

### III-037 - OTIMIZAÇÃO DE SEPARADOR CENTRÍFUGO DO TIPO CICLONE PARA A CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE PARTÍCULAS EM FÁBRICA DE TINTAS EM PÓ

**Celso Antonio Cipolato<sup>(1)</sup>**

Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP. Especialização em Administração Industrial pela Fundação Vanzolini – EPUSP. Mestre em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP. Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Pitágoras de Jundiaí - Brasil.

**Murilo Daniel de Mello Innocentini<sup>(2)</sup>**

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutor em Engenharia Química pela UFSCar – Brasil. Pós-doutorado em Engenharia de Materiais pela UFSCar – Brasil. Professor Titular do curso de Engenharia Química da Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP – Brasil . Professor do curso de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental da UNAERP – Brasil.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Humberto Formes, 88 – Vila Edith – Jundiaí – SP – Brasil, CEP 13206-620, Fone: +55 11 4526-4419 e +55 11 8666-1575 - e-mail: [cipolato@terra.com.br](mailto:cipolato@terra.com.br)

#### **RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo propor e implementar alterações no processo industrial produtivo de tinta em pó à base de resina poliéster de forma a reduzir a fração de finos (partículas menores que 10  $\mu\text{m}$ ) da composição final do produto vendido aos clientes. A classificação granulométrica ocorre industrialmente com a dispersão da tinta em pó em corrente gasosa e passagem do aerossol gerado em separadores centrífugos do tipo ciclone tangencial de fluxo reverso. Devido à operação não otimizada, os ciclones acabam coletando um produto com teor de finos mais elevado do que o desejado (4,48% para partículas  $< 10 \mu\text{m}$ ), que não são aproveitados durante o processo de aplicação da tinta nas peças, implicando em problemas ambientais de dispersão de aerossóis e em geração de resíduo perigoso classe 1. Neste projeto, executado em parceria com uma indústria de tintas em pó no Brasil, uma avaliação do desempenho atual de classificação foi realizada e um novo ciclone foi dimensionado, de modo a adequar a granulometria do produto coletado a uma curva alvo proposta pela empresa. O ciclone otimizado foi construído e sua operação resultou na obtenção de uma tinta em pó com granulometria mais próxima da curva alvo. As alterações implicaram em uma redução de 30 t/ano de resíduo classe 1, de um total produzido de tinta de 1300 t/ano pela empresa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ciclones, Separação granulométrica, Tinta em pó, Otimização, Resíduo Classe I.

#### **INTRODUÇÃO**

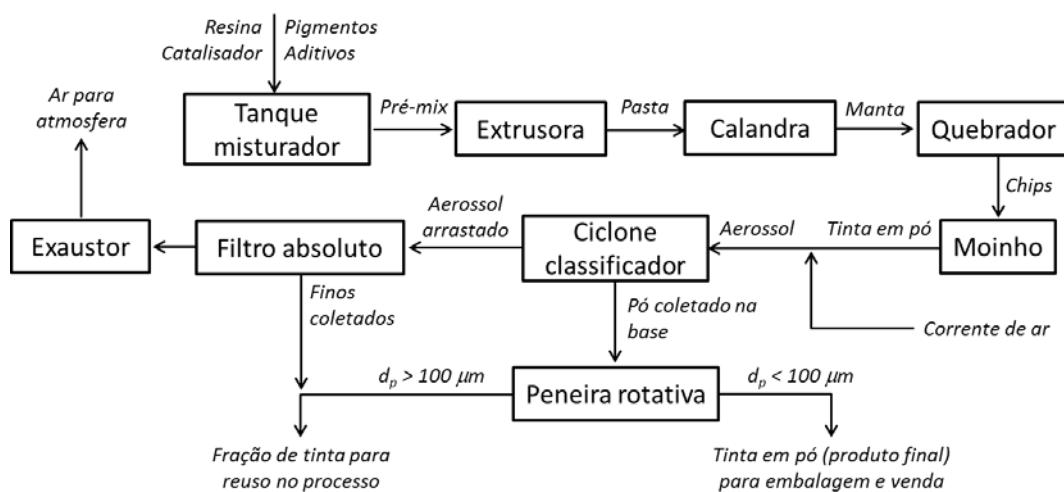
A indústria de tintas em pó produz no Brasil cerca de 50.000 toneladas anuais, das quais cerca de 8% (4.000 t/ano) são consideradas “finos”, isto é, um pó com granulometria inferior a 10  $\mu\text{m}$ . Em virtude de limitações no carregamento eletrostático das partículas da tinta durante sua aplicação [1-3], essa fração de finos não consegue ser adequadamente aderida às peças, resultando em um aerossol que quando inalado é nocivo ao trabalhador (material particulado respirável), mas que por fim também implica em um desperdício apreciável no processo, pelo resíduo sedimentado não aproveitado e não reutilizável pelas indústrias aplicadoras.

