

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Área de Concentração: Engenharia de Processos

**Comportamento Fluidodinâmico do Ciclone
em Diferentes Geometrias**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Autor:

Alessandro Dibb

Orientadora:

Profa. Dra. Maria Aparecida Silva

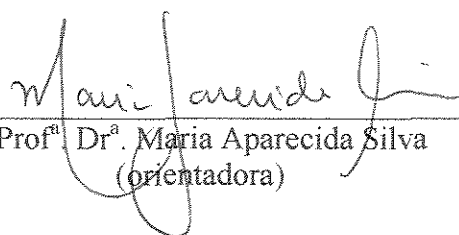
Campinas

Fevereiro - 1997

01750 F6



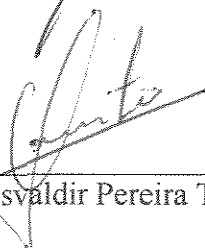
Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 1997 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida Silva
(orientadora)



Prof. Dr. Milton Mori



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Esta versão corresponde à redação final da dissertação do mestrado defendida pelo Engenheiro Químico Alessandro Dibb e aprovada pela comissão julgadora em 26 de fevereiro de 1997.



Profa. Dra. Maria Aparecida Silva

Dedico este Trabalho.

Aos meus pais, Naim e Arinã,

*Se não fosse por eles, não teria chegado ao término deste
trabalho.*

Agradecimentos

- À Profa. Dra. Maria Aparecida Silva pela orientação deste trabalho.
- À Regina Guenka Palma pelo apoio dado em todas as horas.
- Às amigas Édna Santiago Benta e Paula de Campos Babenko pela ajuda oferecida.
- Aos amigos Antônio Vilanova Queiroz Filho, Everaldo Silvino dos Santos, Lídia Oazem de Oliveira, Ricardo M. Picado, Marlus Pinheiro Rolemberg, Helenice Leite Garcia, Clamer Dimas Faria e William James N. Lima pelo companheirismo.
- À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas.
- Ao CNPq pela bolsa concedida.
- A todos que colaboraram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata do estudo da influência da geometria do ciclone no seu comportamento fluidodinâmico. O escoamento gás-partículas no interior do ciclone foi modelado matematicamente considerando-se o escoamento bifásico, bidimensional e turbulento, onde a fase particulada é tratada como um continuum. Admitiu-se, como hipóteses, escoamento em regime estacionário, incompressível e axissimétrico, com viscosidade turbulenta variável. Como condição de contorno considerou-se o escorregamento das partículas na parede. As equações de Navier-Stokes foram escritas em coordenadas cilíndricas. A solução numérica das equações foi obtida utilizando-se o algoritmo SIMPLE, onde as equações discretizadas foram obtidas pela integração das equações diferenciais no volume de controle, usando-se para o esquema "power-law". Os resultados obtidos demonstram que o comportamento fluidodinâmico do ciclone é fortemente afetado pela geometria do mesmo, influenciando no tempo de residência das partículas. À medida em que o ângulo diminui, a altura da parte cilíndrica aumenta e, principalmente, o diâmetro aumenta, o tempo de residência das partículas aumenta, indicando que a geometria deve ser modificada dependendo do uso que se quiser dar ao ciclone.

ABSTRACT

In this work, it was studied the cyclone geometry influence in its fluidynamics behavior. A mathematical model was developed to simulate the gas-particles flow in a cyclone, considering a two-dimensional turbulent gas-particles flow and using a continuum model for particle phase. The boundary conditions were considered the particles' slipness on the cyclone wall. The Navier-Stokes equations were written in cylindrical coordinates. The numerical solution was obtained using SIMPLE algorithm. The results showed that fluidynamics behavior of the cyclone is strongly affected by geometry, influencing on the permanence time of the particles. While the angle decreases, the cylindrical part height increases and, mainly, as the diameter increases the permanence time of the particles increases, showing that the geometry should be modified being conditioned on the use we would like to give to the cyclone.

SUMÁRIO

Nomenclatura.....	iv
1 - Introdução.....	1
2 - Revisão Bibliográfica.....	2
3 - Modelo Matemático.....	11
3.1 - Hipóteses.....	11
3.2 - Equações.....	12
4 - Simulação Numérica.....	15
4.1 - Método Numérico.....	15
4.2 - Solução Numérica.....	19
4.3 - Programa Desenvolvido.....	23
5 - Resultados.....	24
5.1 - Obtenção dos Resultados.....	24
5.2 - Discussão dos Resultados.....	26
6 - Conclusão.....	54
Apêndice I.....	55
Apêndice II.....	61
Referências Bibliográficas.....	65

NOMENCLATURA:

A - Coeficiente de convecção-difusão
A_p - Definido pela equação 3.10.
a - Coeficiente na equação discretizada
b - Termo constante na equação de discretização
c - Concentração das partículas [kg/m³] (quadro 2.2)
C_D - Coeficiente de arraste
D_e, D_w, D_s, D_n - Condutância
D_p - Diâmetro da partícula [m] (eq. 3.10)
F_e, F_w, F_s, F_n - Taxa do fluxo através da face de um volume de controle
g - Aceleração da gravidade [m/s²]
N - Força normal [kg m/s²]
P - Pressão [Pa]
Pe_e, Pe_w, Pe_s, Pe_n - Números de Peclet
r - coordenada radial
Re - Número de Reynolds
t - tempo [s]
S - Termo fonte
u, v, w - Velocidades axial, radial e tangencial do fluido [m/s]
u_p, v_p, w_p - Velocidades axial, radial e tangencial da partícula [m/s]
U - Velocidade genérica
x - Coordenada axial

LETRAS GREGAS:

α - ângulo entre o escoamento e a horizontal [graus]
λ - Comprimento de mistura [m]
φ - Variável genérica
Γ - Coeficiente geral de difusão
μ - Viscosidade laminar do fluido [kg/m s]
μ_{eff} - Viscosidade efetiva [kg/m s]
μ_p - Viscosidade efetiva da fase partícula [kg/m s]
μ_T - Viscosidade turbulenta [kg/m s]
ρ - Densidade do fluido [kg/m³]
ρ_p - Concentração de partículas [kg/m³]
ρ_s - Densidade efetiva do sólido [kg/m³]

SUBSCRITOS:

B - ponto vizinho negativo na direção z, ou, ao fundo
E - ponto vizinho positivo na direção x, ou, aleste
N - ponto vizinho positivo na direção y, ou, ao norte
P - ponto considerado no centro do volume de controle

S - ponto vizinho negativo na direção y, ou, ao sul

T - ponto vizinho positivo na direção z, ou, à frente

W - ponto vizinho negativo na direção x, ou, a oeste

1 - INTRODUÇÃO

A natureza tem vários tipos de estruturas diferentes, que sempre chamaram a atenção de pesquisadores e promovem vários tipos de estudos. Entre suas estruturas mais belas, encontra-se a estrutura espiral.

Tornados, tufões e furacões frequentemente provocam muitos danos em várias partes do mundo. Estes fenômenos, assim como outros, têm estimulados muitos estudos, para que se possa reproduzir ou então, utilizar algumas características destes fenômenos para alguma finalidade.

O ciclone é um equipamento que reproduz características destes fenômenos, com o objetivo de separar partículas, através de suas densidades.

O ciclone é um equipamento simples, de baixo custo em relação a outros equipamentos, de fácil construção e operação.

Seu mecanismo básico consiste em uma corrente gasosa carregada de partículas, que entra pela parte superior da seção cilíndrica, tangencialmente, onde se inicia o movimento de vórtice. A força centrífuga separa as partículas, fazendo com que estas se movam radialmente em direção à parede do ciclone e, depois, a gravidade as força a descenderem, onde serão coletadas na parte cônica. O gás sai pelo topo, através de uma espiral ascendente.

Devido às facilidades em termos de custo e operação, muitas indústrias usam o ciclone como separador de partículas. Porém, ultimamente, muitos estudos têm sido feitos para mostrar que o ciclone pode ser usado como, reator, secador ou aquecedor de partículas. Isso devido à transferência de calor que ocorre no seu interior.

Até o momento, muitas modificações na geometria do ciclone têm sido estudadas por vários autores. Essas modificações têm como objetivo melhorar a eficiência do ciclone para a função de separador de partículas.

O objetivo deste trabalho é a modelagem e simulação matemática do escoamento no ciclone, considerando um escoamento bifásico (gás-partículas) e a fase particulada como um *continuum*.

Neste trabalho serão analisados modificações nas características geométricas do ciclone, com o objetivo de encontrar o melhor tipo a ser usado na função de aquecedor ou secador, e além disto, serão indicados algumas características de ciclones que podem ser usado como separador de partículas. Para esta análise, o parâmetro escolhido foi o tempo de residência das partículas, uma vez que para a função de aquecedor ou secador quanto maior o tempo de residência, maior será o nível de aquecimento ou secagem a ser obtido.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos estudos a respeito do mecanismo de funcionamento do ciclone têm sido realizados, sendo que muitos autores analisaram o escoamento dentro do ciclone.

Partindo-se dos trabalhos de ter Linden (1949) e Stairmand (1949) determinou-se que o escoamento em um ciclone pode ser dividido em duas regiões: uma junto à parede, onde o escoamento forma uma espiral descendente, e uma na região central, onde o escoamento forma uma espiral ascendente.

O escoamento descendente segue a velocidade tangencial da seguinte forma:

$$w.r^n = K_1 \quad (1.1)$$

onde n é um expoente negativo que varia de 0.5 a 1.0, dependendo do fluido, da carga de partículas e da geometria do ciclone. Yuu et al. (1978) registraram no seu trabalho a influência da presença de partículas no escoamento sobre o valor de n .

O expoente n , de acordo com Trefz e Muschelknautz (1993), descreve o retardo do fluxo de gás pela fricção na parede. A desvantagem deste modelo está no fato de que o expoente n não poderia ser determinado como uma função da forma do ciclone e de suas condições de operação.

Também partindo dos trabalhos de ter Linden (1949) e Stairmand (1949), foi verificado que o comportamento do escoamento ascendente é similar ao de um sólido rígido em rotação, seguindo a velocidade tangencial da seguinte forma:

$$w = K_2.r \quad (1.2)$$

onde K é uma constante.

Yuu et al. (1978) estudaram a influência da presença de partículas no escoamento sobre o valor de n da equação 1.1. Para isto, as partículas foram classificadas de acordo com o movimento em: partículas em movimento que se aglomeram entre si, em direção à parede e partículas flutuantes no espaço. Yuu et al (1978) notaram que quanto maior é o número de partículas que se aglomeram em direção à parede maior é diminuição da velocidade tangencial, que causa a queda de pressão.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos realizados em modelagem e simulação numérica do escoamento no interior do ciclone.

Davidson (1988), por exemplo, assumiu um fluxo axissimétrico, bidimensional, mesmo sabendo que este não era o caso próximo a entrada no topo do ciclone. Assumiu, também, que o escoamento da mistura fluido-partícula era incompressível e estava em regime permanente, assim como considerou a variação de μ_{eff} (para efeito do modelo de turbulência) e densidade ρ (para efeito de concentração de partículas).

Quadro 2.1 - Comparação entre as considerações feitas por alguns autores.

	PARIDA E CHAND (1980)	DAVIDSON (1988)
ESCOAMENTO	Regime Permanente Simetria Axial Incompressível	Regime Permanente Simetria Axial Incompressível
PARTICULAS	Esféricas e Monodispersas Concentração Uniforme Vista como um <i>continuum</i>	Concentração Variando Vista como um <i>continuum</i>
MODELO DE TURBULÊNCIA	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho \lambda^2 \left[\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right]$ (a zero-equação)	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho \lambda^2 \left[\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right]$ (a zero equação)

Parida e Chand (1980) investigaram o efeito das partículas na distribuição da velocidade tangencial. Para isto consideraram o escoamento axissimétrico, incompressível e em estado estacionário e as partículas como sendo monodispersas, esféricas, com concentração uniforme e com fração volumétrica desprezível comparada à fração volumétrica de gás, sendo desprezível a interação partícula-partícula, devido à colisão e fricção.

O quadro 2.1 apresenta as considerações feitas por Davidson (1988) e por Parida e Chand (1980), enquanto o quadro 2.2 apresenta as equações de Navier-Stokes usadas nestes dois trabalhos.

O modelo de Davidson (1988) previu que a velocidade tangencial é maior próximo ao eixo de simetria do ciclone e que decresce próxima à parede. A equação da fase partícula foi resolvida independentemente da fase gás.

Após terem sido comparados os resultados da simulação com dados experimentais existentes, o método de Parida e Chand (1980) teve sucesso. Eles provaram que a velocidade tangencial decresceu com o aumento da concentração de partículas ou com o decréscimo do tamanho das mesmas.

Parida e Chand (1980) comentaram, também, que como a velocidade tangencial é o fator mais importante na queda de pressão, seu modelo poderia futuramente auxiliar em estudos sobre a queda de pressão.

Zhou e Soo (1990) realizaram, inicialmente, um trabalho considerando somente a fase gás. Os cálculos da queda de pressão e velocidade foram feitos, usando uma solução analítica aproximada, desenvolvida por Soo (1989), e o modelo k-ε de turbulência. Suas condições limites foram:

Quadro 2.2 - Comparação entre equações utilizadas.

	PARIDA E CHAND (1980)
FASE GÁS	$\rho \left(u \frac{\partial \phi}{\partial r} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{U_\phi}{r} \right) = -\rho_p \frac{(\phi - \phi_p)}{\tau_m} - P_\phi + \mu_{\text{eff}} \left(\nabla^2 \phi - \frac{\phi}{r^2} \right)$
FASE PARTÍCULAS	$\rho_p \left(u_p \frac{\partial \phi_p}{\partial r} + w_p \frac{\partial \phi_p}{\partial z} + \frac{U_{\phi p}}{r} \right) = \rho_p \frac{(\phi - \phi_p)}{\tau_m}$
CONDIÇÕES DE CONTORNO	$\begin{aligned} r=0 \quad v=0 \quad v_p=v_{p0} \\ r=r_w \quad v=v_w \end{aligned}$ Explicitadas no Artigo
	$\tau_m = \frac{\rho_p \delta^2}{18\mu}$ Tempo de Relaxação da Partícula onde δ é o diâmetro da partícula [cm].

	DAVIDSON (1988)
FASE GÁS	$\frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_\phi$
FASE PARTÍCULAS	$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u_p c) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_p c) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial r} \right)$
CONDIÇÕES DE CONTORNO	$\begin{aligned} r=0 \quad v=0 \quad v_p=v_{p0} \\ r=r_w \quad v=v_w \end{aligned}$ Inferidas pela leitura do artigo

- Turbulência e distribuição uniforme de velocidade tangencial de entrada.
- Fluxo totalmente desenvolvido na saída.
- Sem escorregamento nas paredes.
- Simetria axial.

Os resultados numéricos obtidos com o modelo de Zhou e Soo (1990) foram comparados com dados obtidos experimentalmente e medidos pelo sistema LDV (Laser Doppler Velocimeter). Houve uma coerência entre as velocidades axial e tangencial e na queda de pressão da simulação com o experimento. Também notaram que a máxima energia cinética turbulenta ocorreu no movimento ao redor da parede, próxima ao fundo do ciclone.

Alguns outros fatores como a queda de pressão e tamanho das partículas influenciam a performance do ciclone como separador. Hoffmann et al. (1992)

determinaram que a eficiência de separação do ciclone e a queda de pressão melhoram sensivelmente com o aumento da carga de sólidos e que estas variações poderiam ser descritas adequadamente usando modelos existentes.

Em um outro trabalho, Hoffmann, Arends e Sie (1991), determinaram que a eficiência do ciclone como separador é influenciada pelos seguintes fatores:

- Sólidos carregados no gás de entrada;
 - Quanto maior o tamanho dos sólidos carregados, maior a eficiência do ciclone;
 - Os efeitos de cargas de sólidos na separação varia com a velocidade de entrada;
- e
- A fração separada na entrada é independente do cilindro de entrada e da eficiência do ciclone.

A eficiência foi obtida pela expressão:

$$\eta = \frac{k_1 c^{k_2} + \eta_0}{k_1 c^{k_2} + 1} \quad (2.1)$$

onde:

η - eficiência do ciclone correspondente à carga de sólidos na entrada.

η_0 - eficiência do ciclone sem carga.

k_1, k_2 - constantes.

c - carga de sólidos. $[\text{kg/m}^3]$

Para Tuzla e Chen (1992), a eficiência do ciclone como separador não é prejudicada com o aumento da carga de sólidos, porém há um decréscimo na eficiência de coleta para partículas muito pequenas.

Modificações na geometria do ciclone também podem causar mudanças na sua performance. De acordo com Heumann (1991), modificações podem ser feitas, mas para isto deve-se analisar o custo destas modificações e a finalidade para qual elas serão feitas, pois pequenas modificações podem causar grandes mudanças na performance do ciclone.

Ramachandran, Raynor e Leith (1994) fazem algumas comparações do funcionamento de dois tipos diferentes de ciclones, como mostrado no quadro 2.3. Eles mostram em seu trabalhos que o ciclone de fluxo rotacional serve como separador de partículas, mas que necessitava de mais estudos sobre ele.

Ter Linden (1949) estudou experimentalmente perfis de velocidades e pressão em um ciclone usado como separador de partículas. Em seu estudo, ele tirou algumas conclusões interessante para este trabalho:

- exceto na área turbulenta no centro, a velocidade do gás varia diretamente com a componente tangencial, que aumenta à medida que a distância do centro do ciclone diminui;

- na parte cônica, a velocidade tangencial aumenta consideravelmente conforme a parte cônica se torna mais estreita;
- para uma mesma distância do eixo central do ciclone, a velocidade tangencial é maior na parte cônica que na parte cilíndrica; e
- como a eficiência do ciclone é altamente dependente do tamanho da partícula, uma garantia de eficiência a ser dada, pode ser o tempo de residência das partículas no interior do ciclone.

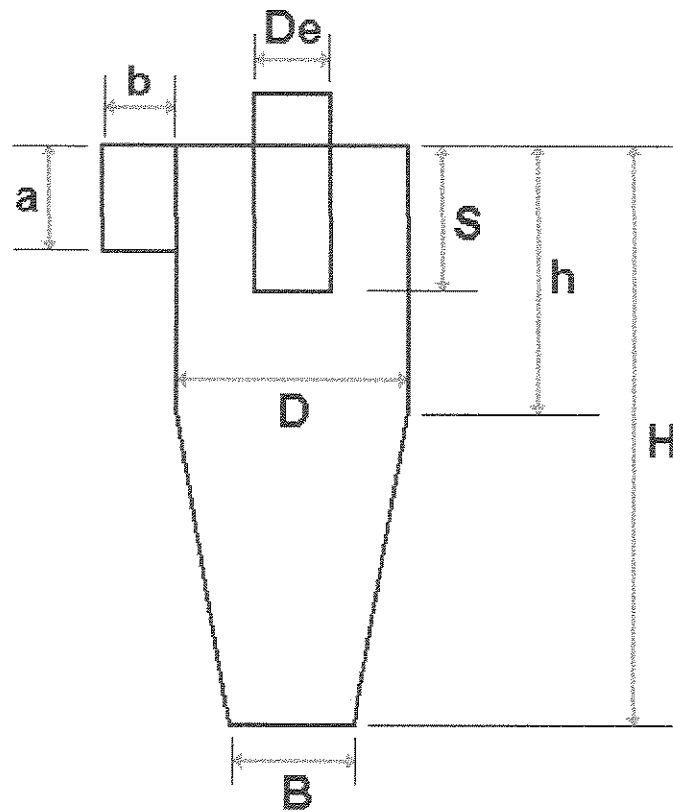
Em relação à geometria do ciclone muitos estudos tem sido feitos, porém para ser usado como separador de partículas. Muitos destes estudos tratam de investigação experimental, enquanto outros mostram modelos matemáticos e simulação numérica e alguns mostram os dois juntos. A geometria característica do ciclone está sendo mostrada na figura 2.1.

Quadro 2.3 - Comparação entre dois tipos de ciclones de acordo com Ramachandran, Raynor e Leith (1994).

	Ciclone de Fluxo Reverso	Ciclone de Fluxo Rotacional
Escoamento	Um externo movendo-se para baixo e um interno movendo-se para cima, ambos com forma vorticial.	O fluxo que se move para baixo tem a forma helicoidal.
Velocidade Tangencial	Aumenta das paredes para o centro no vórtice externo e então decresce na direção do eixo.	Aumenta da origem do eixo para um máximo nas paredes.
Velocidade Radial	Aumenta das paredes em direção ao eixo.	Assumida como sendo zero.
Velocidade Axial	Aumenta em direção ao fundo, próximo às paredes e para cima, próximo ao eixo.	Assumida como sendo constante.

