

Construção de ciclone a partir de materiais recicláveis

Construction of cyclone from recyclable materials

Fernanda Peres Tavares, Guilherme Araújo Silveira, Isabella Ribeiro Jorge, Larissa Silva Paiva, Pâmella Oliveira Bernardo Ferreira, Roberta Moreno Pignata, Stella Ramos Tavares, José Luiz Vieira Neto, Davi Leonardo de Souza*

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química
*e-mail: davi.souza@uftm.edu.br

Resumo: Esta pesquisa buscou desenvolver um projeto de construção de um ciclone de acordo com as dimensões pré-definidas de garrafas de vidro e de plástico, pois esses materiais são recicláveis e de baixo custo. As dimensões das respectivas garrafas foram comparadas com famílias já existentes. Observou-se que somente a garrafa de vidro se enquadrava nas correlações da família Lapple, foi necessária a criação de uma nova família para a garrafa PET. Após a construção do ciclone foram feitos testes para a verificação da eficiência de coleta, através da análise das partículas coletadas do underflow. Apesar de terem ocorridos problemas durante o processo de construção e operação, obteve-se uma boa eficiência de separação de partículas sólido-gás e foi possível a realização da análise das partículas utilizadas. Verificou-se, dessa forma, a viabilidade do projeto, constatando que este pode ser oferecido a empresas, devido aos valores de eficiência encontrados.

Palavras-chave: Ciclone; Separadores ciclônicos; Protótipo; Materiais recicláveis.

Abstract: *This research aimed to develop a project to build a cyclone according to the predefined dimensions of glass and plastic bottles because these materials are recyclable and low cost. The dimensions of the respective bottles were compared with existing families. It was observed that only the glass bottle fit the correlations of the Lapple family, it was necessary to create a new family for the PET bottle. After the construction of the cyclone, tests were carried out to verify the efficiency of the collection, through the analysis of the collected particles of the underflow. Although problems occurred during the construction and operation process, good separation efficiency of solid-gas particles was obtained and analysis of the particles used was possible. The feasibility of the project was verified, confirming that this can be offered to companies, due to the efficiency values found.*

Keywords: *Cyclone; Cyclonic separators; Prototype; Recyclable materials.*

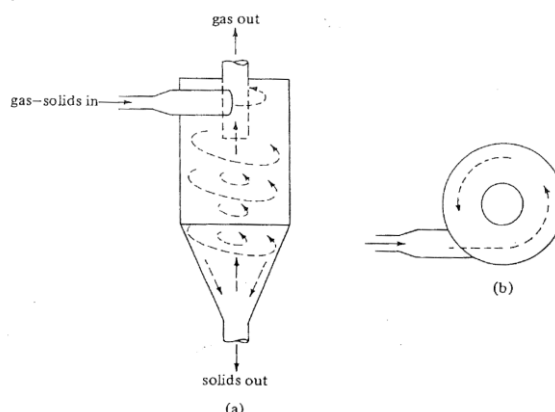
INTRODUÇÃO

Ciclones têm sido usados na indústria como separadores sólido-gás desde o final do século XIX, devido à sua elevada eficiência de separação para partículas com diâmetro na faixa de 5 a 100 μm e à baixa queda de pressão provocada pelo equipamento. Além disso, ciclones representam uma das mais simples formas construtivas de equipamentos de processo encontrados industrialmente. Por ser um equipamento de baixo custo de

investimento, manutenção e de fácil adaptabilidade a uma grande faixa de aplicações, os ciclones são seculares e amplamente utilizados principalmente na separação de poeira e pó fino de uma corrente gasosa (VEGINI, 2007). Possui varias aplicações, como a secagem por pulverização de alimentos, retirar gotículas dispersas no ar e principalmente, controle da poluição do ar.

