

# Análise comparativa de eficiência de sistema de exaustão real em processo de eletrofusão

*Comparative efficiency analysis of real exhaust system in an electrofusion process*

Mariana Wached de Paiva Côrtes<sup>1\*</sup> , Luiz Felipe Ramos Turci<sup>1</sup> , Marcos Vinícius Rodrigues<sup>1</sup> 

## RESUMO

Neste trabalho, analisou-se a eficiência de um sistema de exaustão de material particulado em um processo real de eletrofusão. Particularmente, realizaram-se análises de distribuição granulométrica em diferentes estágios do processo. Utilizando os dados da análise granulométrica, avaliou-se a eficiência do ciclone comparando-a com a eficiência de projeto – adicionalmente, a eficiência do ciclone foi também calculada com base no balanço de massa de todo o processo. Apesar de algumas medidas tomadas pela empresa a fim de melhorar a eficiência do sistema de exaustão, resultados indicam eficiência do ciclone da ordem de 50%, e perda de material particulado para atmosfera da ordem de 1 t a cada batelada do processo. Neste trabalho, apresentam-se detalhadamente as etapas da análise de eficiência do sistema de exaustão, particularmente do ciclone, e a proposta de redimensionamento do ciclone.

**Palavras-chave:** ciclone; material particulado; sistema de exaustão; eficiência.

## ABSTRACT

In this work, we analyzed the performance of a particulate matter exhaust system of a real electrofusion production process. Particularly, we performed particle size distribution analysis at different stages of the process. Using particle size distribution data, cyclone operation efficiency was evaluated by comparing it with design efficiency – in addition, cyclone efficiency was also calculated based on the mass balance of the entire process. Despite some measures taken by the company in order to improve the exhaust system efficiency, results indicate cyclone efficiency of around 50%, and particulate matter loss to atmosphere of 1t at each batch of the process. This paper presented in detail the steps of the efficiency analysis of the exhaust system, particularly the cyclone, and the proposed cyclone resizing.

**Keywords:** cyclone; particulate matter; exhaust system; efficiency.

## INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial, houve crescente desenvolvimento e aumento da produção industrial, sendo o carvão inicialmente utilizado como fonte de energia (RODRIGUES, 2006). Nessa época, houve alguns episódios históricos de morte relacionados a doenças respiratórias, estas associadas à poluição atmosférica intensa causada pelo aumento descontrolado das emissões de poluentes, o que passou a afetar o meio ambiente e a prejudicar a qualidade de vida da população (RODRIGUES, 2006).

São inúmeras as fontes de poluição atmosférica, particularmente a poluição por emissão de material particulado. Todo processo produtivo pressupõe algum tipo de emissão de poluente, que pode ocorrer, por exemplo, pela fragmentação de substâncias sólidas, gerando material particulado e, dependendo de suas dimensões, na forma de aerossóis (SÁ, 2007). Assim sendo, o controle de emissão de material particulado é primordial.

A poluição atmosférica causada pela presença de material particulado em suspensão está associada a riscos para a saúde pública (LIED, 2011; MAGALHÃES, 2005; RODRIGUES, 2006). Bakonyi *et al.* (2004) investigaram os efeitos causados pela poluição atmosférica na morbidade por doenças respiratórias em crianças no município de Curitiba, Paraná, entre 1999 e 2000. Todos os poluentes investigados (material particulado, fumaça, dióxido de nitrogênio e ozônio) tiveram relação com as doenças respiratórias de crianças, mesmo quando os níveis dos poluentes estavam aquém do que determina a legislação. Nascimento *et al.* (2006) estudaram o aumento de internações de crianças por pneumonias na cidade de São José dos Campos, São Paulo, nos anos de 2000 e 2001, e confirmaram que o potencial deletério dos poluentes do ar sobre a saúde pode ser detectado, também, em cidades de médio porte.

Atualmente, há maior preocupação em minimizar a quantidade de poluentes emitidos para o meio ambiente, culminando, até mesmo,

<sup>1</sup>Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas – Poços de Caldas (MG), Brasil.

\*Autora correspondente: marianawached@yahoo.com.br

Recebido: 17/01/2017 – Aceito: 05/11/2018 – Reg. ABES: 174550

na criação de diversos órgãos reguladores e agências fiscalizadoras (MAGALHÃES, 2005; RODRIGUES, 2006).

As indústrias vêm fazendo maiores investimentos na prevenção e minimização de emissões, revertendo esses gastos em lucros, utilizando a proteção ambiental como um instrumento de marketing, expandindo a aceitação de seus produtos pelos consumidores, bem como aumentando a competitividade da empresa no mercado (RODRIGUES, 2006).

Particularmente, destacam-se pesquisas em sistemas de exaustão, mais especificamente no desenvolvimento e melhoramento de ciclones. Em 1985, Lee, Gieseke e Piispanen avaliaram um conjunto de dados de eficiência de ciclone em que foram obtidos o tamanho médio das partículas, a velocidade de fluxo, o tamanho do ciclone e as propriedades do gás. Foram utilizados ciclones de quatro dimensões diferentes, com um intervalo de taxa de fluxo de 9,1–19,5 L/min e tamanho de partícula 0,5–25 µm. Para variar as propriedades do gás, foram usados ar e argônio. Por meio dos resultados obtidos, concluiu-se que a densidade do gás é uma propriedade importante, além de sua viscosidade; os efeitos da temperatura dos gases no desempenho do ciclone devem ser avaliados. A alta viscosidade tende a piorar o desempenho do ciclone, enquanto a alta densidade do gás melhora o desempenho do ciclone (para quanto maior a diferença entre as densidades do gás e de partícula, menor o diâmetro de corte e, conseqüentemente, maior a eficiência). Os dados encontrados neste estudo mostram que as características de fluxo dentro de ciclones é muito mais crítica do que se pensava.