Muitos tipos de ciclones já são muito conhecidos e suas geometrias padronizadas. Alguns destes tipos estão no quadro 2.4. Eles são muito usados como separador de partículas.

Alguns autores realizaram estudos onde fizeram algumas simplificações usando o ciclone com geometria alterada. Esses estudos foram feitos para ver se alguma característica geométrica poderia influir no ciclone para a função de separador de partículas.

**CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CICLONE:**

- a - Altura da entrada de gás.
- b - Largura da entrada de gás.
- B - Diâmetro da saída de partículas.
- De - Diâmetro da saída de gás.
- D - Diâmetro do ciclone.
- h - Altura da parte cilíndrica.
- H - Atura total do ciclone.
- S - Altura da saída de gás do ciclone.

Figura 2.1 - Relações geométricas do ciclone.

Fonte: Maroulis e Kremalis (1995).

Enliang e Yingmin (1989) utilizaram um ciclone cuja geometria convencional foi modificada. Consistia em um cilindro circular reto para facilitar a simplificação da análise. O raio do ciclone e do tubo de saída eram imutáveis (figura 2.2). Isto foi feito para que pudesse ser usado como simplificação em uma teoria proposta por estes autores, que depois foi comparada com outras teorias da literatura e com resultados experimentais, onde a teoria proposta por eles se mostrou restrita a algumas faixas de tamanhos de partículas.

Para a função de separador de partículas, a melhor eficiência foi obtida segundo o trabalho de Ogawa (1984) para o ciclone mais comum, o chamado de fluxo reverso (figura 2.1), enquanto a pior foi para o ciclone totalmente cilíndrico (figura 2.2).

Maroulis e Kremalis (1995) fizeram um estudo similar ao proposto neste trabalho, porém eles estudaram a melhor geometria para o ciclone utilizado como separador de partículas. Eles utilizaram relações geométricas para ciclones de formas padronizadas. Essas relações estão no quadro 2.4. Para realizar a simulação eles usaram um simulador no Microsoft Excel® e através das relações utilizadas encontraram as relações ótimas para ciclone separador para ser usado em 3 tipos diferentes de tamanhos de partículas. Essas geometrias são mostradas no quadro 2.5.

Karpukhovich (1987) fez uma análise modificando apenas a altura do cilindro através de relações com o diâmetro do ciclone que permaneceu fixo, assim como as outras características geométricas. Neste trabalho ele notou que para separador, a melhor forma do ciclone foi com o comprimento igual das partes cônicas e cilíndricas. E que a eficiência dele como separador de partículas cai para valores da altura do cilindro acima de 1,6 vezes o diâmetro do ciclone.

Stairmand (1951) concluiu que para ser usado como separador, um ciclone com um diâmetro pequeno e uma altura grande seria mais vantajoso, obtendo-se assim uma melhor eficiência. As relações geométricas deste ciclone está sendo mostrado no quadro 2.4.

Outros estudos têm sido feito utilizando o ciclone para outras funções além de separador de partículas. Szekely e Carr (1966) e Cremasco e Nebra (1994) usaram como aquecedor, enquanto Ledé, Mercadier e Villiermaux (1996) utilizaram o ciclone como reator.

Silva (1991) realizou um estudo usando o ciclone como secador de partículas de borra de café, onde concluiu que o ciclone foi um secador eficiente para este tipo de material. Nebra e Silva (1992) realizaram uma extensa revisão bibliográfica sobre o ciclone utilizado como secador, referente tanto a trabalhos experimentais como de modelagem matemática.

A geometria do ciclone usado por Silva (1991) em seu trabalho, será considerada como padrão para as simulações numéricas feitas neste trabalho e está sendo mostrada no quadro 2.6.

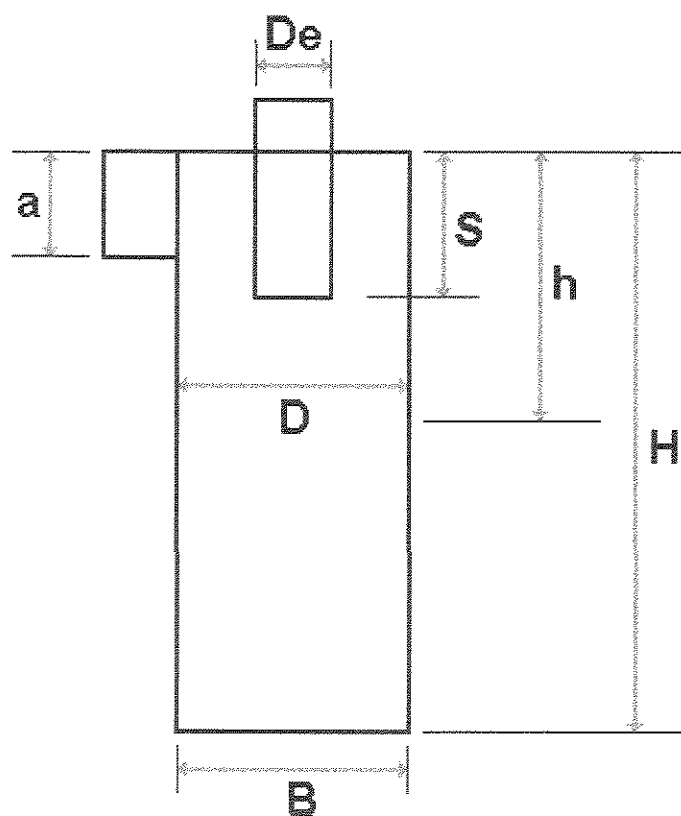


Figura 2.2 - Ciclone totalmente cilíndrico.
Fonte: Enliang e Yingmin (1989).

Quadro 2.4 - Relações geométricas para varios ciclones usados por Maroulis e Kremalis (1995).

Ciclone	a/D	b/D	D_c/D	S/D	h/D	H/D	B/D
Stairmand HE	0,50	0,20	0,50	0,50	1,50	4,00	0,38
Swift HE	0,44	0,21	0,40	0,50	1,40	3,90	0,40
Lapple GP	0,50	0,25	0,50	0,63	2,00	4,00	0,25
Swift GP	0,50	0,25	0,50	0,60	1,75	3,75	0,40
Stern C	0,45	0,20	0,50	0,63	0,75	2,00	0,40
Stairmand HT	0,75	0,38	0,75	0,88	1,50	4,00	0,38
Swift HT	0,80	0,35	0,75	0,85	1,70	3,70	0,40

Quadro 2,5 - Relações geométricas ótimas encontradas por Maroulis e Kremalis (1995).

Tamanho da partícula	a/D	b/D	D_c/D	S/D	h/D	H/D	B/D
5 μm	0,50	0,38	0,47	0,50	2,00	4,00	0,40
10 μm	0,80	0,38	0,75	0,80	2,00	3,95	0,40
15 μm	0,80	0,38	0,75	0,80	1,78	2,32	0,40

Quadro 2,6 - Geometria padrão do ciclone utilizado por Silva (1991).

Características geométricas do ciclone	Padrão
α	7,086°
a	0,25m
b	0,056m
B	0,09m
D	0,315 m
D_c	0,18375 m
h	0,471 m
H	1,376m
S	0,33024m

3 - MODELO MATEMÁTICO

Diferentes modelos matemáticos foram usados por diferentes autores em simulações numéricas.

Parida e Chand (1980) usaram um modelo bifásico admitindo concentração uniforme em todo o ciclone. Assim como Yuu et al. (1978), Parida e Chand (1980) demonstraram que existe interação gás-partícula e que esta é tanto maior quanto maior for a concentração de sólidos. Porém para resolver as equações de Navier-Stokes do modelo proposto em seu trabalho, Parida e Chand (1980) utilizaram o esquema de solução das diferenças finitas e Runge-Kutta de quarta ordem, depois de assumirem que a viscosidade turbulenta constante. Isso foi feito devido a dificuldade de resolução das equações.

Ayers et al. (1985) utilizaram um modelo onde foi considerado que para prever o tempo de escorregamento das partículas na parede, elas eram recolocadas a uma pequena distância da parede, como se estivessem "saltando" de volta para o interior do fluxo, ao contrário do modelo usado neste trabalho que considera uma concentração das partículas de 99% na parede e 1% no restante do ciclone.

Davidson (1989) usou um modelo para hidrociclone utilizado como separador, onde foi considerado que as partículas moviam-se de acordo com o movimento do fluido, através de um balanço entre as forças centrífugas e de arraste. As considerações utilizadas em seu modelo estão no quadro 2.1.

Hsiek e Rajaman (1991) criaram um modelo matemático para hidrociclones baseado em considerações físicas do fluxo de fluido usando as equações de Navier-Stokes. Esse modelo foi testado experimentalmente com sucesso, onde os perfis de velocidades estiveram de acordo com os preditos pelo modelo.

Zhou e Soo (1991) utilizaram um modelo de turbulência de ordem mais alta, o k - ϵ . Esse modelo é mais complexo que o utilizado neste trabalho e é baseado na energia cinética turbulenta (k) e na taxa de energia cinética dissipada (ϵ). Para resolução das equações, estes autores utilizaram o algoritmo SIMPLE de Patankar (1980), e obtiveram uma boa concordância para os perfis de velocidade axial, exceto próximo ao centro do ciclone, onde a velocidade experimental era menor que a numérica. E para a componente tangencial, foi obtida uma boa concordância até seu valor máximo, pois a partir deste ponto a velocidade numérica era sempre menor que a experimental.

O modelo proposto neste trabalho é o mesmo utilizado por Silva (1991), cuja condição de contorno da fase partículas na parede foi posteriormente modificada por Silva e Nebra (1996). Neste modelo a fase partículas é tratada como um *continuum*.

3.1 - Hipóteses

O modelo utilizado por Silva (1991) consiste nas seguintes hipóteses:

- Escoamento com regime estacionário, incompressível e axissimétrico.
- Escoamento do fluido tem viscosidade turbulenta variável μ_{eff} , que obedece a expressão 3.5.
- Escoamento do fluido é afetado pela presença de partículas.
- O efeito da gravidade sobre o escoamento das partículas não é desprezível.
- As partículas são esféricas e se distribuem em uma camada de concentração uniforme, junto à parede do ciclone e com uma concentração muito pequena no escoamento central.

3.2 - Equações

As equações de Navier-Stokes em coordenadas cilíndricas para ambas as fases são apresentadas a seguir.

Para a fase gás, as seguintes equações são propostas, onde:

u, v, w são, respectivamente, as velocidades axial, radial e tangencial do fluido em m/s;

u_p, v_p, w_p são, respectivamente, as velocidades axial, radial e tangencial da partícula em m/s

ρ é a densidade do fluido em kg/m^3 ;

ρ_p é a concentração de partículas em kg/m^3 .

Equações de conservação do *momentum*:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 u - \rho_p A_D (u - u_p) \quad (3.1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{w^2}{r} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{\text{eff}} \left(\nabla^2 - \frac{v}{r^2} \right) - \rho_p A_D (v - v_p) \quad (3.2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{vw}{r} + v \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \mu_{\text{eff}} \left(\nabla^2 w - \frac{w}{r^2} \right) - \rho_p A_D (w - w_p) \quad (3.3)$$

$$\text{Equação da continuidade : } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (3.4)$$

Condições de contorno:

$$r = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial r} = 0$$

$$r = R_w \quad u = v = w = 0$$

$$\text{Onde:} \quad \mu_{\text{eff}} = \rho \ C^2 r^2 \left| \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right| \quad (3.5)$$

e C é uma constante igual a 0.034, de acordo com Duggins e Frith (1987).

E para a fase partículas:

Equações de conservação do *momentum*:

$$\rho_p \left(u_p \frac{\partial u_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial u_p}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P_p}{\partial x} + \mu_p \nabla^2 u_p + \rho_p A_D (u - u_p) + \rho_p g \quad (3.6)$$

$$\rho_p \left(u_p \frac{\partial v_p}{\partial x} - \frac{w_p^2}{r} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P_p}{\partial r} + \mu_p \left(\nabla^2 v_p - \frac{v_p}{r^2} \right) + \rho_p A_D (v - v_p) \quad (3.7)$$

$$\rho_p \left(u_p \frac{\partial w_p}{\partial x} - \frac{v_p w_p}{r} + v_p \frac{\partial w_p}{\partial r} \right) = \mu_p \left(\nabla^2 w_p - \frac{w_p}{r^2} \right) + \rho_p A_D (w - w_p) \quad (3.8)$$

$$\text{Equação da continuidade:} \quad \frac{\partial u_p}{\partial x} + \frac{v_p}{r} + \frac{\partial v_p}{\partial r} = 0 \quad (3.9)$$

Condições de contorno:

$$r = 0 \quad \frac{\partial u_p}{\partial r} = \frac{\partial v_p}{\partial r} = \frac{\partial w_p}{\partial r} = 0$$

$$\begin{aligned}
 r = R_w \quad \rho_p \left[A_D (u - u_p) + g - N \sin \alpha - f_p N \frac{u_p}{V_p} \right] &= 0 \\
 \rho_p \left[A_D (v - v_p) - N \cos \alpha - f_p N \frac{v_p}{V_p} \right] &= 0 \\
 \rho_p \left[A_D (w - w_p) - f_p N \frac{w_p}{V_p} \right] &= 0
 \end{aligned}$$

Expressões auxiliares:

$$A_D = 3 / 4 C_D \operatorname{Re}_p \frac{\mu}{\rho_s D_p^2} \quad (3.10)$$

$$\text{Reynolds da partícula: } \operatorname{Re}_p = \frac{\rho_p D_p (\overline{v - v_p})}{\mu} \quad (3.11)$$

$$\overline{v - v_p} = \sqrt{(u - u_p)^2 + (v - v_p)^2 + (w - w_p)^2} \quad (3.12)$$

$$N = g \sin \alpha + \frac{w_p^2}{r} \cos \alpha, \quad V_p = \sqrt{u_p^2 + v_p^2 + w_p^2} \quad (3.13)$$

e

$$\text{Coeficiente de arraste: } C_D = \frac{24}{\operatorname{Re}_p} \left(1 + 0.15 \operatorname{Re}_p^{0.687} \right) \quad (3.14)$$

para $\operatorname{Re}_p < 1000$, de acordo com Arastoopour e Gidaspow (1979).

Na fase partículas foi dado um tratamento similar ao de um fluido e, assim, aparece o termo de pressão que deve ser visto como a pressão parcial da fase, conforme sugerido por White (1986), enquanto o termo viscoso representa as interações partícula-partícula, de acordo com Soo (1989).

4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 - Método Numérico

A simulação numérica do modelo a ser proposto será realizada utilizando o método numérico descrito por Patankar (1980).

Entre as vantagens deste método, pode-se ressaltar que ele é fortemente baseado em considerações físicas e não apenas matemáticas, facilitando assim a interpretação dos resultados. Além disto, não é utilizado nada mais sofisticado do que simples álgebra e cálculos elementares.

Por ser um método conservativo, ele é adequado para aplicação em equações de conservação. O balanço obedece perfeitamente a equação da continuidade (4.1) em cada volume de controle.

Para transformar o volume total de análise em vários volumes de controle discretos (figura 4.1), utiliza-se o método dos volumes finitos. Este método consiste em dividir o domínio de cálculo em um número finito de volumes de controles não sobrepostos e para cada volume, é associado um ponto "P" no seu interior e seus pontos vizinhos, que variam de acordo com o sistema de coordenadas a ser utilizado.

Discretiza-se a equação diferencial geral (4.2) através do volume de controle, transformando uma fase contínua em vários volumes discretos, para que se possa calcular o campo de velocidade, entalpia, temperatura e outras variáveis desejadas, através dos pontos vizinhos, utilizando a equação discretizada (4.3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi) + S \quad (4.2)$$

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (4.3)$$

Para o campo de velocidade utiliza-se uma grade deslocada para maior precisão e facilidade de cálculo.

A velocidade tangencial de ambas as fases é tratada como uma variável qualquer, ou seja, não utiliza grade deslocada como as outras velocidades, uma vez que não está associada à equação da continuidade.

Para se encontrar uma solução numérica, utiliza-se um algoritmo chamado SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) desenvolvido por Patankar (1980) e modificado por Silva (1991), para ser utilizado em escoamento bifásico.

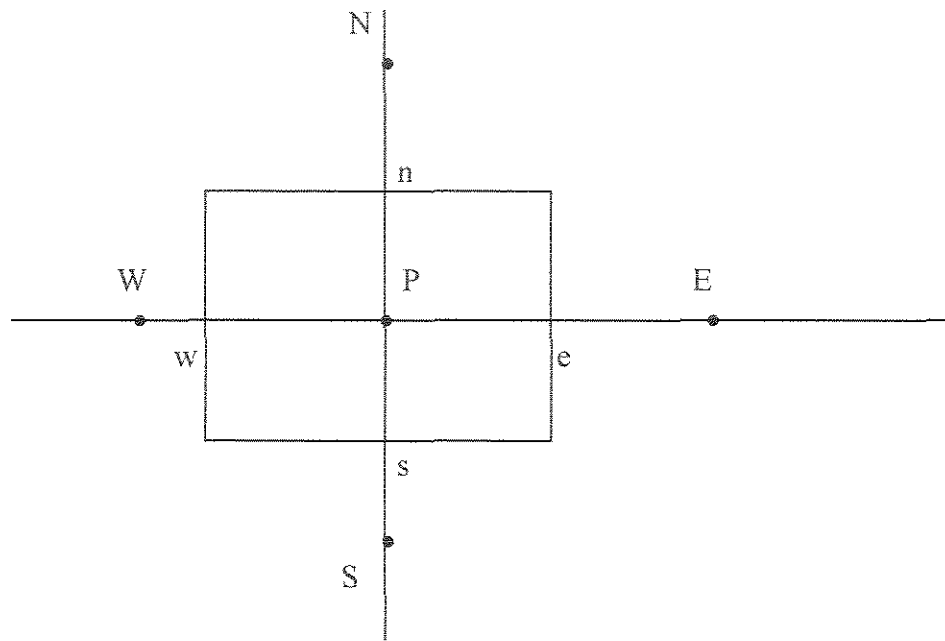


Figura 4.1 - Volume de Controle.

O SIMPLE consiste basicamente em:

- 1- Supor um campo de velocidades.
- 2- Calcular os coeficientes da eq. do momentum (4.3).
- 3- Resolver a equação discretizada para pressão.
- 4- Utilizar a pressão obtida e resolver a equação do momentum para velocidades.
- 5- Corrigir a pressão através da eq. da continuidade (4.1)
- 6- Corrigir as velocidades, mas não corrigir a pressão novamente.
- 7- Voltar ao segundo passo até obter convergência.

Para os outros ϕ , s , que não sejam velocidade, usam-se alguns esquemas para discretizar as equações. São eles:

- Diferenças Centrais.
- Upwind.
- Híbrido.
- Exponencial.
- Power Law.

A diferença básica nestes esquemas consiste basicamente na escolha da função $A([Pe])$, que é o coeficiente de difusão-convecção. Essas expressões são mostradas no quadro 4.1.

O esquema Upwind é utilizado quando não há difusão.

O Power Law e Exponencial são os que apresentam melhores resultados.

Quadro 4.1 - A função $A([Pe])$ para os diferentes esquemas.

Esquema	Fórmula de $A([Pe])$
Diferenças centrais	$1-0.5[Pe]$
Upwind	1
Híbrido	$[[0, 1-0.5[Pe]]]$
Power Law	$[[0, (1-0.1[Pe])^5]]$
Exponencial	$[Pe] / [\exp([Pe])-1]$

As equações finais de discretização, partindo da equação 4.1, para discretização bidimensional, podem ser escritas do seguinte modo:

$$a_E = D_e A([P_e]) + [[-F_e, 0]] \quad (4.4)$$

$$a_W = D_w A([P_w]) + [[-F_w, 0]] \quad (4.5)$$

$$a_N = D_n A([P_n]) + [[-F_n, 0]] \quad (4.6)$$

$$a_S = D_s A([P_s]) + [[-F_s, 0]] \quad (4.7)$$

$$a_p^\circ = \frac{\rho_p^\circ \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (4.8)$$

$$b = Sc \Delta x \Delta y + a_p^\circ \phi_p^\circ \quad (4.9)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^\circ - Sp \Delta x \Delta y \quad (4.10)$$

Onde a_p° e ϕ_p° são referentes a valores conhecidos no tempo t , enquanto os outros valores são valores desconhecidos no tempo $t + \Delta t$.