Um aspecto ambiental ainda mais grave do desperdício da fração de finos refere-se ao fato de que as formulações utilizadas nas tintas em pó à base de resina poliéster no Brasil empregam de 4,5 a 6% do agente de cura triglicidilisocianurato (TGIC) [4], ainda que esse composto seja definido desde 1998 pela Organização Mundial da Saúde como mutagênico e cancerígeno. Desta forma, essa tinta em pó não reaproveitada caracteriza-se pela Norma ABNT 10.004/2004 como resíduo Classe I – perigoso.

Estatísticas informais feitas pelos fabricantes com a colaboração das empresas aplicadoras no Brasil apresentam um fato preocupante: apenas 15% dos resíduos Classe I das tintas em pó são destinados corretamente (aterro Classe 1). O restante é descartado de diversas formas, todas ambientalmente incorretas, como, por exemplo, pela deposição no solo, na rede de esgotos e até mesmo pela coleta de resíduos sólidos urbanos.

A preocupação com o desperdício e com o descarte inadequado têm motivado as empresas produtoras a proporem melhorias em sua linha de produção para otimizar a granulometria das tintas em pó fornecidas aos clientes, de forma que a fração de finos não aderida às peças seja minimizada.

A fabricação de tintas em pó à base de resina poliéster abrange basicamente as etapas de pré-mistura, extrusão, moagem e classificação granulométrica por coletor centrífugo e por filtro do tipo cartucho [1-3]. Na fase de pré-mistura, os componentes da formulação são pesados e misturados em um tanque por um tempo e uma intensidade de agitação que dependem da tecnologia de cada empresa. Terminado o ciclo de mistura, o material é alimentado em uma extrusora para garantir a completa dispersão dos pigmentos e o molhamento da resina aos demais componentes da fórmula. Na saída da extrusora, o material pastoso é calandrado e resfriado ao mesmo tempo, dando origem a uma manta de polímero quebradiça. Essa manta passa por um quebrador para a formação de flocos (chips), que são transportados até um moinho de pinos, no qual ocorre a fragmentação do material até a formação de um pó com diâmetro tipicamente inferior a 100  $\mu\text{m}$ . A classificação granulométrica desse pó gerado ocorre por sua dispersão em uma corrente de ar (transporte pneumático) e passagem do aerossol por um separador centrífugo do tipo ciclone tangencial de fluxo reverso [x]. A fração do pó coletado na base do ciclone passa por uma peneira rotativa, apenas para a remoção de partículas grosseiras ( $d_p > 100 \mu\text{m}$ ), que não devem ser incorporadas ao produto final. A fração passante na peneira rotativa corresponde ao produto final, ou seja, à tinta em pó a ser embalada e enviada ao cliente. A fração de pó fino não coletado e arrastado no topo do ciclone é coletada em um filtro absoluto do tipo cartucho e é reciclado dentro da própria empresa, não sendo assim caracterizado como resíduo. A Figura 1 esquematiza o processo produtivo industrial da tinta em pó à base de resina poliéster analisado neste trabalho.



**Figura 1: Fluxograma do processo produtivo de tinta em pó à base de resina poliéster.**

Com base no processo produtivo descrito, observa-se que há possibilidade do ajuste granulométrico do produto final (tinta em pó para venda) em duas etapas: durante a fragmentação dos chips no moinho de pinos ou então durante a separação granulométrica no ciclone. Neste trabalho, esta última alternativa foi selecionada, sendo o estudo realizado em uma empresa que produz anualmente 1300 t de tinta em pó, das quais 110 t correspondem aos finos indesejáveis, que acabam sendo desperdiçadas no processo de aplicação pelos clientes e convertidos em resíduos perigosos de Classe I. O estudo teve como objetivo a análise do desempenho do sistema de coleta por ciclone instalado na indústria e sua otimização para reduzir a fração de finos ( $d_p < 10 \mu\text{m}$ ) na tinta à base de poliéster de 8% para 6%, sem afetar a coleta para frações maiores de partículas. Para isso, um novo ciclone foi projetado, construído, instalado e avaliado. O desempenho de coleta na faixa de 1 a 10  $\mu\text{m}$  foi verificado e comparado com a teoria.