A operação do ciclone pode ser caracterizada por partículas sólidas em suspensão no ar, sob ação de força centrífuga, que tendem a deslocar-se para a película de ar junto às paredes do ciclone. Por definição, de acordo com Geankoplis (1993), os ciclones são constituídos de um cilindro vertical com uma saída cônica, como indicada na **Figura 1**. No corpo cilíndrico o gás inicia um movimento espiralado descendente, criando uma força centrífuga, intensificada na seção cônica, que impele as partículas na direção da parede do ciclone, onde elas são coletadas. Em oposição à força centrífuga, existe a força de arrasto causada pelo movimento do fluxo de gás em direção ao eixo central do ciclone e a turbulência da corrente gasosa, cujo efeito combinado carrega as partículas não coletadas para o duto de saída, o overflow (WANG *et al.*, 2004).

Figura 1 - Vista lateral (a) e a superior (b) de um separador ciclônico.



Fonte: GEANKOPLIS (1993).

A recuperação de sólidos total é definida como a quantidade de sólidos capturados ou separados. Assim, a capacidade de separação do equipamento é dada através de sua eficiência de coleta, em que esta, por sua vez, é dada pelo diâmetro de corte (d^*), isto significa que partículas com diâmetro menor que o d^* dificilmente serão coletadas, pois mesmo à vazões de entrada mais baixas, não há tempo suficiente para que elas alcancem as paredes, portanto, estas partículas saem no *overflow*, a saída superior de ar (GEANKOPLIS, 1993).

A distribuição ou análise granulométrica é um estudo da distribuição das dimensões dos

grãos de determinado tipo de partícula, assim, o principal objetivo é conhecer a distribuição granulométrica do agregado e representá-la através de um modelo, o que possibilita a determinação de suas características físicas. Esse método pode ser realizado por peneiramento, sedimentação, pela combinação de ambos ou até mesmo por difração de laser. Contudo, os problemas relacionados com a análise granulométrica começam com a escolha do método a utilizar, pelo número de partículas presentes ou por peso das partículas (PERRY, 1999).

Os materiais utilizados para a fabricação dos ciclones industriais são geralmente metálicos como alumínio, aço inox e *mild steel* com revestimento cerâmico para prolongar o período de manutenção por desgaste devido à abrasão. Segundo Giacomini (2007), o vidro tem propriedades apreciáveis para a construção de um ciclone, devido a apresentar dureza e resistência à abrasão, durabilidade química e a intempéries, dentre outras. O PET é uma alternativa ecológica devido à sua grande facilidade de reuso, combinada com sua alta resistência e leveza que são características que devem ser levadas em consideração. Por isso são largamente utilizados para embalagens que exigem maior durabilidade, como bebidas carbonadas.

Com base nos fundamentos teóricos, o presente trabalho realizou um estudo teórico e experimental da separação de um sólido fino do ar. Os materiais particulados utilizados foram areia, calcário agrícola e terra, e para a construção do projeto foram utilizados materiais recicláveis como garrafas de vidro e de plástico PET. A partir dos ciclones projetados, foi possível analisar as eficiências globais dos mesmos em função da quantidade de partículas recolhidas no *underflow*, além da realização da análise granulométrica destas.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Materiais utilizados

Secador, garrafas PET e vidro, junções em T e Y em PVC, ampolheta, materiais de vedação, materiais particulados, tubo de PVC, recipiente de coleta do *underflow*, entrada

tangencial de aço inox, mangueira de silicone, placas de madeira e suporte de aço inox.

Na **Figura 2** é possível visualizar o ciclone Intelq depois de pronto e na **Figura 3** é visto o ciclone de vidro, ambos construídos com base nos materiais citados acima.

