_2 + c_4x_3 + d_4x_4 + e_4x_5 + f_4x_6 = \varepsilon_4$
- $a_5x_1 + b_5x_2 + c_5x_3 + d_5x_4 + e_5x_5 + f_5x_6 = \varepsilon_5$
- $a_6x_1 + b_6x_2 + c_6x_3 + d_6x_4 + e_6x_5 + f_6x_6 = \varepsilon_6$

Cada um, dos seis padrões de leito montados (A,B,C,D,E,F) foi replicado mais vinte e nove vezes, ou seja, trinta leitos preparados no final dos experimentos.

## 2.7. Etapa de Queima e Qualidades Físicas das Pelotas Queimadas

A etapa de queima foi realizada no forno piloto utilizando 40 quilos de pelota crua para o preenchimento da panela. O perfil padrão utilizado foi o ciclo térmico da usina em estudo com velocidade da grelha de 6.74 m/min, totalizando tempo de residência de 28,49 minutos para cada ensaio. Os resultados inseridos na tabela 5.0 é a média de três queimas de seis padrões distintos de leitos, ou seja, foram realizadas 18 queimas. As análises de qualidade de resistência à compressão e tamboramento, foram realizadas no Laboratório físico, anexo ao Pot Grate. Para cada teste de resistência à compressão coletou-se 100 pelotas queimadas aleatórias dentro da faixa granulométrica de 12.5 a 16.0 mm que foram inseridas na prensa de pelotas queimadas. Este equipamento possui um pistão acoplado a uma célula de carga que pressiona a pelota contra uma mesa fixa. O valor de compressão é gerado a partir do momento de ruptura da pelota é expressa em [kgf/cm<sup>2</sup>]. Para os testes de tamboramento coletou-se 5.0 Kg de pelota queimada, maior que 6,3 mm, que é inserido em um tambor que realiza um padrão de 188 rotações em 7 minutos e 30 segundos. Em seguida, as pelotas queimadas passam por uma peneira de 6.3 mm e o material retido é pesado. O valor de tamboramento é expresso em [%].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Ensaio do branco com esferas de vidro, esfericidade igual a 1

#### 3.1.1. Análise no PML (EV = %ε)

**Tabela 3.** Resultados obtidos via PML – Fluido ar. (30 análises de cada diâmetro)

ESFERAS DE VIDRO - PML				
DIÂMETRO DA ESFERA:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPADRÃO:	0,009	0,013	0,014	0,012
MÉDIA DE EV POR DIÂMETRO:	43,122	43,250	43,576	43,890
MÉDIA DE EV DE TODAS AMOSTRAS:	43,459			

#### 3.1.2. Análise no Becker (EV = %ε)

**Tabela 4.** Resultados obtidos via becker – Fluido óleo. (30 análises de cada diâmetro)

ESFERAS DE VIDRO - BECKER				
DIÂMETRO DA ESFERA:	5 mm	10 mm	12 mm	16 mm
DPADRÃO:	0,007	0,009	0,011	0,015
MÉDIA DE EV POR DIÂMETRO:	43,170	43,289	43,363	43,392
MÉDIA DE EV DE TODAS AMOSTRAS:	43,304			