As taxas de fluxo F são definidas como:

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \quad (4.11)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \quad (4.12)$$

$$F_n = (\rho u)_n \Delta x \quad (4.13)$$

$$F_s = (\rho u)_s \Delta x \quad (4.14)$$

As condutâncias correspondentes são definidas como:

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (4.15)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (4.16)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta x)_n} \quad (4.17)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta x)_s} \quad (4.18)$$

E os números de Peclet como:

$$Pe_e = \frac{F_e}{D_e} \quad (4.19)$$

$$Pe_w = \frac{F_w}{D_w} \quad (4.20)$$

$$Pe_n = \frac{F_n}{D_n} \quad (4.21)$$

$$Pe_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (4.22)$$

Depois de obtido estes valores, o esquema a ser escolhido pode ser selecionado através do quadro 4.1. Entre estes esquemas, o Power-Law é o mais recomendado.

Depois de montado o conjunto de equações para um referente ϕ , pode-se resolvê-las utilizando o algoritmo de Thomas ou TDMA (*Tri-Diagonal Matrix Algoritim*) ou então, caso não se obtenha resultado por esse método, pode-se usar o método ponto-a-ponto de Gauss-Seidel.

4.2 - Solução Numérica

A solução numérica foi obtida utilizando o algoritmo SIMPLE . Os quadros 4.2 e 4.3 comparam as equações do modelo matemático com os termos da equação genérica do método.

As equações discretizadas foram obtidas pela integração das equações diferenciais no volume de controle utilizando-se o esquema "Power Law", e então resolvidas iterativamente pelo método TDMA linha a linha e sub-relaxações.

A entrada tangencial do ciclone, tridimensional, foi simulada por uma entrada anular com uma pequena velocidade radial, sendo a velocidade tangencial introduzida gradualmente até a decima iteração, quando atingia então o seu valor real na entrada, conforme proposto por Zhou e Soo (1990).

O volume de controle é bidimensional, do tipo $\Delta x \Delta r$ 1rd, como mostrado na figura 4.2.

A grade utilizada é uniforme e de 17 X 52 pontos. A parte cônica do ciclone é simulada na grade, anulando alguns volumes, conforme é mostrado na figura 4.3.

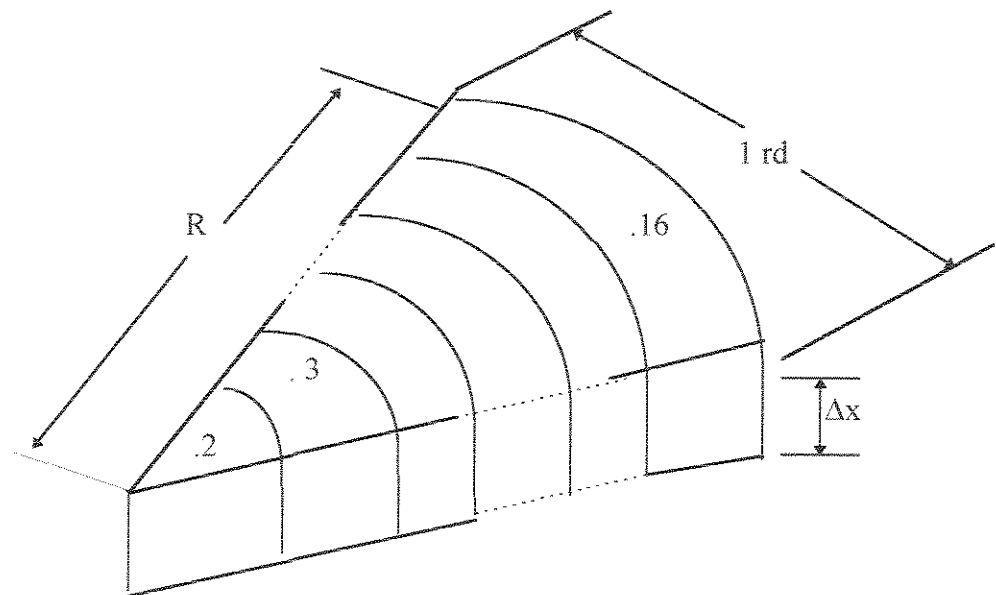


Figura 4.2 - Volume de controle em perspectiva.

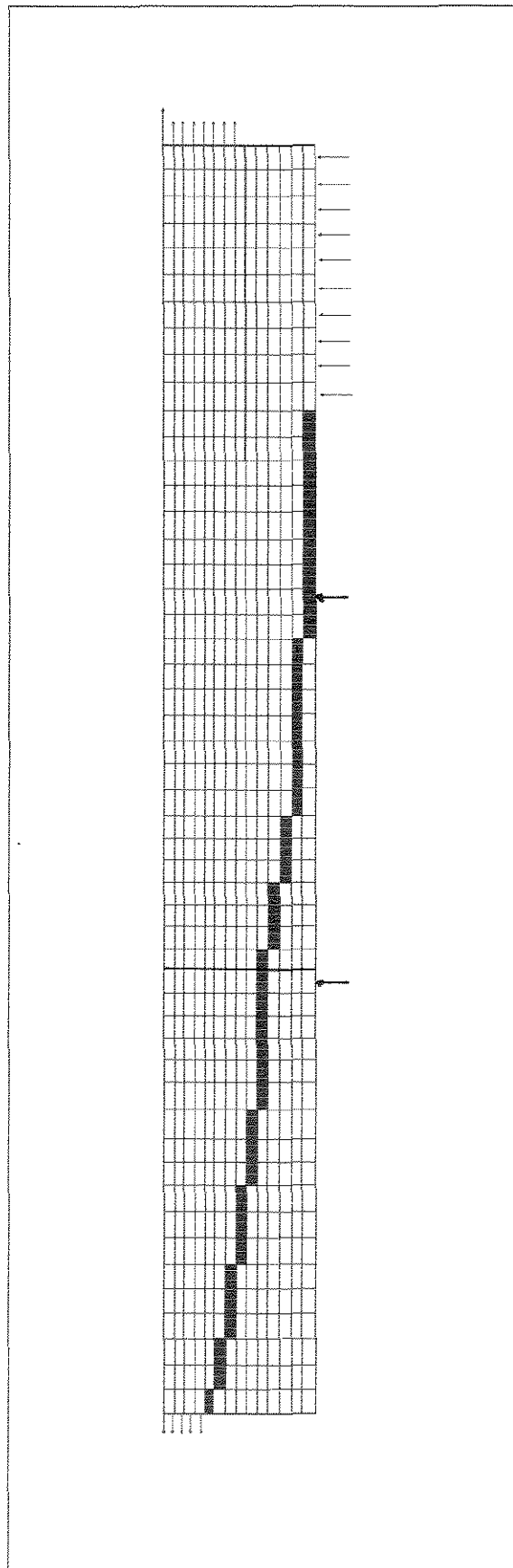


Figura 4.3 - Grade utilizada no ciclone em escala 1: 25.

Quadro 4.2 - Quadro comparativo das equações da fase fluido com a equação genérica.

ϕ	$\text{div}(\rho u \phi)$	$\text{div}(\Gamma \text{grad} \phi)$	Sp		Sc	
			Sist. Coord.	Partículas	Sist. Coord.	Partículas
u	$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right]$	$\mu_{\text{eff}} \nabla^2 u$	-	$-\rho_p A_p$	-	$\rho_p A_p u_p$
v	$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right]$	$\mu_{\text{eff}} \nabla^2 v$	$-\mu_{\text{eff}} \frac{1}{r^2}$	$-\rho_p A_p$	$-\rho \frac{w^2}{r}$	$\rho_p A_p v_p$
w	$\rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial r} \right]$	$\mu_{\text{eff}} \nabla^2 w$	$\rho \frac{v}{r} - \mu_{\text{eff}} \frac{1}{r^2}$	$-\rho_p A_p$	-	$\rho_p A_p w_p$

Quadro 4.3 - Quadro comparativo das equações da fase partículas com a equação genérica.

ϕ	$\text{div}(\rho u \phi)$	$\text{div}(\Gamma \text{grad} \phi)$	Sp		Sc	
			Sist. Coord.	Partículas	Sist. Coord.	Partículas
u	$\rho \left[u_p \frac{\partial u_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial u_p}{\partial r} \right]$	$\mu_p \nabla^2 u_p$	-	$-\rho_p A_p$	-	$\rho_p A_p u$
v	$\rho \left[u_p \frac{\partial v_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial v_p}{\partial r} \right]$	$\mu_p \nabla^2 v_p$	$-\mu_p \frac{1}{r^2}$	$-\rho_p A_p$	$-\rho_p \frac{w_p^2}{r}$	$\rho_p A_p v$
w	$\rho \left[u_p \frac{\partial w_p}{\partial x} + v_p \frac{\partial w_p}{\partial r} \right]$	$\mu_p \nabla^2 w_p$	$\rho_p \frac{v_p}{r} - \mu_p \frac{1}{r^2}$	$-\rho_p A_p$	-	$\rho_p A_p w$

4.3 - Programa Desenvolvido

Os programas foram desenvolvidos em Fortran 77 e executados em uma estação de trabalho SUN.

Primeiramente foi considerado apenas a fase gás, sem a fase partículas. Depois, o programa com as características do ciclone, do fluido e das partículas foi modificado para incluir a fase partículas e melhorar as relações entre as geometrias. Isso será mostrado no próximo item deste trabalho.

As unidades das características geométricas do ciclone, das propriedades do fluido e das partículas devem ser inseridas no programa pelo padrão do Sistema Internacional de Unidades, para a obtenção de um funcionamento perfeito do software.

No programa com o algoritmo SIMPLE de Patankar (1980) o esquema utilizado para integrar as equações das fases gás e partículas foi o Power-Law. As equações discretizadas foram resolvidas em seguida iterativamente pelo TDMA linha a linha e sub-relaxações.

A sequência utilizada na resolução numérica das equações 3.1 a 3.8, foi a seguinte:

- até a iteração 300 resolveu-se as equações de conservação do momentum e massa do fluido com μ_{eff} constante, da ordem de grandeza de viscosidade turbulenta.;
- acima da iteração 300 introduziu-se a variação da viscosidade turbulenta;
- até a iteração 1300 resolveu-se as equações de conservação de momentum e de massa da fase partículas, sem considerar o arraste pelo fluido;
- acima da iteração 1500 foi introduzido o arraste pelo fluido; e
- acima da iteração 1700 foram resolvidas simultaneamente as equações da fase gás e fase partículas.

O tempo de residência das partículas é calculado usando a fórmula de Simpson, onde ocorre a integração da velocidade axial média das partículas junto à parede do ciclone. O tempo de residência é igual ao inverso da velocidade axial média assim obtida.

O tempo de processamento é de 720 segundos.

5 - RESULTADOS

5.1 - Obtenção dos Resultados

Foram simulados as características de um ciclone em um software desenvolvido para gerar dados dos campos de velocidades e pressão manométrica para certas características físicas do ciclone utilizando o algoritmo SIMPLE de Patankar (1980), modificado por Silva (1991) para escoamento bifásico.

Partindo de um padrão, cuja geometria são mostradas no quadro 2.6, foram inseridas modificações em várias partes do ciclone para obtermos novos campos de velocidades. Esta simulação tem como objetivo modificar várias características físicas do ciclone e avaliá-lo para dois tipos diferentes de função:

- Como secador ou aquecedor
- Como separador de partículas

Inicialmente foi usada apenas a fase gás nas simulações. Alguns dos resultados obtidos nessas simulações estão no Apêndice I.

Primeiramente foram sendo modificadas apenas uma característica por vez. No entanto, para a simulação ser coerente, também foi modificado o diâmetro da saída inferior. Isto porque é impossível variar apenas uma característica geométrica do ciclone sem variar outra.

A relação entre o ângulo da parte cônica e a saída inferior B pode ser notada na figura 2.1, e é dada pela seguinte expressão:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R - r}{H - h} \quad (5.1)$$

Onde: $R = D/2$ e $r = B/2$.

A seguir, apresenta-se os valores utilizados nas simulações realizadas:

Ângulo (α) - Foram simulados desde um ciclone totalmente cilíndrico $\alpha = 0^\circ$ (figura 2.2) depois $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 4^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha = 7,086^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$.

Altura da parte cilíndrica (h) - Foram simulados: $h = 0,471$ m, $h = 0,7$ m, $h = 1,0$ m e $h = H = 1,376$ m.

Altura do "Draft-Tube" (S) - Simulados: $S = 0,2752$ m, $S = 0,33024$ m, $S = 0,4128$ e $S = 0,660$ m.

Diâmetro do "Draft-Tube" (De) - Simulados: $De = 0,105$ m, $De = 0,1575$ m, $De = 0,18375$ m e $De = 0,210$ m.

Diâmetro do Ciclone (D) - Simulados: $D = 0,315$ m, $D = 0,40$ m, $D = 0,60$ m e $D = 0,70$ m.

Essas características primeiramente foram analisadas isoladamente. Depois foram combinadas entre elas para determinar se alguma exercia influência sobre a outra. Para isso foram escolhidos os valores que deram os maiores e menores perfis de velocidade e tempo de residência nas simulações feitas anteriormente. As combinações que foram simuladas foram as seguintes:

$h = 0,471$ com $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 7,086^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$;

$h = 1,0$ com $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 7,086^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$;

$D = 0,315$ m com $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 7,086^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$;

$D = 0,70$ m com $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 7,086^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$;

$D = 0,315$ m com $h = 0,471$ m, $h = 1,0$ m e $h = 1,376$ m;

$D = 0,70$ m com $h = 0,471$ m, $h = 1,0$ m e $h = 1,376$ m;

$D = 0,315$ m e $h = 1,376$ m com $\alpha = 0^\circ$;

$D = 0,70$ m e $h = 1,376$ m com $\alpha = 0^\circ$.

Depois foram simuladas três características combinadas, utilizando as características geométricas que deram os maiores e menores perfis de velocidade e tempo de residência das partículas e foram combinadas entre si para fazerem as seguintes simulações:

$D = 0,315$ m e $h = 1,0$ m com $\alpha = 2^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$;

$D = 0,70$ m e $h = 1,0$ m com $\alpha = 2^\circ$ e $\alpha = 8^\circ$.

Para verificar a consistência do programa, foram comparados os resultados obtidos para $\alpha = 0^\circ$ e $h=H$, que representam um ciclone totalmente cilíndrico (figura 2.2). Nas duas simulações eles foram idênticos.

E em sequência foram feitas simulações para ciclones totalmente cilíndricos utilizando $\alpha = 0^\circ$ e $h = 1,376$ m com os seguintes diâmetros: $D = 0,315$ m, $D = 0,40$ m, $D = 0,60$ m, $D = 0,70$ m, $D = 0,90$ m e $D = 1,00$ m.

O trabalho de Karpukhovich (1987) foi simulado no programa. Para esta simulação foi admitido o diâmetro $D = 0,960$ m e a altura $H = 3,2D$, que foi usado por Karpukhovich (1987), mas as outras geometrias utilizadas foram as do padrão deste trabalho, pois as usadas por ele não foram citadas em seu artigo.

O trabalho de Maroulis e Kremalis (1995) foi simulado também. As relações geométricas usadas para estas simulações estão no quadro 2.4. O diâmetro usado para esta simulação foi o diâmetro padrão deste trabalho, ou seja, $0,315$ m.

5.2 - Discussão dos Resultados

A vazão de sólidos de esferas de vidro de diâmetro igual a 14,34 cm e densidade igual a 2462,9 Kg/m³, foi de 0,0072 kg/s para todas as simulações, mas para verificar a consistência do programa, foram testadas algumas vazões de sólidos diferentes usando a geometria padrão deste trabalho.

A grade utilizada neste trabalho está na figura 4.3. Nela é mostrada os pontos escolhidos para mostrar os gráficos nas figuras desta seção. Esses pontos estão a 0,92 m e a 0,48 m da saída inferior. Estes pontos foram escolhidos porque existem dados experimentais obtidos nessas alturas e seria possível mostrar a consistência do programa com esses dados.

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram, respectivamente, os perfis de velocidade axial, velocidade tangencial e pressão manométrica do ar para algumas vazões de sólidos simuladas e para o ar puro.

Pode-se notar na figura 5.1, que a velocidade axial próximo ao centro é maior para o ar puro, e à medida que se aumenta a vazão de sólidos, a velocidade axial decresce. Porém quando se passa do ponto de inversão, que ocorreu próximo à $r/R=0,6$, o mesmo fenômeno é observado.

Na figura 5.2 pode-se notar que o perfil de velocidade tangencial foi maior para o ar puro, enquanto para as maiores vazões houve uma menor diferença entre os perfis.

O perfil de pressão manométrica também foi maior para o ar puro, chegando a alcançar, próximo à parede do ciclone, um valor mais que duas vezes maior do que o valor da pressão manométrica para a maior vazão, como pode ser notado na figura 5.3. Isto está de acordo com o trabalho de Yuu et al (1978), que mostraram que ocorre uma maior queda de pressão manométrica quando se tem baixas concentrações de partículas.

Os resultados dos tempos de residência obtidos para estas simulações estão no quadro 5.1. Estes resultados mostram que o programa está de acordo com os trabalhos experimentais de Silva (1991) e Godoy, Silva e Nebra (1992), mostrando que o tempo de residência diminui à medida que se aumenta a vazão de sólidos, tendendo a um valor constante. Esses autores registram em seu trabalho outros trabalhos que não mencionam esta relação entre o tempo de residência e a vazão de sólidos e, sim, que o tempo de residência permanece constante independente da vazão de sólidos indicando que nesses casos, os autores devem ter utilizado altas vazões de sólidos.

Por uma questão de espaço, não serão mostrados todos os resultados das simulações. Os gráficos mostrados nesta parte serão os do ponto próximo ao centro da parte cilíndrica, a 0,92 m da saída inferior. Para o diâmetro do ciclone serão mostrados também gráficos do ponto na parte cônica, a 0,48 m da saída inferior pois foi onde se obteve uma melhor visualização dos perfis.

A seguir serão mostrado os resultados de algumas simulações.

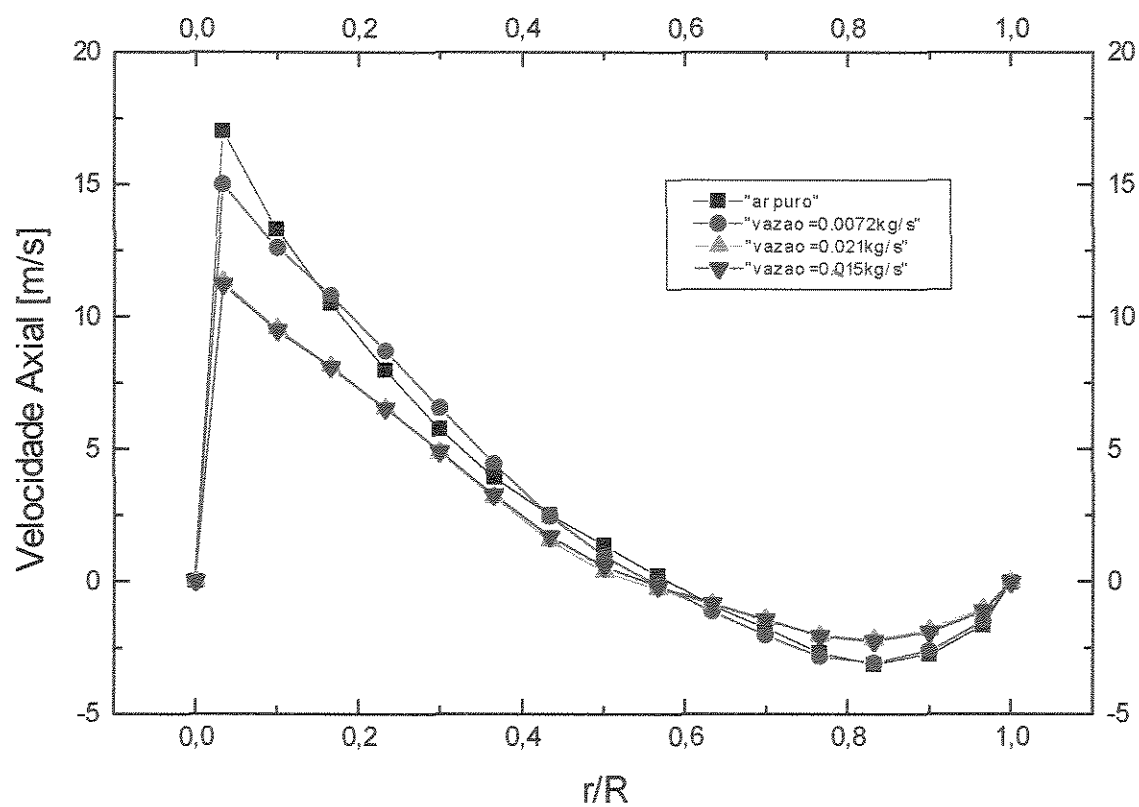


Figura 5.1 - Perfil de velocidade axial do ar para diferentes vazões de sólidos em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior do ciclone.