Mais recentemente, Avci e Karagoz (2003) desenvolveram um modelo matemático para o cálculo do tamanho do diâmetro de corte e eficiência fracionada em separadores ciclônicos, levando em consideração efeito do fluxo, partículas, parâmetros geométricos e aceleração, assumindo que a mistura de fluido e partículas é homogênea e que a aceleração diminui dependendo da fricção e da geometria. A análise dos efeitos de vários parâmetros revelou que, em adição aos padrões geométricos, superfície de atrito, comprimento de vórtice e regimes de fluxo desempenham papel importante no desempenho do ciclone, especialmente nos pequenos. Corrêa *et al.* (2004) avaliaram o tempo de residência das partículas em ciclone com alto valor da razão entre seu diâmetro e os demais parâmetros geométricos — os resultados teóricos e experimentais mostraram que as dimensões da parte cônica do ciclone têm muita influência na característica dinâmica do fluxo e, conseqüentemente, no tempo de residência das partículas, o que tem efeito direto no desempenho do ciclone.

Além de pesquisas sobre eficiência, estudos de desenvolvimento de ciclones também são realizados. Fukui *et al.* (2011) estudaram a eficiência de um novo ciclone, feito de material metálico poroso, com controle de injeção de ar limpo por esses poros, a fim de controlar o diâmetro de corte e reduzir a deposição de particulado na parte cônica do ciclone. Yamamoto *et al.* (2016) estudaram a eficiência de separação de partícula em hidrociclones modificados: Tipo A, com anel inclinado;

Tipo B, com haste central; Tipo C, com cone de ápice; e Tipo D, com todas as três modificações. Os estudos mostraram: maior velocidade descendente das partículas para o *underflow* do ciclone, proporcionando maior separação de partículas no Tipo A; menor número de partículas de reentrada da parte central para tubulação no Tipo B; menor velocidade do fluido e melhor separação de partículas no Tipo C. O ciclone Tipo D obteve a melhor eficiência de separação de partículas.

A motivação deste projeto vem dessa criticidade do ciclone na determinação da eficiência do sistema de exaustão; particularmente, de um sistema de exaustão para mitigação da emissão de particulados de uma indústria da região de Poços de Caldas, Minas Gerais, que utiliza o processo de eletrofusão em seu sistema produtivo. Uma vez que há fuga de material particulado nas esteiras de carregamento, no processo de mistura de carga e principalmente dos fornos, material esse que não é eficientemente capturado pelos sistemas de exaustão, surge a necessidade da realização da avaliação do sistema de exaustão atual como ponto de partida para a proposição de medidas de mitigação de emissões no sistema produtivo. Particularmente, neste trabalho, faz-se a caracterização granulométrica, incluindo a elaboração das curvas de distribuição granulométrica, do material particulado do sistema de exaustão desde a alimentação de matéria-prima no forno, passando pelo material coletado pelo sistema de exaustão e alimentado no ciclone, o *underflow* do ciclone, e finalmente o material retido no filtro de mangas. Dessa caracterização, obtêm-se o diâmetro de corte do ciclone e os parâmetros de modelos de distribuição granulométrica; a partir desses estimadores, pode-se calcular a eficiência do ciclone, bem como a partir do balanço de massa, o que também foi feito neste trabalho.

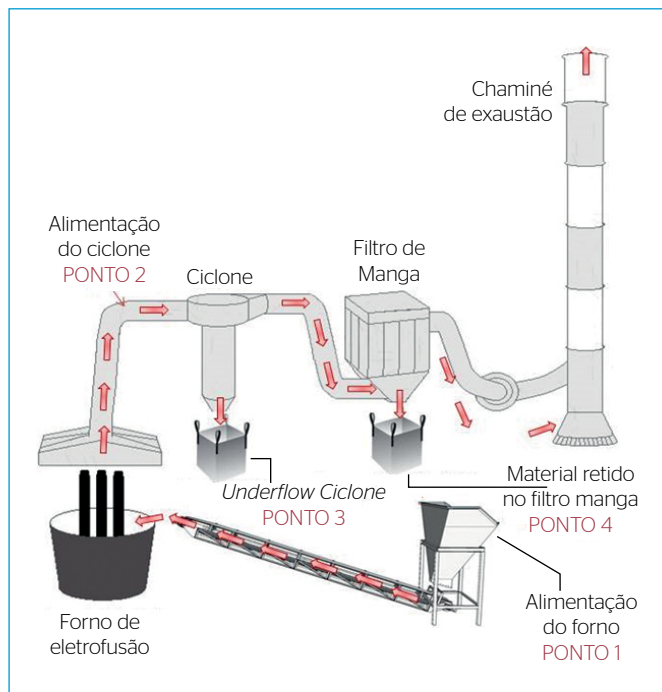
## METODOLOGIA

### Informações preliminares

O estudo foi realizado em uma indústria de transformação mineral que produz e comercializa mais de 20 tipos de produtos para aplicação nas indústrias de cerâmicos, abrasivos e refratários. A empresa utiliza em seu processo produtivo a eletrofusão para transformação mineral.