### 3.2. Ensaios com os Leitos de Pelotas Cruas

#### 3.2.1. Visão geral da distribuição amostral dos P.C.O nos leitos montados

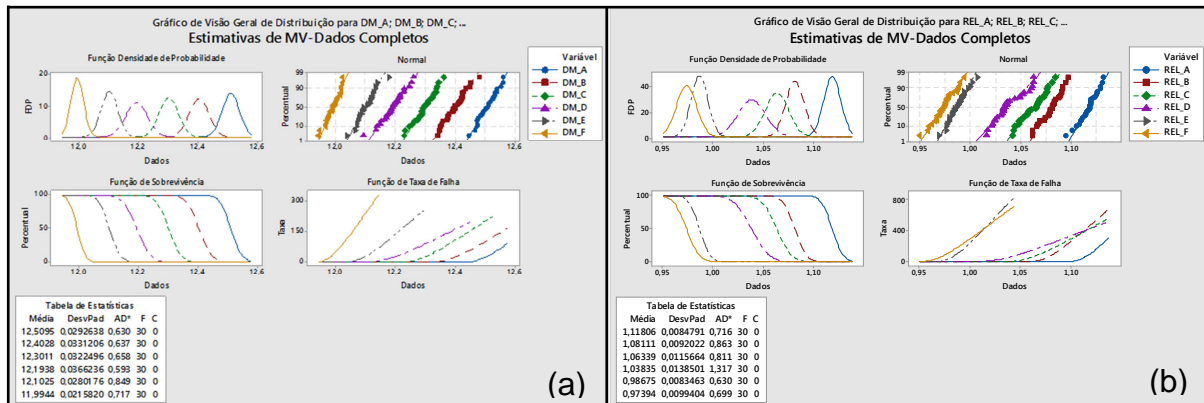


Figura 7. Resultados do padrão de variação das variáveis A, B, C, D, E do diâmetro médio (a) e relação granulométrica (b).

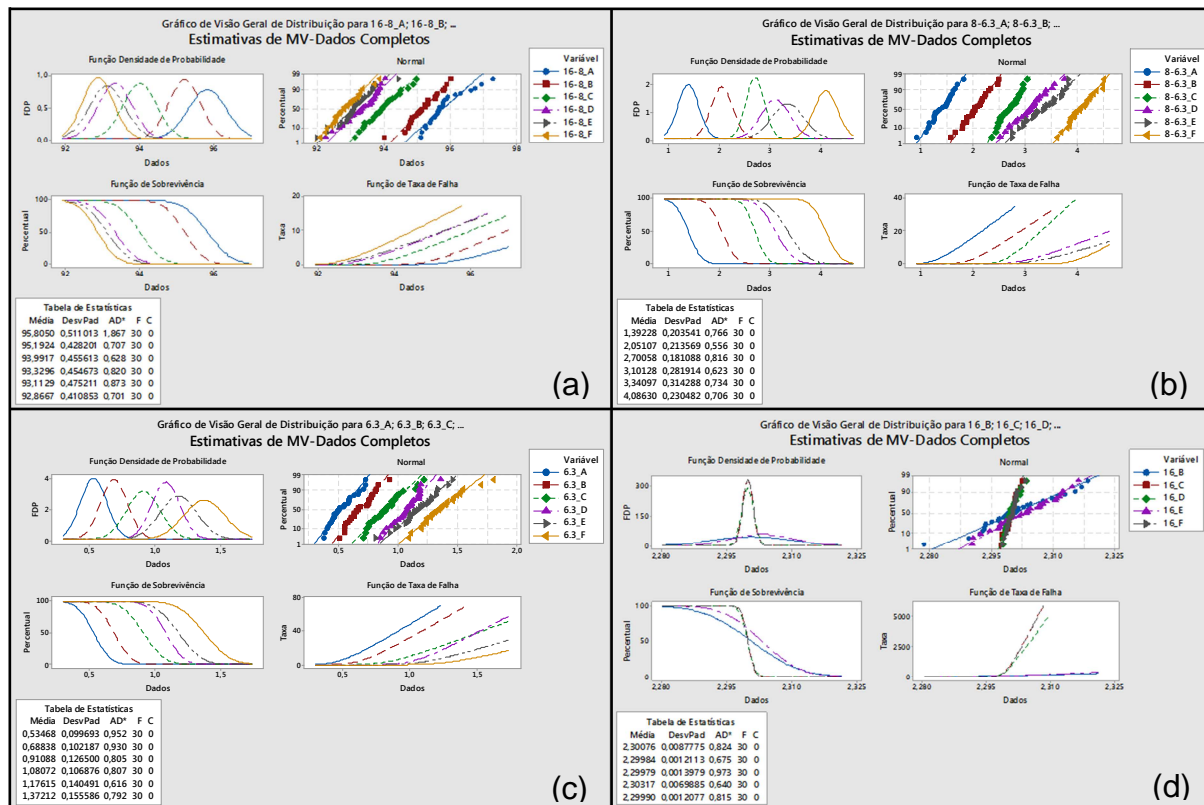
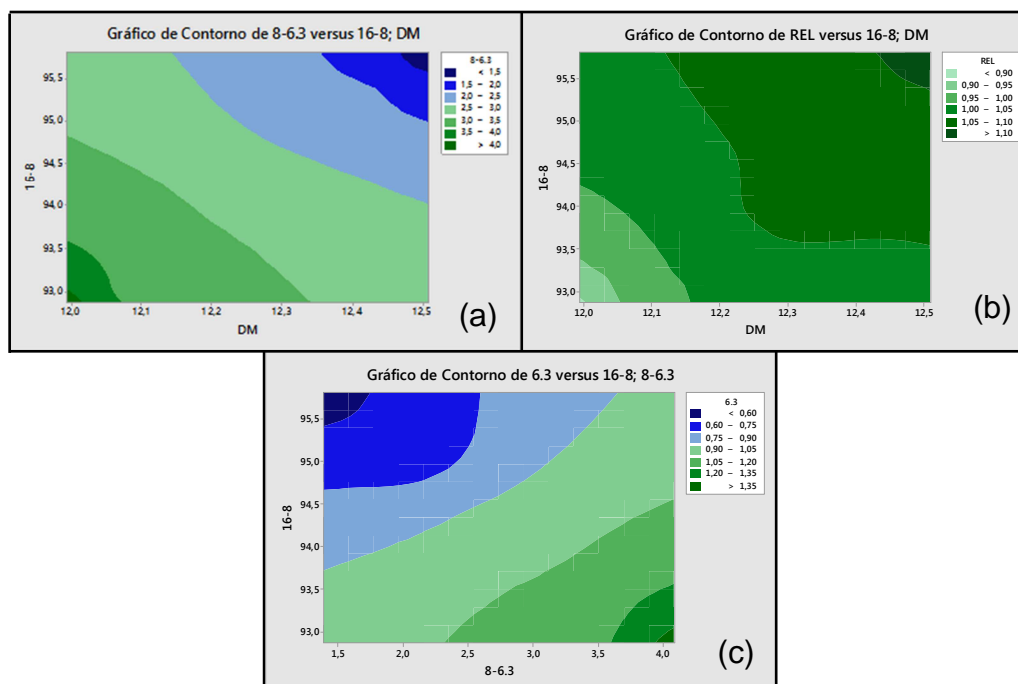


