



EDINALDO PEREIRA DA SILVA

**“DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO EXPERIMENTAL DE
BAIXO CUSTO PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO
DE CÂMARA DE SECAGEM PARA *SPRAY DRYER* COM BOCAL
ROTATIVO”.**

CAMPINAS

2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

EDINALDO PEREIRA DA SILVA

**“DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO
PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO DE CÂMARA DE
SECAGEM PARA *SPRAY DRYER* COM BOCAL ROTATIVO”.**

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO EDINALDO PEREIRA DA SILVA
E ORIENTADA PELO PROF. DR. ELIAS BASILE TAMBOURGI**

Assinatura do Orientador

A handwritten signature in black ink, appearing to be "E. Tambourgi", is written over a horizontal line.

CAMPINAS

2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

SI38d Silva, Edinaldo Pereira da, 1978-
Desenvolvimento de um método experimental de baixo custo para
determinação do diâmetro máximo de câmara de secagem para spray dryer com
bocal rotativo / Edinaldo Pereira da Silva. - Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Elias Basile Tambourgi.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Química.

1. Operações unitárias (Engenharia química). 2. Secagem. I. Tambourgi, Elias
Basile, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development of an inexpensive experimental method for determining
the maximum diameter of a drying chamber for spray dryer with rotary nozzle

Palavras-chave em inglês:

Unit operations (Chemical engineering)

Drying

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

Elias Basile Tambourgi [Orientador]

Aldo Ramos Santos

Karina Tamião de Campos Roseno

Patrícia Bernardi Leite da Silva

Sávio Souza Venâncio Vianna

Data de defesa: 26-07-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

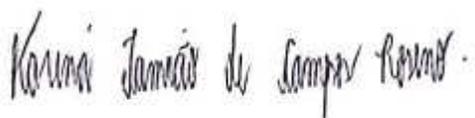
Tese de Doutorado defendida por Edinaldo Pereira da Silva, em 26 de julho de 2013
e aprovada pela banca constituída pelos doutores:



Elias Basile Tambourgi



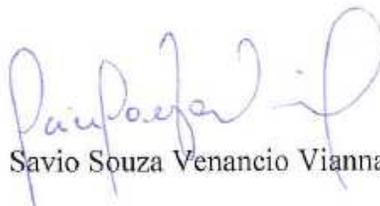
Aldo Ramos Santos



Karina Tamião de campos Roseno



Patrícia Bernardi Leite da Silva



Savio Souza Venancio Vianna

Dedico,

*À minha amada família que esteve sempre comigo e que me deu forças para superar todas
as adversidades.*

Toda a minha gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros e estimados agradecimentos,

Ao Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi pela aceitação e orientação nessa importante etapa da minha vida, fazendo com que eu pudesse dar mais um passo adiante.

Ao grande amigo Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior que com os seus sábios conselhos, nos faz sentir que o conhecimento é a luz que sempre nos guia. Seu incentivo, persuasão e estímulo me mostrou que devemos ser fraternos com o próximo.

Aos amigos Prof^a.Dra. Karina Tamião de Campos Roseno, Prof. Dr. Aldo Ramos Santos, Prof. Dr. Thiago Cesar Pinto, Eng. Lucas Bernardo Monteiro e aos técnicos Volnei de Lemos, Gilmar Alcantára, Irineu Penha da Ressureição e Luís Fernando Diniz Neves pelos auxílios dados e também pelos conselhos na elaboração deste trabalho.

A Universidade Estadual de Campinas e Universidade Santa Cecília que possibilitaram a utilização de suas dependências na conclusão deste trabalho e não esquecendo todos que de uma forma ou outra, sendo direta ou indiretamente, também contribuíram nesse trabalho, *a todos vocês expresso o meu grande obrigado.*

*A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios,
por isso cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina,
se feche e a peça termine sem aplausos.*

(Charles Spencer Chaplin, 1889 – 1977)

RESUMO

O processo de secagem consiste na eliminação, através da evaporação, de um líquido volátil contido em um sólido não volátil. O *Spray Dryer* é um equipamento de secagem, que utiliza o processo de atomização para aumentar a área de contato do produto a ser seco com o ar quente. Dentre suas vantagens podem-se destacar a redução do volume do produto e diminuição do seu peso, aumentando sua facilidade de armazenagem e transporte.

Através de um disco girando a alta rotação, o fluido é atomizado em uma câmara gerando uma névoa que, em contato com o ar quente, vaporiza-se instantaneamente. Utilizando-se desse processo, são gerados produtos na forma de pó como, por exemplo, leite, café, ovo, sabão, suco de fruta, corantes e antibióticos. As técnicas disponíveis na literatura para o projeto da câmara são baseadas no tempo de contato do fluido com o ar de secagem e não com o diâmetro da névoa de atomização. Em função do diâmetro não adequado da câmara, o material pulverizado e não seco, pode aderir à parede e alterar a qualidade do produto.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um método experimental de baixo custo para determinar o diâmetro máximo de câmaras de secagem para *spray dryer* com bocal rotativo baseado no leque da névoa. Uma prancha de madeira com material adsorvente colocada abaixo do disco permitiu quantificar a distância da névoa. As variáveis estudadas para demonstrar o método foram a distância entre a prancha e o disco (200, 300 e 400 mm), os diâmetros dos discos (30, 40 e 50 mm), as rotações (16.800, 21.000 e 28.000 rpm) e as vazões de alimentação de água ($2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$).

Os resultados obtidos apresentaram elevados coeficientes de correlação para os discos de 40 e 50 mm, no dimensionamento do diâmetro máximo da câmara de secagem, porém para o disco de 30 mm, comparado aos discos de 40 e 50 mm, apresentou baixo coeficiente de correlação independente da vazão e da rotação. Foi também possível observar que, com o disco de 30 mm obteve-se o maior raio de pulverização, em contrapartida, o disco de 50 mm apresentou o menor raio de pulverização. A unidade experimental permite quantificar variáveis em geral negligenciadas nos projetos e nem sempre desprezíveis como o ponto de entrada do material no disco, altura do disco, assim como o formato e área lateral do disco.

Palavras-chave: Secagem, *Spray Dryer*, Atomização, Nebulização, Atomizador.

ABSTRACT

The drying process is the removal through evaporation of a volatile liquid contained in a non-volatile solid. The Spray Dryer is a drying equipment which uses the atomization process to increase the contact area of the product to be dried with hot air. Among the advantages can be emphasized to reduce the volume of the product and its weight loss, improving storage and transport.

Through a disk rotating at high speed, the fluid is atomized into a chamber generating a mist which, in contact with the hot air, vaporizes instantly. Using this process products are generated in powder form, for example, milk, coffee, egg, soap, fruit juice, coloring agents and antibiotics. The techniques available in the literature for the design of the camera are based on the time of contact of the fluid with air drying rather than the diameter of the spray mist. Depending on the diameter of the chamber is not adequate, the sprayed material and not dried can adhere to the wall and changes the quality of the product.

This study aimed to develop an experimental method of low cost to determine maximum diameter of drying chambers to spray dryer with rotary nozzle based on the range of the mist. A wooden plank with adsorbent material placed below the disc allowed quantifying the distance fog. The variables studied to demonstrated the method, were the distance between the board and the disk (200, 300 and 400 mm), the diameters of the discs (30, 40 and 50 mm), rotations (16,800, 21,000 and 28,000 rpm) and flow rates of water supply ($2.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ $1.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$).

The results showed high correlation coefficients for the discs 40 and 50 mm, the dimensioning of the maximum diameter of the drying chamber, but to the disk of 30 mm, compared to discs 40 and 50 mm showed a low correlation coefficient independent flow and rotation. It was also observed that, with the disc of 30 mm was obtained the greatest radius spraying, by contrast, a 50 mm disk had the smallest radius of spraying.

The experimental unit used to quantify the variables generally neglected in the design and also worthless as not always the point of entry of the material on the disc, disc height, as well as the shape and the side area of the disc.

Keywords: Drying, Spray Dryer, Atomization, Nebulization, Atomizer.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Generalidades	1
2.OBJETIVO	2
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1.Secagem.....	3
3.2.Secadores e classificação.....	4
3.3.Secador do tipo <i>spray dryer</i>	9
3.3.1.Processo de secagem em <i>spray dryer</i>	9
3.3.2.Tipos de secadores <i>spray dryers</i>	10
3.3.2.1.Secador de corrente paralelas	10
3.3.2.2.Secador contracorrente	11
3.3.2.3.Secador de fluxo misto	12
3.3.2.4.Secador de ciclo aberto.....	13
3.3.2.5.Secador de ciclo fechado	14
3.3.2.6.Secador de ciclo semi fechado	15
3.3.2.7.Secador de estágio único	15
3.3.2.8.Secador de dois estágios	15
3.3.3.Processo de atomização em <i>spray dryers</i>	15
3.3.3.1.Atomizadores rotativos (centrífugos)	19
3.3.3.2.Atomizadores de bico pressurizado (pressão)	23
3.3.3.3.Atomizadores pneumáticos	25
3.3.3.4.Seleção do tipo ao atomizador.....	27
3.3.4.Projeto do secador <i>spray dryer</i>	28
4.MATERIAL E MÉTODO	37
4.1.Equipamentos e acessórios	37
4.2.Variáveis utilizadas nos experimentos	42
4.3.Procedimento experimental	44
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	55
6.1.Sugestões	56
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
8.APÊNDICE	60
8.1.APÊNDICE A	60
8.2.APÊNDICE B.....	87
8.3.APÊNDICE C.....	95
8.4.APÊNDICE D	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação do tipo do secador com base no regime de operação.	5
Figura 2 - Critério de classificação dos secadores tendo como característica o aspecto da alimentação do secador.....	6
Figura 3 - Critério de classificação tendo como base as características e aspectos do processo desenvolvido durante a secagem	7
Figura 4 - Critério de seleção em função da escala de produção	8
Figura 5 - Processo de secagem por <i>spray dryer</i>	10
Figura 6 - <i>Spray Dryer</i> de correntes paralelas.....	11
Figura 7 - Secador do tipo <i>spray dryer</i> de fluxos mássicos em contracorrente.....	12
Figura 8 - Secador de fluxo misto	13
Figura 9 - Operação do <i>spray dryer</i> em ciclo aberto.....	14
Figura 10- Atomizador rotativo ou centrífugo.	20
Figura 11 - Exemplificação do mecanismo de formação de gotas no atomizador rotativo	20
Figura 12 - Vistas de perfil e planta do atomizador rotativo.....	21
Figura 13 - Formatos mais comuns de orifícios em atomizadores rotativos.....	21
Figura 14 - Etapas da formação do spray em um atomizador de pressão.	23
Figura 15 - Vista em corte da secção longitudinal de um bico pressurizado.	23
Figura 16 - Sistema de secagem multi bicos pressurizados	24
Figura 17 - Varias formas de orifícios e os correspondentes valores de CD.....	25
Figura 18 - Vista em corte de um atomizador do tipo pneumático.	26
Figura 19 - <i>Spray dryer</i> em escala de laboratório	29
Figura 20 - Modelo de <i>bench scale spray dryer</i>	29
Figura 21 - Exemplificação das condições de contorno, para o balanço de massa e energia, para um <i>spray dryer</i>	30
Figura 22- Relação entre o diâmetro da partícula ($d - \text{mm}$) versus a altura ($H - \text{m}$) da câmara de secagem para <i>spray dryer</i> utilizando atomizador do tipo disco rotativo	32
Figura 23 - Resultados da simulação CFD em uma câmara cônica.....	36
Figura 24 - Tanque de alimentação.	37
Figura 25 - Bomba peristáltica.	38
Figura 26- Disco atomizador acoplado ao eixo de transmissão.	38
Figura 27 - Discos atomizadores.	39
Figura 28- Prancha de madeira.	40
Figura 29 - Adsorvente fixo na placa de acrílico.	40
Figura 30 - Paquímetro.	40
Figura 31 - Tacômetro.	41
Figura 32 - Cronômetro.	41
Figura 33 – Vista da unidade utilizada durante os experimentos.	42
Figura 34 - Ponto zero da prancha.....	46
Figura 35 - Esquema de montagem do experimento	47

Figura 36 - Diâmetro do disco de 30mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	48
Figura 37 - Diâmetro do disco de 40mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	49
Figura 38 - Diâmetro do disco de 50mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	49
Figura 39 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h e rotação de 16.800 rpm.....	50
Figura 40 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h e rotação de 21.000 rpm.....	51
Figura 41 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h e rotação de 28.000 rpm.....	51
Figura 42 - Raio de pulverização para disco atomizador de 30 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h.....	52
Figura 43 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h.....	53
Figura 44 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h.	53
Figura B.1 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.....	87
Figura B.2 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.....	88
Figura B.3 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.....	88
Figura B.4 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.....	89
Figura B.5 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.....	89
Figura B.6 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $2,88.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.	90
Figura B.7 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	90
Figura B.8 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.	91
Figura B.9 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.	91
Figura B.10 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	92
Figura B.11 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.	92
Figura B.12 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.	93
Figura B.13 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 20 cm de altura.	93
Figura B.14 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 30 cm de altura.	94
Figura B.15 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96.10^{-3}$ m ³ /h, para 40 cm de altura.	94

Figura C.1 - Disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.	95
Figura C.2 - Disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 21.000 rpm.	96
Figura C.3 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.	96
Figura C.4 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.800 rpm.	97
Figura C.5 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 21.000 rpm.	97
Figura C.6 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.800 rpm.	98
Figura C.7 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.	98
Figura C.8 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 21.000 rpm.	99
Figura C.9 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.8000 rpm.	99
Figura C.10 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.	100
Figura C.11 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 21.000 rpm.	100
Figura C.12 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.800 rpm.	101
Figura C.13 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.	101
Figura C.14 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 21.000 rpm.	102
Figura C.15 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.800 rpm.	102
Figura D.1 - Raio de pulverização para disco atomizador de 30 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	103
Figura D.2 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	103
Figura D.3 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	104
Figura D.4 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	104
Figura D.5 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	105
Figura D.6 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	105
Figura D.7 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	106
Figura D.8 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	106
Figura D.9 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	107
Figura D.10 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	107
Figura D.11 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho das gotículas em função do tipo do atomizador.	18
Tabela 2 - Tamanho de gotas encontrados na natureza.	19
Tabela 3 - Comparação dos efeitos das condições operacionais no tamanho das gotas para atomizadores rotativos	22
Tabela 4 - Consumo de energia em função do tipo do atomizador.	27
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos atomizadores rotativos e de bico pressurizado	28
Tabela 6 - Tempos de residência compilados da literatura, para o dimensionamento do diâmetro da câmara de secagem em <i>spray dryer</i>	33
Tabela 7 - Dados e parâmetros operacionais usado na secagem do sulfato de zinco (ZnSO ₄) em escala industrial.....	34
Tabela 8 - Combinação das variáveis do experimento.	43
Tabela A.1 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	60
Tabela A.2 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	60
Tabela A.3 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	61
Tabela A.4 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	61
Tabela A.5 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	62
Tabela A.6 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	62
Tabela A.7 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	63
Tabela A.8 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	63
Tabela A.9 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	64
Tabela A.10 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	64
Tabela A.11 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	65
Tabela A.12 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de 1,96.10 ⁻³ m ³ /h	65
Tabela A.13 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	66
Tabela A.14 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de 2,88.10 ⁻³ m ³ /h	66

Tabela A.15 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	67
Tabela A.16 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	67
Tabela A.17 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	68
Tabela A.18 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	68
Tabela A.19 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	69
Tabela A.20 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	69
Tabela A.21 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	70
Tabela A.22 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h.....	70
Tabela A.23 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	71
Tabela A.24 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	71
Tabela A.25 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	72
Tabela A.26 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h.....	72
Tabela A.27 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	73
Tabela A.28 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	73
Tabela A.29 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	74
Tabela A.30 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	74
Tabela A.31 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	75
Tabela A.32 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	75
Tabela A.33 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	76
Tabela A.34 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	76
Tabela A.35 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m ³ /h	77

Tabela A.36 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	77
Tabela A.37 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	78
Tabela A.38 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	78
Tabela A.39 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	79
Tabela A.40 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	79
Tabela A.41 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	80
Tabela A.42 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	80
Tabela A.43 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	81
Tabela A.44 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	81
Tabela A.45 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	82
Tabela A.46 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	82
Tabela A.47 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	83
Tabela A.48 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	83
Tabela A.49 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	84
Tabela A.50 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	84
Tabela A.51 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	85
Tabela A.52 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	85
Tabela A.53 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	86
Tabela A.54 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	86

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A operação de secagem é amplamente empregada em diversos segmentos industriais é baseada na eliminação de um líquido volátil contido num corpo não volátil (PARK *et al.*, 2007). Os secadores do tipo *spray dryers* de acordo com FOUST *et al.*, (1982), consegue manter as propriedades físico-químicas dos produtos e, em alguns casos, chega-se a adequá-las para um emprego específico. O uso deste tipo de secador é bastante comum na fabricação ou nas etapas de processo de diversos produtos de uso diário, como farmacêuticos, alimentícios, de limpeza e dentre outros (COUPER *et al.*, 2005).

A versatilidade operacional dos secadores do tipo *spray dryer* permite, o seu uso desde escalas laboratoriais da ordem de mililitros por hora, até dezenas de toneladas por hora na indústria, e em comparação aos outros tipos de secadores o seu custo relativo deve ser considerado devido a alguns requerimentos energéticos necessários à sua operação (RODRIGUES *apud* OI, 2011).

LANGRISH (2009), LIGERO e RAVAGNANI (2006) relatam que o projeto de *spray dryers* inclui o conhecimento de mecânica dos fluidos, transferência de massa e calor e, aliado a tudo isto, o conhecimento em tecnologia de partículas. Mesmo com a aplicação de todo esse conhecimento, o processo ainda é empírico, e baseado muitas vezes em parâmetros operacionais, que se diferem na literatura (COUPER *et al.*, 2005, PERRY e GREEN, 2007).

Um dos principais componentes dos secadores *spray dryer* é a câmara de secagem e o seu projeto, nos dias atuais possui escassa menção na literatura com relação ao seu diâmetro, sendo apenas citado de acordo com MUJUMDAR (2007), a altura da câmara de secagem. De acordo com WOO, MUJUMDAR e DAUD (2009), AICHE (2003), KUDRA e MUJUMDAR (2009), COUPER *et al.* (2005), HUANG, KUMAR e MUJUMDAR. (2006), PERRY, GREEN e MALONEY (1997), PERRY e GREEN (2007), relatam que não existe um critério específico que considere os padrões de escoamento para o projeto do diâmetro da câmara de secagem em *spray dryer*. Esta carência de informações e método para o projeto torna viável o aprofundamento dos estudos para o equipamento de *spray dryers*.

2. OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um método experimental de baixo custo, visando determinar o diâmetro máximo para câmaras de secagem em secadores do tipo *spray dryers*, através do diâmetro da névoa propiciada por atomizadores centrífugos do tipo disco rotativo, negligenciando-se os padrões de escoamento do gás de secagem (gás quente) no interior da câmara de secagem.

Este método, aplicado antes da construção da câmara de secagem, evita a propensão da aderência das partículas às paredes da câmara, minimizando assim os custos de produção na operação do *spray dryer*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Secagem

KEYY (1978) define as operações de secagem como a remoção de substâncias voláteis, chamada muitas vezes de umidade, utilizando fontes de calor. De acordo com TREYBAL (1980) a secagem é dita como a remoção da umidade presente em uma substância.

A secagem está entre as operações mais usuais na indústria de forma geral. Em uma boa parte das situações, é o último processamento do produto antes de sua classificação e embalagem (FOUST *et al.*, 1982, CHEREMISINOFF, 2000).