## METODOLOGIA

A indústria em estudo forneceu inicialmente a curva granulométrica desejada para a tinta a ser comercializada (curva-alvo), de forma a minimizar o desperdício junto aos clientes. Desta forma, idealmente, todo o pó coletado na base do ciclone deveria apresentar uma distribuição granulométrica discreta e acumulada similar à curva alvo da Figura 2. Observa-se que a fração acumulada desejada até o diâmetro de partícula de 10  $\mu\text{m}$  corresponde a cerca de 4,5% do total e que a tinta deve ter partículas limitadas entre 1 e 100  $\mu\text{m}$ .

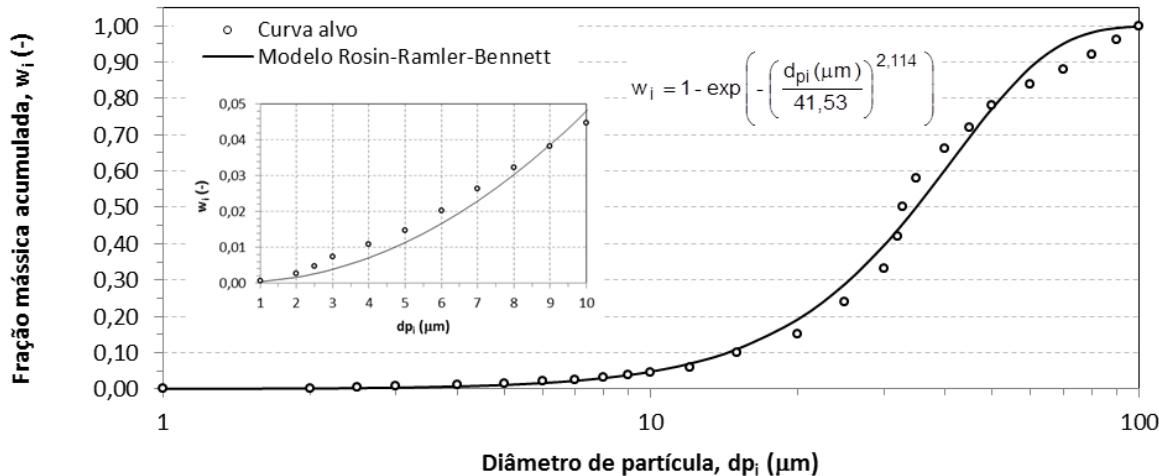


Figura 2: Distribuição granulométrica acumulada desejada para o pó coletado no ciclone (curva-alvo).

A próxima etapa realizada foi um mapeamento na indústria das condições operacionais praticadas na linha de transporte pneumático e no ciclone separador da tinta em pó. A Figura 3 mostra esquema do sistema instalado para a amostragem isocinética do aerossol, bem como destaca as dimensões úteis do ciclone que foram levantadas para a análise e a otimização do processo.