Quadro 5.1 - Tempos de residências obtidos variando a vazão de sólidos.

Vazão de sólidos (kg/s)	Tempo de Residência (s)
0.0072	10,3
0.015	7,10
0.021	6,86
0.0355	6,23

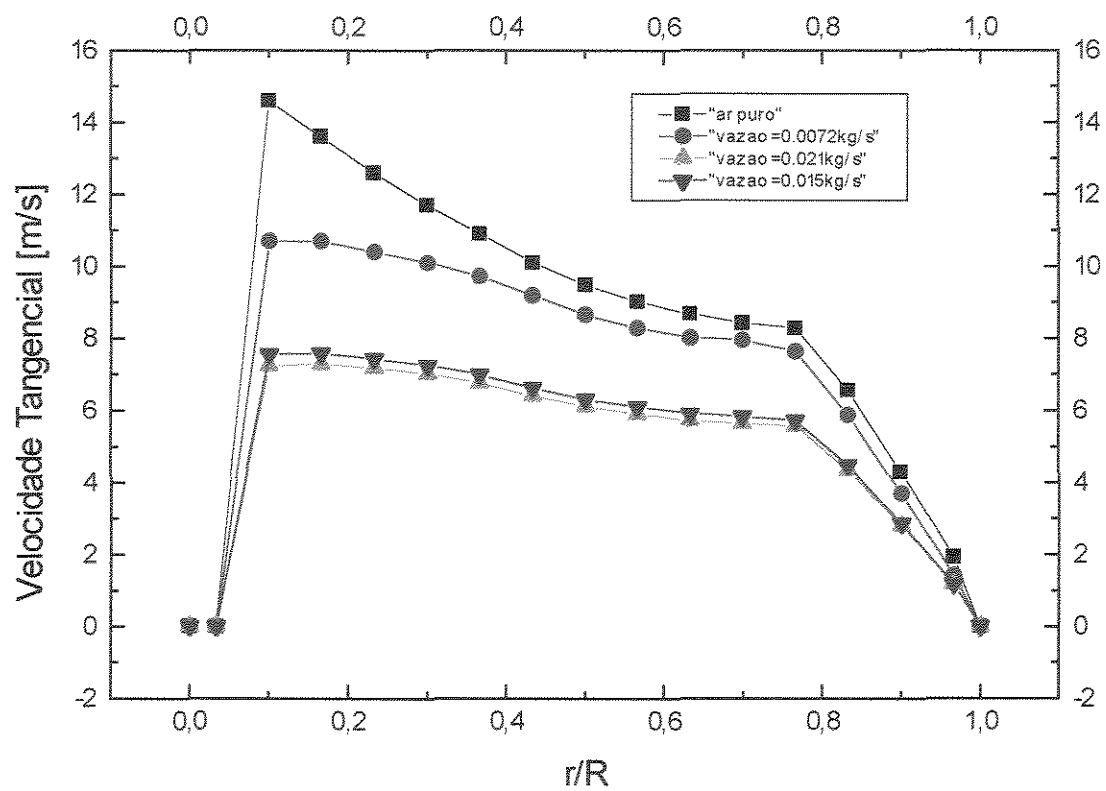


Figura 5.2- Perfil de velocidade tangencial do ar para diferentes vazões em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior do ciclone.

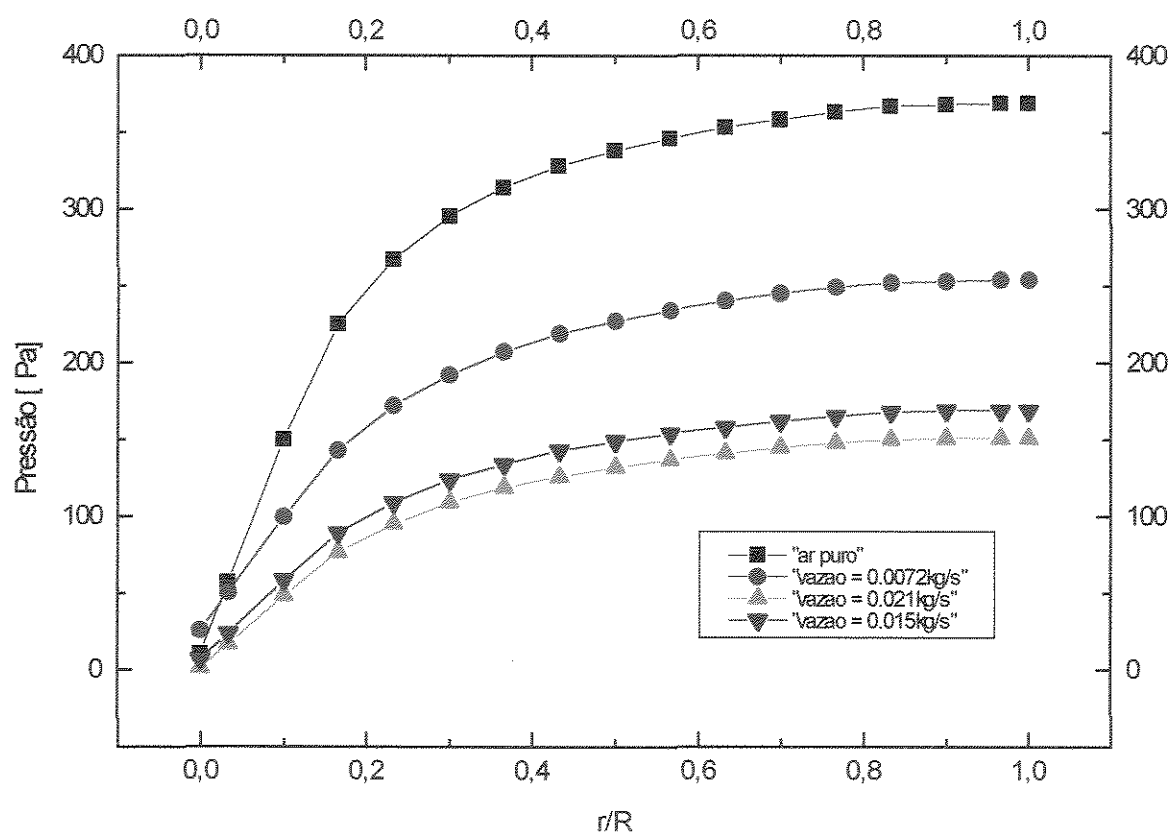


Figura 5.3- Perfil de pressão manométrica do ar para diferentes vazões em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior do ciclone.

Ângulo (α) - Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 podem ser observados os perfis de velocidade axial, tangencial e queda de pressão manométrica respectivamente para um ciclone de diferentes ângulos.

Pode ser notado que há uma grande variação próximo ao centro nos perfis de velocidade axial, porém ao se dirigir para a parede essa variação vai se tornando bem menor. O mesmo acontece com a velocidade tangencial, porém nesta o perfil para $\alpha=0^\circ$ permanece um pouco diferente dos demais perfis.

A pressão manométrica foi se tornando maior à medida que se aumentava o valor do ângulo, ou seja, quanto mais estreita a parte cônica, maior foi a pressão manométrica no ciclone.

Altura da parte cilíndrica (h) - As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram respectivamente os perfis de velocidade axial, velocidade tangencial e queda de pressão manométrica no ponto próximo ao centro da parte cilíndrica para esta fase da simulação.

Na figura 5.7, pode ser notado que próximo a parede os perfis de velocidade axial foi praticamente idênticos para todas as alturas da parte cilíndrica simuladas depois de $r/R = 0,6$, enquanto próximo ao centro do ciclone, $h = 0,471\text{m}$ teve uma velocidade axial maior. O ponto de inversão ocorreu próximo a $r/R = 0,3$.

Para a velocidade tangencial, pode-se notar diferenças nos perfis das duas alturas menores simuladas para as duas maiores próximo ao centro do ciclone. As velocidades das duas maiores alturas, tem um pico maior próximo ao centro e depois decrescem mais rapidamente à medida que se aproxima da parede, enquanto os perfis das duas menores alturas decrescem mais suavemente.

Altura do "Draft-Tube" (S) - Pela figura 5.10 pode ser notado que não houve nenhuma diferença nos perfis de velocidade axial para estas simulações. O mesmo aconteceu com os perfis de velocidade tangencial e queda de pressão manométrica. Isto porque para a simulação foi considerado que 99% das partículas estão na parede enquanto 1% das partículas está no resto do ciclone, tornando o efeito do "Draft-Tube" sobre o escoamento desprezível.

Diâmetro do "Draft-Tube" (De) - Assim como na variação da altura do "Draft-Tube", o diâmetro do "Draft-Tube" também não apresentou qualquer diferença nas simulações. Isto se deve à mesma justificativa apresentada para a altura do "Draft-Tube".

Diâmetro do ciclone (D) - Os perfis de velocidade axial, tangencial e da queda de pressão manométrica na parte cilíndrica estão respectivamente nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13, enquanto para um ponto na parte cônica estão respectivamente nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16.

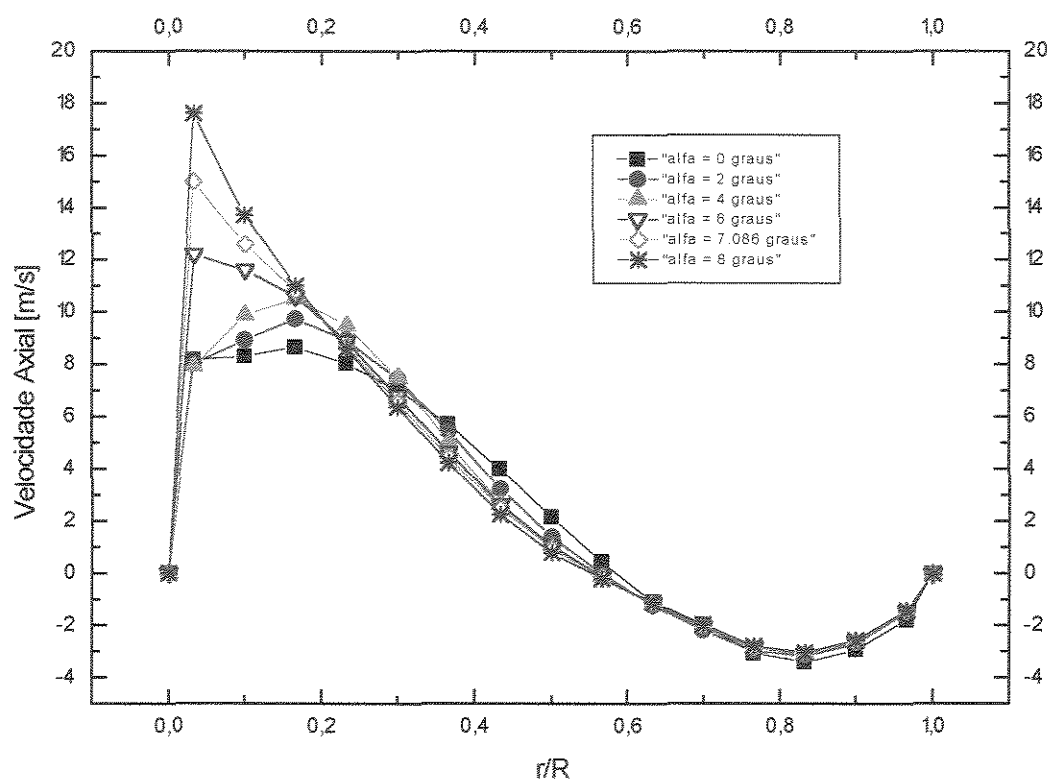


Figura 5.4 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes ângulos em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior.

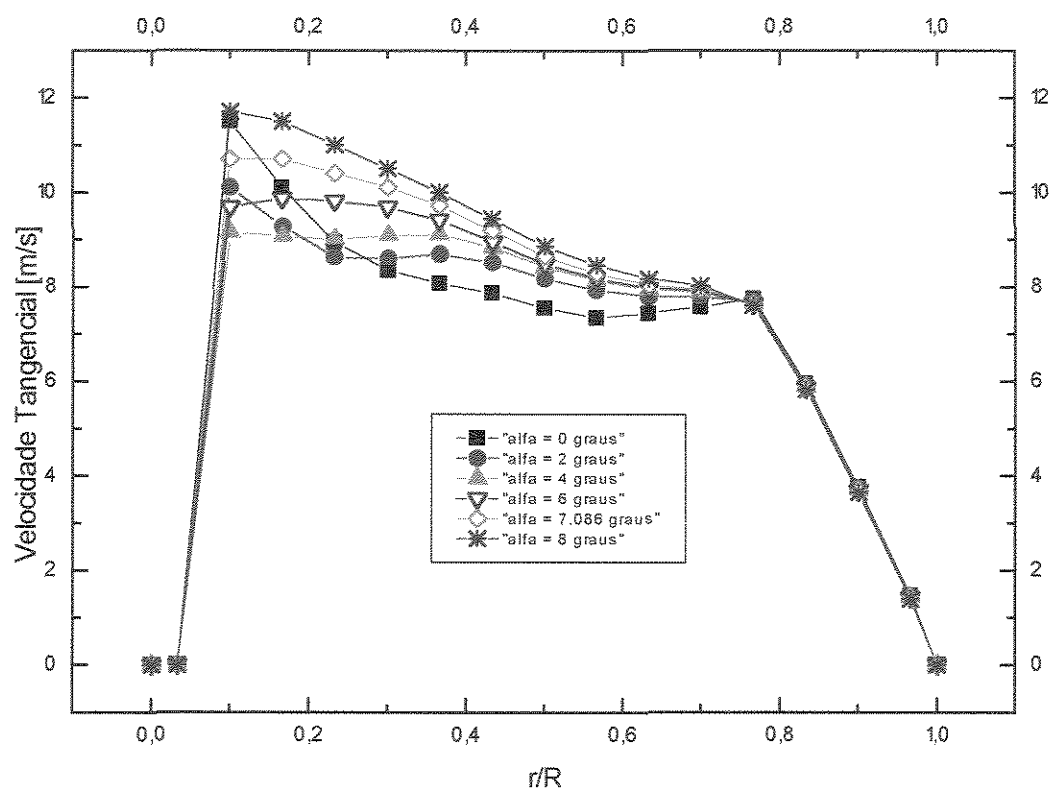


Figura 5.5 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes ângulos em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior.

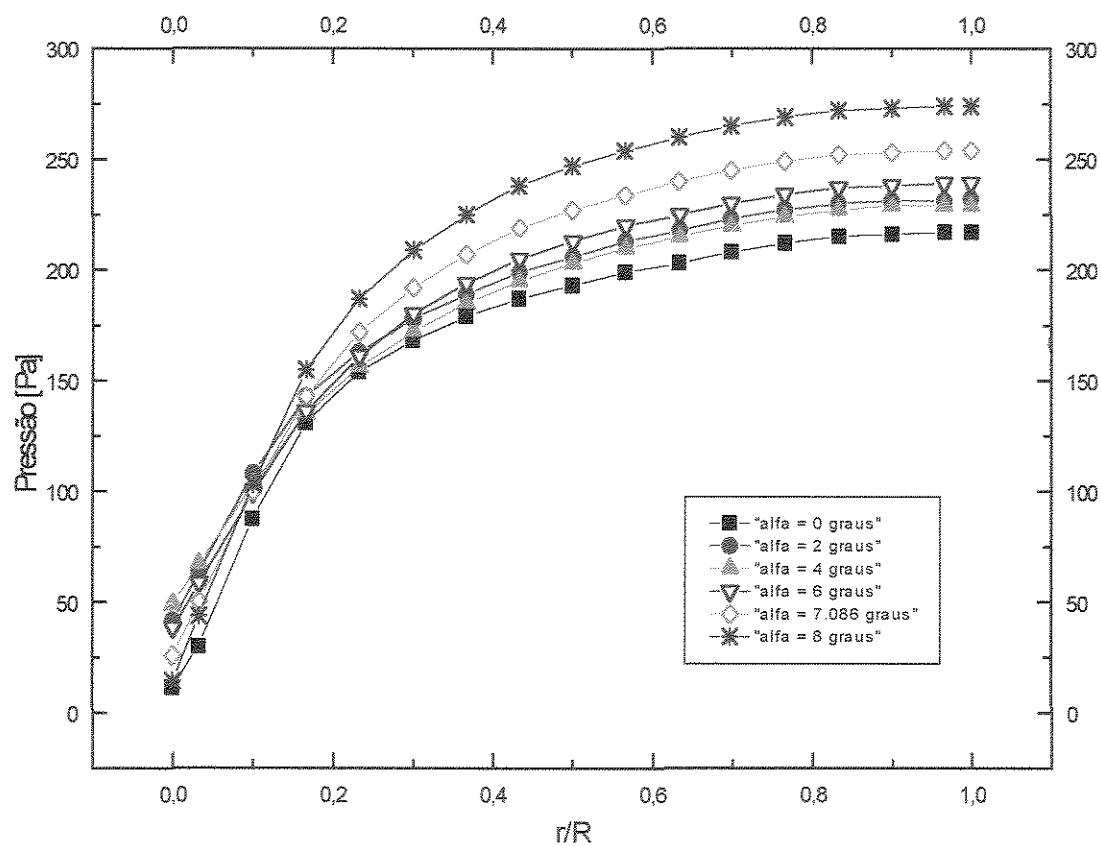


Figura 5.6 - Perfil de pressão manométrica para o ar para ciclones de diferentes ângulos em um ponto da parte cilíndrica a 0,92 m da saída inferior.

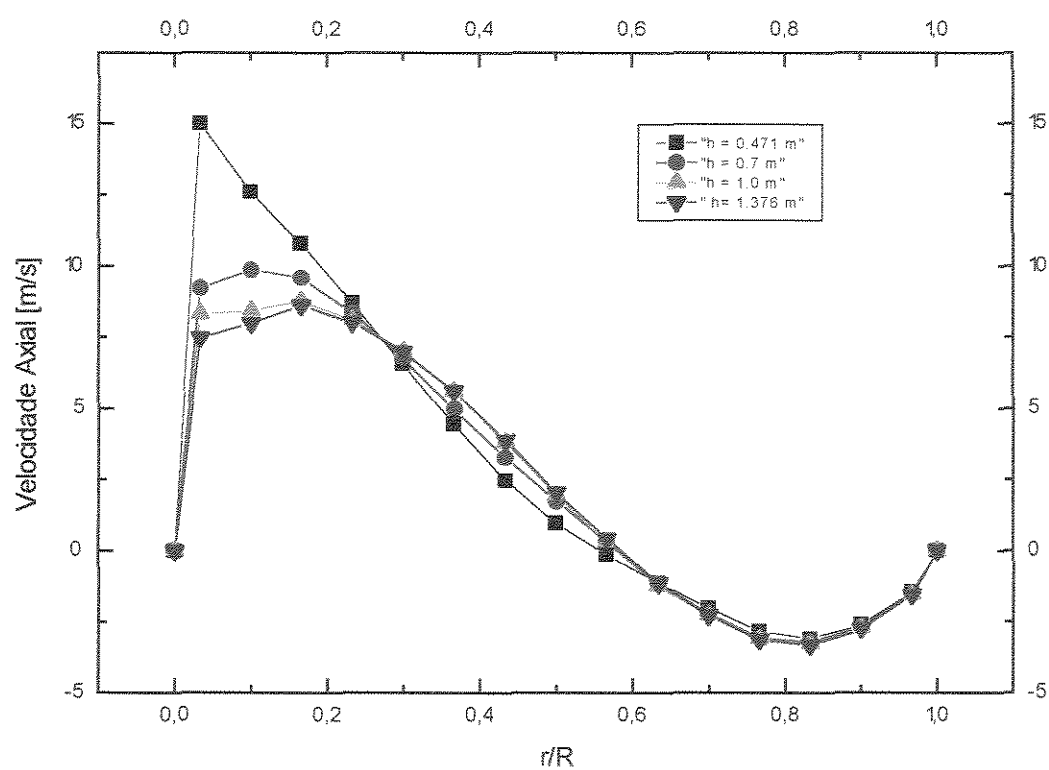


Figura 5.7 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes alturas da parte cilíndrica em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