FELDER e ROUSSEAU (2000), McCABE, SMITH e HARRIOT (2001) citam a secagem de sólidos como o processo de separar pequenas quantidades de água, ou outro líquido a partir de um material sólido, a fim de reduzir o teor de líquido residual a um valor aceitável. Já para SINNOTT (2003), GEANKOPLIS (2003), BETE (2005), a secagem é a remoção de água, ou outro líquido volátil, por evaporação e MUJUMDAR (2007) apresenta a secagem como o processo de remoção térmica de uma substância volátil para produzir um produto sólido seco.

A umidade presente em um sólido pode ocorrer de duas formas sendo estas, ligada ou livre. Na forma ligada, a umidade esta presente na microestrutura do sólido e exerce uma pressão de vapor menor do que se estivesse na forma livre. A umidade se apresenta em excesso na forma livre com relação à umidade ligada, sendo chamada de umidade livre ou umidade não ligada ao sólido (MUJUMDAR, 2007).

MUJUMDAR (2007) também cita que em um sólido úmido submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente, sendo estes:

- 1) Transferência de energia (na forma de calor) a partir do ambiente circundante para evaporar a umidade na superfície do sólido;
- 2) Transferência da umidade interna do sólido para a superfície e sua evaporação decorrente do processo acima citado.

E ainda de acordo com MUJUMDAR (2007) existem dois métodos de remoção da umidade livre, sendo estes, evaporação e vaporização.

A evaporação ocorre quando a pressão de vapor da umidade na superfície do sólido é igual à pressão atmosférica, isto é, feito através do aumento da temperatura da umidade, até o seu ponto de ebulição. Se o material seco é sensível ao calor, então a temperatura na qual ocorre a evaporação pode ser reduzida diminuindo a pressão do sistema de secagem, ou seja, se a pressão for reduzida abaixo do ponto triplo, então não há fase líquida que possa existir, logo a umidade é congelada. A adição de calor faz com que ocorra a sublimação do gelo.

A secagem por vaporização é realizada através da convecção, isto é, passando o ar quente sobre o produto, e então, a umidade é transferida do produto para o ar. Neste caso, a pressão de vapor de saturação do líquido sobre o sólido é inferior à pressão atmosférica.

De acordo com OI (2011), a conceitualização da operação de secagem consiste na remoção de um líquido agregado (umidade) a um sólido, para um meio gasoso insaturado e nesse processo a vaporização ocorre a uma temperatura inferior aquela de ebulição do líquido na pressão do sistema.

As operações de secagem são efetuadas em equipamentos denominados de secadores. Mais de 400 tipos de secadores têm sido relatados, enquanto mais de 100 tipos distintos são comumente disponíveis para utilização em escala comercial (MUJUMDAR, 2007). Por outro lado, a diversidade dos tipos de secadores oferecidos no mercado coloca em questionamento o secador ideal para ser utilizado em determinado processo (PACHECO, 1995).

A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo são parâmetros primordiais para a rentabilidade do bem submetido a estas operações e, conseqüentemente no projeto do tipo do secador (SCHUCK *et al.*, 2009). Os fenômenos de transferência de calor, remoção de umidade e alterações de dimensões, cor, sabor, resistência mecânica e outros, envolvidos em uma operação de secagem são complexos e merecem profundo conhecimento e levantamento de dados para o projeto do equipamento em escala industrial (CREMASCO, 2002).

3.2. Secadores e classificação

Define-se secador o equipamento ou dispositivo utilizado para realizar a operação de secagem. De acordo com PARK *et al.*, (2007), COUPER *et al.* (2005), PERRY, GREEN e MALONEY (1997), os secadores podem ser classificados de diversas formas, sendo as principais:

- a) Regime de operação do secador;
- b) Características e aspectos da alimentação do secador;
- c) Características e aspectos do processo desenvolvido durante a secagem, e;
- d) Escala de produção.

Nas figuras 1, 2, 3 e 4 são apresentados, na forma de diagrama de blocos, a classificação dos secadores.

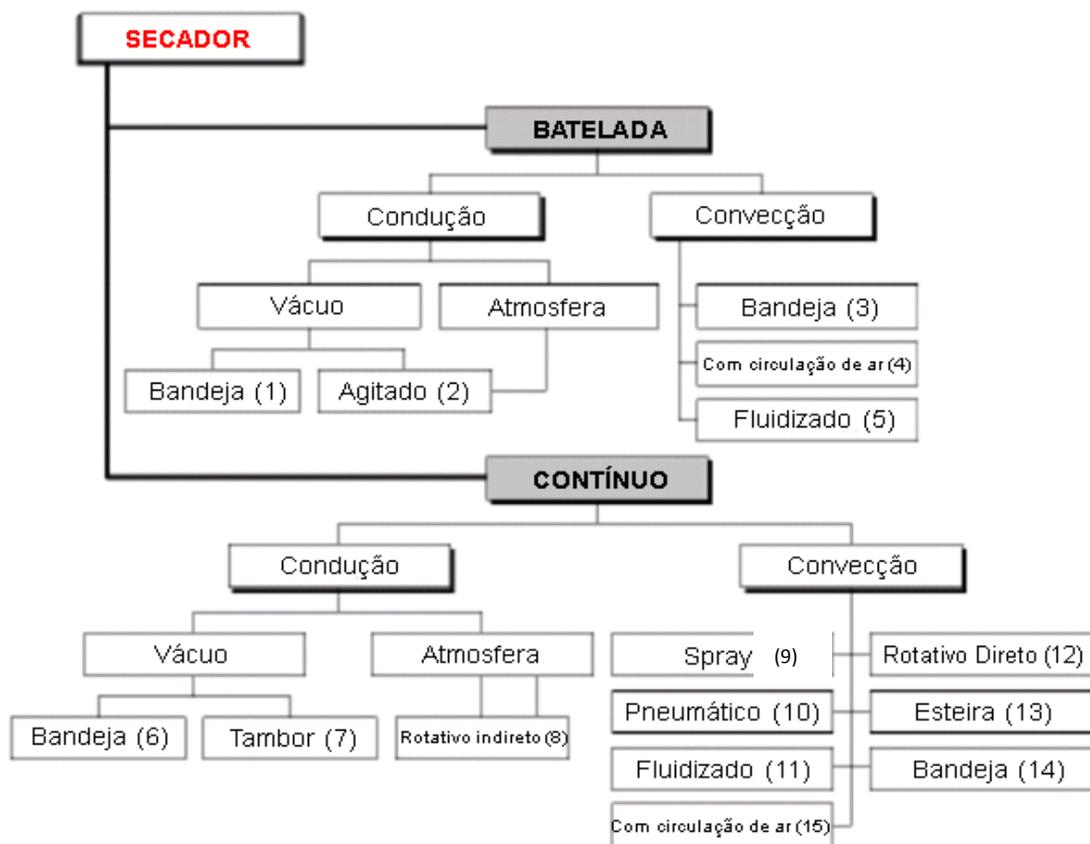


Figura 1- Classificação do tipo do secador com base no regime de operação NONHEBEL e MOSS *apud* PARK (2007).

Na figura 1 tem-se o tipo de secador apropriado para uma gama de materiais específicos, conforme a numeração dentro dos blocos e sua descrição abaixo (PARK *et al.*, 2007).

- 1 – Pasta, pré-moldados, materiais granulares, fibrosos e folhas;
- 2 – Líquidos, lama, pastas e materiais granulares;
- 3 – Pastas, pré-moldados, materiais granulares, fibrosos e folhas;
- 4 – Pré-moldado, materiais granulares e fibrosos;
- 5 – Pré-moldado, materiais granulares e fibrosos;
- 6 – Lama e pastas;
- 7 – Líquidos, lama, pastas e folhas;
- 8 – Materiais granulares e fibras;
- 9 – Líquido, lama e pastas;
- 10 – Pastas, pré-moldados, materiais granulares e fibrosos;

- 11 – Pastas, pré-moldados, materiais granulares e fibrosos;
- 12 – Granulares e fibrosos;
- 13 – Pastas, pré-moldado, materiais granulares e folhas;
- 14 – Pastas, pré-moldados, materiais granulares e fibrosos;
- 15 – Pré-moldado, materiais granulares e fibrosos.

O critério de classificação que tem como base as características e os aspectos de alimentação do secador é apresentado na (figura 2).

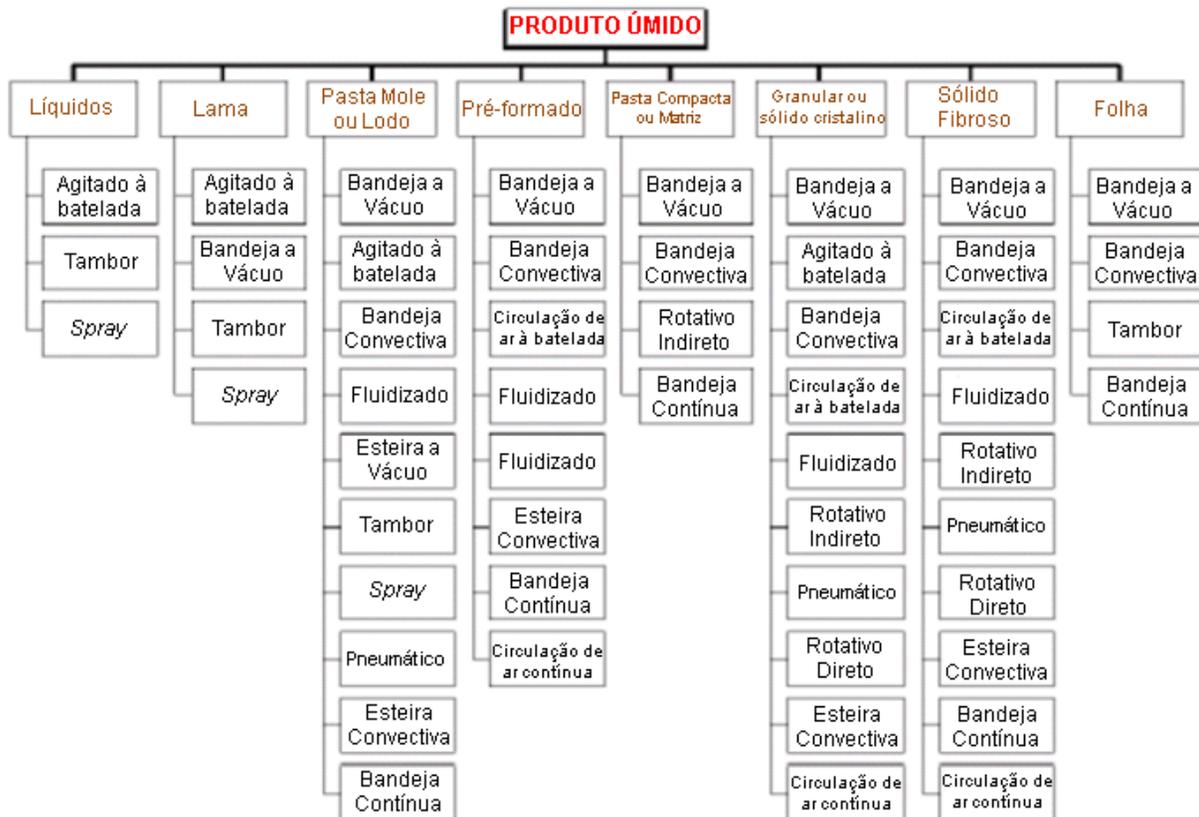


Figura 2 - Critério de classificação dos secadores tendo como característica o aspecto da alimentação do secador (PARK *et al.*, 2007).

Já nas figuras 3 e 4 são apresentados os critérios de seleção pelas características e aspectos do processo desenvolvido durante a secagem e a escala de produção.

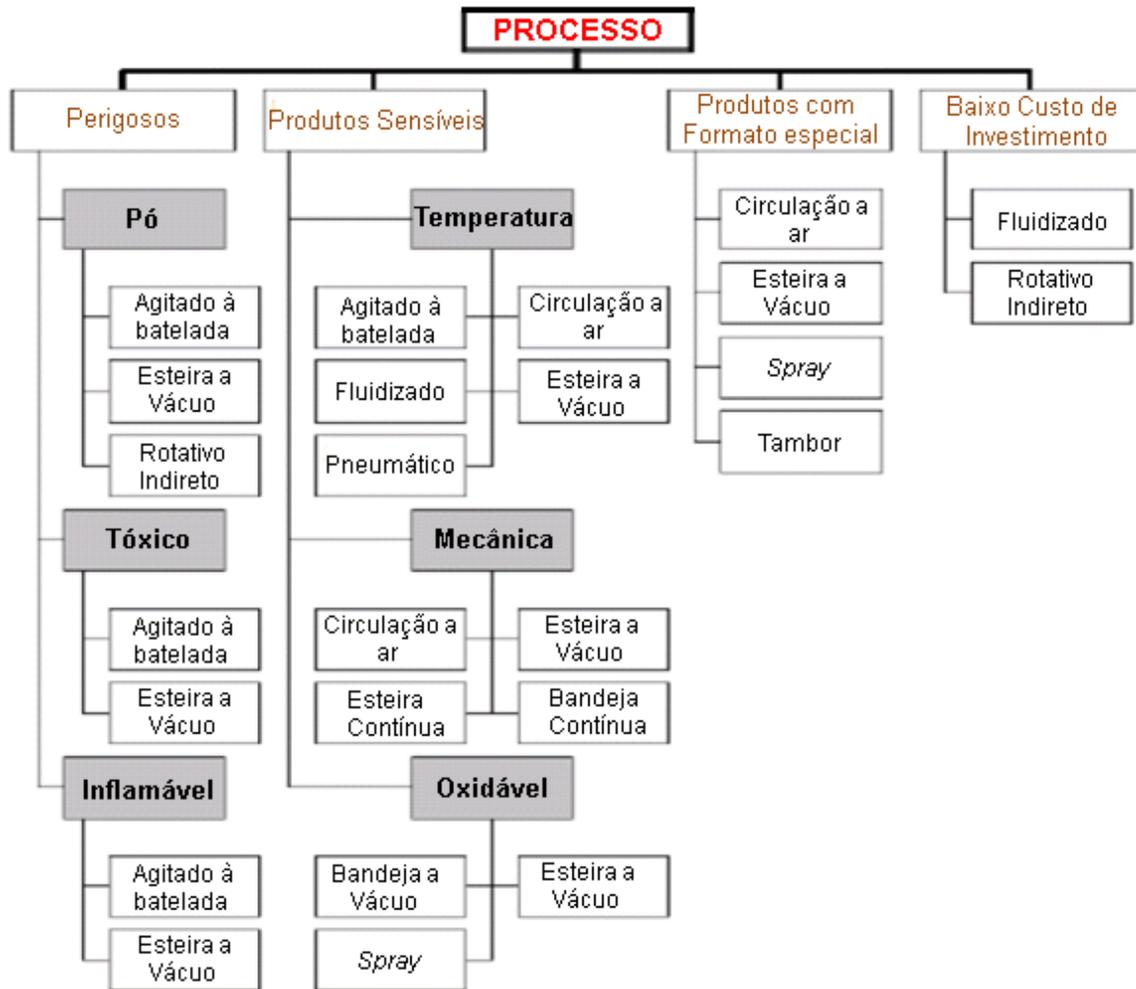


Figura 3 - Critério de classificação tendo como base as características e aspectos do processo desenvolvido durante a secagem (PARK *et al.*, 2007)

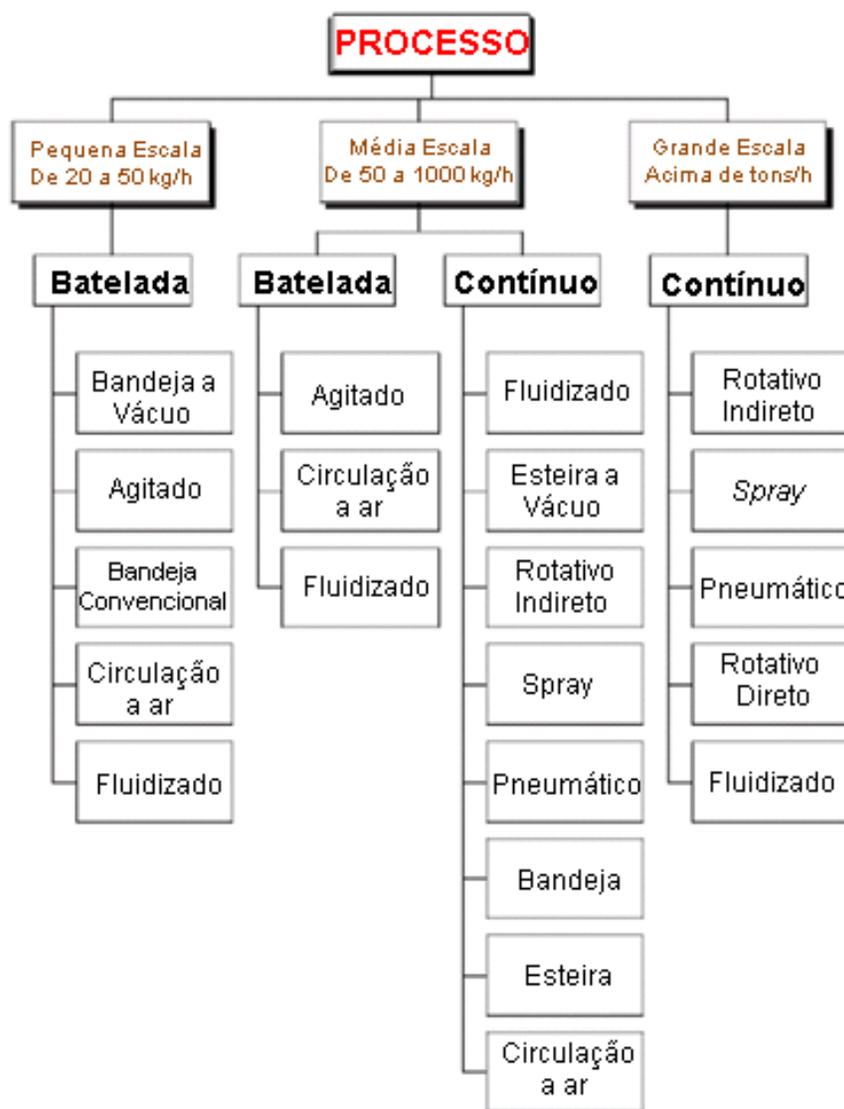


Figura 4 - Critério de seleção em função da escala de produção (PARK *et al.*, 2007).

Como se pode verificar nas figuras 1, 2, 3 e 4 existe uma ampla gama de classificação dos secadores e o processo de seleção do tipo do secador requer o conhecimento de diversas condições e das variáveis do processo, assim como a condição do produto a ser manipulado (LAND, 2012, MUJUMDAR, 2007, PARK *et al.*, 2007, COUPER *et al.*, 2005).

3.3. Secador do tipo *spray dryer*

A história do secador do tipo *spray dryer* inicia-se no final do século XIX com o requerimento de uma patente em 1872 por *Percy* (MASTER, 1985). Mas em 1905 é que se teve o salto nas operações de secagem em *spray dryer*, com o desenvolvimento pela empresa norte americana *Merril Saul* do primeiro *spray dryer* utilizado para a secagem de leite (MASTER *apud* OI, 2011).

A partir da bem sucedida aplicação da empresa *Merril Saul*, os secadores do tipo *spray dryer* começaram a ser utilizados em aplicações comerciais nos anos 20 do século XX, e a partir da segunda guerra mundial, a necessidade de se produzir alimentos desidratados e outros tipos de produtos em pó para reduzir o alto custo do transporte, o que contribui para uma maior utilização e desenvolvimento do secador tipo *spray dryer* (OI, 2011).