Figura 8. Resultados do padrão de variação das variáveis A, B, C, D, E das distribuições granulométricas 16.8 mm (a), 8.6.3 mm (b), -6.3 mm (c) e +16 mm (d).

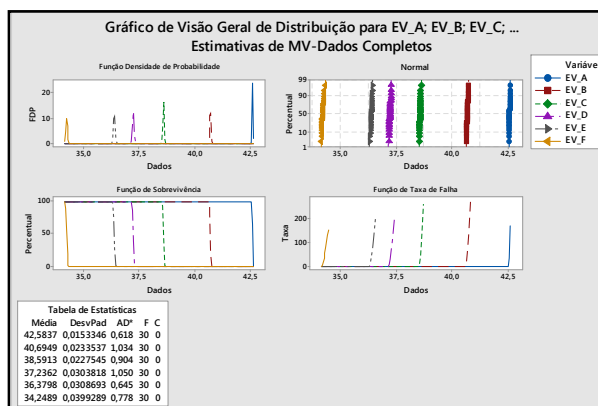


### 3.2.2. Relacionamento em três dimensões entre os P.C.O contidos nos leitos montados nos experimentos



**Figura 09.** Faixa granulométrica de 8a6.3 mm em função do 16a8 mm e diâmetro médio (a), relação granulométrica em função do diâmetro médio e do 16a8 mm (b) e faixa granulométrica -6.3 mm em função do 8a6.3 mm e do 16a8 mm (c).