A planta de eletrofusão tem um sistema de exaustão composto de ciclone como pré-coletor e, posteriormente, filtro de mangas, conforme ilustrado na Figura 1.

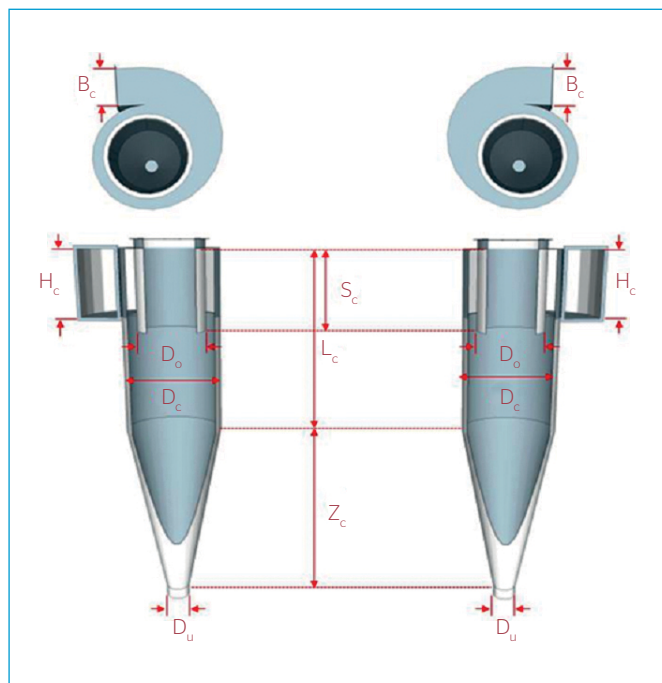
Os dados de projeto do ciclone estudado foram fornecidos pela empresa parceira do projeto. Além disso, para conferência, as dimensões do ciclone foram medidas utilizando uma trena. A Tabela 1 traz os valores de projeto de cada parâmetro geométrico do ciclone do sistema de exaustão; a Figura 2 ilustra a que corresponde cada um dos parâmetros geométricos do ciclone estudado. Os valores de projeto da vazão (Q) e a velocidades (ve) de fluxo do ciclone são, respectivamente, 35.000 m<sup>3</sup>/h e 16,2 m/s.



**Figura 1** - Esquemático do sistema de exaustão. Pontos de 1 a 4 são de coleta para análise granulométrica.

**Tabela 1** - Parâmetros geométricos de projeto do ciclone (mm).

$D_c$	$D_o$	$S_c$	$L_c$	$Z_c$	$H_c$	$B_c$	$D_u$
1.600	1.130	1.350	2.300	3.020	1.150	590	405



**Figura 2** - Parâmetros geométricos do ciclone.

Dados de operação também foram obtidos. Primeiramente, foi estimada a densidade média da partícula do material alimentado no ciclone, igual a  $3.520 \text{ kg/m}^3$ , utilizando o picnômetro de gás hélio Accupyc 1330, da marca Micromeritics. A temperatura do gás da tubulação ( $40^\circ\text{C}$ ) foi medida utilizando o termômetro infravermelho MT-360. A viscosidade ( $\mu$ ), igual a  $1,85 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ , e a densidade do gás ( $\rho_g$ ), igual a  $1,12 \text{ kg/m}^3$ , foram obtidas na literatura (PERRY; GREEN, 1984).

Utilizando o equipamento Testo 510 em combinação com o tubo de Pitot foi medida a velocidade do fluxo de ar na tubulação, igual a  $24 \text{ m/s}$ . Após a medida da velocidade, foi medido o diâmetro da tubulação utilizando uma trena ( $0,85 \text{ m}$ ) e, posteriormente, foi calculada a área da seção transversal. Multiplicando-se esta pela velocidade do fluxo, obtém-se a vazão de  $48.960 \text{ m}^3/\text{h}$ . Nota-se que os valores de velocidade e vazão de operação são maiores que os valores de projeto.

### Classificação do ciclone

Com os dados de projeto do ciclone foi feita a comparação das relações geométricas entre as famílias de ciclones comumente apresentados na literatura (RODRIGUES, 2001) e o ciclone analisado.

### Análise granulométrica

O cálculo da eficiência de operação do ciclone requer a determinação de seu diâmetro de corte ( $D_{50}$ ). Este parâmetro pode ser estimado a partir de análise de distribuição granulométrica. Determinaram-se, para tal, quatro pontos de coleta de amostra:

- ponto 1: coleta do material alimentado no forno;
- ponto 2: coleta do material coletado pelo sistema de exaustão e alimentado no ciclone;
- ponto 3: coleta do material retido no ciclone, chamado de *underflow*;
- ponto 4: coleta do material retido pelo filtro manga.

Por falta de referência normativa (de nosso conhecimento) para sistemas de exaustão como o estudado neste trabalho, os pontos e as formas de amostragem foram determinados em reuniões com a empresa e escolhidos de maneira que não interferissem no processo produtivo.

Nos pontos 1, 3 e 4, as amostras foram coletadas por ação da gravidade, sendo no ponto 1 com o auxílio de uma pá que era inserida na abertura do forno no momento da alimentação; nos pontos 3 e 4, com o uso de uma bolsa de amostra. Para a amostragem no ponto 2, foi confeccionado um amostrador de espuma preso à portinhola da tubulação transversalmente ao fluxo de ar; o material era coletado com a portinhola fechada para não interferir no funcionamento do sistema de exaustão e ser uma amostra mais representativa.