3.3.1. Processo de secagem em *spray dryer*

O processo de secagem em secadores do tipo *spray dryer* consiste em pulverizar o produto dentro de uma câmara submetida a uma corrente controlada de ar quente e, dessa maneira, consegue-se a evaporação dos solventes, em geral água, obtendo-se uma separação ultrarrápida dos sólidos e solúveis contidos com a mínima degradação do produto a secar, terminando esse processo com a recuperação do produto já em pó (LAND, 2012).

Esse tipo de processo consiste em três etapas básicas, segundo MUJUMDAR (2007) sendo estas:

- a) Atomização;
- b) Mistura *spray*-ar e evaporação da umidade, e;
- c) Separação de produto seco do ar de saída.

Um exemplo típico de um processo de secagem com os equipamentos e acessórios mais importantes está representado na figura 5. Nessa figura verifica-se que o ar de secagem é admitido no aquecedor de ar, onde é aquecido e enviado para a câmara de secagem. Paralelo a isso, a bomba de alimentação leva o produto úmido para ser atomizado pelo disco rotativo. Ambos se encontram dentro da câmara de secagem, onde o ar quente entra em contato com o produto já atomizado e retira sua umidade. O produto seco é retirado pelo fundo da câmara pelo coletor tipo ciclone. O ar de secagem é levado para o purificador de gases, onde é tratado e enviado para a atmosfera.

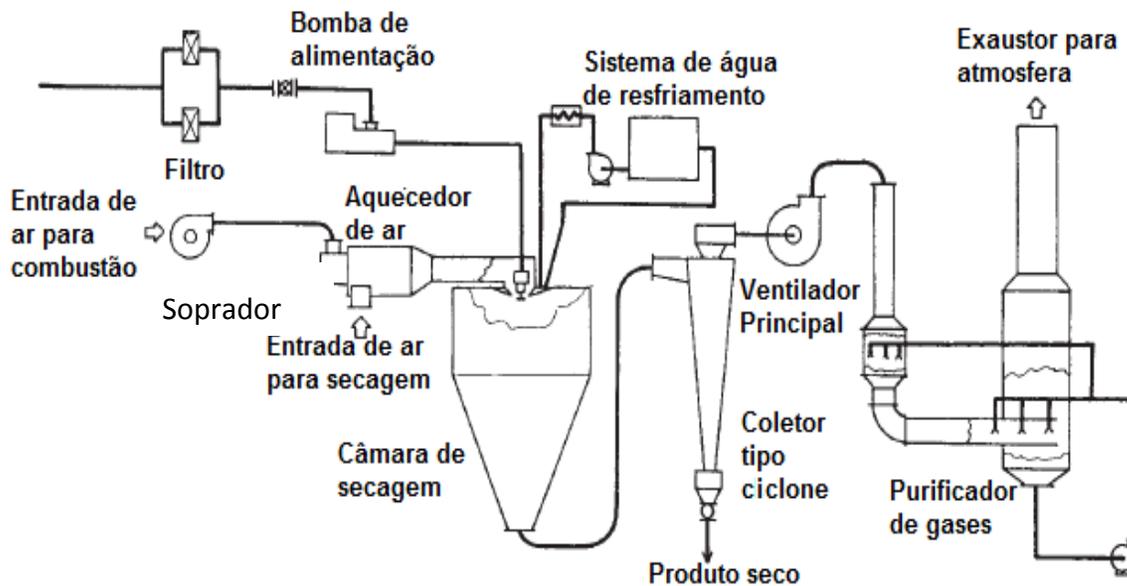


Figura 5 - Processo de secagem por *spray dryer* (MUJUMDAR, 2007).

3.3.2. Tipos de secadores *spray dryers*

3.3.2.1. Secador de corrente paralelas

No secador de corrente paralela, o *spray* é direcionado para o ar quente que entra no secador e ambos passam através da câmara de secagem no mesmo sentido. Secadores de correntes paralelas são os modelos mais adequados para produtos sensíveis ao calor, porque o ar mais quente de secagem entra em contato com as gotículas em seu teor de umidade máximo. A evaporação do *spray* é rápida, e a temperatura do ar de secagem é rapidamente reduzida pela vaporização da água e o produto não sofre degradação pelo calor, porque a temperatura da gota é baixa durante a maior parte do tempo de evaporação.

Uma vez que o teor de umidade do produto atinge o nível desejado, a temperatura da partícula não aumenta muito, porque o ar circundante é agora muito mais frio. Laticínios e outros produtos alimentícios, sensíveis ao calor, são geralmente secos em secadores de correntes paralelas (BETE, 2005).

A figura 6 representa este tipo de *spray dryer*.

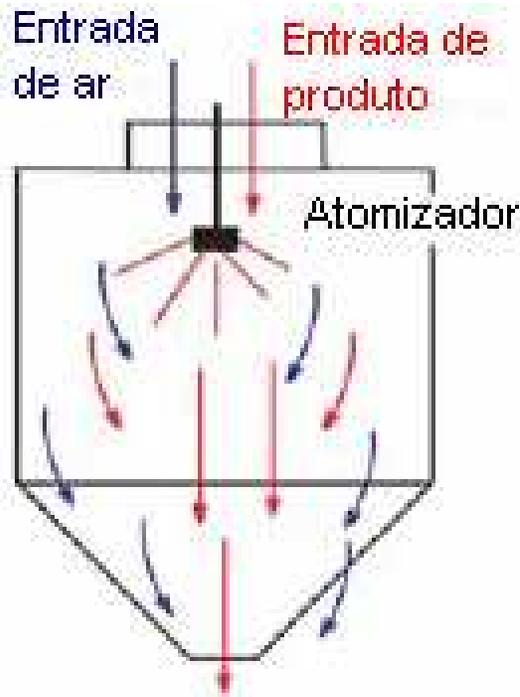


Figura 6 - *Spray Dryer* de correntes paralelas (BETE, 2005).

3.3.2.2. Secador contracorrente

Neste tipo de secador, o *spray* e o ar são introduzidos nas extremidades opostas do secador, com o atomizador posicionado na parte superior e o ar de secagem entrando na câmara pela parte inferior. Um secador de contracorrente oferece evaporação mais rápida e maior eficiência energética em comparação com o secador de correntes paralelas.

Devido ao fato das partículas do produto seco, entrar em contato com o ar mais quente, este tipo de secador não é adequado para produtos sensíveis ao calor. Sabões e detergentes são comumente secos neste tipo de equipamento (BETE, 2005).

Na figura 7, apresenta-se este modelo de *spray dryer* com relação aos fluxos mássicos.

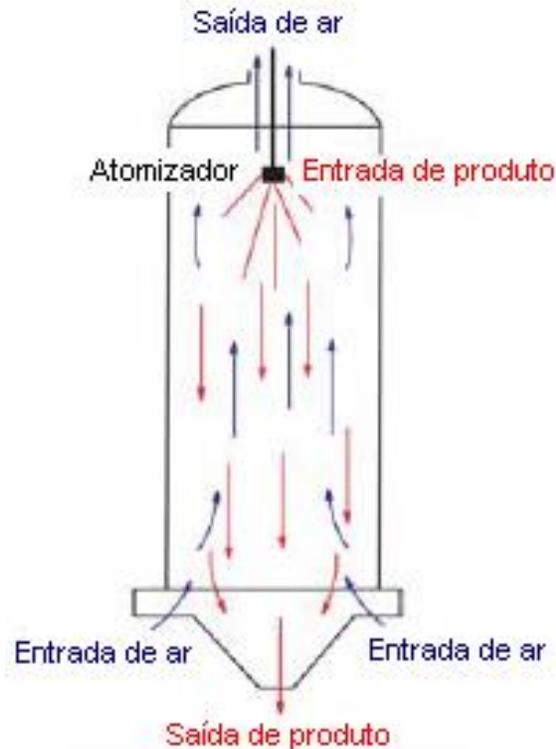


Figura 7 - Secador do tipo *spray dryer* de fluxos mássicos em contracorrente (BETE, 2005).

3.3.2.3. Secador de fluxo misto

O secador de fluxo misto combina os modelos de corrente paralela e contracorrente, no secador de fluxo misto, o ar entra pela parte superior e o atomizador está localizado na parte inferior. Como no contracorrente, um secador de fluxo misto expõe as partículas do produto seco ao ar mais quente, portanto não é adequado para produtos sensíveis ao calor.

A figura 8 apresenta este tipo de variação do secador *spray dryer*.

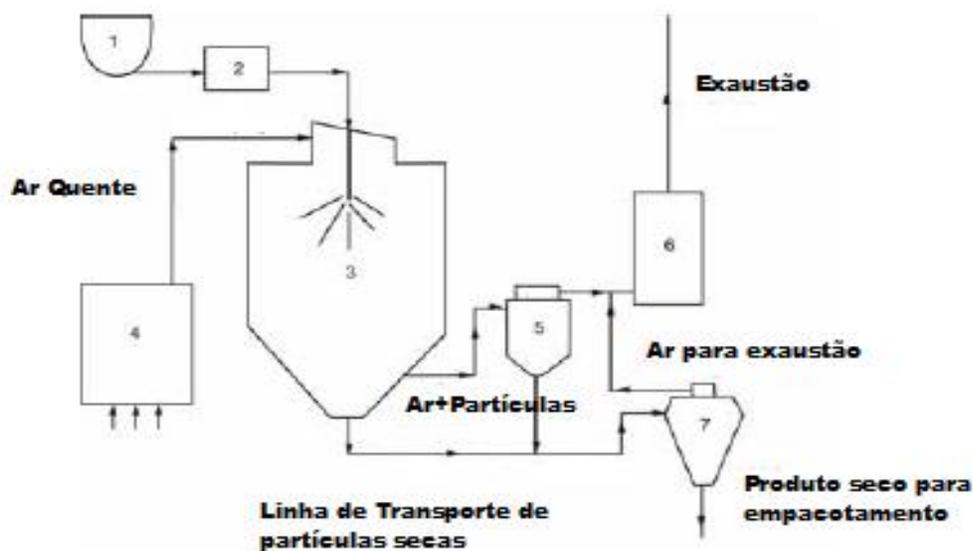


Figura 8 - Secador de fluxo misto (BETE, 2005).

3.3.2.4. Secador de ciclo aberto

No secador de ciclo aberto o ar de secagem é retirado da atmosfera, aquecido, transmitido através da câmara e depois libertado para a atmosfera. Este é o modelo mais utilizado (BETE, 2005, MUJUMDAR, 2007).

Na figura 9, detalha-se o *spray dryer* em operação com ciclo aberto, verifica-se nessa figura que o ar de secagem coletado pelo equipamento (3) e liberado para atmosfera que logo após passar pelo equipamento (6).



1 – Estocagem da matéria-prima, 2 – Bomba, 3 – Câmara de Secagem, 4 – Aquecedor de Ar, 5 – Ciclone, 6 – Lavador de Gases e 7 – Separador.

Figura 9 - Operação do *spray dryer* em ciclo aberto (BETE, 2005).

3.3.2.5. Secador de ciclo fechado

Secadores de ciclo fechado reciclam o gás de secagem, que pode ser ar ou, mais comumente, um gás inerte como o nitrogênio. São utilizados quando:

- a) A matéria-prima é composta de sólidos misturados com solventes orgânicos inflamáveis;
- b) A recuperação completa do solvente é necessária;
- c) Os produtos são tóxicos;
- d) Ocorrer poluição devido a vapor, emissões de partículas ou odor não permitidos, e;
- e) Os riscos de explosões devem ser eliminados.

3.3.2.6. Secador de ciclo semi fechado

Este tipo de secador é a mistura entre secadores de ciclo aberto e fechado. Existem muitas variações deste tipo de secador, porém o mais importante é o sistema de aquecimento direto ou auto inertizante.

No modelo auto inertizante, um aquecedor a combustão é utilizado e o ar, que entra no sistema, é limitado à quantidade necessária para a combustão. Uma quantidade de ar igual ao ar de combustão é retirada do sistema na outra ponta do processo; o gás (principalmente, produtos de combustão) é reciclado através do secador, e este apresenta um teor de oxigênio muito baixo, tornando-o adequado para os materiais que não podem ser expostos ao oxigênio, devido ao perigo de explosão ou degradação do produto (BETE, 2005).

3.3.2.7. Secador de estágio único

Em um secador de estágio único, a umidade é reduzida ao teor desejado em uma única passagem pelo secador. Esse tipo de secador é utilizado na maioria dos projetos.

3.3.2.8. Secador de dois estágios

No secador de dois estágios, o teor de umidade do produto que sai da câmara é mais elevado (tipicamente 5% - 10%) do que o desejado para o produto final. Depois de deixar a câmara de secagem, o teor de umidade é reduzido novamente durante o segundo estágio. O segundo estágio de secagem pode ser feito em um secador de leito fluidizado ou em um secador de leito vibratório. Secadores de dois estágios permitem o uso de temperaturas mais baixas na secagem, tornando o projeto uma boa escolha para os produtos que são particularmente sensíveis ao calor (BETE, 2005).

3.3.3. Processo de atomização em *spray dryers*

De acordo com Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (2006) a atomização consiste em dividir em gotas de menor tamanho possível, visando um aumento significativo da área disponível para operações de transferência de calor e massa. Para MUJUMDAR (2007) a atomização é a mais importante operação no processo de secagem em *spray dryer* e de acordo com LIGERO e RAVAGNANI (2006) a atomização

na secagem, *spray*, determina a distribuição inicial do tamanho das partículas, a qual constitui a base do projeto da câmara.

Para entender o processo de atomização, toma-se como exemplo hipotético a divisão de uma única gota com diâmetro de 1 centímetro, para uma população de gotas com diâmetro igual a 100 micra, sendo que na equação (1) pode-se ter a noção da quantidade de gotículas geradas.

$$N = \frac{\frac{\pi \times D^3}{6}}{\frac{\pi \times d^3}{6}} = \frac{D^3}{d^3} = 10^6 \text{ gotas} \quad (1.000.000 \text{ gotículas}) \quad (1)$$

Sendo,

N a quantidade de gotas geradas (adimensional);

D o diâmetro da gota a ser atomizada (cm);

d o diâmetro da gota após a atomização (μm).

Não só o efeito da geração de uma grande população de gotas, mas o aumento da área superficial como dito anteriormente pode ser verificado. Esse aumento é mostrado na equação (2) para o mesmo caso hipotético já citado.

$$\frac{\text{spray}}{\text{gota}} = N \frac{d^2}{D^2} = 10^2 \quad (2)$$

No qual,

N é a quantidade de gotas geradas (adimensional);

D é o diâmetro da gota a ser atomizada (cm);

d é o diâmetro da gota após a atomização (μm).

No exemplo hipotético, tem-se o aumento da área superficial em 100 vezes e o aumento da quantidade de gotículas em um milhão.

As equações, comumente utilizadas para a caracterização do *spray*, são baseadas no tamanho médio das gotas e pode ser determinado pelas equações (3), (4) e (5).

$$dm = \frac{\sum nidi}{\sum ni} \quad (3)$$

No qual,

dm é o diâmetro médio a partir da média aritmética (μm);

ni é a quantidade de gotas (adimensional);

di é o diâmetro da gota (μm).

$$dmv = \left(\frac{\sum nid_i^3}{\sum ni} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Sendo,

dmv é o diâmetro médio a partir do volume das gotas (μm);

ni é a quantidade de gotas (adimensional);

di é o diâmetro da gota (μm).

$$dms = \left(\frac{\sum nid_i^2}{\sum ni} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

No qual,

dms é o diâmetro médio a partir da área superficial das gotas (μm);

ni é a quantidade de gotas (adimensional);

di é o diâmetro da gota (μm).

A caracterização frequentemente utilizada é a relação do volume das gotas pela área superficial das gotas, denominado de *Sauter Mean Diameter* – SMD, conforme equação (6).

$$d_{SMD} = \frac{\sum nid_i^3}{\sum nid_i^2} \quad (6)$$

Sendo,

d_{SMD} é o diâmetro médio das gotas ou diâmetro médio de Sauter (m, μm);

n_i é a quantidade de gotas (adimensional);

d_i é o diâmetro da gota (m, μm).

O tamanho da gota estabelece a superfície de transferência de calor disponível e, assim, a taxa de secagem.

O tipo de atomizador determina a energia necessária para formar o *spray*, a distribuição e o tamanho das gotas, sua trajetória e velocidade. O desenho da câmara também é influenciado pela escolha do atomizador (MUJUMDAR, 2007).

Existem três tipos principais de atomizadores que são empregados nos processos de secagem em *spray dryer* (LAND, 2012): a) rotativos (centrífugos), b) a dois fluidos ou pneumáticos (cinéticos) e c) os de bicos pressurizados ou de um só fluido (pressão). Os mais utilizados são os atomizadores rotativos (centrífugos) e os atomizadores de bico pressurizado de um único fluido (pressão). Os pneumáticos são restritos a aplicações onde a alimentação é muito viscosa.

Os intervalos típicos de tamanho das gotículas, em função do tipo de atomizador, estão representados na tabela 1 e, comparativamente a tabela 2 apresenta o tamanho de gotas que são encontrados na natureza.

Tabela 1 - Tamanho das gotículas em função do tipo do atomizador (MUJUMDAR, 2007).

Tipo do Atomizador	Tamanho da gotícula (μm)
Rotativo	1 – 600
Pneumático	5 – 300
Bico pressurizado	10 - 800

Tabela 2 - Tamanho de gotas encontrados na natureza (ROSA, TSUKADA e FREITAS, 2003).

Exemplo comparativo	Tamanho da gota (μm)
Chuva pesada	2000 a 5000
Chuva intensa	1000 a 2000
Chuva Moderada	500 a 1000
Chuva Leve	100 a 500
Névoa	50 a 100
Névoa úmida	10 a 50
Névoa seca	2 a 10
Vapor	0,01 a 1
Fumaça	0,001 a 0,01
Dimensão molecular	Abaixo de 0,001

3.3.3.1. Atomizadores rotativos (centrífugos)

O atomizador do tipo rotativo ou centrífugo utiliza energia centrífuga para pulverizar a solução. Seu funcionamento consiste, basicamente, de um eixo, em uma das extremidades, que possui um disco com pequenos orifícios e na outra extremidade, um motor que transmite altas rotações. O líquido é introduzido na câmara de aceleração de uma turbina em alta rotação, pela passagem em um distribuidor estacionário, que tem a finalidade de assegurar uma repartição homogênea sobre a circunferência do disco (MUJUMDAR, 2007).

As figuras 10, 11 e 12 apresentam respectivamente o equipamento para atomização contemplando o disco rotativo na extremidade inferior, representação da formação da gota neste tipo de atomizador e as vistas, em corte, de um atomizador rotativo.

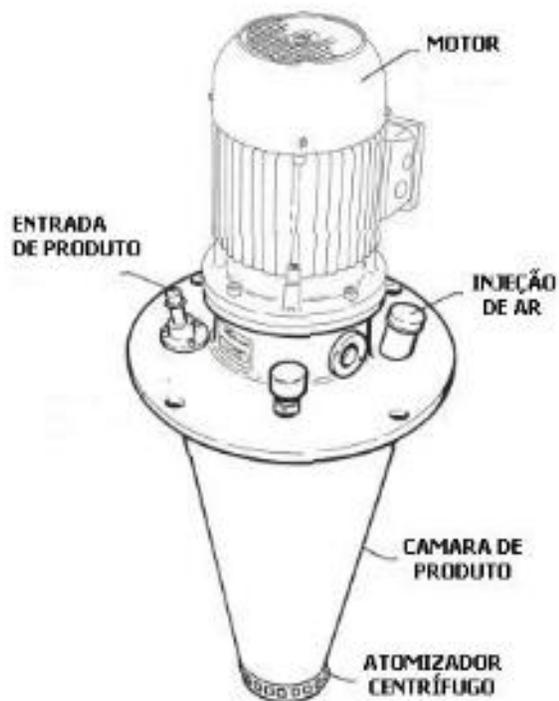


Figura 10- Atomizador rotativo ou centrífugo (ROSA, TSUKADA e FREITAS, 2003).