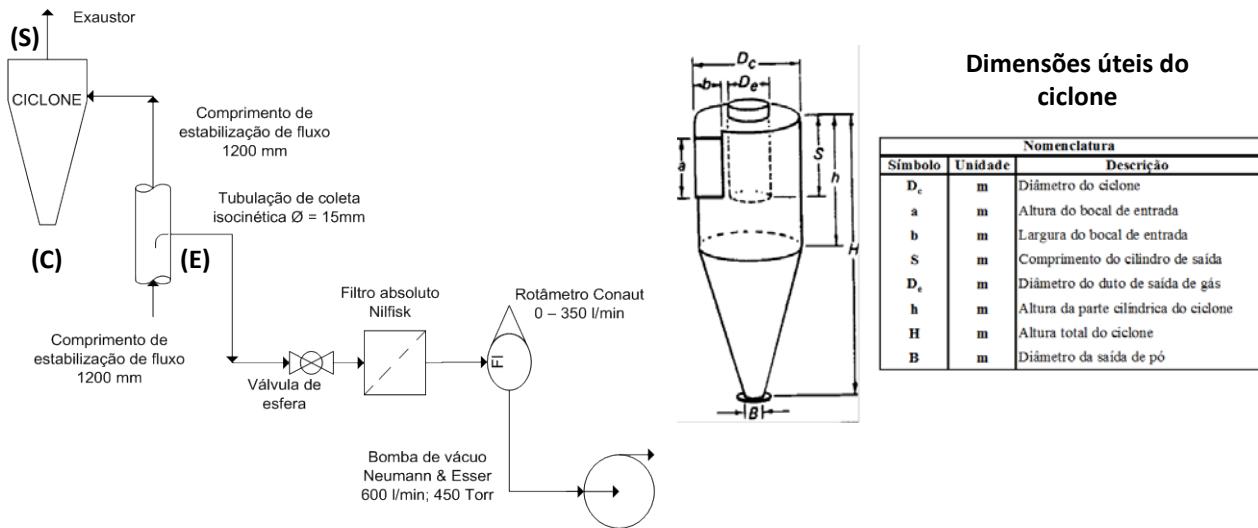


Figura 3: Esquematização do sistema para coleta de amostras de pó em regime isocinético.

A vazão volumétrica, temperatura e pressão absoluta da corrente gasosa, bem como a concentração mássica de pó disperso na entrada do ciclone (E) foram avaliadas experimentalmente através de coleta isocinética. A vazão mássica de tinta coletada foi obtida por pesagem de material no ponto (C), enquanto a vazão mássica e a concentração do pó arrastado do ciclone (S) foram obtidas por balanço de massa.

As curvas de distribuição granulométrica do material particulado nos pontos E e C foram obtidas por análise das amostras em instrumento Malvern 2000®, utilizando-se via seca, acoplado a aspirador Nilfisk® especialmente projetado para essa aplicação. Foram levantados 8 conjuntos de dados tanto para o pó coletado

(C) como para o pó na entrada do ciclone (E). As amostras do pó coletado no ciclone foram retiradas a cada 120 kg produzidos, anotando-se normalmente a temperatura e umidade relativa do ar nas folhas de processo.

Uma curva de eficiência de coleta teórica do ciclone em operação foi obtida com base nas suas dimensões úteis e no modelo proposto por Leith e Iozia [5-6]. Essa curva foi comparada com a curva experimental de coleta, obtida pela análise conjunta de distribuição granulométrica e o balanço global de massa no ciclone.

Com base na curva-alvo mostrada na Figura 2 e na distribuição granulométrica do pó na entrada do ciclone, obteve-se uma curva de eficiência de coleta desejada para o ciclone. Essa curva foi inicialmente comparada com a curva real apresentada pelo ciclone instalado na planta e depois foi utilizada como base para o dimensionamento de um novo ciclone.

O processo de dimensionamento otimizado do novo ciclone foi baseado nas equações de Leith e Iozia [5-6] para a previsão da eficiência fracionária de coleta ( $\eta_i$ ) e da queda de pressão no ciclone ( $\Delta P$ ):

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{50} / d_{pi})^\beta} \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{\rho_{ar} v_i^2}{2} \Delta H \quad (2)$$

sendo que  $d_{50}$  é o diâmetro de Stokes para a partícula com 50% de eficiência de coleta ( $\mu\text{m}$ ),  $d_{pi}$  é o diâmetro da partícula cuja eficiência de coleta está sendo calculada ( $\mu\text{m}$ ),  $\beta$  é um expoente empírico adimensional,  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v_i$  é a velocidade do ar na entrada do ciclone ( $\text{m/s}$ ) e é  $\Delta H$  um parâmetro geométrico adimensional proposto por Ramachandran [5], respectivamente calculados por:

$$v_i = \frac{Q}{ab} \quad (3)$$

$$\Delta H = 20 \left( \frac{ab}{D_e^2} \right) \left[ \frac{S/D_c}{(H/D_c)(h/D_c)(B/D_c)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

As dimensões do ciclone  $D_c$ , a, b, H, h, S, B e  $D_e$  são definidas conforme a Figura 3. O diâmetro do ciclone  $D_c$  (m) pode ser obtido pela Equação (5), sendo que  $Q$  é a vazão volumétrica da corrente gasosa ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e  $R$  é um parâmetro recomendado de velocidade ( $\text{m/s}$ ) estabelecido na literatura para cada família de ciclones [5].