Figura 2 - Ciclone Intelq



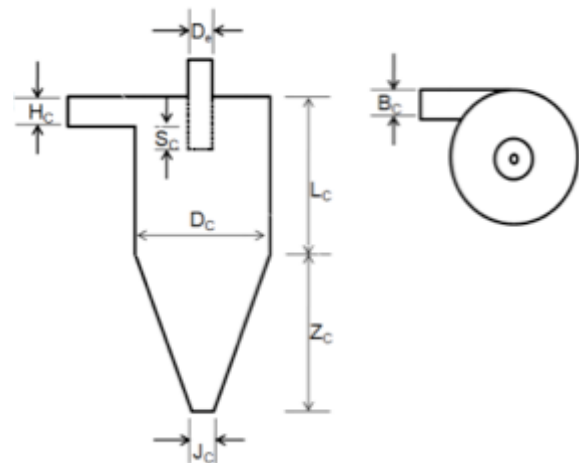
Figura 3 - Ciclone de vidro



Dimensionamento e equacionamento

Para construção de ciclones é necessário relacionar suas dimensões com o D_c , para isso foram analisadas diversas famílias existente na literatura. De acordo com o valor do D_c da garrafa de vidro, foi visto que esta se enquadrava de forma similar à família Lapple. O ciclone Intelq (PET), não se enquadrava em nenhuma família, logo foi necessária a criação da família Intelq. Na **Figura 4** é possível a visualização das dimensões características do ciclone segundo a família Lapple.

Figura 4 - Dimensionamento do Lapple



Fonte: SANTOS (2013)

Em que as equações que relacionam esses valores com D_c são mostradas nas **equações de 1 a 7**.

$$B_c = \frac{D_c}{4} \quad (1)$$

$$D_e = \frac{D_c}{2} \quad (2)$$

$$H_c = \frac{D_c}{2} \quad (3)$$

$$L_c = 2D_c \quad (4)$$

$$S_c = \frac{D_c}{8} \quad (5)$$

$$J_c = \frac{D_c}{4} \quad (6)$$

$$Z_c = 2D_c \quad (7)$$

Para a família Inteleq foi necessária criação de correlações, estas estão mostradas nas **equações 8 a 14**.

$$J_c = \frac{D_c}{4,36} \quad (8)$$

$$L_c = 1,95D_c \quad (9)$$

$$Z_c = 1,2D_c \quad (10)$$

$$B_c = \frac{D_c}{2,74} \quad (11)$$

$$H_c = \frac{D_c}{2,74} \quad (12)$$

$$D_e = \frac{D_c}{2,74} \quad (13)$$

$$S_c = 0 \quad (14)$$

De acordo com as correlações citadas foi possível a construção da **tabela 1**, que mostra os valores encontrados para medidas dos ciclones, em centímetros.

Tabela 1 - Medidas dos ciclones

	D_c	B_c	D_e	H_c	L_c	S_c	J_c	Z_c
Vidro	7,95	2,00	3,53	4,00	13,50	1,00	1,73	15,37
PET	9,60	3,53	2,51	3,54	15,44	0,00	1,86	9,26

Para o cálculo do diâmetro de corte foram utilizadas as equações de Perry e de Massarani que estão representadas nas **equações 15 e 16** respectivamente.

$$d^* = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{10 \cdot \pi \cdot u \cdot (\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\frac{d^*}{D_c} = 0,095 \left(\frac{\mu \cdot D_c}{Q \cdot (\rho_s - \rho)} \right)^{1/2} \quad (16)$$

Em que Q é dado pela **equação 17** e a velocidade na parte cilíndrica é dada por u_c , que está representado na **equação 18**.

$$Q = u \cdot H_c B_c \quad (17)$$

$$u_c = \frac{Q}{\left(\pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \right)} \quad (18)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para efetuar a análise dos resultados, é necessário conhecer as propriedades das partículas, tais como a densidade e a distribuição granulométrica. Também é necessário conhecer as propriedades do fluido, que no presente caso é o ar à 38°C. Para essa temperatura do ar, temos que sua densidade é 0,001614 g/cm³ e sua viscosidade é de 1,859.10⁻⁴ N/cm². Os dados referentes à densidade das partículas estão dispostos na **Tabela 2** abaixo:

Tabela 2 - Densidade das partículas em g/cm³

Areia	Calcário	Terra
1,10	2,72	2,42

O diâmetro de corte do ciclone está relacionado diretamente com sua geometria, dimensão, propriedade da partícula sólida e da velocidade do fluido. Para o cálculo do d^* utilizou-se a equação de Perry, descrita pela **equação 15**, por ser um equacionamento geral aplicado a qualquer ciclone. Para o cálculo de K, uma constante específica para cada família de ciclones, foi utilizada a correlação de Massarani através do d^* calculado anteriormente. Para medir a queda de pressão entre a alimentação e o *overflow* utilizou-se um Tubo em U, cujas medidas são dadas em mmH₂O, que foram convertidos para dyna/cm². A velocidade do ar foi medida diretamente na alimentação utilizando um anemômetro modelo TAFR-190/Digital, fabricado pela Instrutherm. Os dados de queda de pressão, velocidade do ar e K para cada um dos ciclones estão listado na **Tabela 3**, e os dados do diâmetro de corte estão mostrados na **Tabela 4**. Com o intuito de fazer o teste para partículas com diâmetros menores que a areia, utilizou-se uma mistura de calcário agrícola com areia, sendo a segunda responsável por promover um melhor escoamento dos sólidos. Contudo, esse tipo de amostra só foi utilizada para o ciclone do tipo Lapple, já que para o ciclone Inteleq não foi

possível realizar o experimento com tal mistura, devido ao canal de alimentação possuir um diâmetro pequeno, o que ocasionava um acúmulo de calcário, impedindo o escoamento. Visto que o calcário e a terra apresentam densidades próximas, foi feito experimentos com a terra no ciclone Inteleq para efeito de comparação.

Tabela 3 - Dados dos ciclones

Ciclone	$-\Delta P \left(\frac{dyna}{cm^2} \right)$	K	Velocidade do ar (cm/s)
Inteleq	5900	0,12	723
Tipo Lapple	5900	0,10	714

Tabela 4 - Dados diâmetro de corte ciclones

Ciclone	$d^* (\mu m)$		
	Areia	Terra	Calcário + areia
Inteleq	4,933	3,327	Não possível
Tipo Lapple	3,858	Não possível	3,149

Para analisar os resultados dos ciclones, em relação às partículas coletadas no *underflow* e as que saíram através do *overflow*, análises granulométricas foram realizadas antes e após a operação dos equipamentos para ser possível fazer a comparação entre elas, além disso, os resultados obtidos no *underflow* foram ajustados aos modelos, apresentados na **Tabela 5**.

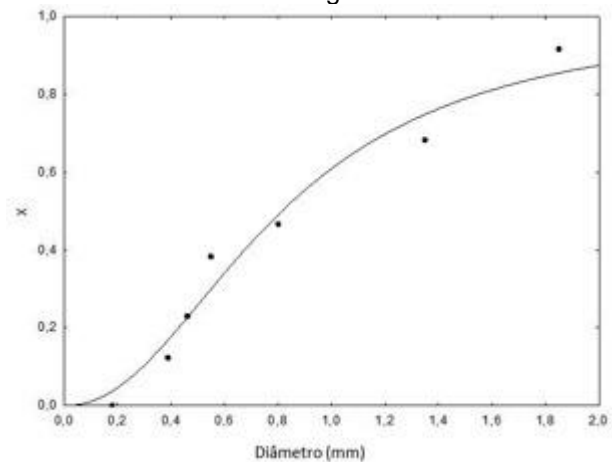
Os primeiros ensaios foram realizados com areia em ambos os ciclones, porém as partículas eram muito grandes em relação ao diâmetro de corte calculado para os equipamentos, o que resultou na coleta pelo *underflow* de praticamente toda a amostra empregada na alimentação, não recuperando apenas uma areia muito fina, considerada pó, resultado das possíveis colisões das partículas dentro do equipamento, tornando a análise inviável. Deste modo, as análises granulométricas realizadas antes e após a operação ficaram iguais, compreendendo uma faixa de diâmetro de partículas de até $2000 \mu m$. A **Tabela 5** apresenta os resultados obtidos através dos ajustes.