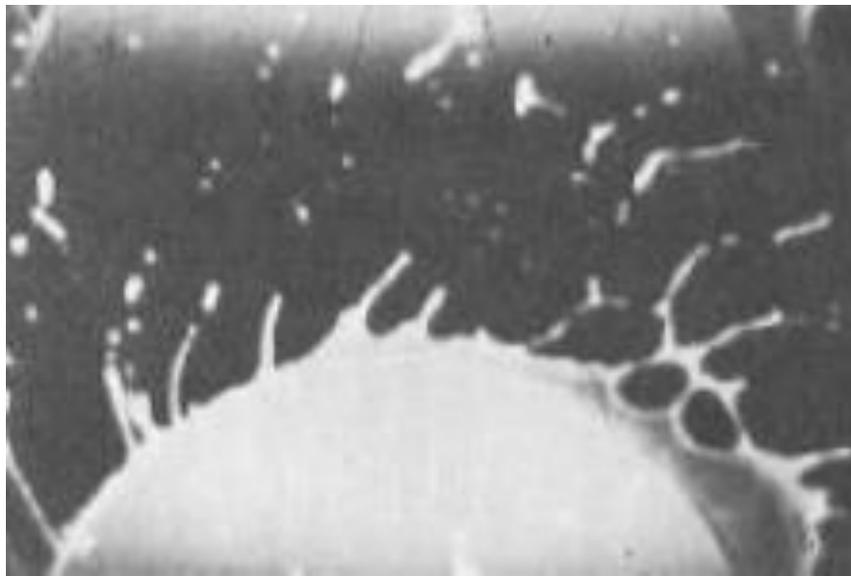


Figura 11 - Exemplificação do mecanismo de formação de gotas no atomizador rotativo (MASTER, 1985).

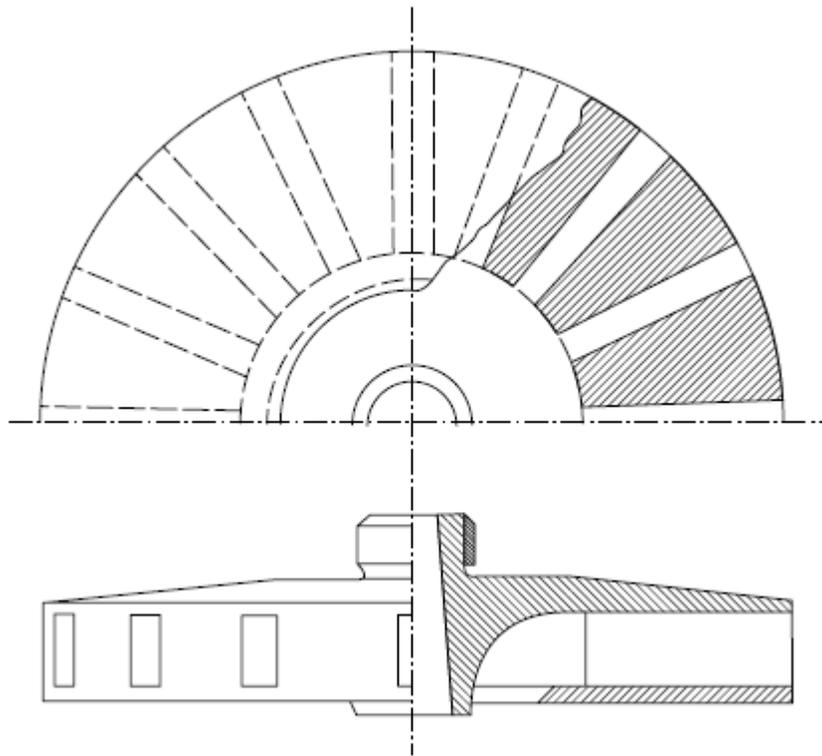


Figura 12 - Vistas de perfil e planta do atomizador rotativo (MUJUMDAR, 2007).

O líquido alimentado no centro do disco move-se para a borda, percorrendo os orifícios, sob o efeito da força centrípeta e é desintegrado na forma de gotas, formando um *spray* com um ângulo próximo de 180°. Devido à trajetória horizontal, esses atomizadores requerem câmaras com um grande diâmetro, sendo que os formatos mais usuais de orifícios são circulares, ovais e retangulares. Como mostra a figura 13.

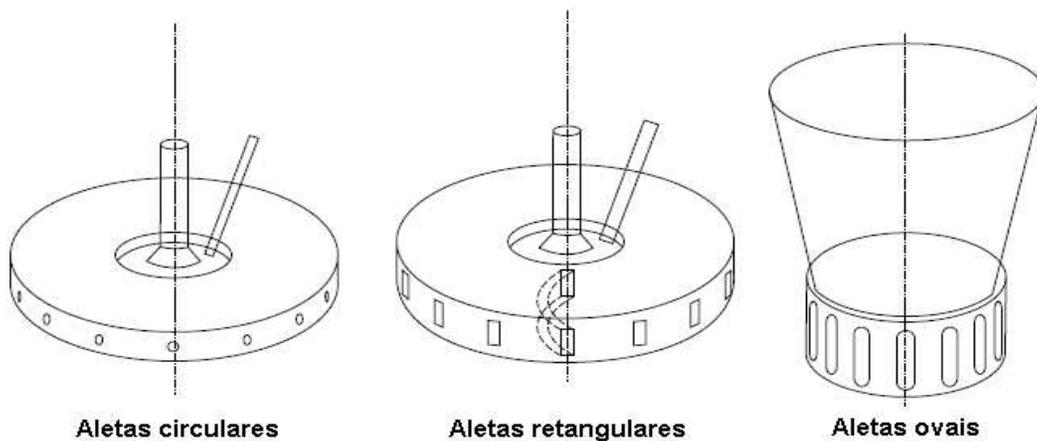


Figura 13 - Formatos mais comuns de orifícios em atomizadores rotativos (MUJUMDAR, 2007).

Para aplicações de alta capacidade, onde o mesmo grau de atomização é requerido para altas vazões de alimentação, aumentam-se o número e a altura dos orifícios, para manter a mesma espessura de filme líquido em cada palheta.

Geralmente, os atomizadores rotativos produzem um *spray* altamente homogêneo, dentro de uma grande variedade de tamanhos de gotas. MUJUMDAR (2007) explica que o tamanho das gotas pode ser controlado mudando-se a velocidade do disco, e que a variação da vazão de alimentação possui pouco efeito sobre o tamanho das gotas.

SINDAYIHEBURA e BOLLE (1998) apresentam um modelo matemático para a predição do diâmetro médio de *Sauter* (d_{smd}) para o atomizador rotativo (equação 7) e na tabela 3 tem-se a comparação dos efeitos das condições operacionais no tamanho das gotas (IPT, 2006).

$$d_{SMD} = 0,26\theta^{-0,79}Q^{0,32}d_t^{-0,69}\rho_l^{0,29}\sigma^{0,26} \quad (7)$$

Sendo,

d_{SMD} o diâmetro médio de *Sauter* (m);

θ a velocidade de rotação da turbina (rps);

Q a vazão volumétrica de líquido (m^3/s);

d_t o diâmetro da turbina (m);

ρ_l a densidade do líquido (Kg/m^3);

σ a tensão superficial do líquido (Kg/s^2);

Tabela 3 - Comparação dos efeitos das condições operacionais no tamanho das gotas para atomizadores rotativos (IPT, 2006).

$d \sim \theta$	↑ velocidade de rotação	↓ diâmetro das gotas
$d \sim Q$	↑ vazão de alimentação	↑ diâmetro das gotas
$d \sim \mu$	↑ viscosidade do líquido	↑ diâmetro das gotas
$d \sim \sigma$	↑ tensão superficial	↑ diâmetro das gotas
$d \sim \rho$	↑ densidade do líquido	↑ diâmetro das gotas

3.3.3.2. Atomizadores de bico pressurizado (pressão)

Os atomizadores de bico pressurizado geram *sprays* utilizando a conversão da pressão em energia de velocidade, uma vez que o líquido que passa através do bico está sujeito a uma pressão entre 5 a 7 MPa. Um esquema típico do desenvolvimento do *spray* nesse tipo de atomizador, está representado na figura 14 e na figura 15, com a vista em corte de um bico atomizador de pressão.



(a) a pressão é muito próximo de zero, (b) o líquido deixa o orifício na forma de um cilindro distorcido, (c) forma-se um cone junto do orifício que se contrai sob a ação da tensão superficial (cebola), (d) a película (tulipa) rompe-se em gotas formando um *spray* grosseiro e (e) obtém-se o *spray* plenamente desenvolvido.

Figura 14 - Etapas da formação do spray em um atomizador de pressão (IPT, 2006).

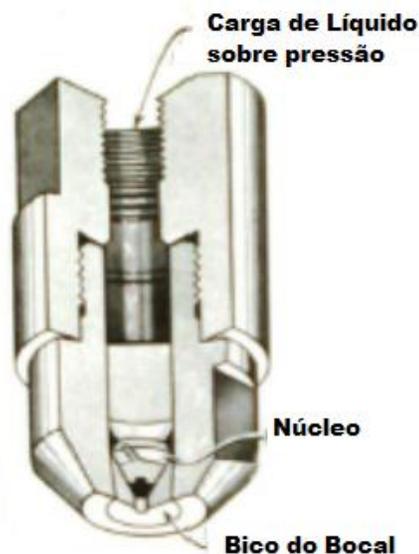


Figura 15 - Vista em corte da seção longitudinal de um bico pressurizado (FOUST *et al.*, 1982).

O líquido entra tangencialmente no bico e deixa o orifício na forma de um cone oco com um ângulo que varia de 40° a 140°; uma das principais limitações desse tipo de atomizador é a vazão de alimentação. Essa não pode exceder 100 L/h e, quando é necessário processar vazões maiores do que 100 L/h, são utilizados vários bicos, em uma mesma câmara de secagem, conforme representado na figura 16 (MUJUMDAR, 2007).

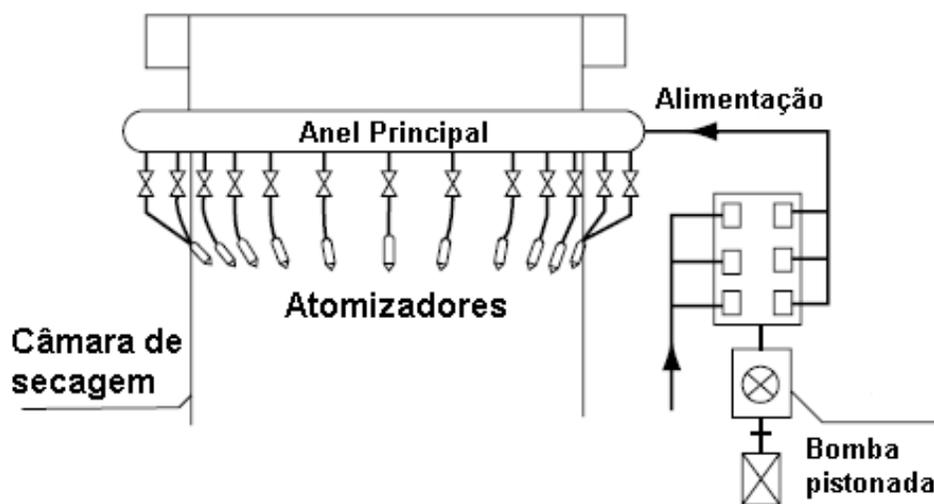


Figura 16 - Sistema de secagem multi bicos pressurizados (MUJUMDAR, 2007).

A principal vantagem dos atomizadores de bico pressurizado em relação aos demais é o consumo de energia que é extremamente baixo.

Para, o caso do atomizador de pressão de simples orifício, a vazão é proporcional à raiz quadrada do diferencial de pressão do líquido entre a montante e a jusante do orifício (equação 8).

$$Wl = CD.A_o^2 \sqrt{2\rho_l \Delta P_l} \quad (8)$$

Sendo que,

Wl é a vazão mássica do líquido (Kg/s)

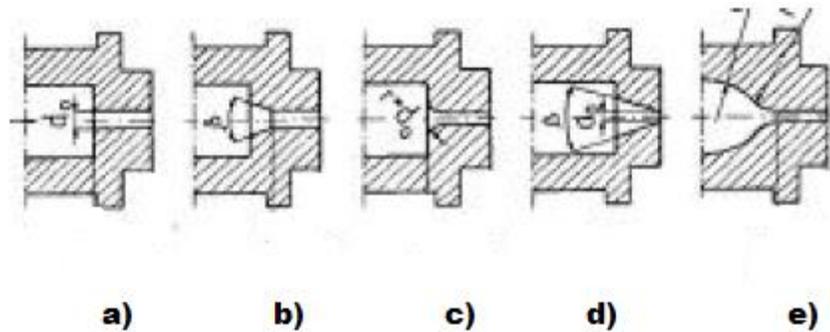
CD é o coeficiente de descarga do orifício;

A_o é a área transversal do orifício de descarga (m²);

ρ_l é a densidade do líquido (Kg/m³);

ΔP_l é o diferencial de pressão do líquido (Pa).

O valor de CD mantém-se constante para $Re > 10.000$, assumindo valores que dependem exclusivamente da geometria do bocal atomizador (figura 17).



- (a) $CD = 0,625$; (b) $CD = 0,877$ para $\beta = 20^\circ$, $CD = 0,775$ para $\beta = 60^\circ$; (c) $CD = 0,85$;
 (d) $CD = 0,865$ para $\beta = 11^\circ$; (e) $CD = 0,625$.

Figura 17 - Varias formas de orifícios e os correspondentes valores de CD (IPT, 2006).

Na prática para um determinado orifício, mantendo-se constantes as propriedades do líquido a equação 8 pode ser reescrita da seguinte forma (equação 9).

$$CV = \frac{Wl}{(\Delta P_l)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

Em que,

CV é o coeficiente de vazão do atomizador;

3.3.3.3. Atomizadores pneumáticos

Os atomizados pneumáticos utilizam ar comprimido ou vapor para atomizar o fluido. A figura 18 representa um dos modelos mais usuais desse tipo de atomizador.

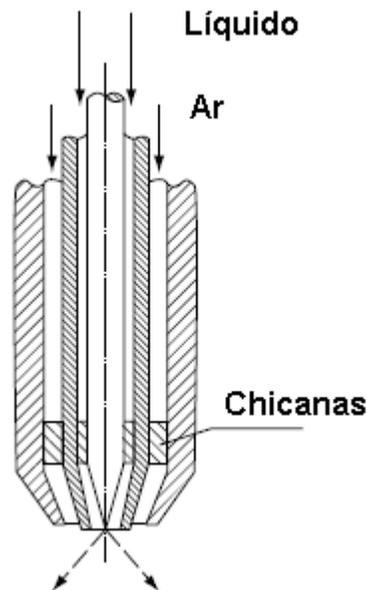


Figura 18 - Vista em corte de um atomizador do tipo pneumático (MUJUMDAR, 2007).

No atomizador representado na figura 18, a alimentação é misturada ao ar do lado de fora do atomizador. Há casos, menos usuais, onde o ar e a alimentação são misturados dentro do corpo do atomizador, à dispersão é feita pela ação das forças de cisalhamento e de expansão exercidas pelo ar ou vapor sobre o líquido, no orifício de saída do atomizador.

A intensidade das forças depende fortemente da velocidade relativa (vr) das duas fases, da relação de suas vazões e também das propriedades físicas do líquido como densidade, viscosidade e tensão superficial (MARSHALL *apud* IPT, 2006).

O ângulo do *spray* varia de 20 a 60° e depende do formato do atomizador. Aproximadamente, 0,5 m³ de ar comprimido são necessários para atomizar 1 kg de fluido. Sua capacidade não pode exceder à vazão de alimentação de 1000 kg/h. Os *sprays* de alimentações pouco viscosas são caracterizados por gotas pequenas e alta homogeneidade, enquanto que com alimentações muito viscosas são produzidos *sprays* com gotas maiores, mas com baixa homogeneidade (MUJUMDAR, 2007).

Sua principal desvantagem é o alto consumo de energia se comparado aos demais tipos de atomizadores. A tabela 4 apresenta uma comparação do consumo de energia nos três tipos de atomizadores.

Modelos matemáticos apresentados por RIZKALLA e LEFEBVRE (1979) dão uma previsão do diâmetro da gota na operação com atomizadores pneumáticos, levando em consideração grupos adimensionais como os números de *Weber* e *Ohnesorge*, sendo o primeiro como interpretação da medida da inércia fluídica comparada com a sua tensão superficial e o segundo relaciona as forças viscosas pela tensão superficial na partícula fluída.

Tabela 4 - Consumo de energia em função do tipo do atomizador (MUJUMDAR, 2007).

Tipo de atomizador	Consumo de energia para atomizar (KW)			
	250 kg/h	500 kg/h	1000 kg/h	2000 kg/h
Bico pressurizado (3 – 5 MPa)	0,4	1,6	2,5	4,0
Pneumático (pressão do ar 0,3 Mpa e relação ar/produto de 0,5 – 0,6 m ³ /kg)	10,0	20,0	40,0	80,0
Rotativo	8,0	15,0	25,0	30,0

3.3.3.4. Seleção do tipo ao atomizador

A seleção do tipo de atomizador a ser utilizado é baseada em vários critérios como viabilidade, flexibilidade operacional, consumo de energia e tamanho das partículas do produto final seco. Para MUJUMDAR (2007), a seleção do tipo de atomizador se resume basicamente em escolher entre os atomizadores rotativos e os de bico pressurizado, já que o uso dos atomizadores pneumáticos é muito limitado. As principais vantagens e desvantagens dos atomizadores rotativos e dos atomizadores de bico pressurizado estão descritas na tabela 5.

De acordo com MASTER *apud* OI (2011), a seleção do tipo do atomizador se baseia nos seguintes critérios: a) capacidade da alimentação, b) energia necessária para atingir atomização completa da alimentação, c) distribuição do tamanho das gotículas, d) tamanho das gotículas, e) desenho da câmara de secagem, f) flexibilidade operacional, g) propriedades da alimentação e h) experiência no atomizador disponível para o produto.

COUPER *et al.* (2005), explana que a seleção do tipo do atomizador ainda recai em testes de *bench scale* (escala de bancada), devido ao fato da grande arbitrariedade na seleção do tipo do atomizador, apesar dos *guidelines* disponíveis em literatura aberta para a sua seleção (MASTER, 1985). HUANG, KUMAR e MUJUMDAR (2006) relatam que os estudos com atomizadores rotativos ainda são trabalhos com base experimental, diferentemente dos trabalhos com atomizadores de bico pressurizado para os quais já existe uma grande gama de trabalhos publicados, utilizando fluido dinâmica computacional, com excelentes resultados de predição das principais variáveis no processo de secagem em *spray dryer*, utilizando este tipo de atomizador.