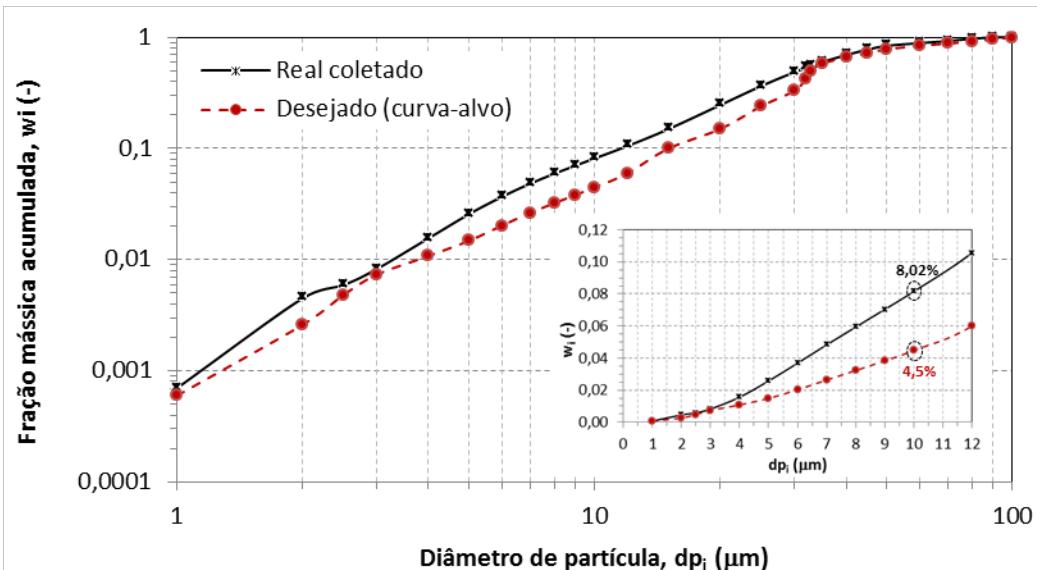
$$D_c = \sqrt{\frac{Q}{R}} \quad (5)$$

Neste projeto, foram testadas 6 famílias de ciclones reconhecidas pela literatura: Swift de propósitos gerais, Lapple de propósitos gerais, Swift de alta eficiência, Stairmand de alta eficiência, Swift de alta vazão e Stairmand de alta vazão [5-6]. A meta para o processo iterativo de otimização foi a obtenção de modelo e dimensões do ciclone que resultasse em uma fração acumulada de finos (com  $d_{pi} < 10 \mu\text{m}$ ) no pó coletado na base do ciclone com valor mais próximo daquele estabelecido pela curva alvo (4,5%).

## RESULTADOS

A análise operacional no ciclone originalmente instalado na planta indicou uma vazão volumétrica de ar de 1800  $\text{m}^3/\text{h}$  a  $25^\circ\text{C}$  e 696 mmHg, vazão mássica de pó alimentado no ciclone de 180 kg/h, sendo que 172 kg/h eram coletados pelo ciclone e 8 kg/h eliminados pela corrente gasosa (e posteriormente recuperados em filtro cartucho). A concentração de pó na entrada do ciclone era de 100  $\text{g/m}^3$ , enquanto que a concentração de saída era de 4,44  $\text{g/m}^3$ . A densidade do material particulado era de 1650  $\text{kg/m}^3$ . A eficiência global de coleta experimental do ciclone era de 95,6%, com perda de carga de 550 Pa ( $\sim 5,5 \text{ cmH}_2\text{O}$ ).

A análise de distribuição granulométrica do pó coletado na base do ciclone confirmou que a curva alvo desejada pela empresa não estava sendo obtida em seu processo produtivo, principalmente na faixa de finos ( $d_p < 10 \mu\text{m}$ ), conforme observado na Figura 4. Na prática, a fração real de finos (8,02%) presentes no produto era praticamente o dobro da fração desejada para o produto (4,5%).