Tabela 5 - Ajuste dos modelos para distribuição granulométrica da areia coletada no *underflow*

Modelos	Parâmetros	R ²
G.G.S.	k= $1980 \mu m$ m= 0,98	0,9538
R.R.B.	D'= $1110 \mu m$ n= 1,52	0,9676
Sigmóide	D ₅₀ = $810 \mu m$ p= 2,16	0,9695

Pelos resultados apresentados, o modelo que melhor se ajustou neste caso foi o Sigmóide, uma vez que este resultou o maior valor de coeficiente de correlação (R²) cuja curva de distribuição granulométrica está representada na **Figura 5**. Os parâmetros obtidos através do modelo Sigmóide são semelhantes aos experimentais, uma vez que o D₅₀ foi $810 \mu m$ e o experimental foi de aproximadamente $900 \mu m$, quanto ao parâmetro p este tem função de representar a forma da curva.

Figura 5 - Distribuição granulométrica da areia pelo modelo Sigmóide



A faixa granulométrica utilizada foi de 355 até $1700 \mu m$ para a areia. Já para o calcário sabe-se que o diâmetro de partícula máximo foi de $90 \mu m$, porém, não foi possível determinar faixas menores que $20 \mu m$, que era a menor peneira mas foi constatada uma massa considerável de partículas menores que o diâmetro citado. Os resultados obtidos para o material coletado no *underflow* para essa mistura estão demonstrados na **Tabela 6**.

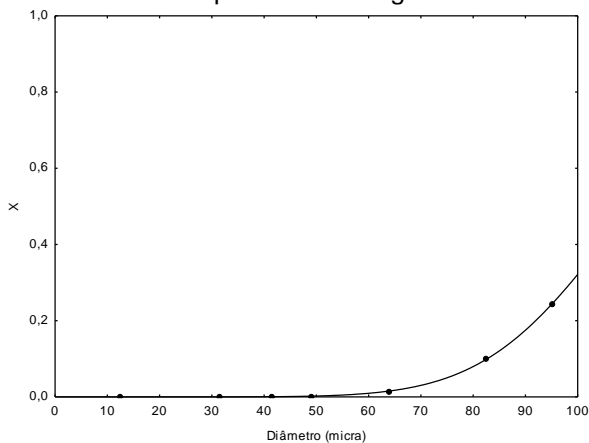
Igualmente a análise anterior, o modelo que se destacou foi o Sigmóide, contudo todos os modelos apresentaram um valor muito

semelhante para o R^2 , o que gera confiabilidade dos resultados obtidos. Entretanto, o parâmetro D_{50} calculado pelo modelo apresentou um valor maior que os diâmetros utilizados no peneiramento, isso pode ser explicado pelo fato da mistura conter maior quantidade de areia, que possui um diâmetro de partícula bem maior que o calcário. Devido a isso, mais de 50% das partículas ficaram retidas na peneira com abertura de $90 \mu m$, o que era esperado. A **Figura 6** está representando o ajuste da curva pelo modelo Sigmóide para a mistura de sólidos estudada.

Tabela 6 - Ajuste dos modelos para distribuição granulométrica da areia e calcário coletados no *underflow*

Modelos	Parâmetros	R^2
G.G.S.	$k= 117,94 \mu m$ $m= 6,54$	0,9988
R.R.B.	$D'= 113,87 \mu m$ $n= 7,06$	0,9993
Sigmóide	$D_{50}= 110,31 \mu m$ $p= 7,62$	0,9997