O uso dos atomizadores rotativos possui um grande empirismo comparado aos de bicos pressurizados, requerendo um maior esforço em ensaios de bancada, para a predição e/ou entendimento do comportamento das variáveis associadas ao seu uso em *spray dryers*.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos atomizadores rotativos e de bico pressurizado (MUJUMDAR, 2007).

Tipo de atomizador	Vantagens	Desvantagens
Rotativos	Trabalha com altas vazões de alimentação com um único atomizador	Consumo maior de energia se comparado aos atomizadores de bico pressurizado
	Pode ser utilizado em materiais abrasivos	Custo de aquisição maior se comparado aos atomizadores de bico pressurizado
	Baixa tendência de entupimento dos orifícios	<i>Sprays</i> de grandes dimensões requerem grandes câmaras de secagem
	Controle do tamanho das gotas baseado na rotação do atomizador	-
Bico pressurizado	Construção simples e compacta sem partes móveis	Controle e regulagem dos padrões do <i>spray</i> e capacidade do bico não são possíveis durante a operação
	Baixo custo	Tendência de entupimentos
	Baixo consumo de energia	Os efeitos da corrosão e erosão causam um alargamento do orifício, que altera as características do <i>spray</i>

3.3.4. Projeto do secador *spray dryer*

O projeto do secador do tipo *spray dryer* de acordo com MASTER (1985) é uma arte e os procedimentos para concepção e projeto deste tipo de secador continuam, até os dias atuais, sendo um processo com elevado grau de empirismo (LAND, 2012).

Os testes em escala piloto (*bench scale*) são essenciais para a obtenção de diversos parâmetros e condições operacionais. De acordo com IPT (2006); devido à complexidade do dimensionamento de um secador *spray dryer*, algumas questões devem ser respondidas, como:

- a) É fácil atomizar?
- b) Quais condições de atomização são necessárias para produzir um determinado tamanho?
- c) Até que temperatura o material “aguenta”?
- d) O material é coesivo?
- e) Há depósitos na câmara de secagem? Problemas de manuseio?
- f) Temperatura de secagem (sensitividade térmica e/ou segurança operacional)?
- g) Umidade final no produto?
- h) Balanços de massa e energia para determinar o fluxo de ar de secagem necessário para a carga evaporativa requerida ($\text{Kg H}_2\text{O/h}$)?

Os tipos de *spray dryers* utilizados em laboratório, para a obtenção das informações acima listadas, são mostrados nas figuras 19 e 20.

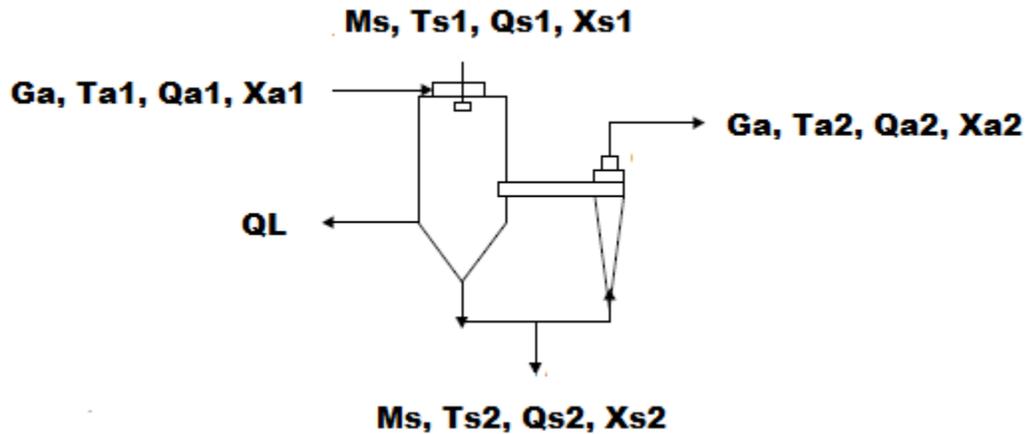


Figura 19 - *Spray dryer* em escala de laboratório (ADL, 2012)



Figura 20 - Modelo de *bench scale spray dryer* (NIRO, 2012)

Os balanços de massa e energia podem ser obtidos pelas condições de contorno do equipamento (LANGRISH, 2009); a figura 21 apresenta as condições para o balanço de massa e energia aplicado a um *spray dryer*.



G_a (vazão mássica de ar), M_s (vazão mássica de sólidos), Q (entalpia), T (temperatura), X (umidade absoluta), a (ar), s (sólido), 1 (entrada) e 2 (saída), Q_L perdas de calor para o ambiente.

Figura 21 - Exemplificação das condições de contorno, para o balanço de massa e energia, para um *spray dryer*.

Nas equações 10 a 15 verificam-se os balanços de massa e energia ao exemplo hipotético da figura 21.

Equação 10, balanço de massa (sem acumulo e nem geração).

$$M_s.(X_{s1}) + G_a.(X_{a1}) = M_s.(X_{s2}) + G_a.(X_{a2}) \quad (10)$$

Apresenta-se as equações 11, 12, 13 e 14 balanços de energia.

$$M_s.(Q_{s1}) + G_a.(Q_{a1}) = M_s.(Q_{s2}) + G_a.(Q_{a2}) + Q_L \quad (11)$$

$$Q_L = U.A.\Delta T \quad (12)$$

$$Q_s = c_{ps}.(T - T_0) + X_s.c_{pl}(T - T_0) \quad (13)$$

$$Q_a = c'.(T - T_0) + X_a.\lambda_o \quad (14)$$

$$c' = 0,24 + 0,46.X_a \quad (15)$$

Sendo que,

$M_s.(Xs1)$ é a quantidade de água no sólido a ser seco (kg de água);

$G_a.(Xa1)$ é a quantidade de água presente no ar de entrada do secador (kg de água);

$M_s.(Xs2)$ é a quantidade de água no produto seco (kg de água);

$G_a.(Xa2)$ é a quantidade de água no ar de saída do secador (kg de água);

$G_a.(Qa1)$ é a quantidade de calor presente no ar de entrada do secador (kcal/h);

$G_a.(Qa2)$ é a quantidade de calor presente no ar de saída do secador (kcal/h);

$M_s.(Qs1)$ é a quantidade de calor presente no líquido a ser seco (kcal/h);

$M_s.(Qs2)$ é a quantidade de calor presente no produto sólido (kcal/h);

cps e cpl são as capacidades caloríficas do sólido e do líquido (kcal/kg°C);

λ é o calor latente de vaporização da água (kcal/kg);

T_o é a temperatura de referência (0°C);

c' é a capacidade calorífica do ar úmido (kcal/kg°C);

Estudos de otimização energética em *spray dryer* podem ser verificados em ETSU (1986) e ATKINS, WALMSLEY e NEALE (2011) com excelentes resultados que acarretaram a diminuição dos custos na operação do *spray dryer*.

De acordo HUANG, KUMAR e MUJUMDAR (2006) o tipo do atomizador tem influência no projeto da câmara e para LIGERO e RAVAGNANI (2006) o tipo do atomizador e o modelo do fluxo de ar são determinantes para o projeto da câmara.

LAND, 2012 apresenta uma relação, baseada em dados industriais para o cálculo da temperatura de entrada e saída do ar de secagem do secador *spray dryer* (equação 16).

$$T_{saída} = 88,39 \times \log_{10} T_{entrada} - 112,35^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

Sendo que:

$T_{saída}$ é a temperatura de saída do ar de secagem (°C);

$T_{entrada}$ é a temperatura de entrada do ar de secagem (°C).

O projeto da câmara de secagem do *spray dryer* de acordo com MUJUMDAR (2007) depende de fatores como tipo do atomizador utilizado, o sistema de contato ar-fluido. MUJUMDAR (2007) apresenta uma relação da altura em função do diâmetro da partícula para atomizadores do tipo disco rotativo (figura 22).

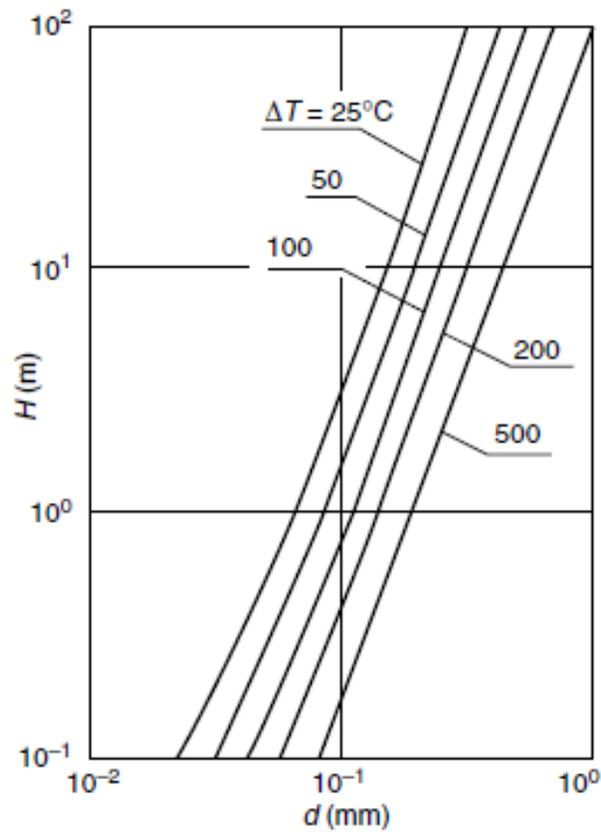


Figura 22- Relação entre o diâmetro da partícula (d – mm) versus a altura (H – m) da câmara de secagem para *spray dryer* utilizando atomizador do tipo disco rotativo (MUJUMDAR, 2007).

Notar que, na figura 22, o ΔT é a diferença entre a temperatura do ar de secagem e da partícula seca.

Para COUPER *et al.* (2005) é apresentado uma compilação de dados de literatura, que se baseia no tempo de residência do gás como função da relação do volume da câmara de secagem, pela vazão volumétrica do gás, esses dados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Tempos de residência compilados da literatura, para o dimensionamento do diâmetro da câmara de secagem em *spray dryer* (COUPER *et al.*, 2005).

Fonte	Tempo (segundos)
<i>Heat Exchanger Design Handbook</i> (1983)	5 – 60
<i>McCormick</i> (1979)	20
<i>Master</i> (1976)	20 – 40 (correntes paralelas)
<i>Nonhebel and Moss</i> (1971)	< 60
<i>Peck</i> (1983)	5 – 30
<i>Wentz and Thygeson</i> (1979)	< 60
<i>Williams-Gardner</i> (1971)	4 - 10 (< 4,572 m) 10 – 20 (> 4,572 m)

Em função das informações de literatura aberta (tabela 6), é determinado o volume da câmara de secagem a ser utilizada na operação, conhecendo-se a vazão volumétrica do gás de secagem. Como se pode verificar, existe uma ampla faixa de valores de tempo de residência, o que implica em diversos valores de volumes e conseqüentemente diversas dimensões para a câmara de secagem para o mesmo volume de gás utilizado para a secagem.

LAND (2012) apresenta uma equação para a determinação do volume da câmara do *spray dryer*, baseado no fundo da câmara como sendo cônico, com ângulo do cone em 60°. Essa equação é baseada para um tempo de residência do produto no interior da câmara em 25 segundos.

A equação (17) proposta por LAND (2012) é indicada para a altura do cilindro igual ao diâmetro e o tempo de residência com 25 segundos.

$$V = 0,7854 \times D^2 \times (H + 0,2886 \times D) \quad (17)$$

Em que:

V é o volume da câmara (m³);

D é o diâmetro da câmara (m);

H é a altura da câmara (m).

PERRY e GREEN (2007) apresenta o dimensionamento da câmara de secagem como função do tempo de residência (retenção do gás no interior da câmara) em 25 segundos, e com o emprego de parâmetros de *spray dryer* usados com sucesso em escala industrial, como exemplo citado por PERRY e GREEN (2007) apresenta-se a secagem de 2.000 Kg/h sulfato de zinco ($ZnSO_4$); os dados e parâmetros operacionais para a secagem do sulfato de zinco são apresentados na tabela 7.

Para o exemplo de PERRY e GREEN (2007) considera-se para a câmara o diâmetro (D) igual à altura (H) é o fundo da câmara sendo cônico com 60° . Na equação (18) e (19) temos o desenvolvimento da equação para o cálculo do volume da câmara de secagem e diâmetro.

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \left(H + \frac{\sqrt{3}}{2} \times D \right) = 1,47 \times D^3 \quad (18)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{1,47}} \quad (19)$$

Sendo que,

V é o volume da câmara (m^3);

D é o diâmetro da câmara (m);

H é a altura da câmara

Tabela 7 - Dados e parâmetros operacionais usado na secagem do sulfato de zinco ($ZnSO_4$) em escala industrial (PERRY e GREEN, 2007).

Produto	Temperatura do Ar (K)		% de Água na alimentação	Relação Ar/Água evaporada (kg/kg)	Relação Ar/Produto (kg/kg)
	Entrada	Saída			
Sulfato de Zinco ($ZnSO_4$)	600	380	55	12,4	15,2

As equações 20, 21, 22 e 23 apresentam o cálculo do diâmetro da câmara de secagem para o exemplo proposto por PERRY e GREEN (2007).

- Quantidade de ar necessário:

$$\frac{Ar}{Produto} = 15,2 \times 2.000 \times \frac{1}{3.600} = 8,44 \frac{kg}{s} Ar \quad (20)$$

- Massa específica do gás na saída do *spray dryer*: 0,89 kg/m³.

- Vazão volumétrica do gás na saída do *spray dryer*:

$$Vazão = \frac{8,44 \frac{kg}{s} Ar}{0,89 \frac{kg}{m^3}} = 9,48 \frac{m^3}{s} \quad (21)$$

- Volume da câmara de secagem, considerando o tempo de residência para o gás no interior da câmara em 25 segundos conforme proposto por PERRY e GREEN (2007).

$$Volume = 9,48 \frac{m^3}{s} \times 25s = 237m^3 \quad (22)$$

- Diâmetro da câmara de secagem do *spray dryer*, utilizando a equação (19).

$$D = \sqrt[3]{\frac{237}{1,47}} = 5,44m \quad (23)$$

Atualmente, as simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) estão se desenvolvendo muito rapidamente pelas suas vantagens, como baixo custo (em relação aos experimentos), alta velocidade, obtenção de informações detalhadas, entre outros. Através do CFD alguns autores estão simulando sistemas com secadores *spray dryes*, com a finalidade de se obter equações empíricas que possam descrever seus fenômenos (LANGRISH, 2009 (b), HUANG, KUMAR e MUJUMDAR, 2006, LANGRISH, WILLIAMS e FLETCHER, 2004). A figura 23 apresenta o exemplo de um resultado de simulação em CFD.

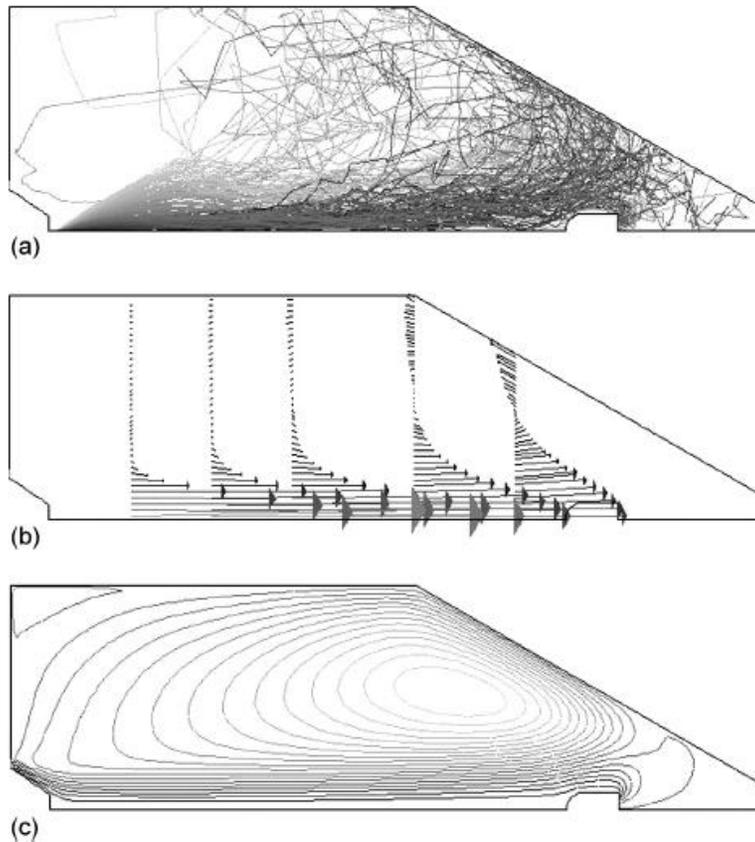


Figura 23 - Resultados da simulação CFD em uma câmara cônica: (a) padrão de fluxo de ar, (b) vetor de velocidade (diferentes níveis), (c) trajetórias de partículas (MUJUMDAR, 2007).

Como se pode verificar, até aqui, não existe um padrão definido para o dimensionamento da câmara de secagem em *spray dryer*, sendo que, essa lacuna de conhecimento torna o processo de dimensionamento, deste tipo de equipamento, muito empírico e necessitando de estudos mais apurados para se padronizar o dimensionado deste equipamento. Nesse estudo, se propõe um método simples de determinar o diâmetro máximo da câmara de secagem, em função do padrão de escoamento propiciado pelos atomizadores do tipo centrífugo (disco rotativo), negligenciando-se os padrões de escoamento do gás de secagem (gás quente) no interior da câmara de secagem.

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. Equipamentos e acessórios

O equipamento utilizado nos experimentos apresenta como partes construtivas e características, as descritas a seguir:

- a) Tanque de armazenagem e alimentação do fluído (água) para a bomba peristáltica, construído em acrílico, com volume de 1,8 litros e agitador de pás inclinadas (figura 24);



Figura 24 - Tanque de alimentação.

- b) Bomba peristáltica que descarrega o fluido (água) para os atomizadores (figura 25);



Figura 25 - Bomba peristáltica.

- c) Motor de 127 Watts de potência, com rotação entre 8.000 e 33.000 rpm e eixo de transmissão, onde esta acoplado o disco atomizador, mostrado na figura 26;

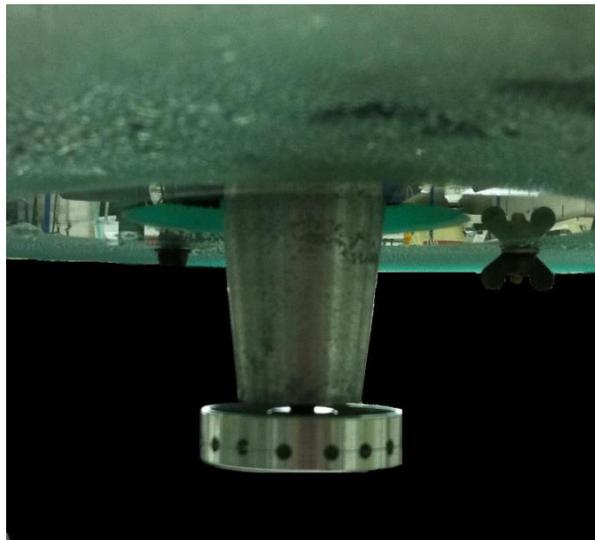


Figura 26- Disco atomizador acoplado ao eixo de transmissão.

- d) Estrutura metálica com dois apoios, sendo um fixo onde ficou preso o motor e o eixo rotativo e o outro móvel;
- e) Três atomizadores de disco rotativo de alumínio com 16 furos, com diâmetros (\emptyset) externos de 30 mm, 40 mm e 50 mm (figura 27);



Figura 27 - Discos atomizadores. 1) Disco Atomizador com diâmetro (\emptyset) externo de 30 mm; 2) Disco Atomizador com diâmetro (\emptyset) externo de 40 mm; 3) Disco Atomizador com diâmetro (\emptyset) externo de 50 mm.