As amostras foram coletadas 3 vezes por dia, durante 5 dias, nos quatro pontos de coleta ilustrados na Figura 1, na seguinte seqüência: 23h (1ª amostragem), 8h (2ª amostragem) e 14h (3ª amostragem). Esse período de operação das 23 às 8h, chamado de batelada, foi

determinado para que representasse o comportamento ao longo do dia, sendo a primeira amostra ao ligar e estabilizar o forno, a segunda no meio do processo e a terceira ao término.

### Diâmetro de corte do ciclone

A expressão empírica comumente utilizada para a determinação do diâmetro de corte,  $D_{50}$ , de um ciclone é a Equação 1, de Rosin, Rammmler e Intelmann (CERRI, 2010):

$$D_{50} = \left[ \frac{9\mu b}{2\pi N_c v_e (\rho_s - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Em que:

$M$  = viscosidade do gás;

$b$  = largura da entrada do ciclone;

$N_c$  = número de voltas que o gás executa no interior do ciclone. No caso de um ciclone Lapple, o valor usado é 5;

$v_e$  = velocidade de entrada do gás no ciclone;

$\rho_s$  e  $\rho_g$  = densidades do sólido e do gás, respectivamente.

Experimentalmente, o diâmetro de corte em cada ponto de coleta, em cada amostragem, foi estimado utilizando o método de interpolação linear a partir de pontos das curvas de distribuição granulométrica das amostras. Com esses dados, pôde-se, então, obter o diâmetro de corte médio em cada ponto de coleta.

### Análise de eficiência

A eficiência da coleta é uma indicação do poder de separação do equipamento. A eficiência de coleta pode estar relacionada ao conjunto de partículas (eficiência global) ou a uma determinada dimensão de partícula (eficiência individual) (RODRIGUES, 2001). Assim, neste trabalho, a determinação da eficiência do ciclone foi realizada de dois modos:

- com base no balanço de massa do processo produtivo;
- por meio das equações para cálculo de eficiência de ciclones presentes na literatura. Este último foi realizado tanto usando dados de projeto quanto dados de operação do ciclone.

### Eficiência parcial

A eficiência parcial,  $\bar{\eta}$ , para cada diâmetro de partícula é dada pela Equação 2. Essa equação é uma aproximação feita da curva de eficiência obtida experimentalmente por Lapple (1951) e deve ser usada para ciclones da configuração Lapple.

$$\bar{\eta} = \frac{(D_p/D_{50})^2}{1 + (D_p/D_{50})^2} \quad (2)$$

Em que:

$D_p$  = o diâmetro de partícula para o qual se deseja saber a eficiência.

### Eficiência global

A eficiência global,  $\eta$ , é definida como a fração da massa de sólidos alimentados que é retirada pelo ciclone. Matematicamente, a eficiência global pode ser calculada por meio da medida da razão entre a massa de sólidos coletados no *underflow* e a massa total de sólidos alimentados no ciclone, conforme mostra a Equação 3:

$$\eta = \frac{W_{su}}{W_s} \quad (3)$$

Em que:

$W_{su}$  = a massa de sólidos no *underflow* do ciclone;

$W_s$  = massa de sólidos na alimentação do ciclone calculado da seguinte forma (Equação 4):

$$W_s = FCM - MBM - BM - CM - LA \quad (4)$$

Na qual:

FCM = a massa da alimentação do forno;

MBM = a massa do bloco fundido;

BM = a massa da casca;

CM = a massa da crosta;

LM = a perda para a atmosfera, que pode ser calculada da seguinte forma (Equação 5):

$$LA = FCM - MBM - CM - CU - SFU \quad (5)$$

Em que:

CU = a massa do *underflow* do ciclone;

SFU = a massa do *underflow* do filtro de mangas.

Além disso, uma vez conhecida a distribuição granulométrica das partículas,  $x = x(D)$  e a eficiência individual de coleta, é possível estabelecer o valor da eficiência global de coleta no campo centrífugo, utilizando-se a Equação 6:

$$\bar{\eta} = \int_0^1 \eta dx \quad (6)$$

A integração da Equação 6 para uma situação em que a distribuição granulométrica possa ser representada pelo modelo Rosin-Rammmler-Bennet (RRB), para o caso dos ciclones Lapple e Stairmand, leva, segundo Massarani (1989), à seguinte equação para eficiência global  $\eta_{RRB}$  do ciclone (Equação 7):

$$\eta_{RRB} = \frac{1.11n}{0.118 + n} \left( \frac{D'}{D_{50}} \right) \quad (7)$$

Em que:

$n$  e  $D'$  = parâmetros do modelo de distribuição granulométrica RRB.

Ainda, para cálculo de eficiência via Equação 7, é preciso determinar os parâmetros  $n$  e  $D'$  do modelo RRB. Para realizar a estimação paramétrica, utilizaram-se os dados de granulometria da pior condição de operação dentre as amostradas, ou seja, a condição de operação com maior granulometria média na *underflow*.

O tratamento estatístico dos dados experimentais de concentração de particulados foi realizado por meio da análise de variância (ANOVA), a fim de determinar se havia diferenças significativas na operação do sistema de exaustão nas diferentes fases da produção, e nos diferentes dias da semana. Para os cálculos estatísticos, foi utilizado o *software* R.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Classificação do ciclone

A Tabela 2 apresenta as relações geométricas normalizadas das famílias de ciclone (MASSARANI, 1997) e o ciclone estudado. Nota-se que o ciclone estudado não se enquadra em nenhuma das famílias comparadas. A que melhor se enquadra é a família Lapple e, por isso, neste trabalho, foram utilizadas equações de estimação de diâmetro de corte e eficiência indicadas para essa família.