### 3.2.3. Medições no PML de % $\epsilon$ para as variações dos P.C.O para os leitos A,B,C,D, E e F



**Figura 10.** EV = % $\epsilon$  obtidos com os padrões de variação dos P.C.O.

### 3.2.4. Relações em três dimensões dos espaços vazios com os P.C.O.

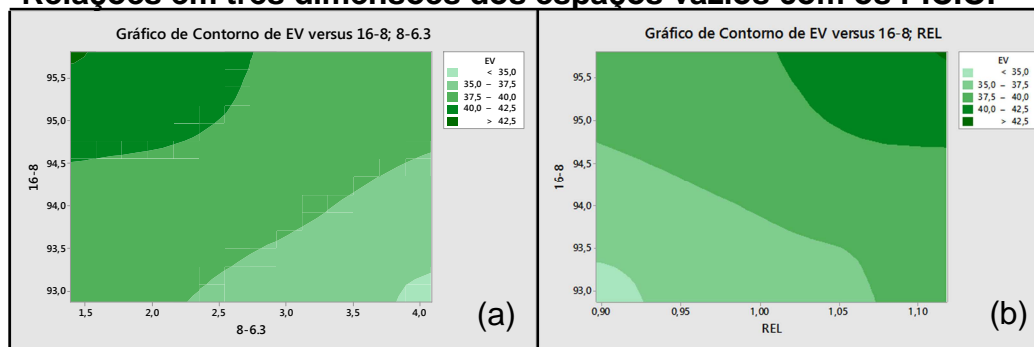


Figura 11. EV = %ε em função do 8a6.3 mm e do 16a8 mm (a) e EV = %ε em função da relação granulométrica do 16a8 mm (b).

### 3.2.5. Modelo ε para leitos com diversos diâmetros de pelotas

Forma matricial aplicada para encontrar modelo:  $[X] = [Y].[A]^{-1}$  :

$$\begin{matrix}
 & \mathbf{A} & & \mathbf{X} & & \mathbf{Y} \\
 \begin{pmatrix}
 12,509 & 95,805 & 1,392 & 0,535 & 2,298 & 1,118 \\
 12,403 & 95,192 & 2,051 & 0,688 & 2,301 & 1,081 \\
 12,301 & 93,992 & 2,701 & 0,911 & 2,300 & 1,063 \\
 12,194 & 93,330 & 3,101 & 1,081 & 2,300 & 1,038 \\
 12,102 & 93,113 & 3,341 & 1,176 & 2,303 & 0,987 \\
 11,994 & 92,867 & 4,086 & 1,372 & 2,300 & 0,897
 \end{pmatrix}
 & \times &
 \begin{pmatrix}
 0,324 \\
 0,387 \\
 -2,076 \\
 -0,920 \\
 0,660 \\
 3,000
 \end{pmatrix}
 & = &
 \begin{pmatrix}
 42,585 \\
 40,695 \\
 38,591 \\
 37,237 \\
 36,386 \\
 34,257
 \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

Figura 12. Matriz “A” (Leitos); Matriz “X” (Coeficientes calculados); Matriz “Y” (%ε medidos).  
 $\% \epsilon = EV = 0.324(DM) + 0.387(16a8) - 2.076(8a6.3) - 0.92(-6.3) + 0.66(+16) + 3(REL)$  (8)

P.C.O, unidades, e restrições encontrados nas simulações do modelo de ε:

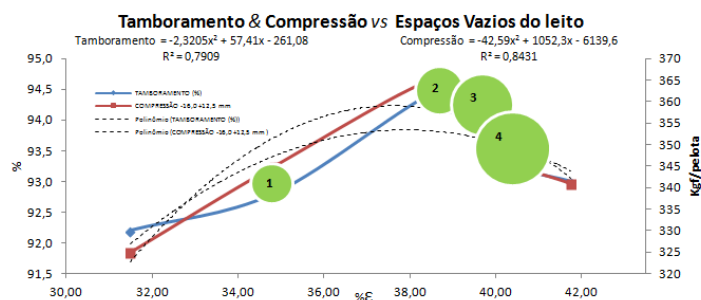
- DM = Diâmetro médio de 11.50 a 12.50 [mm];
- 16a8 = Faixa de 16.0 a 8.0 [mm]; Variação aceitável: 90.00 a 97.00 [%];
- 8a6,3 = Faixa de 8.0 a 6.3 [mm]; Variação aceitável: 1.50 a 4.70 [%];
- -6,3 = Faixa de - 6.3 [mm]; Variação aceitável: 0 a 3.00 [%];
- +16 = +16 [mm]; Variação aceitável: 0 a 2.30 [%];
- REL = Relação granulométrica [-]; Variação aceitável: 0.46 a 1.10 [-].