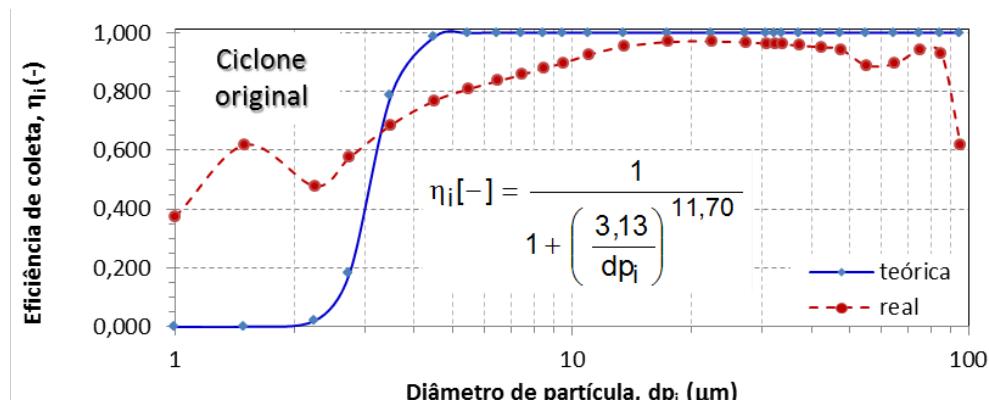


**Figura 4: Distribuição granulométrica acumulada para o material coletado na base do ciclone originalmente instalado na planta e sua comparação com a curva alvo desejada.**

Através das dimensões do ciclone instalado, das condições operacionais e das Equações (1) a (5), a curva de eficiência teórica do ciclone original foi obtida e comparada com a curva experimental, conforme Figura 5. Observa-se na Figura 5 que a eficiência de coleta experimental para partículas menores que  $10 \mu\text{m}$  é muito maior do que a prevista pelo modelo teórico. Uma razão para esse comportamento poderia ser a elevada concentração de particulados na entrada do ciclone ( $C_E = 100 \text{ g/m}^3$ ), que acentua a coleta de partículas finas no campo centrífugo através da interposição de trajetórias das partículas arrastadas para as paredes do ciclone [5]. A Equação (6) prediz que quanto maior a concentração de particulados na entrada ( $C_E$ ), maior será a eficiência global de coleta ( $\eta_G$ ), e vice-versa [7]:

$$\eta_{G2} = 1 - \frac{1 - \eta_{G1}}{(C_{E2}/C_{E1})^{0,182}} \quad (6)$$

Sendo  $\eta_{G2}$  e  $C_{E2}$  respectivamente a eficiência global de coleta e a concentração de pó na entrada do ciclone em uma situação de interesse (2) e  $\eta_{G1}$  e  $C_{E1}$  a eficiência global de coleta e a concentração de pó na entrada do ciclone em uma situação conhecida (1).

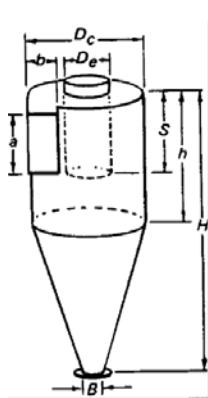


**Figura 5: Curvas de eficiência de coleta fracionária teórica e real para o ciclone instalado na planta.**

Desta forma, a primeira ação praticada para tentar diminuir o teor de finos coletados no ciclone foi a diminuição da concentração de entrada de particulados ( $C_E$ ), sem, contudo, alterar a vazão mássica total de tinta processada ( $W_E$ ). Sabendo-se que  $C_E = W_E/Q$ , a redução de concentração foi promovida através do aumento da vazão volumétrica dos gases (Q) pela alteração na rotação do exaustor. O valor de Q foi alterado de  $1800 \text{ m}^3/\text{h}$  para  $2160 \text{ m}^3/\text{h}$  (aumento de 20%, próximo do máximo possível de ser conseguido pelo exaustor), implicando assim uma redução de 16,7% na concentração de entrada (de 100 para  $83,3 \text{ g/m}^3$ ).

Dois efeitos opostos são esperados em uma alteração dessas: aumento da eficiência global de coleta pelo aumento da velocidade tangencial no ciclone, porém diminuição do efeito de interferência das trajetórias das partículas, diminuindo a coleta de finos. Os resultados obtidos, porém, não foram suficientes, pois não houve alteração necessária do perfil de coleta de finos.