### Análise granulométrica

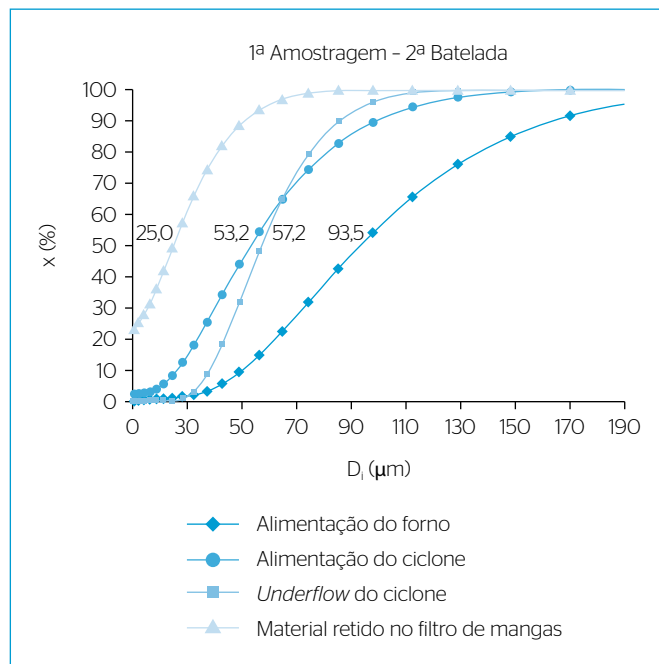
Utilizando dos resultados de diâmetro ( $D_i$ ) e volume (%) de partícula, obtidos na análise granulométrica das amostras realizada no equipamento Malvern, pôde-se obter a curva de distribuição granulométrica de cada amostra. Para isso, calculou-se a porcentagem da fração em massa acumulada ( $x$ ) para cada diâmetro de partícula ( $D_i$ ).

As curvas  $x$  versus  $D_i$  dos dados granulométricos obtidos em um mesmo horário (definam-se coletas de dados obtidos em um mesmo horário como amostragem) são apresentadas em um único

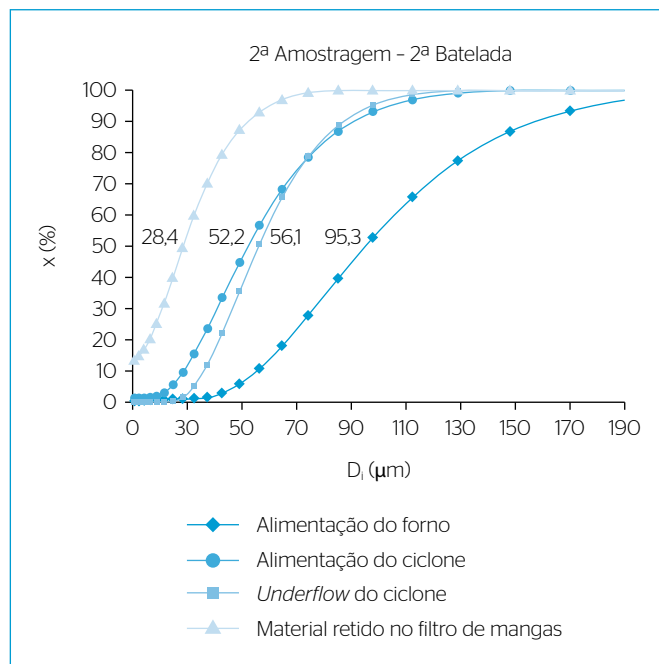
**Tabela 2** - Comparação das relações geométricas normalizadas das famílias de ciclone e o ciclone estudado.

Dimensões	Ciclone			
	Lapple	Stairmand	Niigas-11	Estudado
$B_c/D_c$	1	1	1	1
$D_o/D_c$	2	3	2	2
$H_c/D_c$	2	3	2	2
$L_c/D_c$	8	8	8	4
$S_c/D_c$	2	3	5	2
$Z_c/D_c$	8	13	8	5
$D_u/D_c$	1	2	1	1

gráfico. As Figuras 3 a 5 ilustram as curvas de distribuição granulométrica, em que a curva vermelha representa a distribuição granulométrica da alimentação do forno; a azul, da alimentação do ciclone; a amarela, do *underflow* do ciclone; e a verde, o material coletado no filtro manga.



**Figura 3** - Curvas  $x$  versus  $D_i$  da amostragem feita no dia 19 de outubro de 2014 às 23h30.



**Figura 4** - Curvas  $x$  versus  $D_i$  da amostragem feita no dia 20 de outubro de 2014 às 08h.

**Diâmetro de corte do ciclone**

Com a Equação 1, foram calculados o  $D_{50\text{calculado}} = 37 \mu\text{m}$  e  $D_{50\text{projeto}} = 54,8 \mu\text{m}$ , utilizando, respectivamente, velocidade e vazão, medidos (valores de operação) e de projeto. Desse ponto em diante, demais grandezas estimadas utilizando os valores  $D_{50\text{calculado}}$  e  $D_{50\text{projeto}}$  recebem, respectivamente, os subscritos “calculado” e “projeto”.