Figura 6 - Distribuição granulométrica da areia e calcário pelo modelo Sigmóide



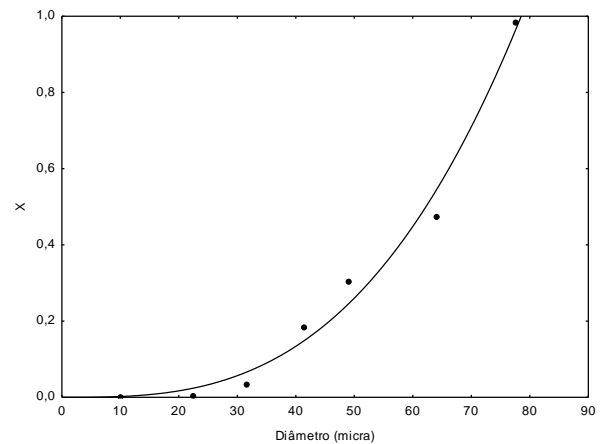
Visto que a mistura areia e calcário não promoveu um escoamento constante para o Ciclone Inteleq, foi estudada outra partícula mais adequada para a realização dos testes. Assim, utilizou-se uma amostra de terra pré-peneirada com um diâmetro de partícula máximo de $75 \mu m$. Através da análise granulométrica na **Tabela 7** foi evidenciado que o *underflow* coletou apenas partículas maiores ou iguais a $20 \mu m$.

Diferente do que visto nas duas amostras anteriores (areia e mistura de areia e calcário) o modelo mais adequado para a amostra de terra foi o G.G.S., apresentando um alto valor de coeficiente de correlação. Os parâmetros calculados por esse modelo foram coerentes com o que era esperado, já que k equivale ao valor de diâmetro em que 100% das partículas são coletadas e m é o parâmetro que indica a forma da curva de distribuição granulométrica. A **Figura 7** apresenta o ajuste da distribuição granulométrica para o modelo G.G.S.

Tabela 7 - Ajuste dos modelos para distribuição granulométrica da terra coletada no *underflow*

Modelos	Parâmetros	R^2
G.G.S.	$k= 78,22 \mu m$ $m= 3,59$	0,9909
R.R.B.	$D'= 67,00 \mu m$ $n= 5,41$	0,9657
Sigmóide	$D_{50}= 61,27 \mu m$ $p= 6,87$	0,9397

Figura 7 - Distribuição granulométrica da terra pelo modelo G.G.S.



A **Tabela 8** retrata a eficiência de coleta dos ciclones, para tanto utilizou-se a relação entre a massa na alimentação e a massa coletada no *underflow*, considerando que a massa das partículas não coletadas no *underflow*, foram arrastadas para o *overflow*, através da razão entre ambas, utilizando uma média das corridas.

Tabela 8 - Eficiências das partículas

Tipo de partícula	Eficiência (%)	
	Ciclone tipo Lapple	Ciclone Inteleq
Areia	98,13	96,88
Areia + Calcário	83,54	Não possível
Terra	Não possível	87,55

Visto que os valores calculados para os diâmetros de corte, para todos os tipos de partículas, foram significativamente pequenos e semelhantes, quando há comparação partícula e tipo de ciclone, a eficiência esperada era alta, o que foi confirmado através dos experimentos realizados.

A amostra de terra apresentou a menor eficiência, isso pode ser explicado devido a essa, entre as três, possuir as partículas com menor diâmetro, ou seja, uma quantidade maior de partículas foram arrastadas para o *overflow*, diferente dos outros casos.

São observados na **Tabela 4** os valores encontrados do diâmetro de corte através das correlações. Os dados experimentais sugerem que o diâmetro de corte é por volta de 20 micras para ambos os ciclones, porém, os diâmetros calculados não correspondem a esse valor. Dessa maneira, as condições impostas na realização do experimento não condizem com o esperado e uma possível causa seria algum erro na medida da velocidade. O ideal seria traçar os perfis de velocidade para cada equipamento, o que não foi possível ser realizado por limitações físicas dos ciclones e do anemômetro.

Outra possível fonte de erro são as correlações utilizadas para definir os diâmetros de corte que são específicas para ciclones com geometrias perfeitas e materiais diferentes dos utilizados nesse projeto. Além disso, como os equipamentos possuem irregularidades que foram adquiridas na sua construção, sua fluidodinâmica é afetada enquanto nas equações assume-se que ela é ideal.