### 3.2.6. Queimas em Pot-Grate relacionando o modelo ε com a qualidade física tamboramento e compressão e consumo térmico

Tabela 5. Variação dos P.C.O, %ε, e qualidade física das pelotas queimadas no Pot-Grate (Os valores reportados são médias de 3 queimas de cada leito)

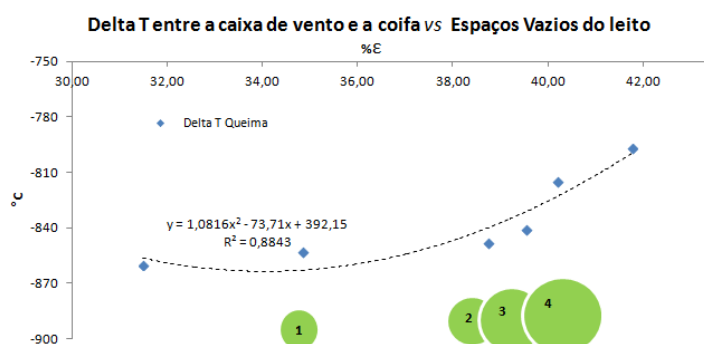
VARIACÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE OPERACIONAL DO PELOTAMENTO (P.C.O) PARA OS LEITOS SUBMETIDOS A QUEIMA							
Item	Unidade	LEITO 1	LEITO 2	LEITO 3	LEITO 4	LEITO 5	LEITO 6
Faixa Maior do que 16.0 mm (+16)	%	0,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00
Faixa entre 8.0 a 6.3 mm (8a6.3)	%	5,00	4,00	3,00	3,00	3,00	2,00
Diâmetro Médio (DM)	mm	11,48	11,73	12,17	12,51	12,67	13,09
Relação granulométrica (REL)	-	0,46	0,64	0,98	1,21	1,41	1,64
Faixa entre 16.0 a 8.0 mm (16a8)	%	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
ESPAÇOS VAZIOS ESTIMADOS PELO MODELO ε							
Item	Unidade	LEITO 1	LEITO 2	LEITO 3	LEITO 4	LEITO 5	LEITO 6
%ε	%	31,49	34,84	38,74	39,54	40,18	41,75
QUALIDADE FÍSICA ENCONTRADA APÓS A QUEIMA DAS PELOTAS CRUAS PARA OS RESPECTIVOS LEITOS 1,2,3,4,5 E 6							
Item	Unidade	LEITO 1	LEITO 2	LEITO 3	LEITO 4	LEITO 5	LEITO 6
Compressão	kgf/pelota	325,00	345,00	366,00	358,00	347,00	341,00
Tamboramento	%	92,20	92,80	94,50	93,90	93,30	93,00

- Resultados encontrados na tabela 5 relacionados a qualidade e o % $\epsilon$ :



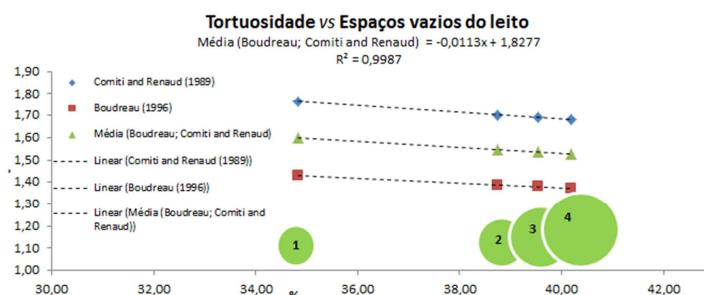
**Figura 13.** Pelota crua (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota crua (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota crua (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota crua (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16.0 a 8.0 mm.

- Resultados encontrados na tabela 5 relacionados à temperatura e o % $\epsilon$ :



**Figura 14.** Pelota crua (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota crua (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota crua (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota crua (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16.0 a 8.0 mm, todas as queimas utilizaram o mesmo perfil térmico, ou seja, mesma temperatura na coifa.