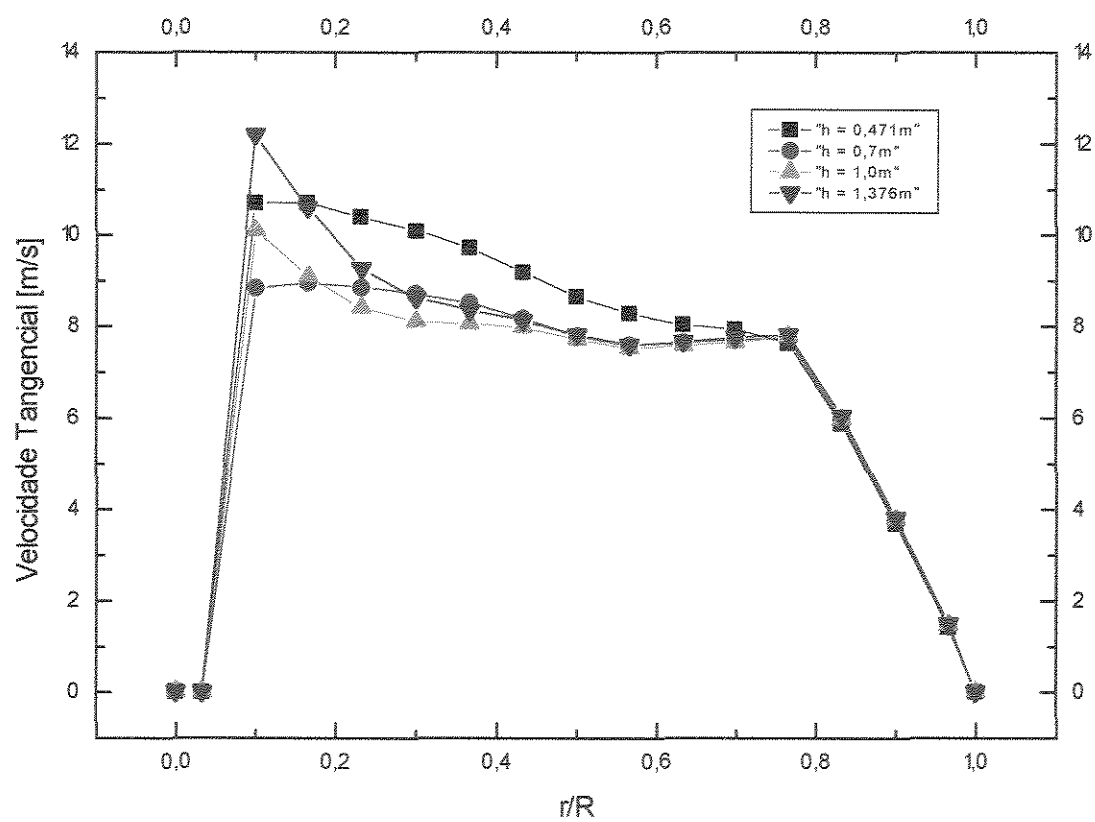


Figura 5.8 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes alturas da parte cilíndrica em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

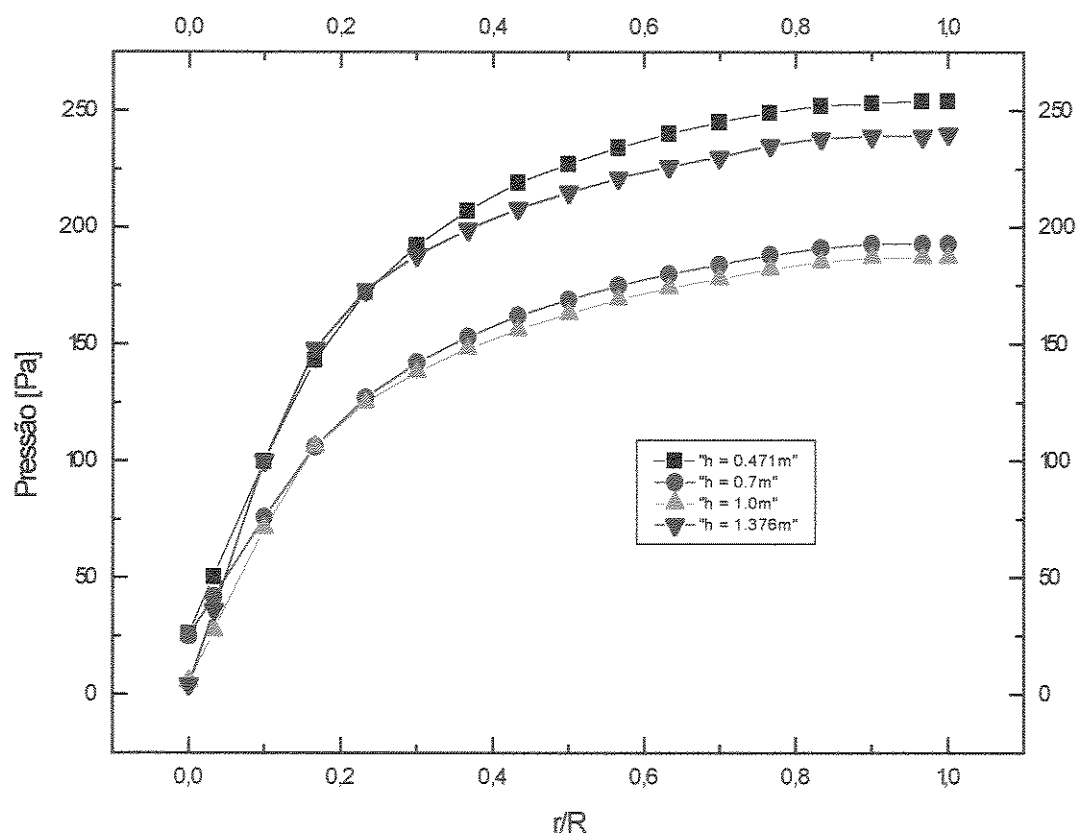


Figura 5.9 - Perfil da pressão manométrica do ar para ciclones de diferentes alturas da parte cilíndrica em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

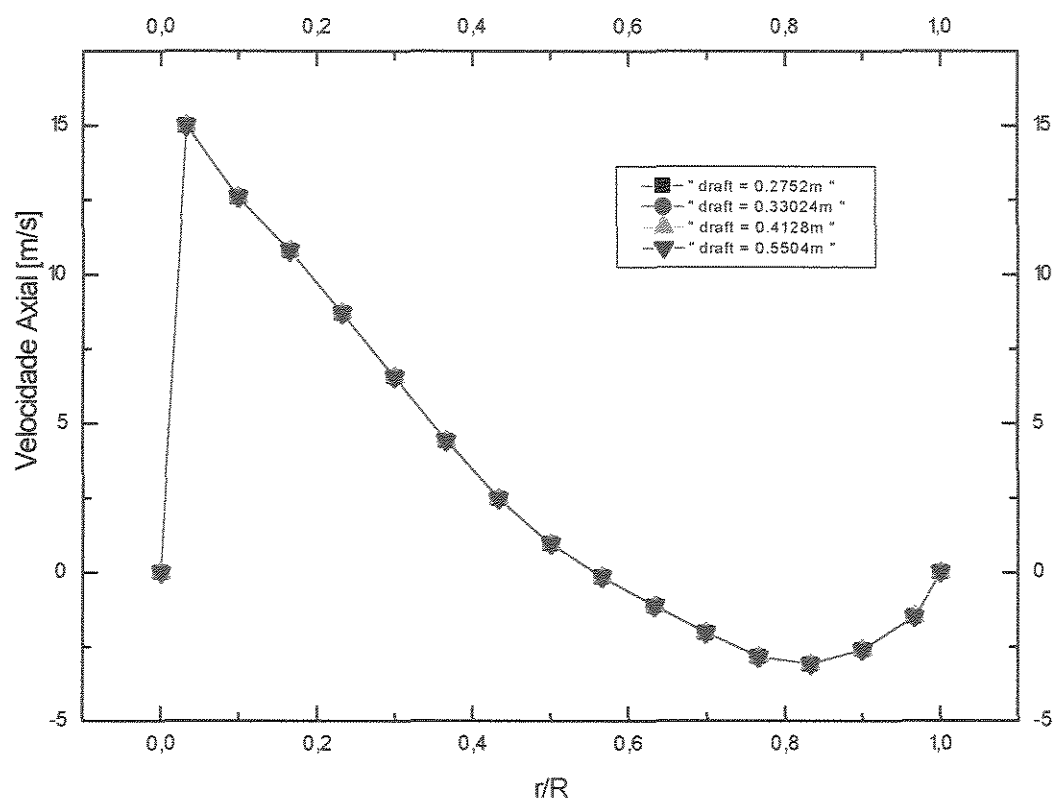


Figura 5.10 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones com "Draft-Tube" de diferentes alturas em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

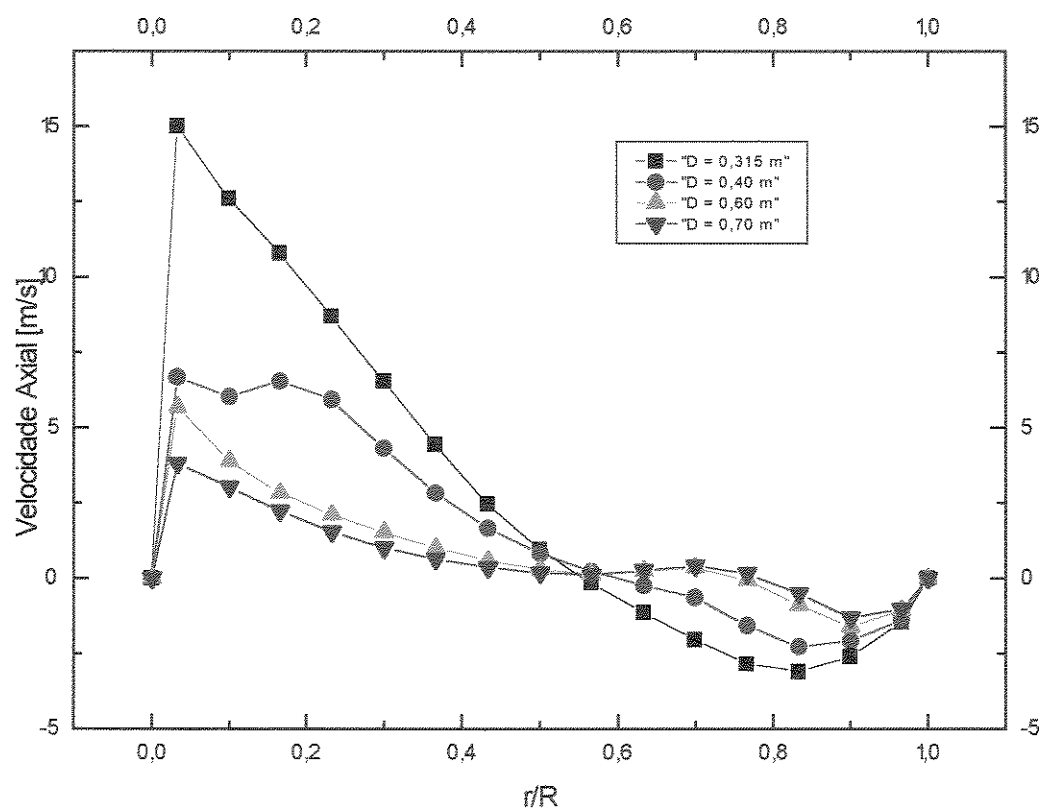


Figura 5.11 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

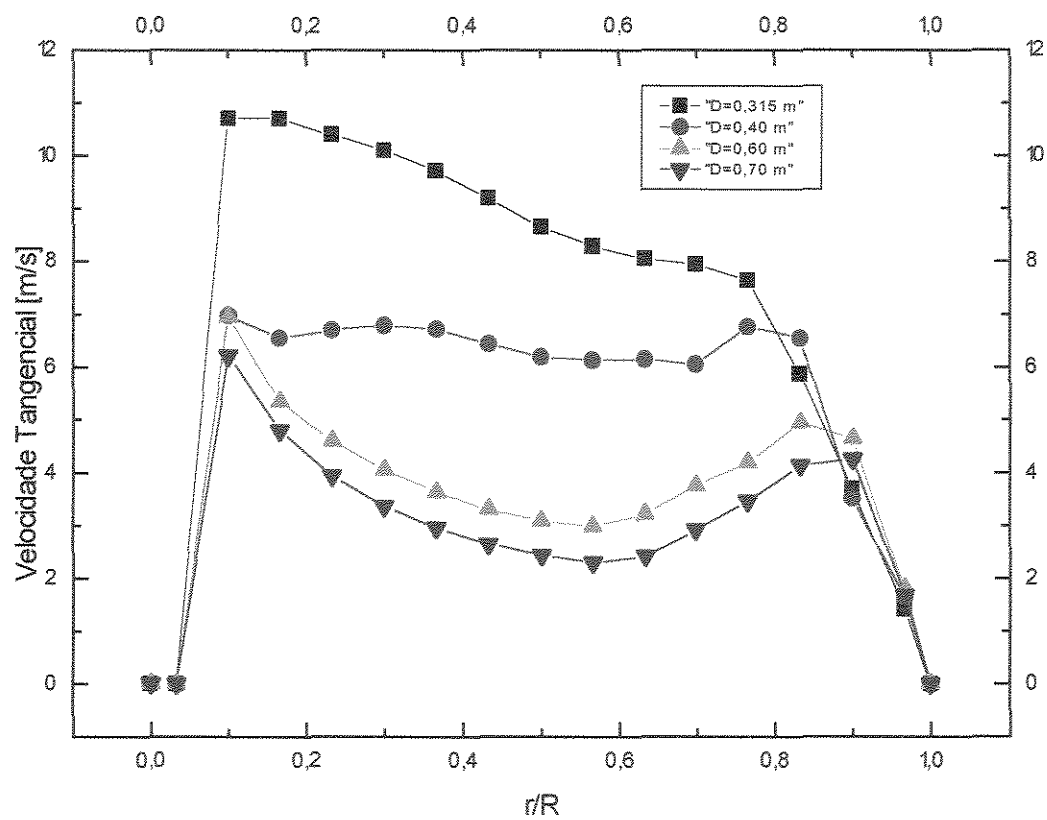


Figura 5.12 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

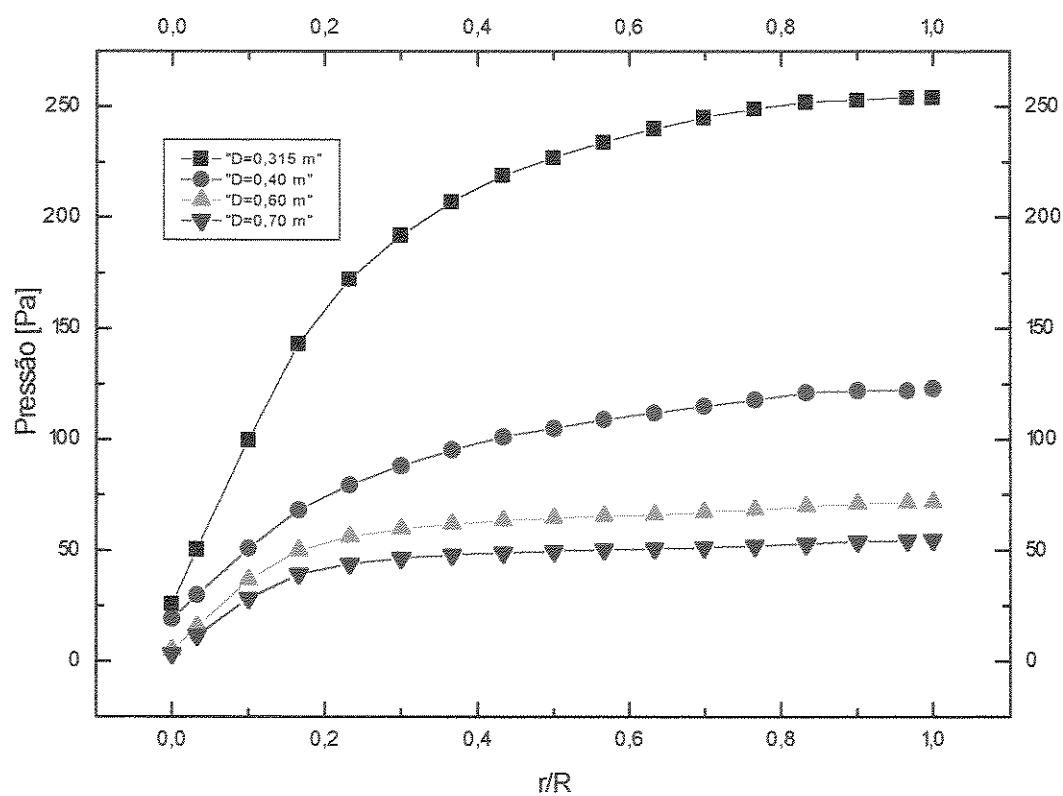


Figura 5.13 - Perfil de pressão manométrica do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,92 m da saída inferior.

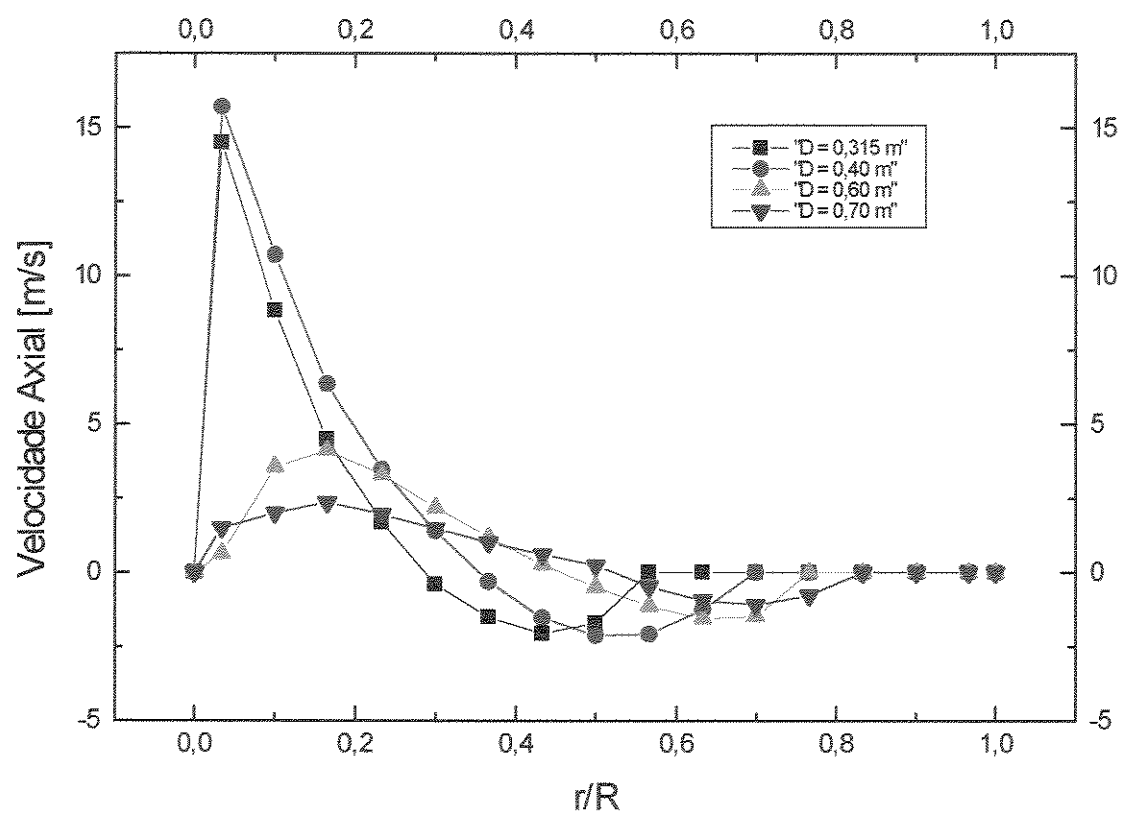


Figura 5.14 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,48 m da saída inferior.