Nota-se que o  $D_{50\text{calculado}}$  é menor que o  $D_{50\text{projeto}}$ . Isso ocorre por causa do aumento na velocidade utilizada na operação em relação à de projeto, respectivamente 16,2 e 24,0 m/s.

Os diâmetros de corte em cada ponto de coleta, em cada amostragem, estão resumidos na Tabela 3. A partir desse ponto, referem-se aos valores médios de  $D_{50}$  calculados utilizando-se dados operacionais como  $D_{50\text{operação}}$ . Demais grandezas estimadas utilizando os valores  $D_{50\text{operação}}$  recebem o subscrito “operação”.

Vê-se que  $D_{50\text{operação}}$  da alimentação do ciclone tem o valor de 53,9  $\mu\text{m}$ . Valores de diâmetros de corte dessa ordem são bastante elevados,

indicando baixa eficiência do ciclone; dessa forma, o filtro de mangas, eficiente para partículas da ordem de 10  $\mu\text{m}$  (MACINTYRE, 2011), está sendo saturado, tendo eficiência e vida útil das mangas reduzidas.

O diâmetro de corte  $D_{50\text{operação}}$  da alimentação do ciclone e do *underflow* do ciclone estão próximos; espera-se, assim, que o ciclone tenha ótima eficiência. Santini (2011) diz que os ciclones têm eficiência de remoção acima de 90% para partículas maiores que 50  $\mu\text{m}$  e acima de 80% para partículas entre 20 e 50  $\mu\text{m}$ . Acredita-se que isso não ocorra no sistema de exaustão em análise, pois o  $D_{50\text{operação}}$  do material retido no filtro de manga é elevado, em média 35,1  $\mu\text{m}$ . Além disso, a partir das curvas *x versus D<sub>i</sub>*, nota-se que nas primeiras amostragens realizadas em quatro bateladas houve cruzamento das curvas da alimentação do ciclone e *underflow* do ciclone. Tipicamente, a curva da alimentação do ciclone estaria localizada entre a curva do *underflow* do ciclone e o material retido no filtro manga. Esse cruzamento pode indicar baixa eficiência do ciclone.

**Análise de eficiência**

**Eficiência parcial**

A partir do  $D_{50\text{projeto}}$ ,  $D_{50\text{calculado}}$  e  $D_{50\text{operação}}$ , foi calculada a eficiência parcial utilizando-se a Equação 2. O diâmetro da partícula utilizado para o cálculo de eficiência parcial foi o médio,  $D_{0,5}$ , fornecido na análise granulométrica do Malvern, da alimentação do ciclone. Foram obtidos  $\bar{\eta}_{\text{calculado}} = 0,70 = 70\%$ ,  $\bar{\eta}_{\text{projeto}} = 0,52 = 52\%$  e  $\bar{\eta}_{\text{operação}} = 0,53 = 53\%$ .

**Eficiência global**

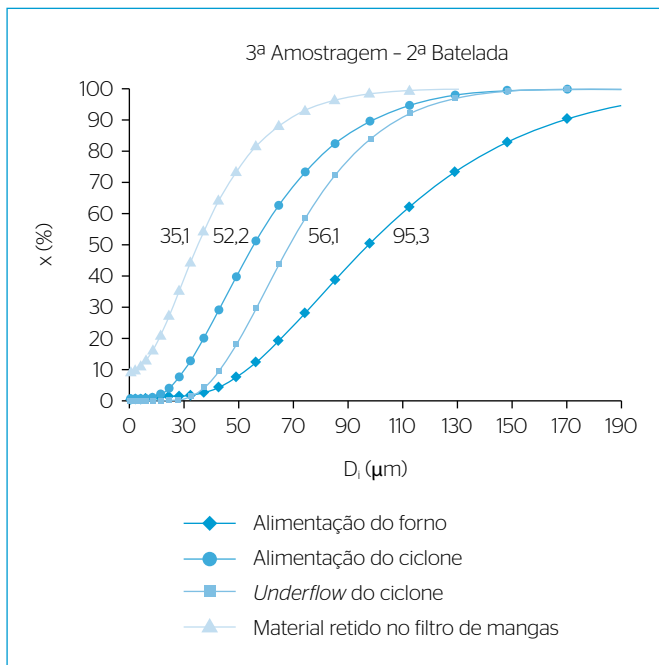
Aplicando-se as Equações 4 e 5 utilizando os valores médios das cinco bateladas, considerando-se que a perda ao fogo da matéria-prima é desprezível, chega-se a:

$$LA = 23.978,24 - 19.949,00 - 271,00 - 1.171,00 - 710,60 - 574,00 = 1.302,64 \text{ kg}$$

$$W_s = 23.978,24 - 19.949,00 - 271,00 - 1.171,00 - 1.302,64 = 1.294,60 \text{ kg}$$

A perda para a atmosfera durante o processo é muito alta, mais de uma tonelada por fornada, o que gera prejuízo financeiro e aumento de emissão para atmosfera, aumentando a insatisfação da vizinhança e poluindo.

Utilizando-se os valores  $W_s$  e  $W_{\text{SU}} = 710,60 \text{ kg}$  obtidos anteriormente, chega-se a uma eficiência global de coleta = 55,3%.