Apesar dos gargalos encontrados serem notáveis é possível concluir que, ao analisar a alta eficiência obtida para todas as condições estudadas, este equipamento pode ser aplicado em escala industrial para purificação

do ar e também na recuperação de partículas com alto valor agregado.

NOMENCLATURA

D_c	Diâmetro da parte cilíndrica - caracteriza o ciclone [<i>cm</i>]
B_c	Largura da entrada tangencial [<i>cm</i>]
D_e	Diâmetro do vórtex finder [<i>cm</i>]
H_c	Comprimento da entrada tangencial [<i>cm</i>]
L_c	Comprimento da parte cilíndrica do ciclone [<i>cm</i>]
S_c	Diferença entre o final do vórtex finder e entrada tangencial [<i>cm</i>]
J_c	Diâmetro da saída do <i>underflow</i> [<i>cm</i>]
Z_c	Altura da parte cônico do ciclone [<i>cm</i>]
η	Eficiência do ciclone
$-\Delta P$	Queda de pressão
K	Constante específica para cada família do ciclone
u	Velocidade de entrada [<i>cm/s</i>]
d^*	Diâmetro de corte do tamanho de partícula cuja eficiência de coleta é de 50% no ciclone considerado [<i>cm</i>]
μ	Viscosidade dinâmica [<i>N/cm²</i>]
ρ_s	Densidade do sólido [<i>g/cm³</i>]
ρ	Densidade do fluido [<i>g/cm³</i>]
Q	Vazão volumétrica [<i>cm³/s</i>]
u_c	Velocidade do fluido na parte cilíndrica [<i>cm/s</i>]
D_{50}	Diâmetro que a partícula é coletada com 50% de eficiência [<i>cm</i>]
p	Parâmetro modelo Sigmóide
m	Parâmetro modelo G.G.S
n	Parâmetro modelo R.R.B
k	Diâmetro que 100% das partículas são coletadas
d'	Diâmetro que 63,2% das partículas são coletadas

CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados na área de ciclones, foi possível a construção deste tipo de equipamento. Pelo fato do projeto utilizar materiais recicláveis para o corpo do ciclone,

as dimensões das garrafas são definidas e assim, foi preciso a adaptações para seu equacionamento. Para a garrafa de vidro as dimensões medidas se encaixaram no conjunto de equações da Família Lapple, sendo necessárias pequenas modificações, já para a garrafa PET as equações foram deduzidas e a Família Intelep foi criada.

As dificuldades previstas e os problemas não esperados foram solucionados da melhor maneira possível. Contudo, a indisponibilidade do soprador afetou o projeto, pois não foi possível controlar de maneira adequada a velocidade do ar, que interfere diretamente nos cálculos e na execução do projeto.

Em relação à eficiência dos ciclones, ambos apresentaram valores significativos, revelando alta eficiência, maiores que 80%. Além disso, outro aspecto importante para ser esclarecido sobre a eficiência, é que normalmente a construção do ciclone é feita a partir do diâmetro de coleta desejado. Nesse caso, os procedimentos foram invertidos, assim não foi encontrado um material particulado adequado para haver uma quantidade significativa de partículas no overflow, o que impediu a construção de uma bateria de ciclones.

Dentre os modelos usados para o ajuste da granulometria das partículas, todos mostraram ajustes satisfatórios, porém o modelo Sigmóide foi o que melhor se adequou a areia e a mistura de calcário e areia, já para a terra o modelo G.G.S. obteve melhor ajuste.

REFERÊNCIAS

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc. 3 ed. 1993.

GIACOMINI, E. **Material O Vidro**. Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto, Porto – Portugal, 2007.

PERRY, R.H; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' handbook**. New York, 7 ed., 1999.

SANTOS, K. G. **Separação no campo Centrífugo - Ciclones**. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba, 2013.

VEGINI, A. A. **Modelagem multifásica euleriana-euleriana para simulação numérica de ciclones**. UNICAMP. Campinas, 2007).

WANG, L. K. *et al.* **Air pollution control engineering**, Totowa-NJ, Estados Unidos: Editora Humana Press Inc., 2004.