Como acessórios dos equipamentos têm-se:

- f) Prancha de madeira na forma retangular com 1,285 m de comprimento e 0,30 m de largura (figura 28);
- g) Adsorventes (composição: celulose e fibra de polipropileno) cortados em forma retangular, com 5 cm de comprimento e 3,5 cm de largura, fixados em placas de acrílico com a mesma dimensão (figura 29);

- i) Tacômetro – Marca: Instrutherm, Modelo: TD-713 (figura 31);



Figura 31 – Tacômetro (precisão de 1 .rpm).

- j) Cronômetro – Marca: Volla, Modelo: VL-1809 (figura 32);



Figura 32 – Cronômetro (precisão de 0,01 segundo).

- k) Balança analítica – Marca: Marte, Modelo: AL500 (precisão de 0,001 g);
l) Trena – Marca Starrett (precisão de 1 mm).

A unidade utilizada com os equipamentos descritos é mostrada na figura 33.

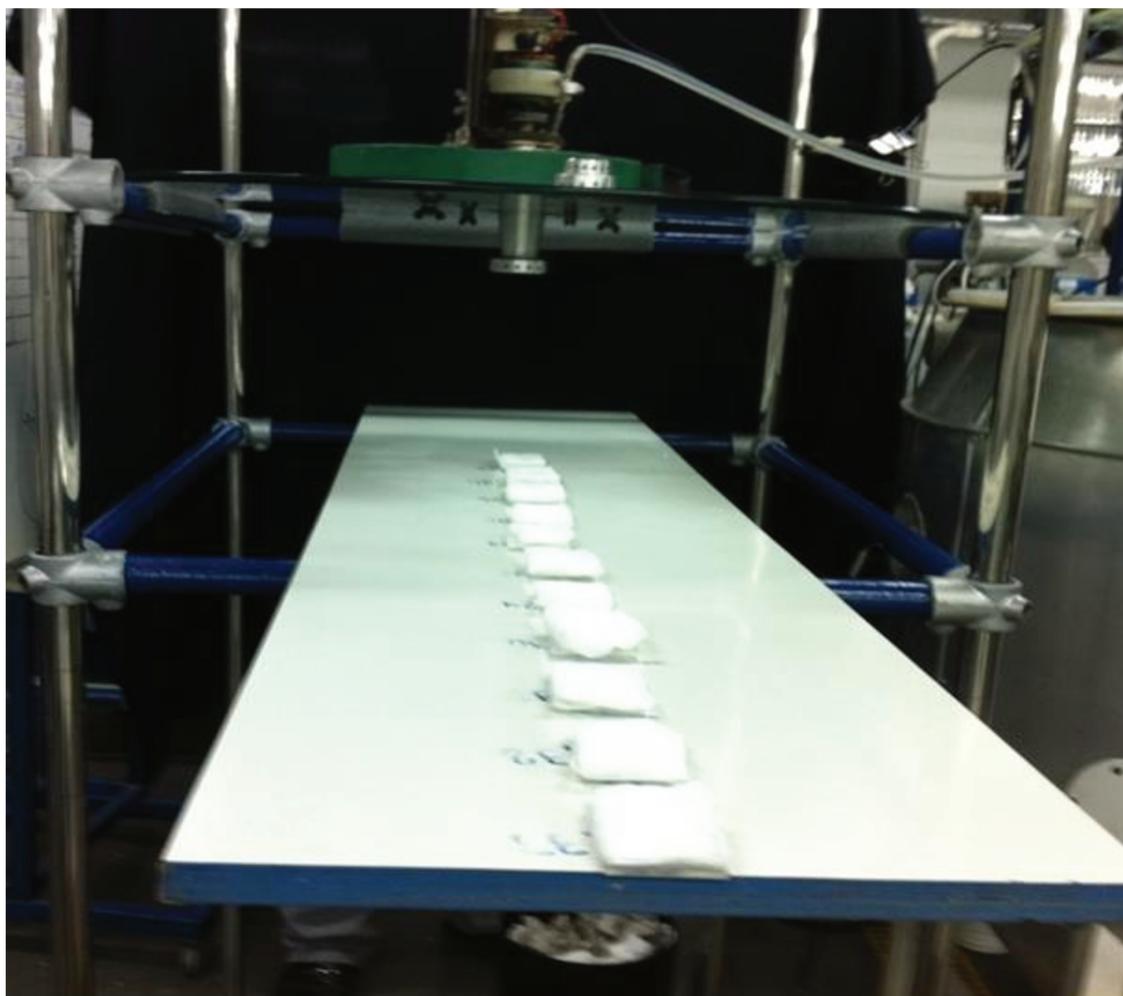


Figura 33 – Vista da unidade utilizada durante os experimentos.

4.2. Variáveis utilizadas nos experimentos

As variáveis utilizadas nos experimentos foram a altura do disco atomizador em relação ao ponto horizontal de referência (no caso a prancha de madeira), o diâmetro do disco atomizador, a vazão de alimentação, e a rotação do disco atomizador. As variáveis, com seus respectivos valores e combinações, estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Combinação das variáveis do experimento.

Diâmetro do disco (mm)	Vazão de alimentação (m ³ /h)	Rotação do disco (rpm)	Altura do disco (mm)
30	2,88.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
		21.000	200
			300
			400
	28.000	200	
		300	
		400	
	1,96.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
21.000		200	
		300	
		400	
28.000		200	
		300	
		400	
40	2,88.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
		21.000	200
			300
			400
	28.000	200	
		300	
		400	
	1,96.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
21.000		200	
		300	
		400	
28.000		200	
		300	
		400	

(continua)

(continuação)

Tabela 8 – Combinação das variáveis do experimento.

Diâmetro do disco (mm)	Vazão de alimentação (m ³ /h)	Rotação do disco (rpm)	Altura do disco (mm)
50	2,88.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
		21.000	200
			300
			400
	28.000	200	
		300	
		400	
	1,96.10 ⁻³	16.800	200
			300
			400
21.000		200	
		300	
		400	
28.000	200		
	300		
	400		

4.3. Procedimento experimental

Os procedimentos experimentais estão descritos a seguir:

- 1) Encheu-se o tanque de alimentação com água;
- 2) Regulou-se a vazão da bomba de alimentação para uma das vazões da tabela 8, de acordo com o ensaio;
- 3) Regulou-se a rotação do motor para uma das rotações da tabela 8 de acordo com o ensaio;

- 4) Regulou-se o apoio móvel da estrutura metálica e apoiou-se sobre o mesmo a prancha de madeira. A regulagem do apoio foi feita de modo que, a altura entre o centro do disco rotativo e a superfície da prancha de madeira, fosse um dos valores da tabela 8, de acordo com o ensaio;
- 5) Colocou-se o material adsorvente em 11 placas de acrílico;
- 6) Pesaram-se as 11 placas de acrílico com o material adsorvente na balança analítica, para se obter a massa seca;
- 7) As 11 placas de acrílico foram dispostas em linha reta, no sentido longitudinal da prancha de madeira, com uma distância de 2,5 cm entre elas, seguindo a ordem da numeração, sendo que a placa de número 1 foi colocada no ponto zero da prancha, ponto no qual a margem da placa 1 forma um ângulo de 90° em relação ao centro do disco atomizador (figura 34);
- 8) Ligou-se o motor e, em seguida, a bomba de alimentação por 2 minutos;
- 9) Após 2 minutos, desligou-se a bomba e pesaram-se novamente as 11 placas de acrílico para se obter a massa úmida;
- 10) A névoa formada pelo fluido alcançou concentrações diferentes em cada raio, dependendo do ensaio. Para quantificar essa concentração, foi calculada a fração mássica em cada uma das 11 placas;
- 11) Obteve-se a massa úmida subtraindo a massa de adsorvente seco da massa de adsorvente úmido;
- 12) A fração mássica foi obtida dividindo a massa úmida de cada placa pela somatória da massa úmida das 11 placas;

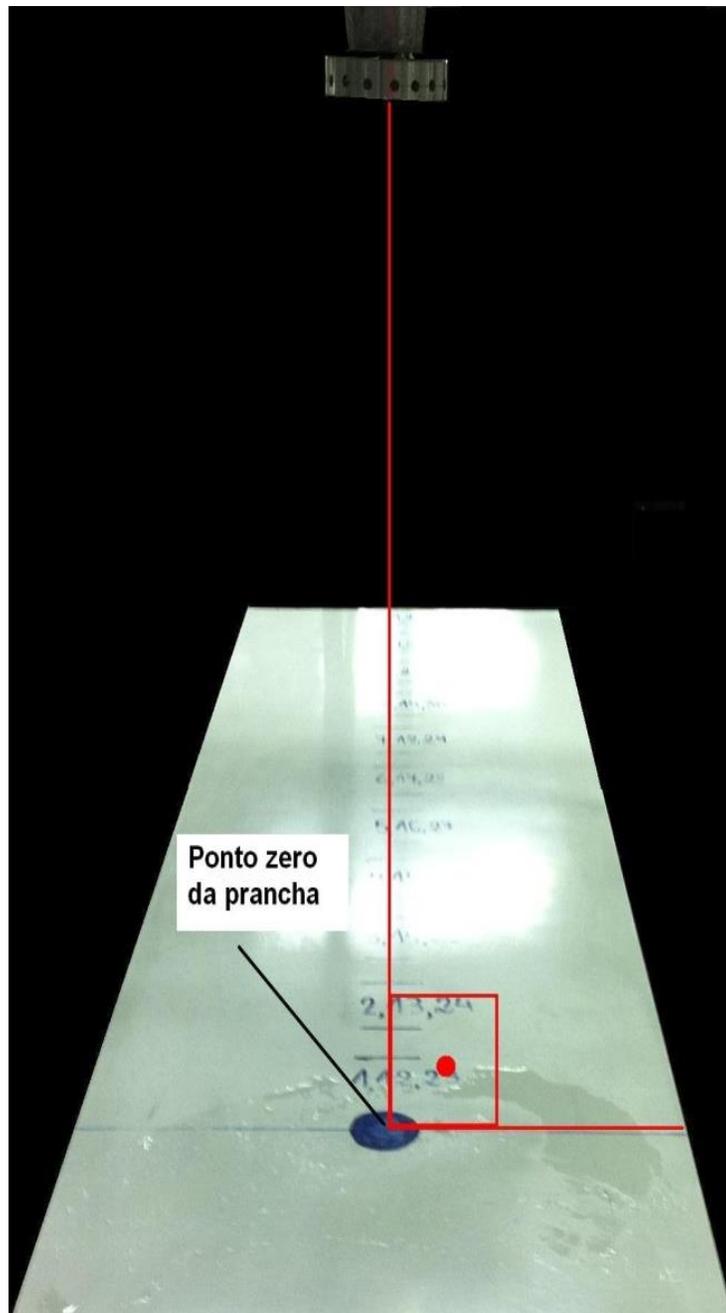


Figura 34 - Ponto zero da prancha.

A figura 35 apresenta o esquema de montagem do experimento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos, com os experimentos realizados de acordo com a combinação das variáveis mostrada na tabela 8 estão dispostos nas tabelas A.1 a A.54, inseridas no apêndice A do presente trabalho.

A partir dos dados das tabelas A.1 a A.54, foram construídos dezoito gráficos, que tiveram como objetivo verificar a influência da vazão, da rotação e altura para cada diâmetro de disco atomizador. Para a construção dos gráficos foram fixados o diâmetro do disco atomizador, sua altura em relação à prancha de madeira e a vazão de alimentação.

Utilizaram-se os valores de porcentagem de massa adsorvida (eixo das ordenadas) e a distância da amostra em relação ao disco atomizador (eixo das abscissas), para cada rotação. Os gráficos obtidos estão representados na figura 36, 37, e 38 para os discos com diâmetro de 30, 40 e 50 mm, respectivamente, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e altura de 20 cm. Os demais gráficos obtidos de acordo com a combinação das variáveis disposta na tabela 8 são apresentados no apêndice B pelas figuras B.1 a B.15.

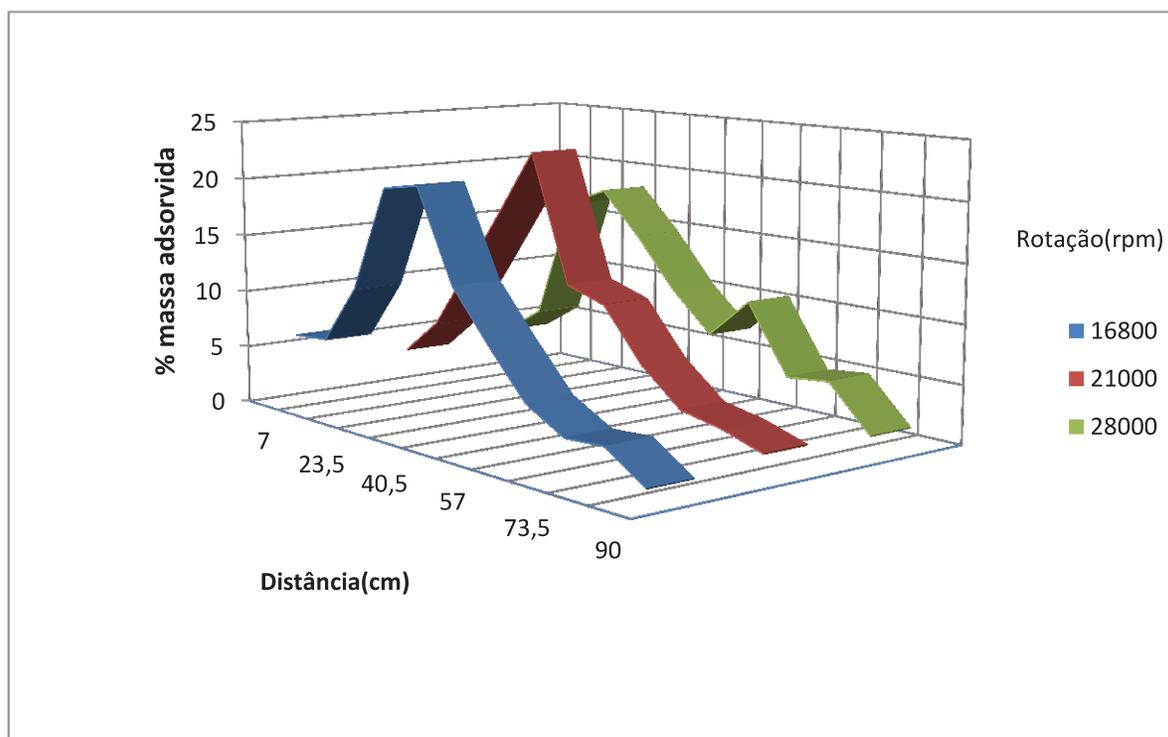


Figura 36 - Diâmetro do disco de 30mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura.

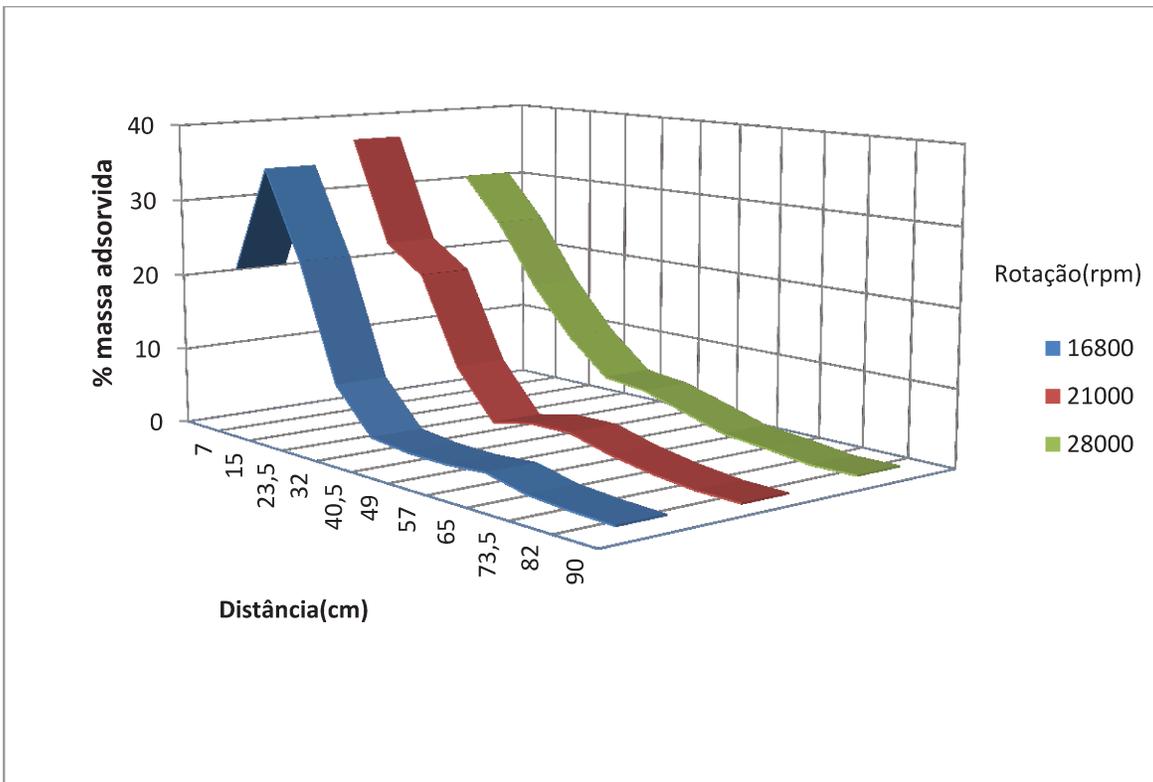


Figura 37 - Diâmetro do disco de 40mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura

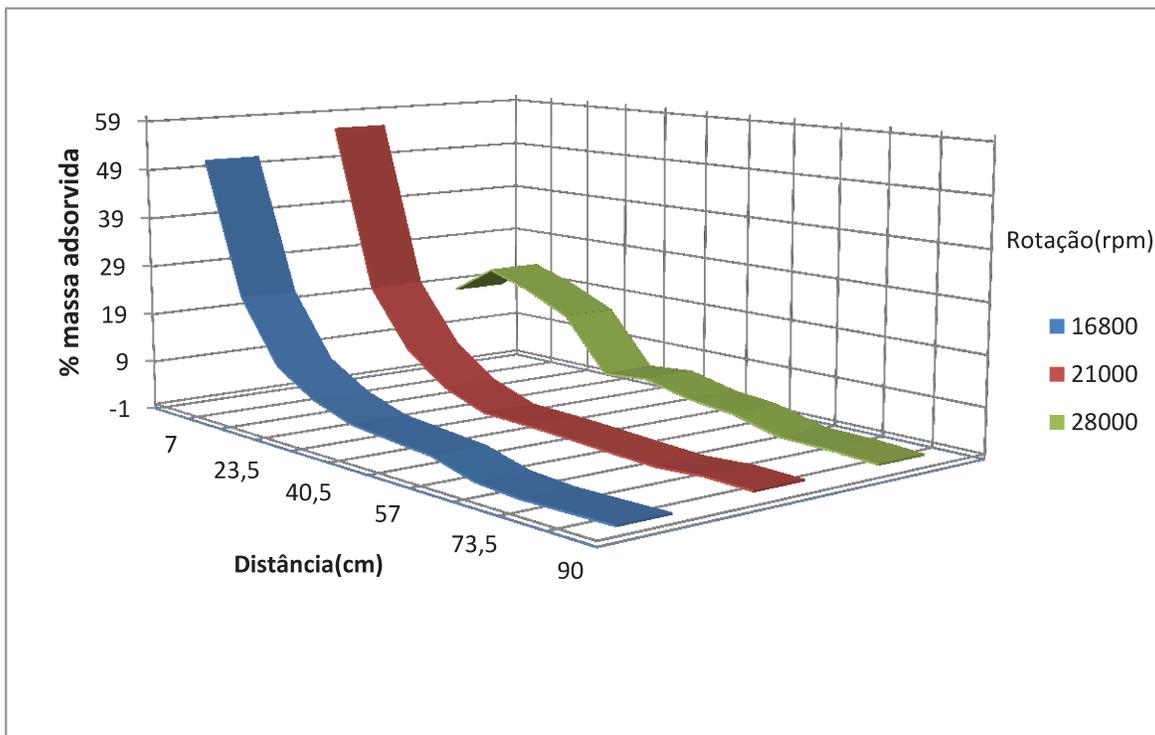


Figura 38 - Diâmetro do disco de 50mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura

Para a determinação dos modelos gráficos, que representem melhor o fenômeno em estudo, foram utilizados os dados das tabelas A.1 a A.54 (Apêndice A) e o *software* de análise de dados *Table Curve 3D* na versão 4.0. Foram construídos dezoito gráficos tridimensionais que relacionam altura do disco atomizador à prancha de madeira (eixo x), distância das amostras em relação ao disco atomizador (eixo y) e a porcentagem de massa adsorvida (eixo z), para cada par de valores de rotação-vazão.