- Resultados encontrados na tabela 5 relacionados à tortuosidade e o % $\epsilon$ :



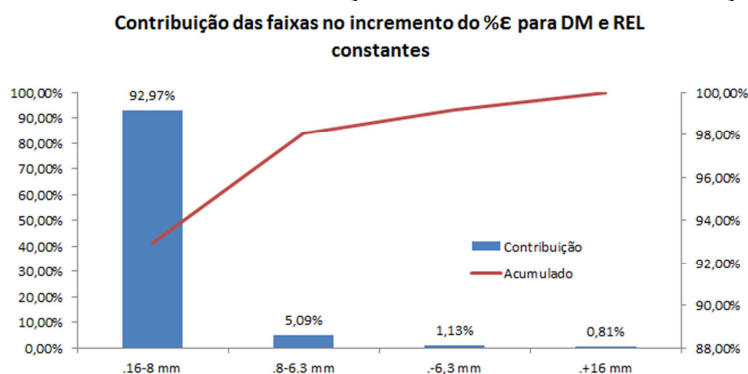
**Figura 15.** Pelota crua (1) DM:11.73 mm e REL: 0.63; Pelota crua (2) DM: 12.17 mm e REL: 0.98; Pelota crua (3) DM: 12.51mm e REL: 1.20; Pelota crua (4) DM:12.67 mm e REL: 1.40, todos os leitos (1,2,3 e 4) com 95% de 16.0 a 8.0 mm, com o aumento do percentual de espaços vazios ocorre uma redução linear da tortuosidade na faixa estudada.

**Nota 01:** O aumento do % $\epsilon$  trás a maximização da distribuição dos gases quentes para o leito, tornando mais homogênea a troca térmica e elevando a temperatura média no interior do leito, isso muito em função de facilitar o controle efetivo da velocidade do fluido que atravessa o leito e conseqüentemente torna-se possível o controle do número de Reynolds, componente crucial na medição do *número de Nusselt* [13]. É demonstrado na equação, por *Incropera e Dewitt* [14], que quanto maior for o número Reynolds, maior será o número de Nusselt e mais eficaz será a transferência de calor por convecção em volta de um corpo esférico, para leitos fixo

esta referência é limitada pelos limites máximos de velocidade do fluido, demonstrada por *Kunii e Levenspiel* [15], para não movimentar o leito.

**Nota 02:** Com o aumento do % $\epsilon$  é possível que o processo de secagem possa ser ineficiente em função da elevação do raio médio das pelotas, *mecanismo de controle da secagem da pelota*, *Pereira e Seshadri* [16], e com isso ocorre a redução da performance da queima das pelotas cruas.

- Resultados encontrados de contribuição de % $\epsilon$  no leito na simulação:



**Figura 16.** Gráfico mostrando a simulação da contribuição das faixas granulométricas tendo como constantes o diâmetro médio e a relação granulométrica no % $\epsilon$ .

#### 4. CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou importantes informações a respeito dos leitos fixo compostos por múltiplos diâmetros de pelotas de minério de ferro, e indicou o **modelo  $\epsilon$**  para estimar o % $\epsilon$  a partir dos parâmetros de controle operacionais, tais como diâmetro médio, faixas e relação granulométrica, também chamados neste estudo como P.C.O. No que tange a qualidade física das pelotas queimadas, foi visto que é possível otimizá-la a partir do incremento do % $\epsilon$ . Os resultados encontrados indicam que este índice formado pelo empacotamento das pelotas cruas previamente produzidas pelo pelotamento, influencia na resistência a compressão das pelotas queimadas durante o tratamento térmico, veja nota 01. A resistência à compressão é um parâmetro de controle da produtividade que segue a tendência de quanto maior for este número, maior será a carga de pelotas cruas admitida na alimentação da grelha. Existe um ponto ótimo do % $\epsilon$ , como é mostrado na figura 13, onde a compressão é elevada aos melhores resultados, após este ponto ocorre à queda desta qualidade, veja nota 02. No que tange a redução de custos com energéticos, foi percebido oportunidades como visto na figura 14, uma vez que ocorreram menores deltas de temperatura, entre as medições realizadas depois (caixas de vento) e antes (coifa) do leito durante a queima, isso para o mesmo delta de pressão, o que indica que poderia ser reduzida a vazão de ar quente até certo ponto, para garantir a mesma temperatura nas caixas de vento, medida após passagem dos gases quentes pelo leito, sem prejudicar a transferência mínima de calor que garanta a meta de qualidade física, isso muito provavelmente em função da redução da tortuosidade que ocorre com o aumento do % $\epsilon$  do leito, mostrado na figura 15, e naturalmente com isso, é previsto que é possível reduzir o consumo específico de combustíveis e energia elétrica com os ventiladores de processo na queima na planta industrial. A partir do contexto apresentado é