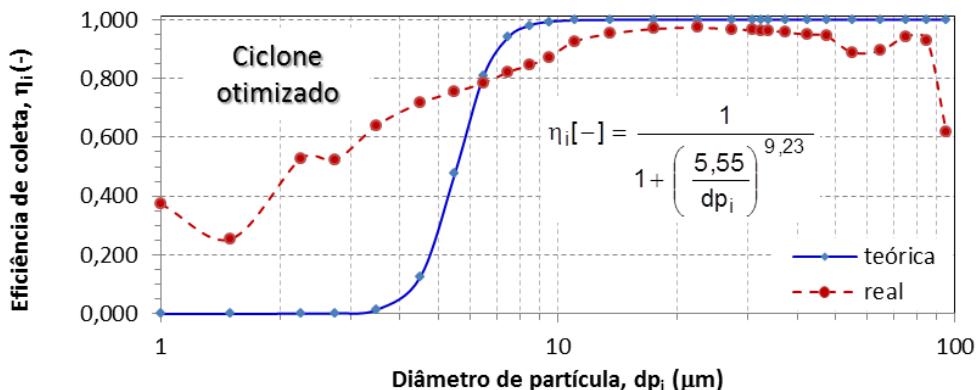
A alternativa então adotada foi o dimensionamento de um novo ciclone que apresentasse menor eficiência de coleta para partículas  $< 10 \mu\text{m}$ . O critério de projeto adotado foi a manutenção simultânea de uma baixa perda de carga no ciclone ( $\sim 400 \text{ Pa}$ ) e de uma alta eficiência global de coleta (~96,5%), de modo a não comprometer o funcionamento do exaustor e nem a produção de tinta na planta. A vazão de projeto foi fixada em  $2160 \text{ m}^3/\text{h}$ , que permitiria a máxima redução na concentração de entrada para  $83 \text{ g/m}^3$ . Seis modelos de ciclones padronizados foram testados através de uma rotina elaborada em planilha Excel® 2010 para a minimização do erro entre a curva alvo e a curva teórica para o produto coletado na base do ciclone. O modelo de ciclone que mais se adequou à curva-alvo desejada foi o do tipo Stairmand de alta vazão [5]. Esse ciclone foi construído e posto em operação na indústria em substituição ao ciclone original. A Figura 6 mostra um comparativo de dimensões e de parâmetros de operação do ciclone original e do ciclone otimizado.



Parâmetro	Ciclone	
	Original	Otimizado
$D_c$ [mm]	330	463
$a$ [mm]	275	347
$b$ [mm]	100	174
$H$ [mm]	1290	1853
$h$ [mm]	630	695
$D_e$ [mm]	203	347
$B$ [mm]	152	174
$S$ [mm]	440	405
$Q$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	1800	2160
$C_E$ ( $\text{g/m}^3$ )	100	83,3
$\Delta P$ ( $\text{cmH}_2\text{O}$ )	5,5	4,4
$\eta_G$ (%)	95,6	96,5

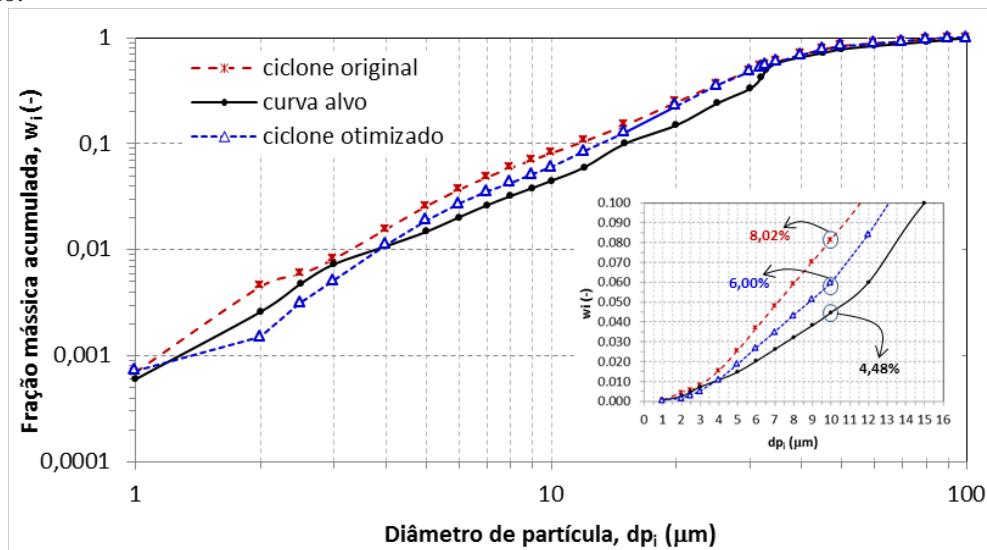
**Figura 6: Comparativo de dimensões do ciclone original e do ciclone otimizado.**