Os gráficos estão representados nas figuras 39, 40, 41 e nas figuras do Apêndice C (C.01 a C.15).

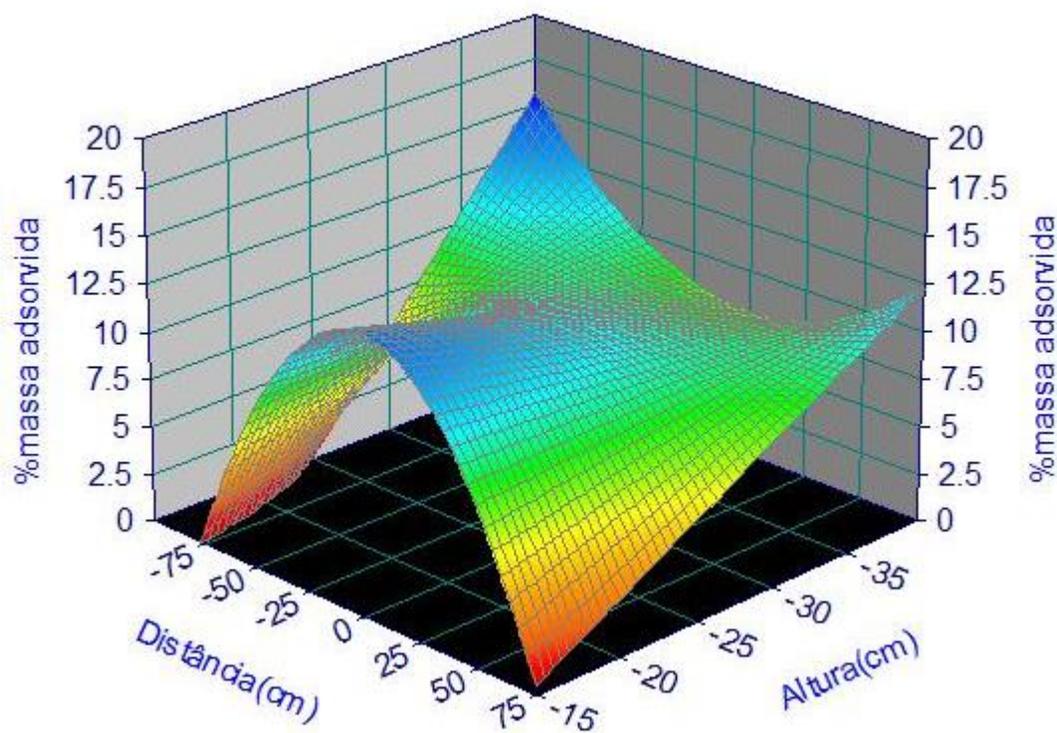


Figura 39 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 16.800 rpm.

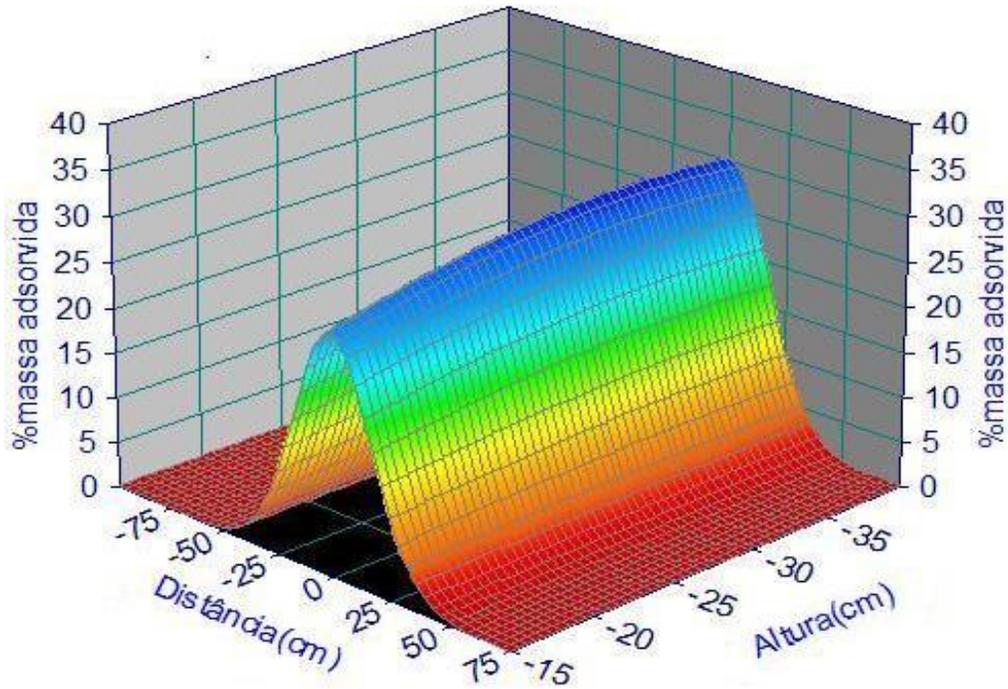


Figura 40 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 21.000 rpm.

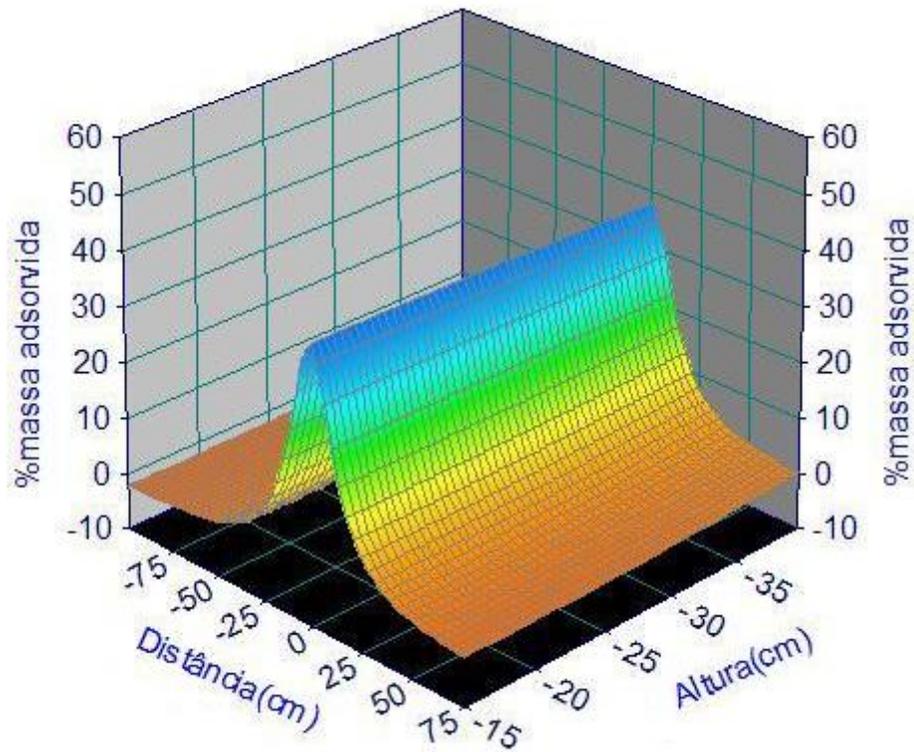


Figura 41 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 28.000 rpm.

Com o intuito de se determinar o raio de pulverização para cada disco rotativo, foram construídos os gráficos representados nas figuras 42, 43, 44 e figuras D.01 a D.11 do Apêndice D. Para a construção foram utilizadas as distâncias das placas para o disco atomizador (eixos x e y) e a altura da prancha de madeira em relação ao disco atomizador (eixo z).

Observando os gráficos das figuras 36, 37 e 38 e do Apêndice B, é possível notar que após uma determinada distância, a porcentagem de massa adsorvida tornou-se praticamente constante para os discos de 40 mm e 50 mm. O valor da distância utilizado é justamente a distância na qual a somatória da massa de água adsorvida é igual a no mínimo 98% em peso.

Para o disco de 30 mm esse comportamento só pode ser notado com a rotação de 16.800 rpm em ambas as vazões de alimentação ($2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$), sendo assim a determinação do seu raio de pulverização ficou restrita a estas condições.

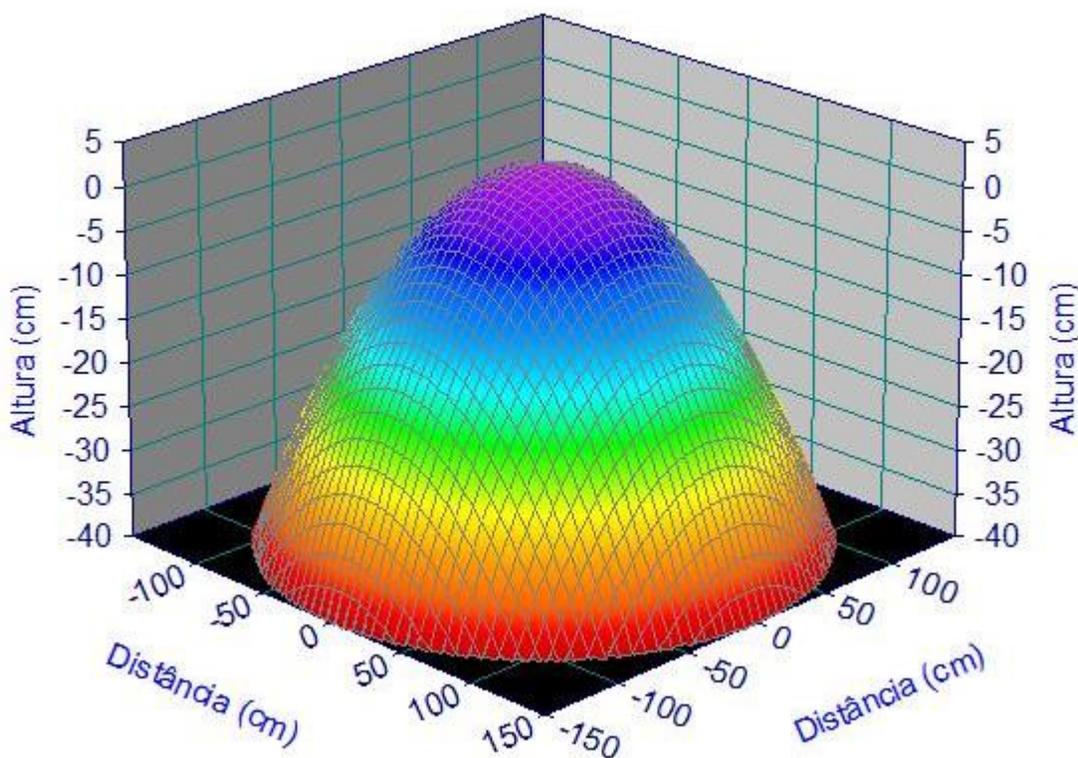


Figura 42 - Raio de pulverização para disco atomizador de 30 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$.

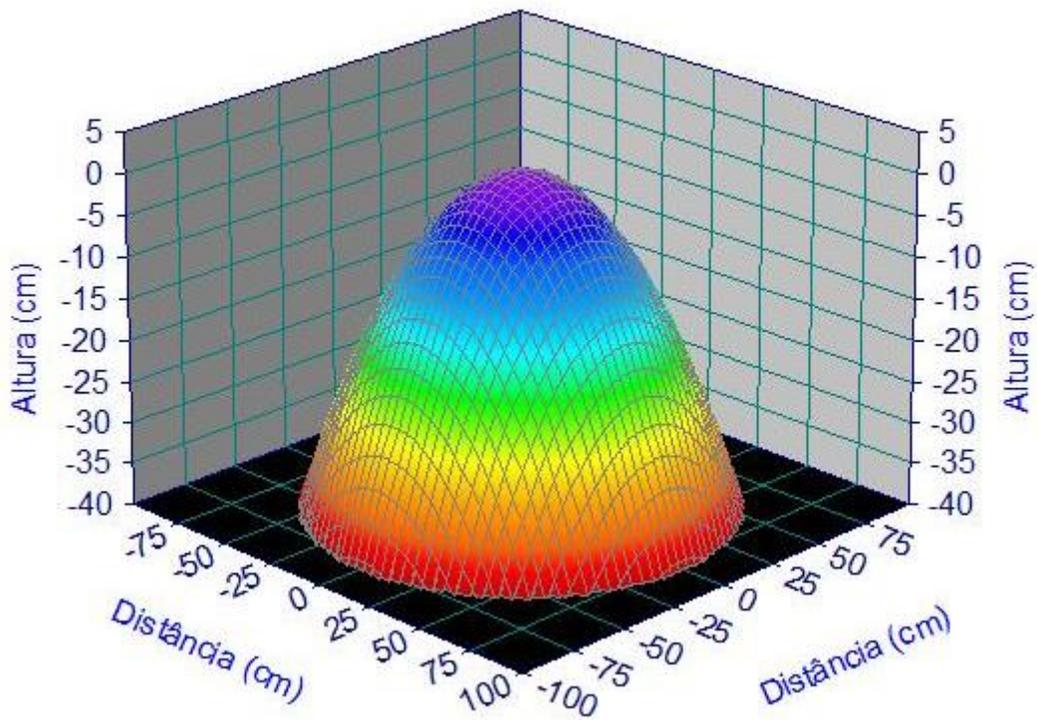


Figura 43 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$.

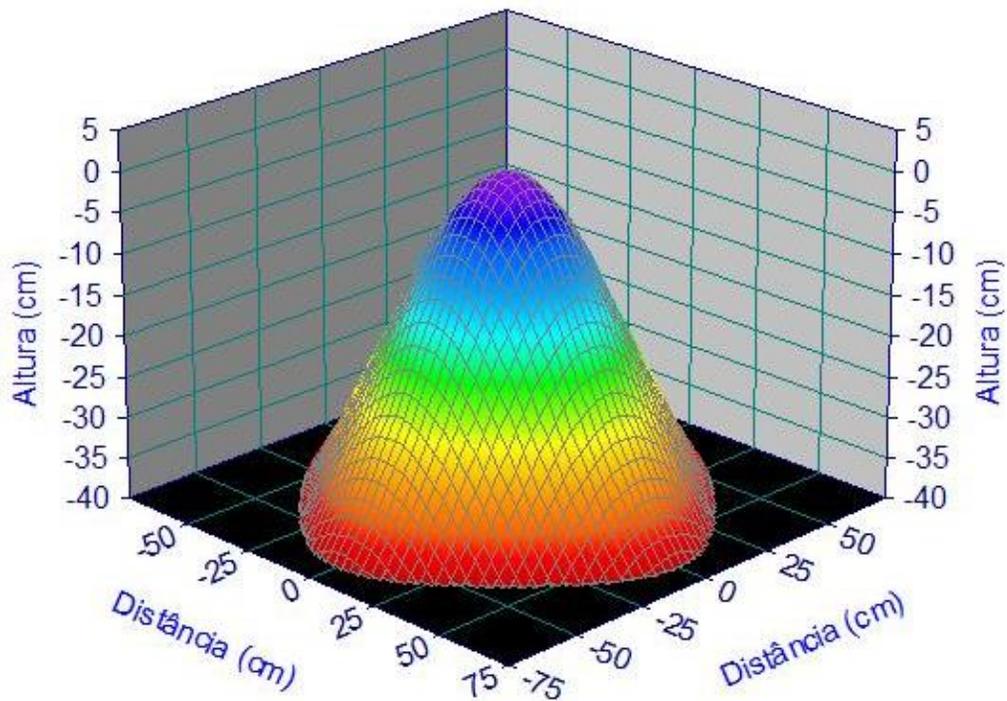


Figura 44 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$.

Para vazões de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ e de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ foram adsorvidos uma média de 1,151 g e 1,692 g de água, respectivamente para todos os discos, rotações e alturas. Sendo assim, pode-se notar que nos experimentos no qual se coletou um valor maior ou menor, não houve uma perfeita homogeneização no qual a névoa era pulverizada, tais dados possivelmente foram influenciados pelo ponto de alimentação do disco atomizador, forçando o fluido a seguir uma direção ao invés de uma distribuição por igual em todas as direções.

Foi observado que o maior disco (50 mm) apresentou o maior percentual de massa adsorvida nas amostras situadas nas posições 1, 2 e 3, mesmo quando foi aplicado na maior altura da prancha (40 cm) em relação ao disco atomizador, todavia, foi notado que o mesmo disco apresentou os menores valores totais de água adsorvida.

Mesmo aplicado a curtas alturas, o menor disco atomizador de (30 mm) apresentou melhor distribuição nas amostras intermediárias, concluindo-se que é o disco de maior alcance de pulverização e, por muitas vezes, observou-se que a névoa alcançou alguns centímetros para fora da prancha de madeira.

Quando utilizada a rotação mais alta de 28.000 rpm, notou-se que as gotículas eram menores, pois demoravam mais para alcançarem os adsorventes. Partículas menores são mais suscetíveis a sofrerem desvios por meio de correntes de ar. O inverso também foi observado, ou seja, a menor rotação aplicada (16.800 rpm) produziu gotículas mais pesadas e mais difíceis de serem dispersas.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho permitiu concluir que:

- a) Os modelos gráficos desenvolvidos para determinação do diâmetro da câmara de secagem, que relacionam a altura, distância e percentual de massa adsorvida, obtidos com os discos atomizadores de 50 e 40 mm nas rotações e vazões estudadas (figuras D.2 à D.11), apresentaram elevado coeficiente de correlação e que, os principais fatores que influenciaram no raio de atomização, para os discos estudados nesses diâmetros, foram a vazão de alimentação e a rotação do disco atomizador;
- b) Os modelos gráficos desenvolvidos que relacionam a altura, distância e percentual de massa adsorvida, obtidos para o disco atomizador de 30 mm, nas rotações e vazões estudadas no presente trabalho, apresentaram baixo coeficiente de correlação se comparado aos discos atomizadores de 40 e 50 mm, mostrando que outros fatores, além da rotação e da vazão de alimentação, interferiram no raio de pulverização e, conseqüentemente, no diâmetro máximo da câmara de secagem;
- c) O disco atomizador de 30 mm foi o que apresentou o maior raio de pulverização para o fluido em estudo “água”, na rotação de 16.800 rpm e vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, em comparação aos outros discos, independente da vazão de alimentação e da rotação dos mesmos;
- d) O disco de 50 mm foi o que apresentou o menor raio de pulverização para água, na rotação de 21.000 rpm e vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, em comparação aos outros discos, independente da vazão de alimentação e da rotação dos mesmos;
- e) O procedimento experimental, desenvolvido para se determinar o diâmetro máximo para câmaras de secagem, utilizadas em secadores do tipo *spray dryer* utilizando atomizadores centrífugos do tipo disco rotativo e de fácil

estruturação e desenvolvimento, haja visto o baixo custo dos equipamentos utilizados;

- f) A unidade experimental desenvolvida e o método proposto permitiram quantificar variáveis relacionadas à formação da névoa. Possibilita estudar outras variáveis, nem sempre desprezíveis, como o ponto de entrada do material no disco atomizador, altura da lateral do disco assim como o formato e área lateral do disco atomizador.