estimado que a faixa do % $\mathcal{E}$  encontrado nos pelotamentos controlados, a exemplo da Samarco, simulados nos leitos do 2 ao 5 mostrados na tabela 5, pode variar entre 34,84% a 40,18%. A componente de maior contribuição da formação de % $\mathcal{E}$  é a faixa de 16.0 a 8.0 mm, como é mostrada na figura 16, considerando a relação granulométrica e o diâmetro médio como constantes.

Como próximos passos deste estudo é sugerido uma medição online dos P.C.O na alimentação da grelha para a estimação do range de % $\mathcal{E}$  encontrados na linha de produção de forma online e tornar esta métrica conhecida para garantir o seu controle em patamares ótimos, pois este controle demonstra ter alto impacto na produtividade em função da maximização da qualidade física e do controle de custos a partir da redução de insumos energéticos de um forno tipo grelha móvel.

## Agradecimentos

Agradecemos a todos os envolvidos no estudo, em especial aos colaboradores dos departamentos de engenharia de processo, automação e instrumentação, e da produção da Samarco Mineração unidade Ubu, ao professor e Ph.D. Renato Minelli Figueira pela orientação deste estudo que foi parte integrante da produção acadêmica de mestrado realizado via programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica, materiais e de minas da UFMG, e ao CNPq, CAPES-PROEX e FAPEMIG.

## REFERÊNCIAS

- 1 NUNES, S.F., Influência da carga recirculante do pelotamento na qualidade física das pelotas cruas e queimadas da Samarco Mineração S.A, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 118p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 2 MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores; Springer. Verlag Berlin. Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 1980.
- 3 Samarco Mineração SA. Manual Integrado da Gerência de Produção de Ubu. 2013. Revisão 01:34-38.
- 4 FONSECA, M. C., Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2004, 126p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 5 ERGUN, S. Flow Through Packed Columns; Chemical Engineering Progress. V.48, nº2, p. 89-94. 1952.
- 6 B. Eisfeld, K. Schnitzlein. The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds Chemical Engineering Science, 56 (14) (2001), p. 4321–4329
- 7 Lanfrey et al., 2010, P.-Y. Lanfrey, Z.V. Kuzeljevic, M.P. Dudukovic, Tortuosity model for fixed beds randomly packed with identical particles, Chem. Eng. Sci., 65 (5) (2010), p. 1891–1896 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.011>
- 8 COMITI, J., Renaud, M.: A new model for determining mean structure parameters of fixed bed from pressure drops measurements, application to beds peckets with parallelepipedal particles, p. 479-496. 1996.
- 9 BOUDREAU, B.P., 1996, The diffusive tortuosity of fine-grained sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta 60, p. 3139-3142.
- 10 Coury, J. R., Carvalho, R. V. P., Estudo do efeito da parede no escoamento de fluidos compressíveis em leitos fixo, VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Unicamp, SP, 2005.
- 11 Disponível em: <http://www.cemi.eng.br/br/>.
- 12 Müller, D., Rambo, C.R., Innocentini, Moreira E.A., Silva, Coury, J. R., Hotza, D., Filtros cerâmicos fibrosos para gases a alta temperatura, 17º CBECIMat - Congresso

- Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- 13 ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A.J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. Tradução 4.ed, Americana: McGraw Hill Brasil; p. 373-437, 2012.
  - 14 SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA, C. A., SILVA, I. A. Fenômenos de Transporte; Fundamentos e Aplicações na Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, p.435-437, 2010.
  - 15 From Kunii and Levenspiel, Fluidization Engineering (Melbourne, FL: Robert E. Krieger, Publishing Co. 1977). Reprinted with permission of the publishers. Original, Kunii, D., and O. Levenspiel, Ind. Eng. Chem. Process Design Devel., 7, 481 (1968).
  - 16 PEREIRA, R. O. S. ; SESHADRI, V. . Secagem de pelotas de minério de ferro. Metalurgia ABM , v. 41, p. 141-144, 1985.