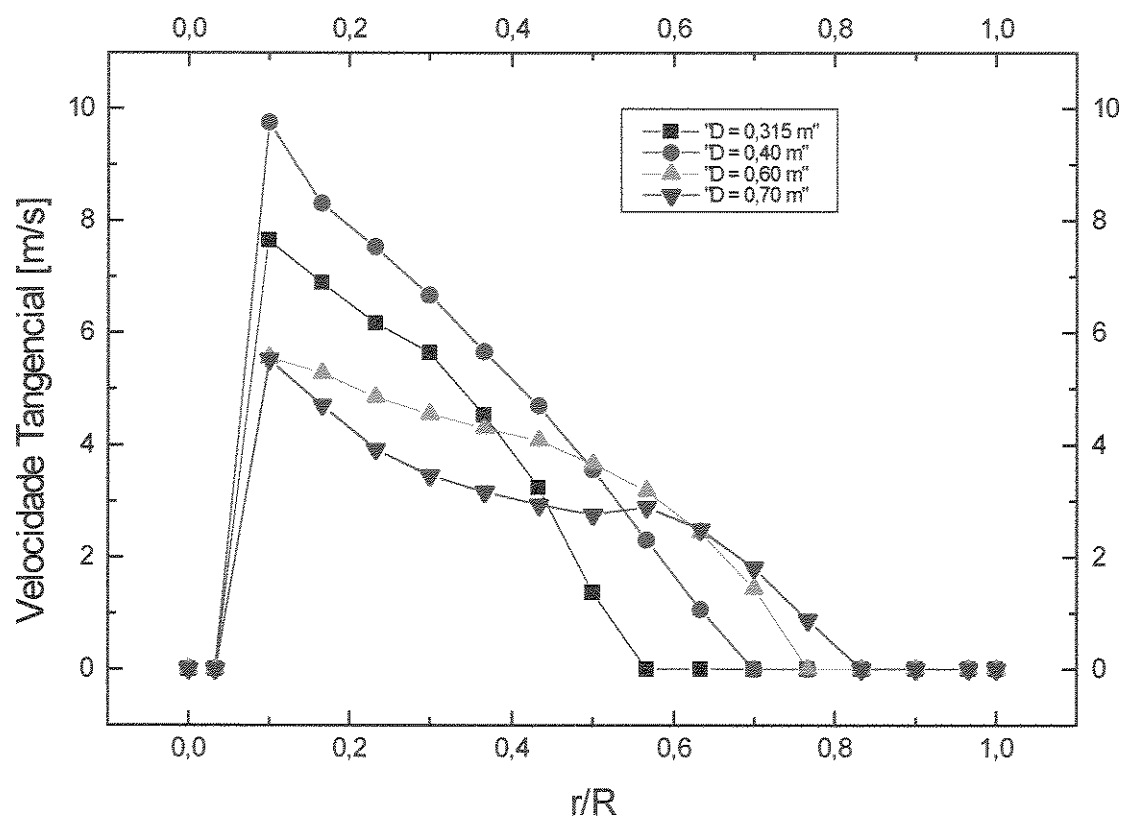


Figura 5.15 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,48 m da saída inferior.

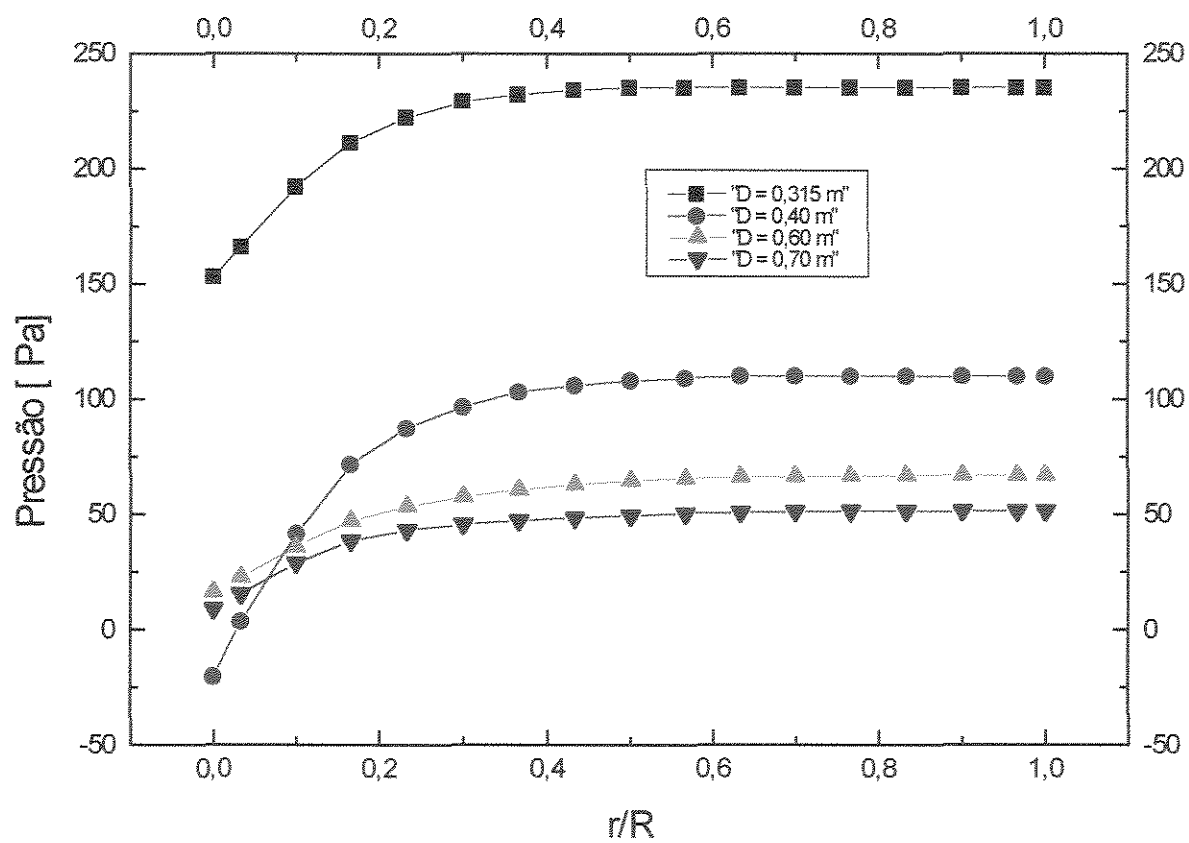


Figura 5.16 - Perfil de pressão manométrica do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,48 m da saída inferior.

Na figura 5.11 pode-se notar que próximo ao centro do ciclone houve um grande pico de velocidade axial para $D = 0,315$ m. Essa velocidade foi aproximadamente o dobro da segunda maior velocidade que ocorreu para $D = 0,40$ m. Porém depois do ponto de inversão que ocorreu próximo a $r/R = 0,55$, o perfil de velocidade axial para $D = 0,315$ m atingiu seu menor valor próximo a $r/R = 0,85$.

A velocidade tangencial atingiu valores bem maiores para $D = 0,315$ m para o ponto a $0,92$ m de distância da saída inferior, como pode ser visto na figura 5.12, enquanto a $0,48$ m de distância da saída inferior os maiores valores foram para $D = 0,40$ m. Neste ponto, os menores valores foram para $D = 0,70$ m, como pode-se notar na figura 5.15.

A pressão manométrica atingiu o maior valores para $D = 0,315$ m tanto para uma distância de $0,92$ m (figura 5.13), quanto para uma distância de $0,48$ m da saída inferior (figura 5.16). Pode-se notar pelas figuras 5.13 e 5.14 que à medida que se aumentava o diâmetro, o perfil de pressão manométrica era menor.

As figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram os perfis de velocidade axial, velocidade tangencial e pressão manométrica, respectivamente, para os ciclones utilizados no trabalho de Maroulis e Kremalis (1995). Para as três análises, o ciclone Stern C foi quem deu os maiores perfis, enquanto os ciclones Stairmand HT e Swift HT apresentaram os menores.

Um outro parâmetro que foi analisado nas simulações foi o tempo de residência. Isto porque para secador ou aquecedor, o tempo de residência das partículas é um importante fator a ser analisado. A seguir serão mostrados os tempos de residência das partículas obtidos em algumas simulações.

No quadro 5.2 pode-se notar que $\alpha = 0^\circ$ foi o ângulo que apresentou o maior tempo de residência nesta análise. Para esta parte da simulação o melhor resultado foi o ciclone totalmente cilíndrico. A figura 5.20 mostra que o perfil da velocidade axial da partícula para $\alpha = 0^\circ$ foi se tornando constante da metade da altura total do ciclone até a saída inferior. Este também foi o ciclone que atingiu a menor velocidade axial da partícula próximo à entrada.

Quadro 5.2 - Tempo de residência para ciclones com diferentes ângulos.

α	Tempo de Residência (s)
0°	11,3
2°	11,1
4°	11,0
6°	10,7
$7,086^\circ$	10,3
8°	10,1

Pode ser notado que no quadro 5.3 o tempo de residência aumentou à medida que se aumentou a altura da parte cilíndrica. Mas a partir de $h = 1,0$ m, o tempo de residência permaneceu constante.

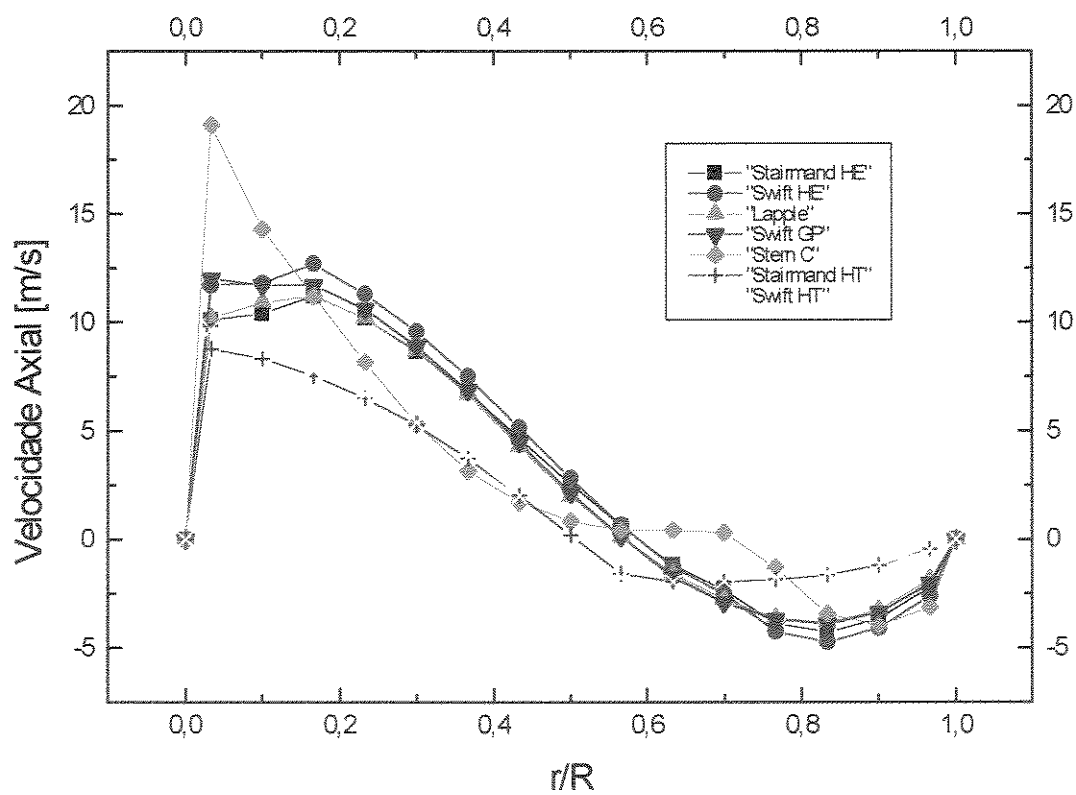


Figura 5.17 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones utilizados no trabalho de Maroulis e Kremalis (1995).

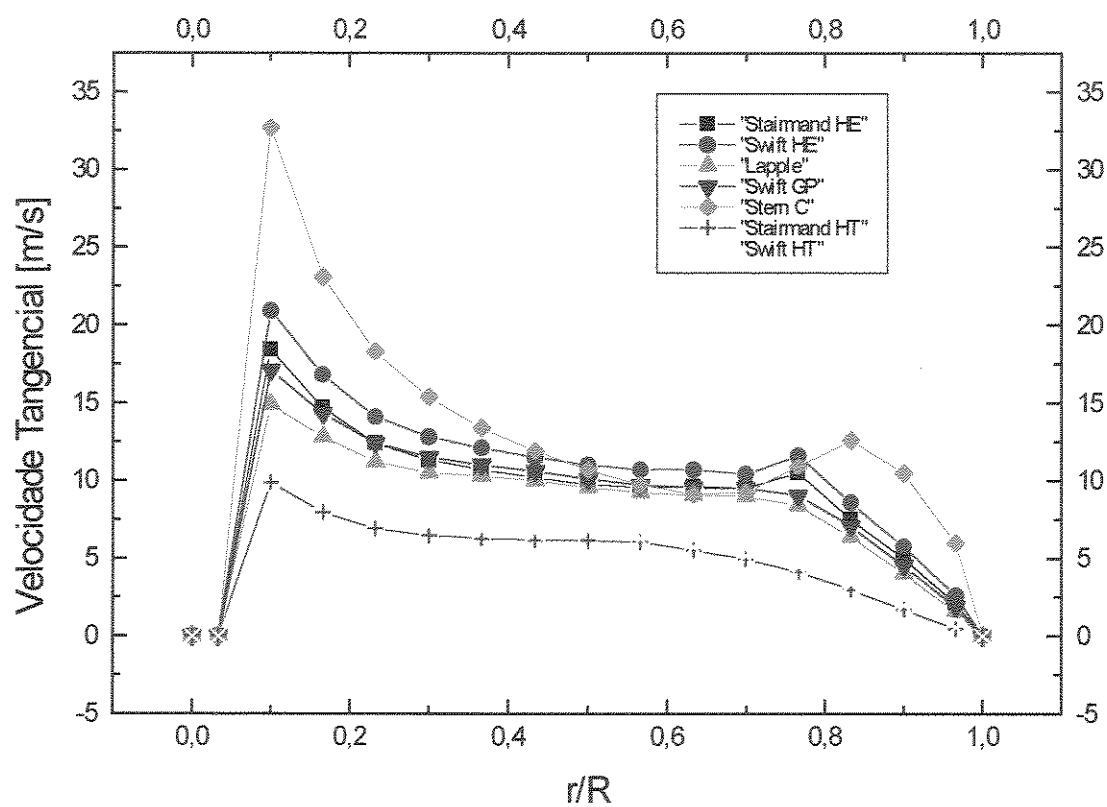


Figura 5.18 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones utilizados no trabalho de Maroulis e Kremalis (1995).

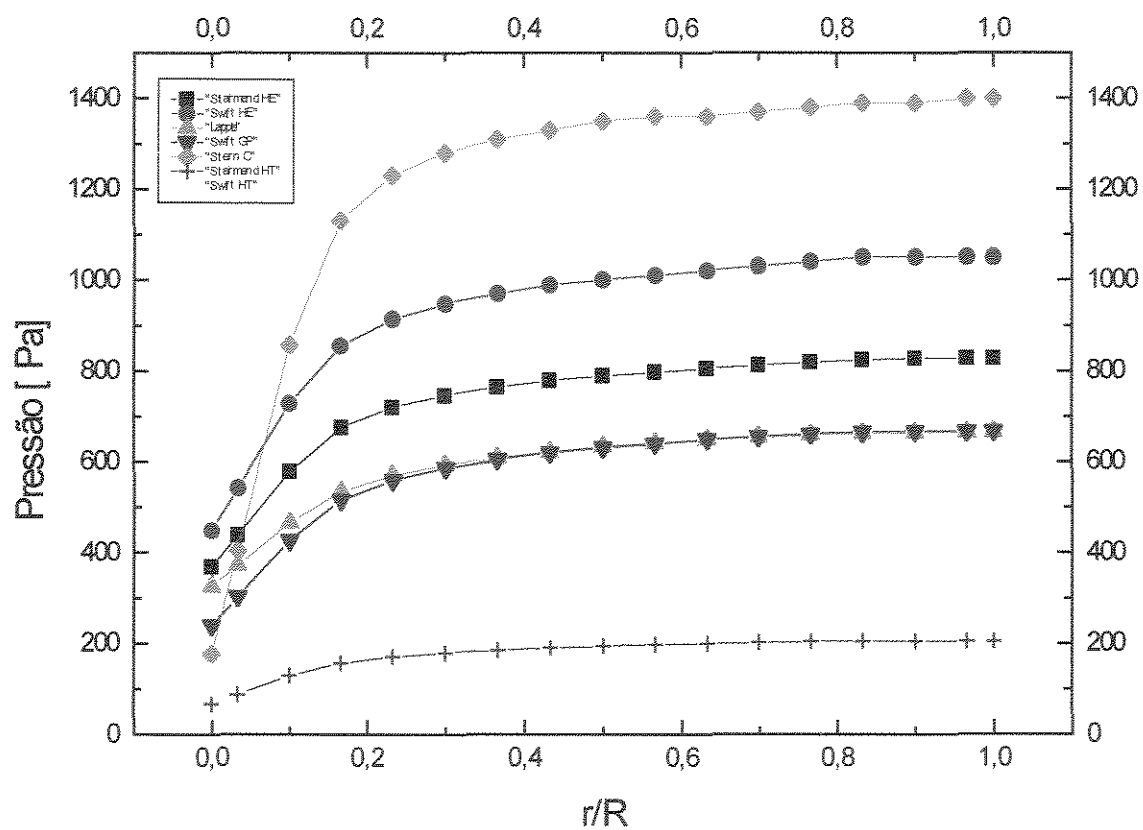


Figura 5.19 - Perfil de pressão manométrica do ar para ciclones utilizados no trabalho de Maroulis e Kremalis (1995).

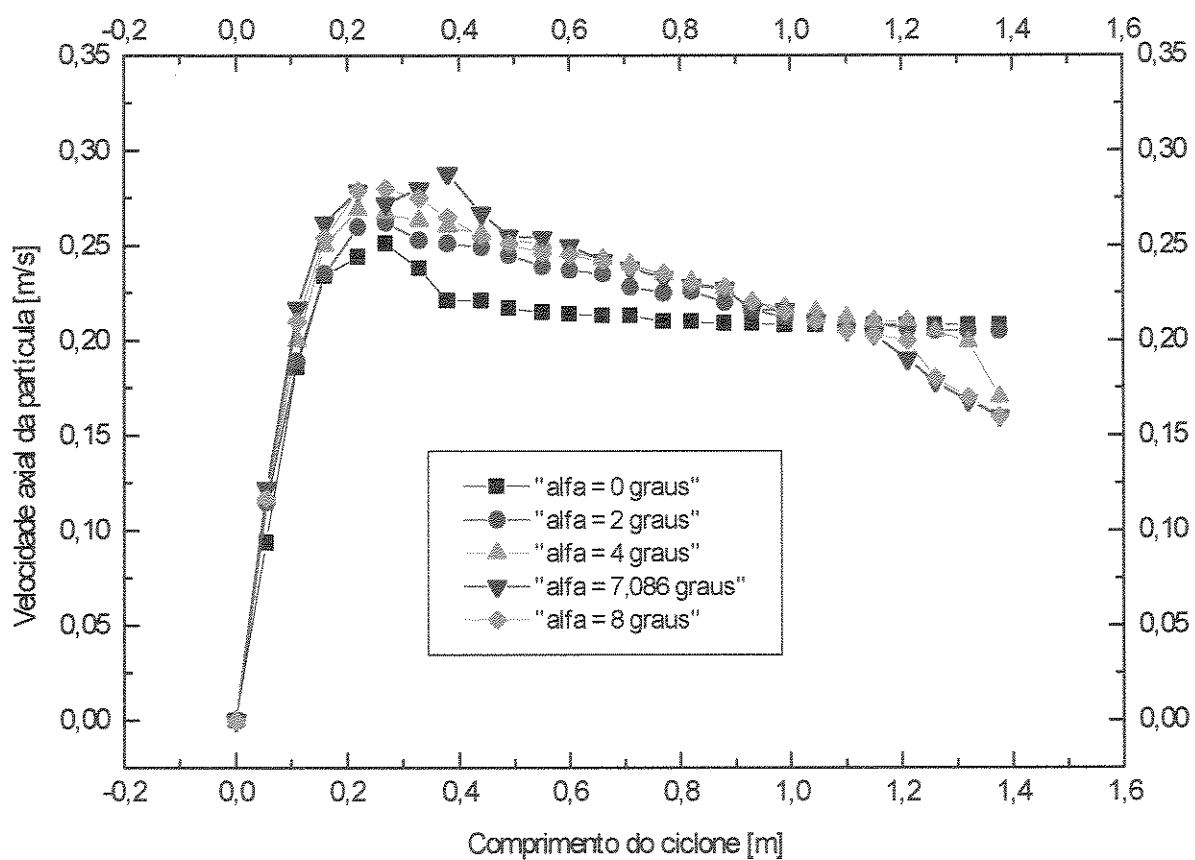


Figura 5.21 - Perfil de velocidade axial da partícula para ciclones de diferentes ângulos, para a partícula na parede do ciclone.

Quadro 5.3 - Tempo de residência para ciclones com diferentes alturas da parte cilíndrica.

h (m)	Tempo de Residência (s)
0,471	10,3
0,700	10,9
1,000	11,3
1,376	11,3

A figura 5.21 mostra o perfil de velocidade axial da partícula variando com a altura da parte cilíndrica. Para o ciclone totalmente cilíndrico, esse perfil vai se tornando constante. Este também foi o ciclone que atingiu a menor velocidade axial próximo à entrada das partículas.