**Figura 5** - Curvas *x versus D<sub>i</sub>* da amostragem feita no dia 20 de outubro de 2014 às 15h.

**Tabela 3** -  $D_{50\text{operação}}$  obtidos por meio de interpolação linear.

Amostragem	1ª Batelada		2ª Batelada			3ª Batelada			4ª Batelada			5ª Batelada			Média
	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	
Alimentação do forno	95,7	94,9	93,5	95,3	97,7	85,0	82,2	84,2	93,8	93,0	104,2	87,0	91,2	98,7	92,6
Alimentação do ciclone	52,5	64,0	53,2	52,2	55,7	50,9	49,6	51,7	59,3	52,5	54,0	53,1	51,0	55,3	53,9
Ciclone <i>underflow</i>	52,5	71,1	57,2	56,1	68,8	50,8	58,4	61,9	54,2	58,1	54,4	55,5	56,4	62,2	58,4
Filtro manga	33,9	32,9	24,9	28,4	35,1	26,7	32,1	31,9	30,1	34,9	36,2	29,3	30,9	34,9	31,6

Verificou-se, a partir da ANOVA, que só houve diferença estatisticamente significativa (a 5% significância) das análises granulométricas obtidas para o *underflow* do ciclone nos diferentes horários de amostragem (tratamentos). O teste de comparação de médias Scott-Knott revelou que as médias granulométricas do *underflow* para 8 e 15h são estatisticamente equivalentes, com média maior do para as 23h. Assim, para isolar o pior ponto de operação, podem-se considerar tanto 8 quanto 15h. Escolheu-se o horário das 8h por ser o momento que representa a fase de regime do processo: às 23h, o forno está sendo ligado e o processo ainda é instável; às 8h, ainda há alimentação do forno; às 15h, é o término do processo e o forno está totalmente estabilizado e sem alimentação.

Com base nos dados de 8h do dia 18 de outubro de 2014, os parâmetros do modelo RRB foram determinados, por meio da estimação dos parâmetros via mínimos quadrados generalizados, utilizando o *software* R. Os parâmetros do modelo RRB estão descritos na Tabela 4. Nota-se que o valor p para ambos os parâmetros é 0, o que significa que estão estatisticamente ajustados ao modelo de forma significativa.

Utilizando-se os estimadores paramétricos obtidos nos ajustes de modelo RRB, aplicando-se a Equação 7, foi calculada a eficiência global  $\eta_{RRB} = 54,5\%$ .

### Discussão dos resultados de eficiência

Os resultados dos diâmetros de corte e eficiência foram transportados para a Tabela 5, a fim de facilitar a discussão e o entendimento.

Com o aumento da velocidade e da vazão utilizadas no sistema de exaustão, houve, pelos cálculos, redução do  $D_{50projeto}$  de 54,8  $\mu\text{m}$  para  $D_{50calculado}$  de 37  $\mu\text{m}$ . Esperava-se, com isso, segundo os cálculos, que a eficiência melhorasse de 52 para 70%. Esse aumento de eficiência não ocorreu, o que é comprovado por meio do valor de eficiência de 53% obtido a partir do  $D_{50operação} = 53,9 \mu\text{m}$ . As eficiências globais estimadas a partir de duas metodologias distintas também corroboram essa conclusão.

**Tabela 4 - Parâmetros do modelo Rosin-Rammeler-Bennet.**

	Valor	Desvio padrão	p
D'	64,79569	0,4525494	0
n	2,06780	0,0352426	0

**Tabela 5 - Resultados de  $D_{50}$  e eficiências.**

$D_{50}$	Eficiência parcial	Eficiência global
$D_{50operação} = 53,9 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{operação} = 53\%$	$\eta_{Mass\ balance} = 55,3\%$
$D_{50calculado} = 37,0 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{calculado} = 70\%$	$\eta_{RRB} = 54,5\%$
$D_{50design} = 54,8 \mu\text{m}$	$\bar{\eta}_{design} = 52\%$	$\eta_{RRB} = 54,5\%$

Conclui-se que a empresa aumentou a velocidade do fluxo de gás, aumentando, assim, o consumo energético, esperando ter ganho de eficiência, o que de fato não ocorreu. A comprovada baixa eficiência do ciclone explica a necessidade atual de os operadores do processo descarregarem o filtro de mangas durante as bateladas — com a baixa eficiência do ciclone, o filtro de mangas está sendo saturado, tendo eficiência e vida útil das mangas reduzidas.

A empresa deve adotar medidas corretivas para melhorar a eficiência do ciclone, sendo uma delas o seu redimensionamento.

### Redimensionamento do ciclone

Utilizando-se as relações geométricas do ciclone da família Lapple, foi feito o redimensionamento do ciclone contido no sistema de exaustão estudado. Mantendo-se o mesmo diâmetro da parte cilíndrica,  $D_c = 1.600 \text{ mm}$ , redimensionaram-se os demais parâmetros a partir das relações geométricas para projeto de um ciclone Lapple (RODRIGUES, 2001). O resultado está resumido na Tabela 6.

Ao fazer a comparação do ciclone atual com o ciclone redimensionado, nota-se, para o ciclone estudado, que os parâmetros  $D_o$ ,  $S_c$ ,  $H_c$ ,  $B_c$  e  $D_u$  são 330, 358, 350, 190 e 5 mm maiores e que os parâmetros  $L_c$  e  $Z_c$  são 900 e 180 mm menores do que o indicado para o ciclone da família Lapple.

Espera-se que com o redimensionamento do ciclone a eficiência esteja entre 70 e 90% (PACHECO, 2012).

## CONCLUSÃO

Neste projeto foi avaliada a eficiência do sistema de exaustão em um indústria de transformação mineral que utiliza processo de eletrofusão. Tal avaliação foi feita mediante a estimação da eficiência do ciclone por meio do balanço de massa, com estimativas calculadas com equações bem conhecidas na literatura utilizando dados de projeto e operacionais.