A Figura 7 mostra a comparação das curvas teóricas e experimentais do ciclone otimizado dimensionado neste projeto. Observa-se que a nova curva de eficiência fracionária teórica (curva azul) foi deslocada para a direita em relação à curva teórica do ciclone original da Figura 5, implicando em maior diâmetro de corte ( $5,55 \mu\text{m}$  ao invés de  $3,13 \mu\text{m}$ ) e menor eficiência para partículas finas. Observa-se também que embora a eficiência experimental de coleta para partículas com  $d_{pi} < 6 \mu\text{m}$  tenha sido superior à teórica, houve uma redução do efeito da concentração em comparação com a do ciclone original (curvas vermelhas das Figuras 7 e 5, respectivamente).



**Figura 7: Curvas de eficiência fracionária de coleta teórica e real para o ciclone otimizado.**

O efeito resultante da alteração do ciclone na qualidade do produto coletado (tinta para a venda) pode ser visto na Figura 8, que compara as granulometrias da curva alvo e das tintas coletadas no ciclone original e no ciclone otimizado.



**Figura 8: Comparação das granulometrias para a curva alvo e para o material coletado na base do ciclone original e para o ciclone otimizado.**

A Figura 8 confirma que a substituição do ciclone original instalado na planta pelo modelo Stairmand otimizado resultou em uma redução no teor de finos ( $dp_i < 10 \mu m$ ) do pó coletado de 8,02% para 6,00%. Esse valor é mais próximo ao valor proposto pela curva alvo (4,48%). Nota-se também que para partículas com  $dp_i > 10 \mu m$ , as curvas mantiveram-se muito próximas, o que foi comprovado pela elevada eficiência global de coleta do ciclone projetado de 96,5%. A queda de pressão experimental do novo ciclone (440 Pa) também foi muito próxima do valor de projeto (400 Pa).

## CONCLUSÕES

A partir do mapeamento das condições de operação na planta e da otimização proposta para o ciclone coletor, foi possível alterar a granulometria do produto (tinta em pó) de modo a diminuir seu teor de finos. Com isso, houve uma redução da geração de resíduos Classe I que são enviados aos clientes, da ordem de 30 toneladas por ano e, portanto, esse volume de resíduos perigosos passa a ser descartado de forma correta: 15% destinados a unidades credenciadas de processamento de resíduos perigosos e 85% reaproveitados internamente, compondo até 4% das formulações de tintas. Conclui-se finalmente que a contribuição à qualidade do meio ambiente foi expressiva. O método de otimização das dimensões do ciclone separador para ajuste da granulometria da tinta em pó mostrou-se adequado e confiável.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BIANCHI, C., Tintas em pó – um avanço tecnológico em revestimento. São Paulo: Unida Artes Gráficas Editora Ltda., 1990.
2. HOWELL, D.M. The technology, formulation and application of powder coatings. London: John Wiley and Sons Ltd., 2000.
3. POWDER COATINGS INSTITUTE. The Complete Finishers Handbook. Alexandria – VA – USA: C.J.Krebiel Company, 1999.
4. CAMARGO, M., Resinas poliésteres carboxifuncionais para tintas em pó: caracterização e estudo cinético da reação de cura. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
5. WANG, L.K., PEREIRA, N., HUNG, Y-T, Handbook of Environmental Engineering Vol. 1: Air pollution control engineering. Totowa-NJ, USA: Humana Press Inc., 2004.
6. HOFFMANN, A.C., STEIN, L.E., Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation. Second Edition. Springer, 2008.
7. THEODORE, L., Air Pollution Control Equipment, John Wiley & Sons, Inc., 2008.