Para o "Draft-Tube", não houve diferença nos tempos de residências obtidos. Isto aconteceu porque nas simulações foi considerado que 99% das partículas estão na parede e 1% está no resto do ciclone, fazendo com que o "Draft-Tube" não influencie no escoamento.

Quadro 5.4 - Tempo de residência para ciclones com diferentes alturas do "Draft - Tube".

S (m)	Tempo de Residência (s)
0,2752	11,3
0,33024	11,3
0,4128	11,3
0,660	11,3

O quadro 5.5 mostra que a medida em que era aumentado D, o tempo de residência também aumentava. Isto está de acordo com o trabalho experimental de Ranz (1985) que mostra que as partículas continuam girando até o final do ciclone e não ficam em queda livre depois de um determinado ponto como afirma Stairmand (1951).

Pela figura 5.22, pode-se notar que à medida que se aumenta o diâmetro do ciclone, o perfil tende a ter uma maior linearidade acima de aproximadamente 0,6 m de comprimento. Por isso, a velocidade da partícula tende a ficar constante resultando em um maior tempo de residência.

No quadro 5.6 é mostrado os resultados das simulações onde foram cominados ângulos e alturas da parte cilíndrica que deram os maiores tempos de residências com $D = 0,70\text{m}$. Com isso foi notado que h e α não apresentaram diferenças no tempo de residência comparado com o tempo de residência para $D = 0,70\text{ m}$ com $h = 0,471\text{m}$ e $\alpha = 7,086^\circ$, como é mostrado no quadro 5.5.

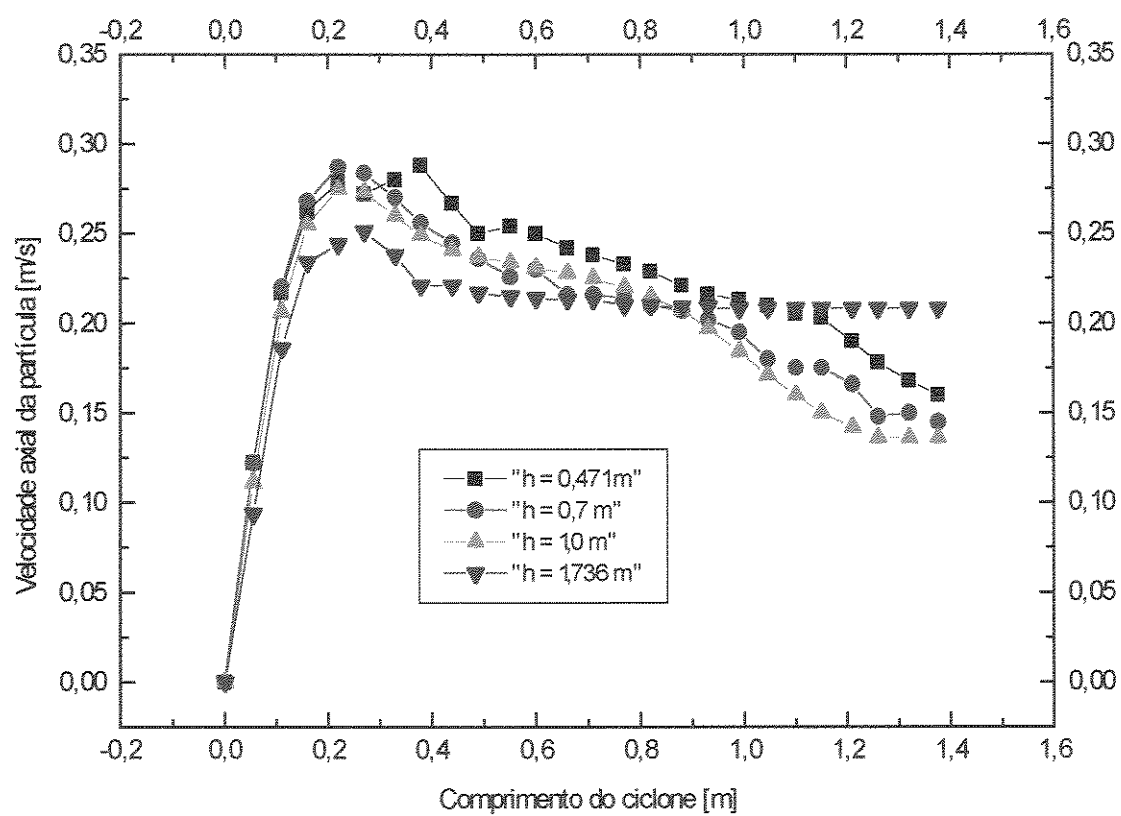


Figura 5.21 - Perfil de velocidade axial da partícula para ciclones de diferentes alturas da parte cilíndrica, para a partícula na parede do ciclone.

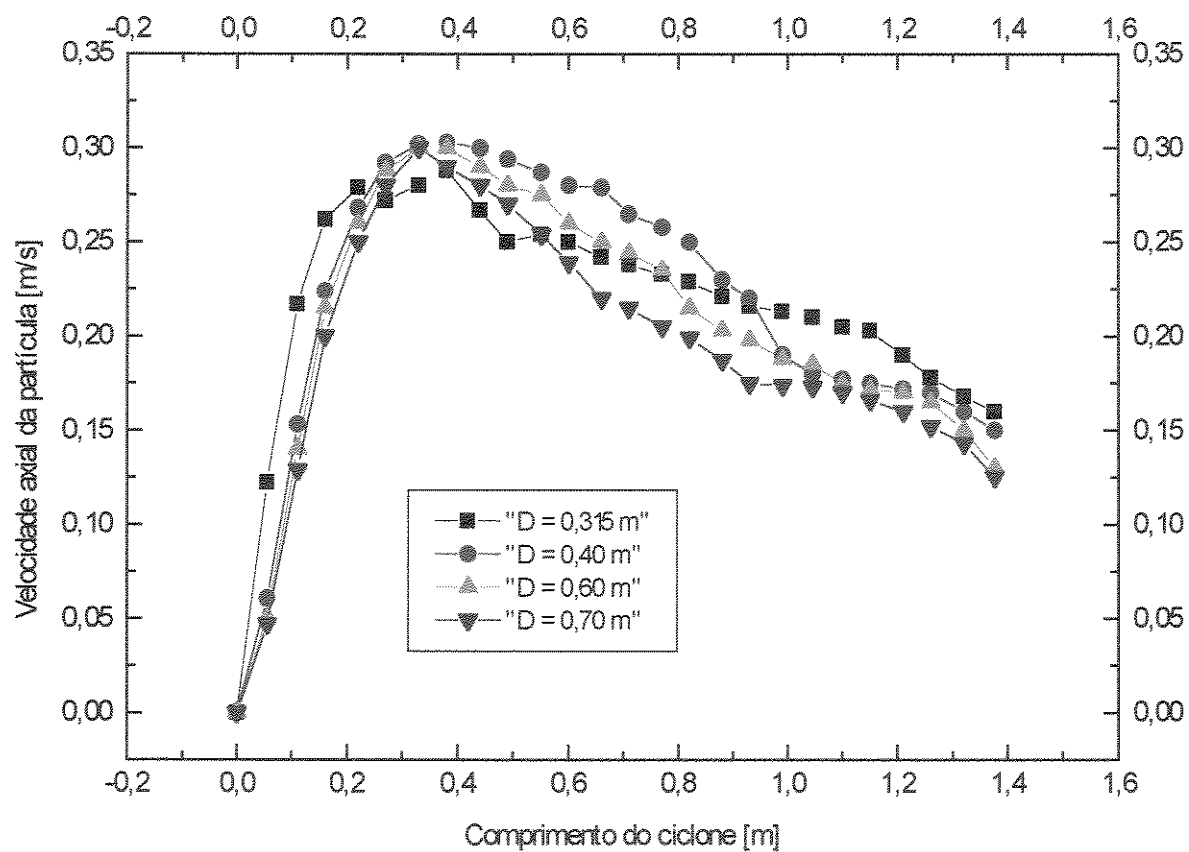


Figura 5.21 - Perfil de velocidade axial da partícula para ciclones de diferentes diâmetros, para a partícula na parede do ciclone.

Quadro 5.5 - Tempo de residência para ciclones com diferentes diâmetros.

D (m)	Tempo de Residência (s)
0,315	11,3
0,40	11,9
0,60	14,5
0,70	15,5

Quadro 5.6 - Variação do tempo de residência para D = 0,70 m.

D = 0,70 m	Tempo de Residência (s)
h = 1,0 m e $\alpha = 2^\circ$	15,5
h = 1,0 m e $\alpha = 8^\circ$	15,5
h = 1,376 m e $\alpha = 0^\circ$	15,5

Após isso, foi feita uma simulação variando D para ciclones totalmente cilíndricos com $\alpha = 0^\circ$ e $h = H = 1,376$ m. Os resultados mostrados no quadro 5.7 apresentam um aumento no tempo de residência conforme aumenta D. Porém esses tempos não variaram muito se comparados com D usados com o ângulo $\alpha = 7,086^\circ$, que é usado como padrão neste trabalho, como pode ser visto no quadro 5.5.

Quadro 5.7 - Tempo de residência com a variação do diâmetro em ciclones totalmente cilíndricos.

D (m)	Tempo de Residência (s)
0,315	11,3
0,40	12,3
0,60	14,5
0,70	15,5
0,90	17,6
1,00	18,7

As geometrias do ciclones usadas no trabalho de Karpukhovich (1987) apresentaram um tempo de residência maior que os obtidos nas outras simulações como pode ser notado no quadro 5.8. Isto se deve ao diâmetro usado por ele, que comparando com este trabalho, foi um dos maiores diâmetros apresentados. Porém, de acordo com Karpukhovich (1987), a relação da altura total, com a altura da parte cilíndrica e com o diâmetro tem muita influência na eficiência do ciclone.

Os resultados encontrados usando na simulação usando os ciclones padrões que foram usados por Maroulis e Kremalis (1995), para encontrar o melhor ciclone para ser usado como separador de partículas, estão no quadro 5.9. Os tempos de residência encontrados foram os menores de todas as simulações realizadas.

Nesta parte da simulação, o ciclone que deu tanto o menor tempo de residência e os maiores perfis de velocidade axial, velocidade tangencial e pressão

manométrica, respectivamente, nas figuras 5.17, 5.18 e 5.19, foi o ciclone Stern C, que no trabalho de Maroulis e Kremalis foi o ciclone mais eficiente para a função de separador de partículas. No Apêndice II será mostrado o resultado do trabalho de Maroulis e Kremalis (1995). No presente trabalho, o Stern C foi o ciclone que deu o menor tempo de residência de todas as simulações realizadas.

Analisando pelo tempo de residência das partículas, o ciclone mais indicado para ser usado como secador seria o ciclone do trabalho de Karpukhovich (1987) com $h = 1,6 D$. No entanto todos os três ciclones simulados com as geometrias propostas por Karpukhovich (1987) apresentaram os maiores tempos de residência das partículas de todas as simulações feitas no presente trabalho.

Quadro 5.8 - Tempos de residências obtidos usando as geometrias do trabalho de Karpukhovich (1987).

h (m)	Tempo de Residência (s)
1,0D	50,8
1,6D	52,2
2,2D	50,9

Quadro 5.9 - Tempo de residência obtido usando os ciclones utilizados por Maroulis e Kremalis (1995).

Ciclones	Tempo de Residência (s)
Stairmand HE	8,58
Swift HE	8,09
Lapple	9,03
Swift GP	7,81
Stern C	1,46
Stairmand HT	8,51
Swift HT	7,33

6 - CONCLUSÃO

Entre todas as características geométricas analisadas, a que teve mais influência no escoamento foi o diâmetro do ciclone. Isto porque o método numérico mostra que a partícula continua tendo um movimento espiral mesmo depois de encontrar a parede do ciclone, concluindo assim que quanto maior o diâmetro do ciclone, maior será o tempo de residência das partículas em seu interior.

O ângulo e a altura da parte cilíndrica também influenciaram. As simulações demonstraram que quanto maior o ângulo, menor o tempo de residência e quanto a maior a altura da parte cilíndrica, maior é o tempo de residência. Porém depois de 1,0 m, a altura da parte cilíndrica não exerceu mais influência no tempo de residência que permaneceu constante.

Pela análise dos tempos de residência obtidos, as geometrias mais indicadas para o ciclone ser usado como secador ou aquecedor, foram as usadas por Karpukhovich (1987).

Para separador de partículas, o mais indicado foi o ciclone Stern C, usado no trabalho de Maroulis e Kremalis (1995), que foi o ciclone que deu o menor tempo de residência de todas as simulações realizados. E de acordo com os resultados dos trabalhos de Maroulis e Kremalis (1995) que estão no Apêndice II, o Stern C foi o ciclone com maior eficiência entre todos apresentados por estes autores.

Em trabalhos futuros poderiam ser feitas modificações na geometria da entrada do ciclone, para uma melhor análise da vazão de sólidos e sua influência no escoamento.

Outro estudo que também poderia ser feito seria uma modificação na grade utilizada na simulação numérica. Poderiam ser feitas análises para grades não uniformes ou então um maior refinamento para estudar sua influência nos resultados.

E um último trabalho sugerido seria o estudo da relação entre o diâmetro, altura da parte cilíndrica e altura total do ciclone, mostradas nas relações geométricas usadas por Karpukhovich (1987), que neste trabalho tiveram influência no tempo de residência.

APÊNDICE I

Gráficos das simulações feitas utilizando apenas o escoamento de ar puro, sem partículas.

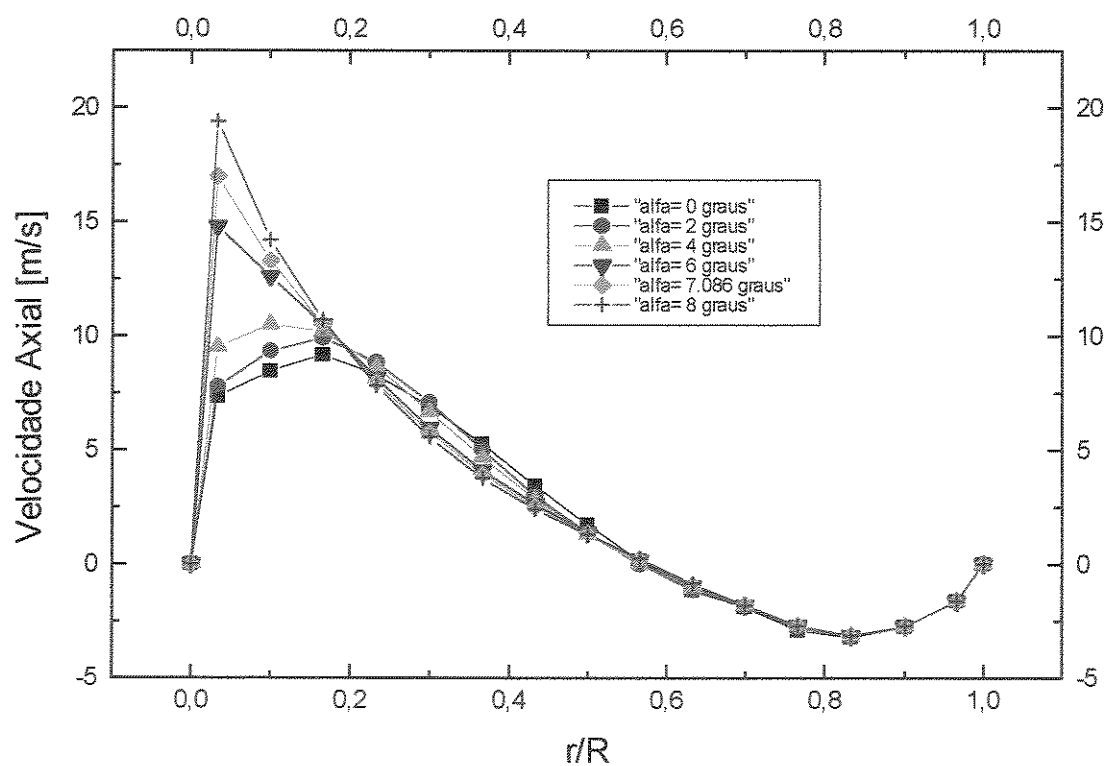


Figura AI.1 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes ângulos em um ponto a 0,92m da saída inferior.

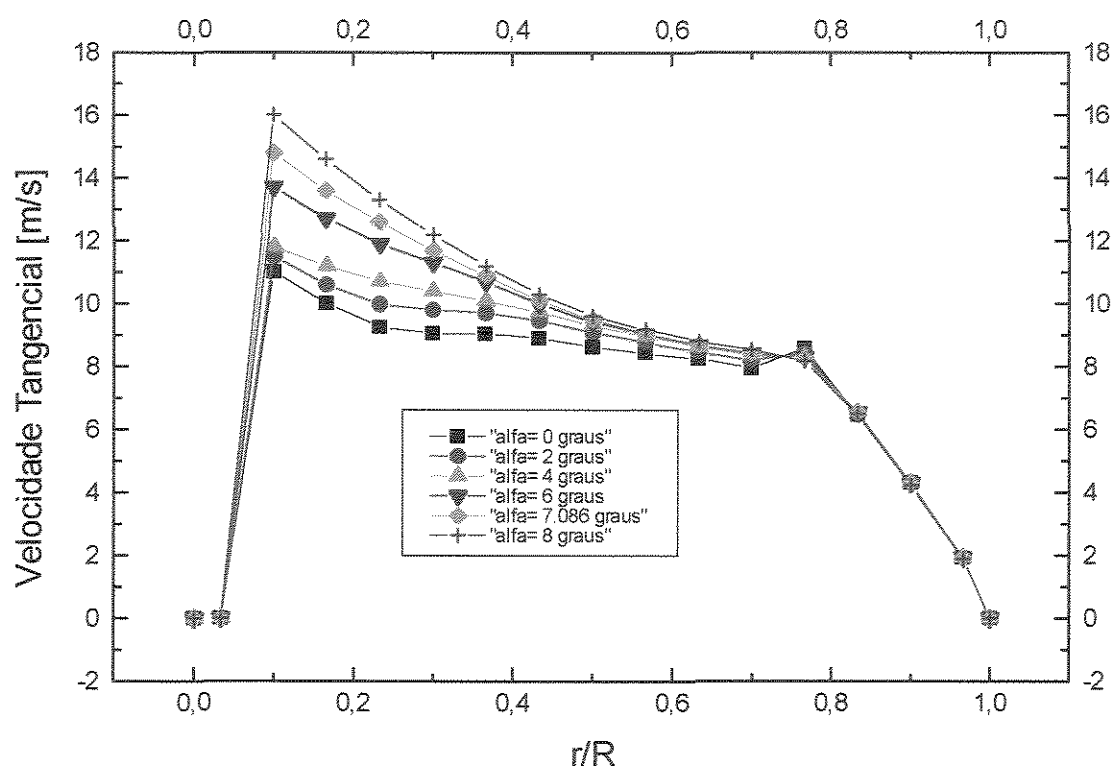


Figura A1.2 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes ângulos em um ponto a 0,92m da saída inferior.

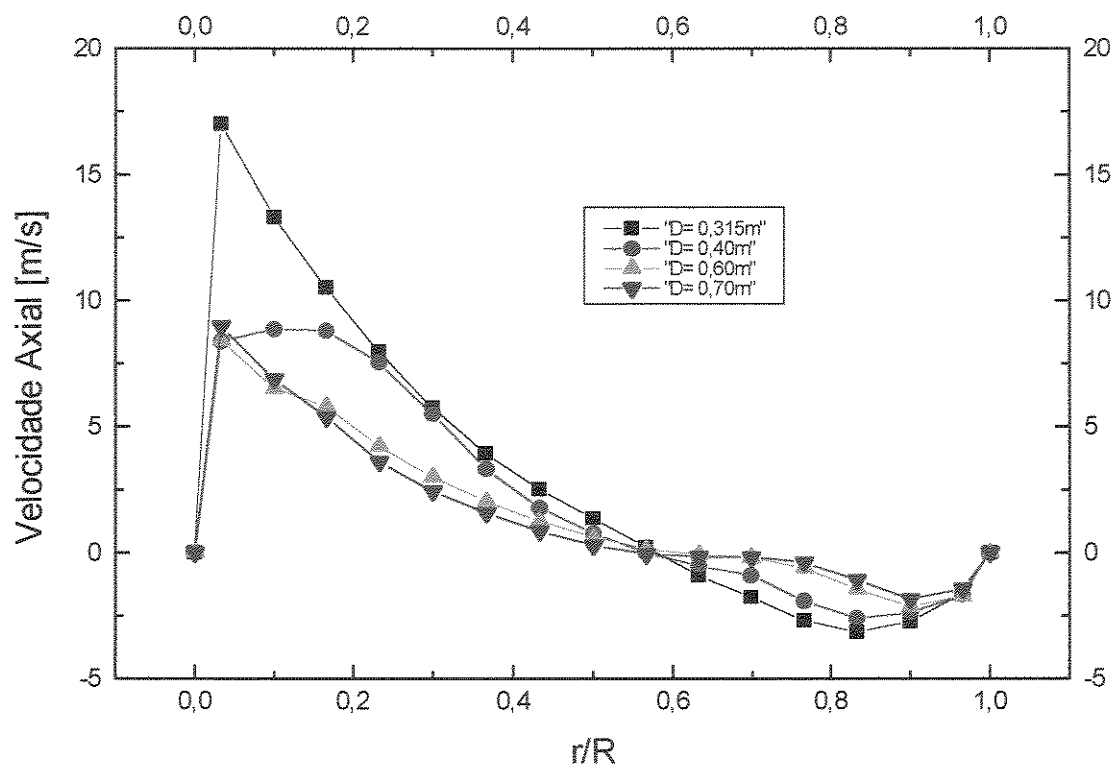


Figura AI.3 - Perfil de velocidade axial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,92m da saída inferior.