Os dados operacionais, como temperatura e vazão, foram medidos, dados de análise granulométrica foram obtidos com base em amostragens feitas em três diferentes horários, em quatro pontos do sistema de exaustão, em cinco dias de operação. As análises dos dados granulométricos revelaram que o ciclone opera com o diâmetro de corte médio de 53,9  $\mu\text{m}$ , valor elevado que indica baixa eficiência do ciclone. Com relação à eficiência do ciclone, todos os resultados encontram-se em torno de 55%, ou seja, baixos se comparados ao valor mínimo de 80%

**Tabela 6 - Configurações do ciclone estudado redimensionado.**

Parâmetros geométricos do redimensionamento do ciclone (mm)							
$D_c$	$D_o$	$S_c$	$L_c$	$Z_c$	$H_c$	$B_c$	$D_u$
1.600	800	992	3.200	3.200	800	400	400

sugeridos na literatura. As análises por balanço de massa e estimativa a partir de análise de modelo matemático corroboram o resultado.

Portanto, nota-se que a medida de aumento da vazão e velocidade do fluido no sistema de exaustão adotado pela empresa não melhorou sua eficiência, esperado pela empresa que ficasse em torno de 70%, aumentando somente o custo energético de operação do sistema.

Conclui-se que é necessário fazer o redimensionamento do ciclone para que haja melhoria no sistema de exaustão da empresa e redução da perda e emissão de material de particulado. Sugere-se também realizar um ensaio de operação de um ciclone piloto em escala reduzida para se obter a curva de eficiência em função da vazão, e determinar assim o ponto ótimo de operação do ciclone hoje instalado.

## REFERÊNCIAS

- AVCI, A.; KARAGOZ, I. (2003) Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Journal of Aerosol Science*, v. 34, n. 7, p. 937-955. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00054-5)
- BAKONYI, S.M.C.; DANNI-OLIVEIRA, I.M.; MARTINS, L.C.; BRAGA, A.L.F. (2004) Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. *Saúde Pública*, v. 38, n. 5, p. 695-700. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89102004000500012>
- CERRI, F.F.P. (2010) *Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química*. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CORRÊA, J.L.G.; GRAMINHO, D.R.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. (2004) The cyclonic dryer - a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n. 1. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322004000100011>
- FUKUI, K.; YOSHIDA, H.; JIKIHARA, K.; YAMAMOTO, T. (2011) Effects of clean-air injection on particle-separation performance of novel cyclone with sintered metal cone. *Separation and Purification Technology*, v. 80, n. 2, p. 356-363. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.05.021>
- LAPPLE, C.E. (1951) Dust and mist collection. In: PERRY, J.H. (org.). *Chemical Engineering Handbook*. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill.
- LEE, K.W.; GIESEKE, J.A.; PIISPANEN, W.H. (1985) Evaluation of cyclone efficiency in different gases. *Atmospheric Environment*, v. 19, n. 6, p. 847-852. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(85\)90229-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(85)90229-X)
- LIED, E.B. (2011) Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de moveis, em Sta. Terezinha de Itaipu, PR, Brasil. *Estudos Tecnológicos*, v. 7, n. 1, p. 1-11. <https://doi.org/10.1016/ete.2011.71.01>
- MACINTYRE, A.J. (2011) *Ventilação Industrial e Controle da Poluição*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- MAGALHÃES, L. (2005) *Estudo do material particulado atmosférico e metais associados às partículas totais em suspensão na cidade de Ouro Preto, MG*. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- MASSARANI, G. (1989) Projeto e Análise do Desempenho de Ciclones e Hidrociclones II. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 17., São Carlos. *Anais [...]*, v. 2, p.125-135.
- \_\_\_\_\_. (1997) *Fluid in Particulate Systems*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. p. 47-77.
- NASCIMENTO, L.F.; PEREIRA, L.A.A.; BRAGA, A.L.F.; MÓDOLO, M.C.C.; CARVALHO JR., J.A. (2006) Effects of air pollution on children's health in a city in Southeastern Brazil. *Saúde Pública*, v. 40, n. 1, p. 1-5. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89102006000100013>
- PACHECO, T.A. (2012) Como obter o rendimento máximo dos filtros de manga. *Química e Derivados*.
- PERRY, R.H.; GREEN, D. (1984) *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 6. ed. Nova York: McGraw-Hill.
- RODRIGUES, K. (2006) *Filtração de Gases: Estudo da Deposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes*. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- RODRIGUES, M.V. (2001) *Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas: Efeito da Permeabilidade do Meio Filtrante*. 111f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SÁ, A. (2007) *Meio ambiente do trabalho: conceituação e prevenção de riscos*. Disponível em: <[https://bloghorta.files.wordpress.com/2014/04/aula-nc2ba-3-artigo-meio\\_ambiente\\_trabalho\\_conceituacao\\_prevencao.pdf](https://bloghorta.files.wordpress.com/2014/04/aula-nc2ba-3-artigo-meio_ambiente_trabalho_conceituacao_prevencao.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2015.
- SANTINI, J. (2011) *Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de material particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo.
- YAMAMOTO, T.; OSHIKAWA, T.; YOSHIDA, H.; FUKUI, K. (2016) Improvement of particle separation performance by new type hydro cyclone. *Separation and Purification Technology*, v. 158, p. 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.020>