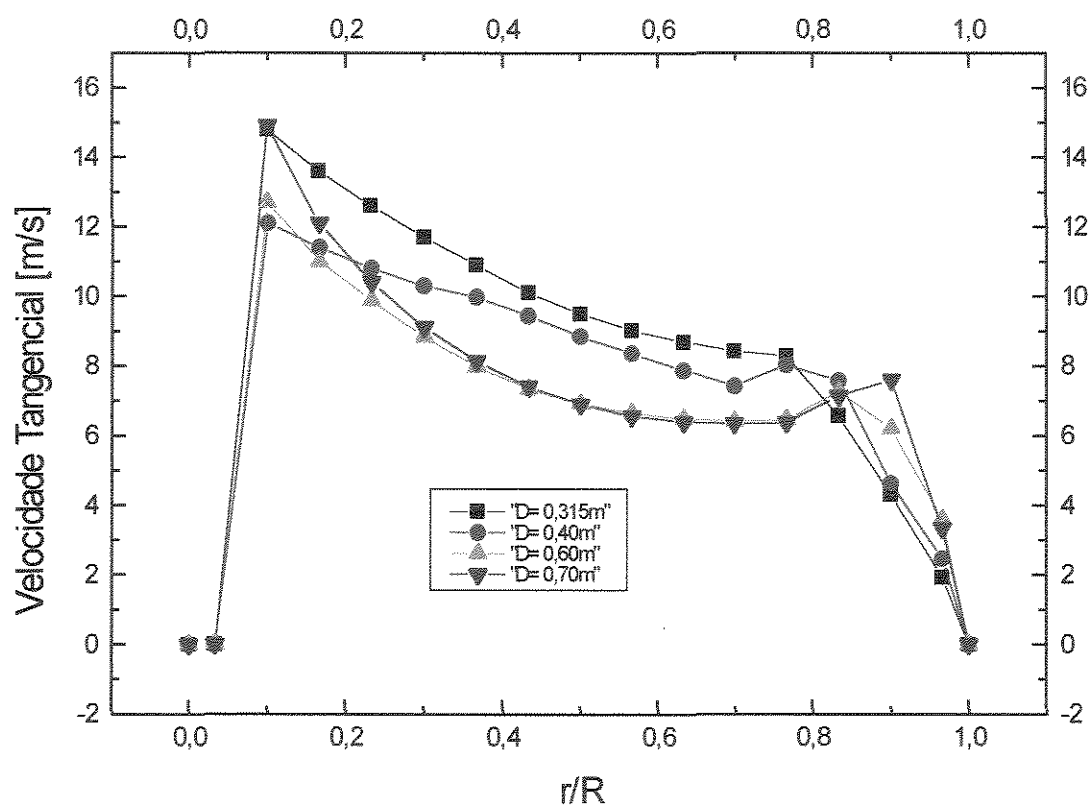


Figura AI.4 - Perfil de velocidade tangencial do ar para ciclones de diferentes diâmetros em um ponto a 0,92m da saída inferior.

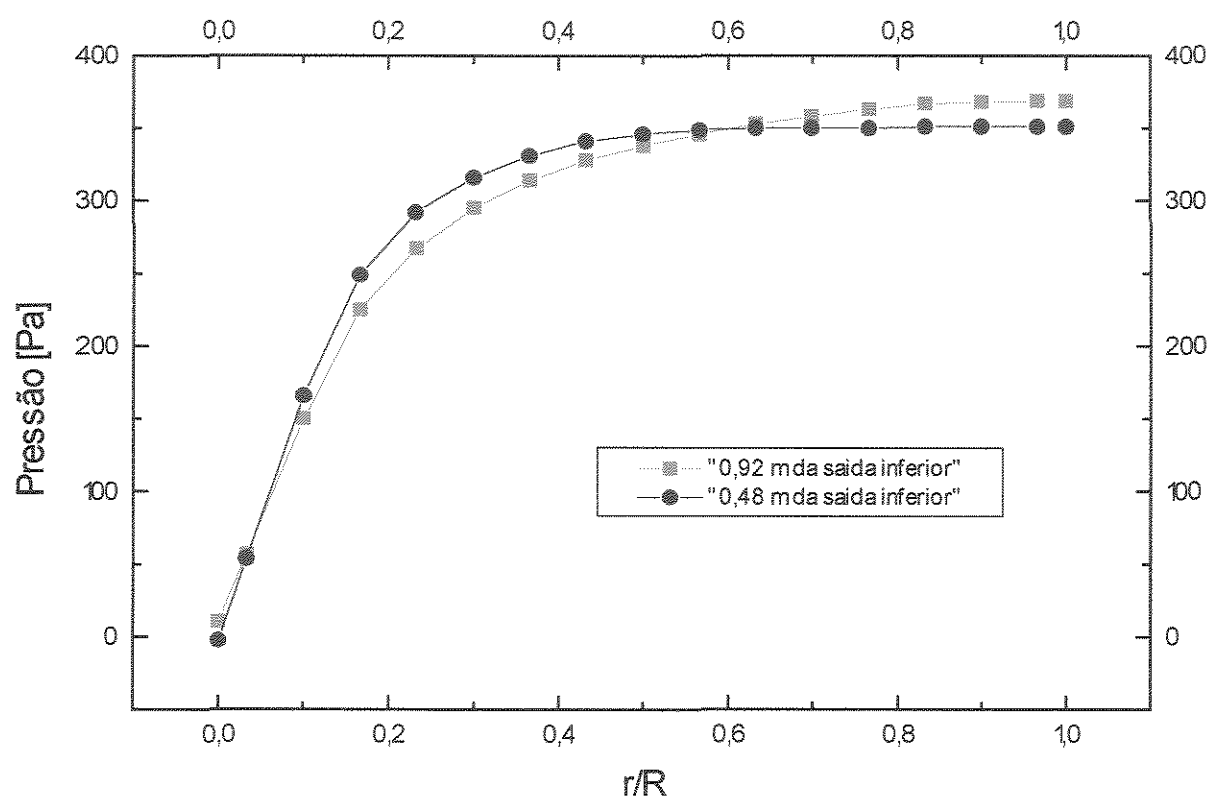


Figura A1.5 - Perfil de pressão manométrica em dois pontos diferentes do ciclone de geometria padrão deste trabalho.

APÊNDICE II

Resultados apresentados por Maroulis e Kremalis (1995) para o ciclone separador na seguinte ordem:

- Um desenho do ciclone em uma determinada escala;
- Eficiência média do ciclone;
- Gráfico da eficiência de coleta da partícula versus o diâmetro da partícula;
- Diferença das cargas na entrada e saída do ciclone versus o diâmetro da partícula.

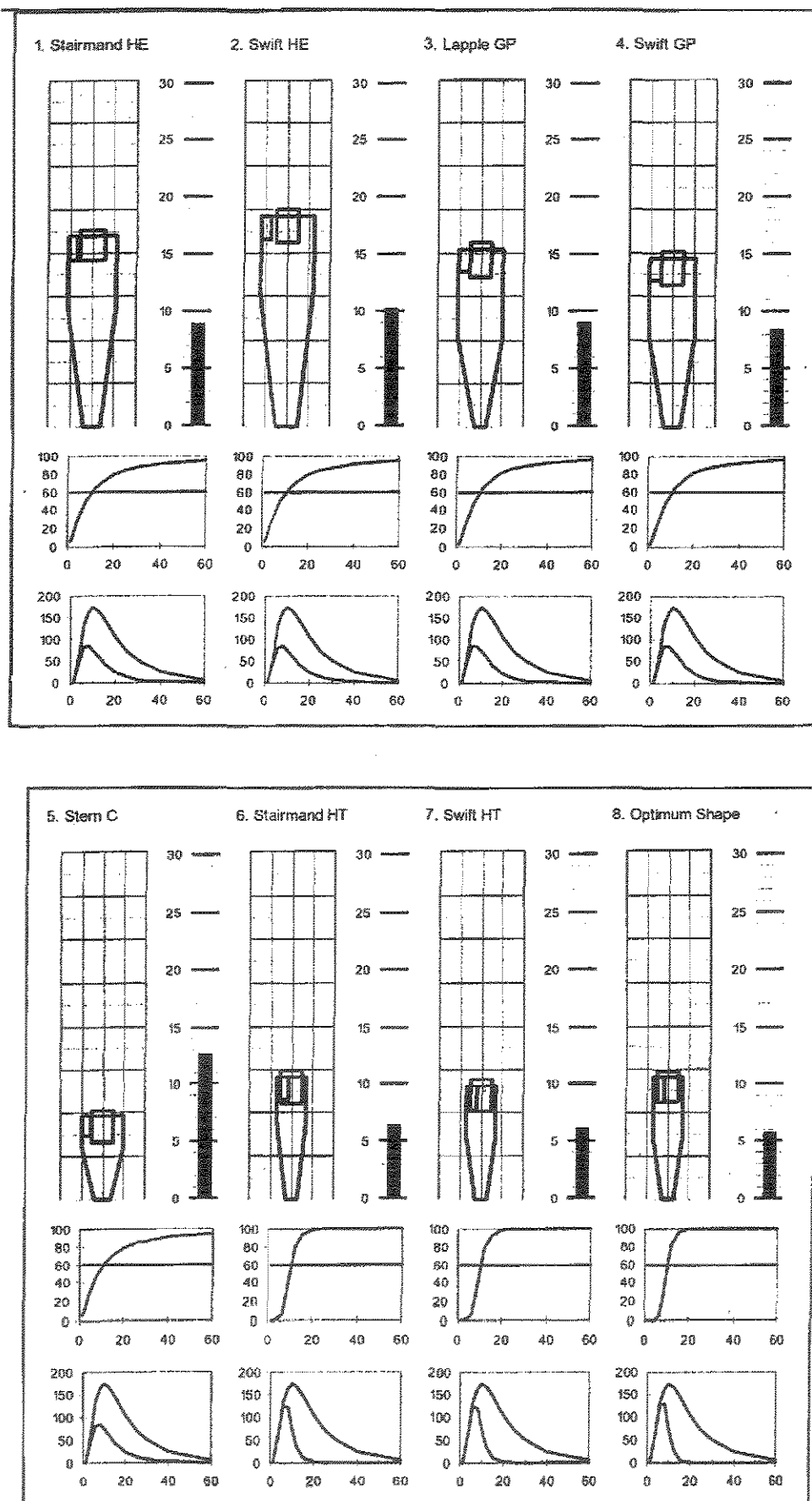


Figura AII.1 - Resultados encontrados para diâmetro da partícula igual a 5 μm .

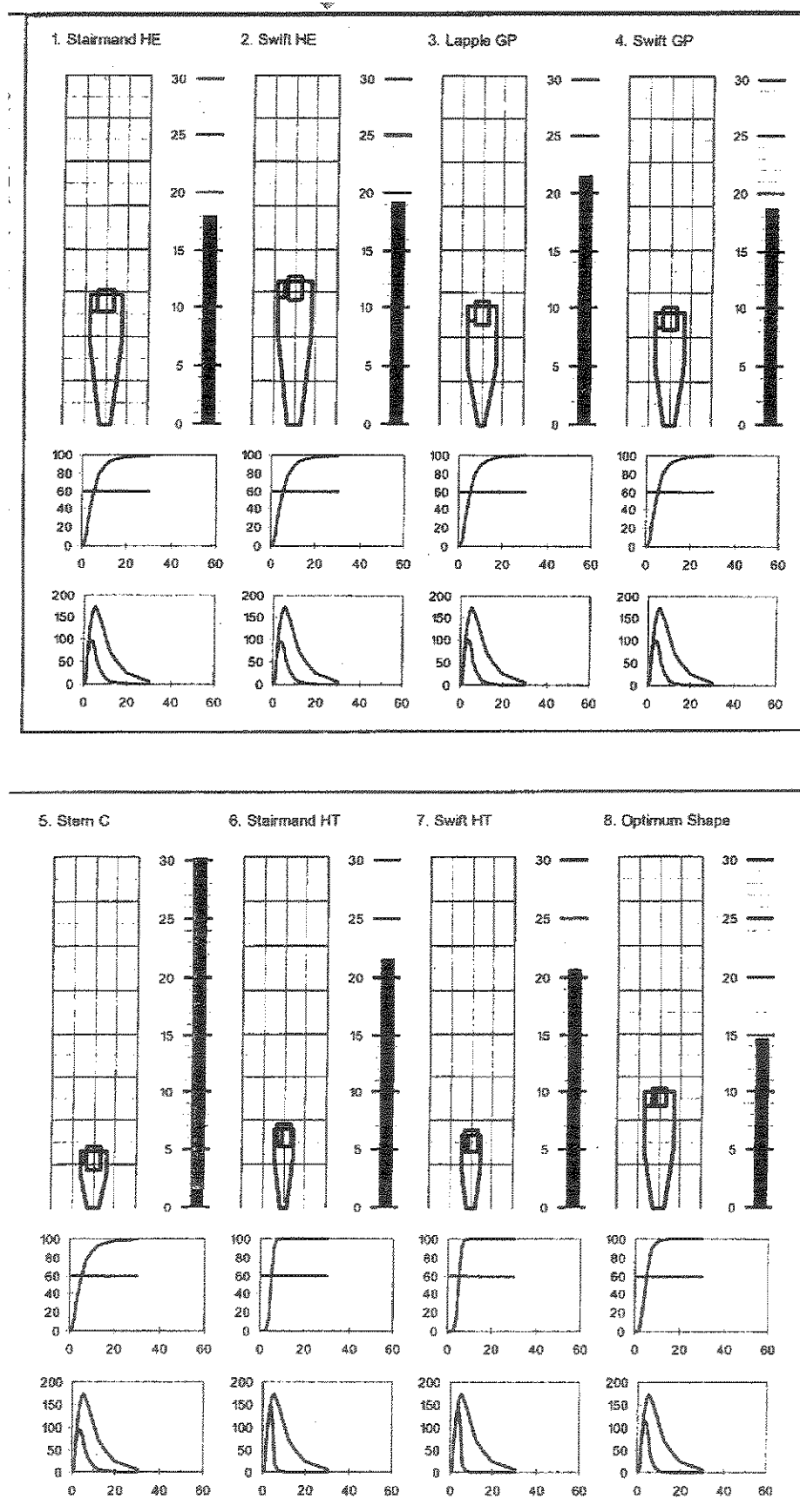


Figura AII.2 - Resultados encontrados para diâmetro da partícula igual a 10 μm .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arastoopour, H.; Gidaspow D., Vertical pneumatic conveying using four hydrodynamic models, Ind. Eng.Chem. Fundam., v.18, n.2, p.123-130, 1979.
- Ayers, W.H.; Boysan F.; Swithenbank J.; Ewan B.C.K, Theoretical modelling of cyclone performance, Filtration & Separation, v.22, n.1, p.39-43, 1985.
- Cremasco, M.A.; Nebra, S.A., Estudo experimental da influência de particulados na transferência de calor gás-parede em um ciclone, Anais do XXI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, v.1, p.301-311, 1994.
- Davidson, M.R., Numerical calculations of flow in a hydrocyclone operating without an air core, Appl. Math Modelling, v.12, p.119 -128, 1988.
- Duggins, R.K.; Frith, P.C.W., Turbulence anisotropy in cyclones, Filtration & Separation, v.24, n.6, p.394-397, 1987.
- Enliang, L.; Yingmin, W., A new collection theory of cyclone separators, AIChE J. v.35, n.4, p.666-668, 1989.
- Godoy, A.L.; Silva, M.A.; Nebra S.A., Análise experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones, Anais do XX Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, v.1, p.251-261, 1992.
- Heumann,W.L., Cyclone separators: a family affair, Chem. Engineering, v.98, n.16, p.118-123, 1991.
- Hoffmann, A.C.; Arends H.; Sie H., An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance, Filtration & Separation, v.28, n.3, p. 188-193, 1991.
- Hoffmann, A.C.; van Santen A.; Allen R.W.K.; Clift R., Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones, Powder Technology, n. 70, p. 83-91, 1992.
- Hsieh K.T.; Rajamani R.K.; Mathematical model of physics of fluid flow, AIChE Journal, v.37, n.5, p.735-746, 1991.
- Karpukhovich, D.T., The effect of form of the casing of a cyclone on the characteristics of interception efficiency and hydraulic resistance, Thermal Engineering, v.34, n.5, p.273-274, 1987.
- Lédé J.; Mercadier J.; Villermaux J., Le cyclone, un réacteur de sublimation: Application à la sublimation de l'acide isocyanurique, Chem. Eng. Journal, v.62, n.1, p.13-21, 1996.
- Maroulis, Z.B.; Kremalis C., Development of an effective cyclone simulator under Excel, Filtration & Separation, v. 32, n.10, p. 969-976, 1995.

- Nebra, S. A.; Silva M. A., Secagem em ciclones, in: Freire, J. T.; Sartori, D. J.M. ed., Tópicos Especial em Secagem UFSCar, São Carlos, 1992, p.175-210.
- Ogawa, A., Estimation of the collection efficiencies of the three types of the cyclone dust collectors from the standpoint of the flow patterns in the cylindrical cyclone dust collectors, Bulletin of JSME, v.27, n.223, p. 64-69, 1984.
- Parida, A.; Chand P., Turbulent swirl with gas solid flow in cyclone, Chem. Eng. Science v.35, p. 949-954, 1980.
- Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Pub. Inc., Washington, 1980.
- Ramachandran, G.; Raynor P.C.; Leith D., Collection efficiency and pressure drop for a rotary-flow cyclone, Filtration & Separation, v.31, n.6, p. 631-636, 1994.
- Ranz, W.E., Wall flows in cyclone separator: a description of internal phenomena, Aerosol Science e Technology, v.4, p.417-432, 1985.
- Silva, M.A., Estudo da Secagem em Ciclones, Tese de Doutorado, FEM/UNICAMP, Campinas, 1991.
- Silva, M.A.; Nebra S.A., Numerical simulation of drying in a cyclone, in Strumillo, C.; Pakowski, Z., Drying 96, v.A, Lodz Technical University, Poland, 1996.
- Stairmand C.J., Engineering, v.128, p. 409-412, 1949.
- Stairmand C.J., The Design and performance of cyclone separators, Transactions of Inst. Chem. Eng., v.29, p.356-383, 1951.
- Soo, S.L., Particulates and continuum: multiphase fluid dynamics, Hemisphere Pub. Inc., New York, 1989.
- Szekely, J.; Carr. R., Heat transfer in a cyclone, Chemical Engineering Science, v.21 p.1119-1132 (1966).
- Ter Linden, A.J., Investigations into cyclone dust collectors, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, v.160, p.233-351, 1949.
- Trefz, M.; Muschelknautz E., Extended cyclone theory for gas flows with high solids concentrations, Chem. Eng. Technol., v.16, p.153-160, 1993.
- Tuzla K.; Chen J.C., Performance of a cyclone under high solid loadings, AIChE Symposium Series, v.88, n.289, p.130-136, 1992.
- White, B.R. Particle dynamics in two-fase flows, in Cheremisinoff, N.P., ed. Encyclopedia of Fluid Mechanics, v. 4., Solids and gas-solids flows, Gulf Pub. Co., Houston, 1986, p.239-282.
- Yuu, S., Jotaki T.; Tomita Y.; Yoshida K., The redution of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone, Chem. Eng. Science, v.33, p.1573-1580, 1978.

Zhou, L.X.; Soo S.L., Gas solid flow and collection of solids in a cyclone separators, Powder Tech., n.63, p.45-53, 1990.

Zhou, L.X.; Soo S.L., On boundary conditions of particle phase and collection efficiency in cyclones, Powder Tech., n.64, p.213-220, 1991.