6.1. Sugestões

Visando a continuidade da linha de pesquisa sugere-se:

- a) Instalar pranchas em várias direções radiais para verificar a simetria e estudar a influência do ponto de alimentação do disco;
- b) Estudar a névoa de produtos industrializados;
- c) Realizar estudos em uma câmara de secagem, utilizando gás de secagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADL, **Advance Drying Laboratory** – Institute of Chemical Technology, Mumbai, India. Disponível em: < <http://www.advanceddryinglab.com/Spray%20Dryer.htm> > acesso em 05/09/2012.

AICHE Equipment Testing Procedure: **Spray Dryers – A guide to performance evaluation**, 2nd Edition, New York, 2003.

ATKINS, M. J., WALMSLEY, M. R. W., NEALE, J. R., **Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhaust in the dairy industry**, Applied Thermal Engineering, 31, 2101-2106, 2011.

BETE, **Spray Dry Manual**, 2005 – BETE Fog Nozzle, Inc – USA.

CHEREMISINOFF, N. P., **Handbook of Chemical Processing Equipment**, Butterworth-Heinemann, USA, 2000.

COUPER, J.R., PENNEY, R. W., FAIR, J. R., WALAS, S. M., **Chemical Process Equipment: Selection and Design**, 2nd Edition, Gulf Professional Publishing, 2005.

CREMASCO, M. A., **Fundamentos da transferência de massa**, 2^o edição, Editora Unicamp, Campinas, 2002.

ETSU, Energy Technology Support Unit, United Kingdom., **Heat recovery from a spray dryer using a run-around coil system – A demonstration project at the Clayton Aniline Company LTD, Manchester, UK**, Heat Recovery System, Vol. 6, N^o1, pp. 33-38, 1986.

FELDER, R. M., ROUSSEAU, R. W., **Elementary principles of chemical process**, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2000.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B., **Princípio das Operações Unitárias**, 2^o Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.

GEANKOPLIS, C. J., **Transport Process and Separation Process Principles**, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2003.

HUANG, L. X., KUMAR, K., MUJUMDAR, A. S., **A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulation**, Chemical Engineering and Processing, 45, 461-470, 2006.

IPT, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO., **Mestrado Profissional em Processos Industriais**, Notas de aula do curso: Tecnologia de Partículas, Prof. Dra. Maria Inês Ré, Prof. Dr. Marcelo Martins Seckler e Prof. Dr. Silas de Renzo, São Paulo, 2006.

KEEY, R. B., **Introduction to industrial drying operations**, Pergamon Press Ltd, United Kingdom, 1978.

KUDRA, T., MUJUMDAR, A. S., **Advanced Drying Technologies**, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2009.

LAND, C. M. VAN'T., **Drying in the process industry**, John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.

LANGRISH, T. A. G., WILLIAMS, J., FLETCHER, D. F., **Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer**, Trans IChemE, Part A, July 2004, Chemical Engineering Research and Design, 82 (A7): 821-833, 2004.

LANGRISH, T. A. G., **Applying mass and energy balances to spray drying**, AIChE, December 2009, Chemical Engineering Process, 30-34, 2009.

LANGRISH, T. A. G., **Multi-scale mathematical modeling of spray dryers**, Journal of Food Engineering, February 2009, 218-228, 2009, (b).

LIGERO, E. L., RAVAGNANI, T. M. K., **Influência dos principais parâmetros de projeto no dimensionamento de uma câmara de secagem “spray”**, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química de Termodinâmica Aplicada – CBTERMO, 2006.

MASTER, K., **Spray Drying Handbook**. 4 Edition, George Godwin, London, 1985.

McCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P., **Unit Operations of Chemical Engineering**, 7th Edition, New York, McGraw-Hill, 2001.

MUJUMDAR, A. S., **Handbook of Industrial Drying**, 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2007.

NIRO, Inc. **Laboratory Spray Dryer**. Disponível em <http://www.niroinc.com/news_archives/laboratory_spray_dryer.asp> acesso em 05/09/2012.

OI, R. K., **Secagem da biomassa de banana verde em spray dryer**. 2011. 83p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas.

PACHECO, C. R. F., **Fundamentos de processo de secagem**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Editora Universitária, São Paulo, 1995.

PARK, K. J., ANTONIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B., **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2007.

PERRY, R.H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O., **Perry's Chemical Engineer's Handbook**, 7th Edition, McGraw-Hill, 1997.

PERRY, R. H., GREEN, D.W., **Perry's Chemical Engineer's Handbook**, 8th Edition, McGraw-Hill, 2007.

RIZKALLA, A.A., LEFEBVRE, A.H., **The influence of air and liquid properties on airblast atomization**, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, 97, 316-320, 1979.

ROSA, E. D., TSUKADA, M., FREITAS, L. A. P., **Secagem por atomização na indústria alimentícia: Fundamentos e aplicações**. 2003, 12p. <<http://www.fcf.usp.br/Ensino/Graduacao/Disciplinas/Exclusivo/Inserir/Anexos/LinkAnexos/secagem%20de%20materiais.pdf>>. Acesso em 23 ago 2011.

SINDAYIHEBURA, D., BOLLE, L., **Ultrasonic Atomization of Liquids: Stability analysis of the viscous liquid film free surface**, Atomization and Sprays, vol.8, 1998.

SINNOTT, R. K., **Coulson and Richardson's Chemical Engineering Design**, Volume 6, 3^o Edição, Butterworth-Heinemann, 2003.

SCHUCK, P., DOLIVET, A., MÉJEAN, S., ZHU, BLANCHARD, E., JEANTET, R., **Drying by desorption: A tool to determine spray drying parameters**, Journal of Food Engineering, 94, 199-204, 2009.

TREYBAL, R. E., **Mass Transfer Operations**, 3rd Edition, McGraw-Hill, Singapore, 1980.

WOO, M. W., MUJUMDAR, A. S., DAUD, W. R. W., **Spraying Drying-Operation, Deposition and CFD Modelling**, Editora: VDM Verlag Dr. Muller, Berlin, 2009.

8. APÊNDICE

8.1. APÊNDICE A

As tabelas de A.1 a A.54 apresentam os resultados dos ensaios realizados para elaboração desse trabalho.

Tabela A.1 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	8,194	8,411	0,217	5,932
2	15	7,224	7,451	0,227	6,206
3	23,5	6,556	6,969	0,413	11,290
4	32	5,998	6,742	0,744	20,339
5	40,5	7,908	8,674	0,766	20,940
6	49	8,012	8,496	0,484	13,231
7	57	6,994	7,325	0,331	9,049
8	65	5,587	5,775	0,188	5,139
9	73,5	7,377	7,496	0,119	3,253
10	82	7,786	7,913	0,127	3,472
11	90	7,456	7,498	0,042	1,148
Total				3,658	100

Tabela A.2 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,375	7,485	0,110	3,368
2	15	8,318	8,472	0,154	4,715
3	23,5	7,861	8,153	0,292	8,941
4	32	7,998	8,645	0,647	19,810
5	40,5	7,794	8,562	0,768	23,515
6	49	7,303	7,839	0,536	16,412
7	57	5,303	5,600	0,297	9,094
8	65	7,609	7,805	0,196	6,001
9	73,5	5,263	5,388	0,125	3,827
10	82	5,459	5,541	0,082	2,511
11	90	7,368	7,427	0,059	1,806
Total				3,266	100

Tabela A.3 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,862	6,960	0,098	2,544
2	15	7,037	7,150	0,113	2,934
3	23,5	6,928	7,141	0,213	5,530
4	32	7,113	7,591	0,478	12,409
5	40,5	7,084	7,880	0,796	20,665
6	49	5,18	5,993	0,813	21,106
7	57	6,97	7,526	0,556	14,434
8	65	5,284	5,672	0,388	10,073
9	73,5	6,285	6,465	0,180	4,673
10	82	7,103	7,225	0,122	3,167
11	90	6,109	6,204	0,095	2,466
Total				3,852	100

Tabela A.4 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,106	6,207	0,101	7,781
2	15	6,163	6,280	0,117	9,014
3	23,5	5,475	5,631	0,156	12,018
4	32	6,303	6,553	0,250	19,260
5	40,5	6,163	6,344	0,181	13,945
6	49	6,237	6,383	0,146	11,248
7	57	6,158	6,252	0,094	7,242
8	65	6,304	6,393	0,089	6,857
9	73,5	5,997	6,071	0,074	5,701
10	82	6,439	6,486	0,047	3,621
11	90	6,612	6,655	0,043	3,313
Total				1,298	100

Tabela A.5 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,244	6,350	0,106	5,151
2	15	6,205	6,367	0,162	7,872
3	23,5	5,377	5,618	0,241	11,710
4	32	6,321	6,708	0,387	18,805
5	40,5	6,208	6,697	0,489	23,761
6	49	6,382	6,660	0,278	13,508
7	57	5,955	6,087	0,132	6,414
8	65	6,422	6,535	0,113	5,491
9	73,5	6,365	6,431	0,066	3,207
10	82	6,368	6,420	0,052	2,527
11	90	6,508	6,540	0,032	1,555
Total				2,058	100

Tabela A.6 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,966	8,006	0,040	2,277
2	15	7,042	7,155	0,113	6,431
3	23,5	6,907	7,126	0,219	12,464
4	32	5,924	6,275	0,351	19,977
5	40,5	7,996	8,326	0,330	18,782
6	49	8,135	8,434	0,299	17,018
7	57	6,941	7,132	0,191	10,871
8	65	5,639	5,737	0,098	5,578
9	73,5	7,316	7,377	0,061	3,472
10	82	7,75	7,779	0,029	1,651
11	90	7,856	7,882	0,026	1,480
Total				1,757	100

Tabela A.7 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,399	7,539	0,140	3,180
2	15	7,442	7,720	0,278	6,314
3	23,5	7,208	7,723	0,515	11,697
4	32	7,463	8,222	0,759	17,238
5	40,5	7,428	8,437	1,009	22,916
6	49	5,218	5,753	0,535	12,151
7	57	7,206	7,692	0,486	11,038
8	65	5,535	5,830	0,295	6,700
9	73,5	6,436	6,602	0,166	3,770
10	82	6,807	6,942	0,135	3,066
11	90	6,474	6,559	0,085	1,931
Total				4,403	100

Tabela A.8 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,097	7,163	0,066	2,791
2	15	7,387	7,499	0,112	4,736
3	23,5	7,029	7,214	0,185	7,822
4	32	7,146	7,561	0,415	17,548
5	40,5	7,454	8,010	0,556	23,510
6	49	5,692	6,089	0,397	16,786
7	57	7,326	7,562	0,236	9,979
8	65	5,451	5,595	0,144	6,089
9	73,5	6,608	6,717	0,109	4,609
10	82	6,977	7,070	0,093	3,932
11	90	6,607	6,659	0,052	2,199
Total				2,365	100

Tabela A.9 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,875	7,932	0,057	3,750
2	15	6,922	7,024	0,102	6,711
3	23,5	6,862	6,994	0,132	8,684
4	32	6,077	6,311	0,234	15,395
5	40,5	8,172	8,424	0,252	16,579
6	49	7,886	8,107	0,221	14,539
7	57	6,969	7,129	0,160	10,526
8	65	5,464	5,581	0,117	7,697
9	73,5	7,553	7,670	0,117	7,697
10	82	7,919	7,999	0,080	5,263
11	90	7,512	7,560	0,048	3,158
Total				1,520	100

Tabela A.10 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	5,254	5,334	0,080	4,579
2	15	5,913	6,062	0,149	8,529
3	23,5	5,59	5,831	0,241	13,795
4	32	6,118	6,469	0,351	20,092
5	40,5	5,996	6,382	0,386	22,095
6	49	6,242	6,500	0,258	14,768
7	57	6,244	6,382	0,138	7,899
8	65	6,309	6,378	0,069	3,950
9	73,5	6,563	6,608	0,045	2,576
10	82	6,963	6,982	0,019	1,088
11	90	5,77	5,781	0,011	0,630
Total				1,747	100

Tabela A. 11 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,42	7,467	0,047	2,079
2	15	8,2	8,301	0,101	4,467
3	23,5	7,788	8,023	0,235	10,394
4	32	7,488	7,853	0,365	16,143
5	40,5	7,778	8,223	0,445	19,682
6	49	7,337	7,742	0,405	17,912
7	57	5,132	5,380	0,248	10,969
8	65	5,374	5,545	0,171	7,563
9	73,5	5,376	5,479	0,103	4,556
10	82	5,387	5,470	0,083	3,671
11	90	7,248	7,306	0,058	2,565
Total				2,261	100

Tabela A.12 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,88	7,930	0,050	2,254
2	15	6,95	7,017	0,067	3,021
3	23,5	6,78	6,933	0,153	6,898
4	32	6,129	6,330	0,201	9,062
5	40,5	8,435	8,828	0,393	17,719
6	49	7,716	8,156	0,440	19,838
7	57	7,363	7,777	0,414	18,665
8	65	5,657	5,919	0,262	11,812
9	73,5	7,619	7,763	0,144	6,492
10	82	7,73	7,794	0,064	2,885
11	90	7,527	7,557	0,030	1,353
Total				2,218	100

Tabela A.13 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,747	6,818	0,071	3,783
2	15	6,864	6,979	0,115	6,127
3	23,5	6,988	7,305	0,317	16,889
4	32	7,336	7,681	0,345	18,380
5	40,5	7,059	7,336	0,277	14,758
6	49	5,344	5,541	0,197	10,495
7	57	6,812	6,948	0,136	7,246
8	65	5,466	5,665	0,199	10,602
9	73,5	6,577	6,669	0,092	4,901
10	82	6,553	6,652	0,099	5,274
11	90	6,101	6,130	0,029	1,545
Total				1,877	100

Tabela A.14 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,991	8,019	0,028	0,927
2	15	7,163	7,292	0,129	4,273
3	23,5	6,908	7,163	0,255	8,447
4	32	6,123	6,460	0,337	11,163
5	40,5	8,238	8,696	0,458	15,171
6	49	8,01	8,417	0,407	13,481
7	57	6,853	7,320	0,467	15,469
8	65	5,098	5,427	0,329	10,898
9	73,5	7,243	7,478	0,235	7,784
10	82	7,416	7,641	0,225	7,453
11	90	7,176	7,325	0,149	4,935
Total				3,019	100

Tabela A.15 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,48	7,512	0,032	1,220
2	15	8,172	8,232	0,060	2,288
3	23,5	7,943	8,057	0,114	4,348
4	32	7,611	7,852	0,241	9,191
5	40,5	7,811	8,136	0,325	12,395
6	49	7,388	7,724	0,336	12,815
7	57	5,301	5,692	0,391	14,912
8	65	7,741	8,112	0,371	14,150
9	73,5	5,438	5,754	0,316	12,052
10	82	5,435	5,689	0,254	9,687
11	90	7,4	7,582	0,182	6,941
Total				2,622	100

Tabela A.16 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,458	6,529	0,071	4,162
2	15	6,883	7,087	0,204	11,958
3	23,5	5,871	6,170	0,299	17,526
4	32	6,305	6,572	0,267	15,651
5	40,5	6,261	6,556	0,295	17,292
6	49	6,338	6,559	0,221	12,954
7	57	6,055	6,208	0,153	8,968
8	65	6,244	6,350	0,106	6,213
9	73,5	6,269	6,323	0,054	3,165
10	82	6,418	6,442	0,024	1,407
11	90	6,503	6,515	0,012	0,703
Total				1,706	100

Tabela A.17 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	5,362	5,393	0,031	1,613
2	15	5,873	5,948	0,075	3,902
3	23,5	5,618	5,796	0,178	9,261
4	32	6,105	6,368	0,263	13,684
5	40,5	5,821	6,185	0,364	18,939
6	49	6,394	6,787	0,393	20,447
7	57	6,352	6,605	0,253	13,163
8	65	6,157	6,327	0,170	8,845
9	73,5	6,388	6,490	0,102	5,307
10	82	6,968	7,030	0,062	3,226
11	90	5,78	5,811	0,031	1,613
Total				1,922	100

Tabela A.18 - Diâmetro do disco de 30 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,969	6,998	0,029	2,042
2	15	7,113	7,152	0,039	2,746
3	23,5	6,806	6,885	0,079	5,563
4	32	6,968	7,111	0,143	10,070
5	40,5	7,29	7,524	0,234	16,479
6	49	5,049	5,241	0,192	13,521
7	57	7,057	7,551	0,494	34,789
8	65	5,377	5,493	0,116	8,169
9	73,5	6,397	6,450	0,053	3,732
10	82	6,712	6,739	0,027	1,901
11	90	6,143	6,157	0,014	0,986
Total				1,420	100

Tabela A.19 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	8,164	8,474	0,310	20,777
2	15	7,484	8,002	0,518	34,718
3	23,5	6,817	7,166	0,349	23,391
4	32	6,382	6,507	0,125	8,378
5	40,5	8,356	8,398	0,042	2,815
6	49	7,845	7,878	0,033	2,212
7	57	7,08	7,112	0,032	2,145
8	65	5,72	5,758	0,038	2,547
9	73,5	7,598	7,618	0,020	1,340
10	82	7,951	7,965	0,014	0,938
11	90	7,793	7,804	0,011	0,737
Total				1,492	100

Tabela A.20 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,778	7,983	0,205	17,477
2	15	7,305	7,604	0,299	25,490
3	23,5	6,562	6,818	0,256	21,824
4	32	5,9	6,087	0,187	15,942
5	40,5	8,004	8,100	0,096	8,184
6	49	7,743	7,777	0,034	2,899
7	57	6,872	6,889	0,017	1,449
8	65	5,436	5,470	0,034	2,899
9	73,5	7,286	7,302	0,016	1,364
10	82	7,714	7,730	0,016	1,364
11	90	7,383	7,396	0,013	1,108
Total				1,173	100

Tabela A.21 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,807	8,008	0,201	16,557
2	15	7,016	7,267	0,251	20,675
3	23,5	6,556	6,779	0,223	18,369
4	32	6,252	6,471	0,219	18,040
5	40,5	8,107	8,236	0,129	10,626
6	49	7,754	7,807	0,053	4,366
7	57	6,844	6,891	0,047	3,871
8	65	5,601	5,639	0,038	3,130
9	73,5	7,528	7,552	0,024	1,977
10	82	7,529	7,548	0,019	1,565
11	90	7,56	7,570	0,010	0,824
Total				1,214	100

Tabela A.22 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,877	7,117	0,240	33,994
2	15	6,795	6,988	0,193	27,337
3	23,5	6,808	6,947	0,139	19,688
4	32	7,175	7,255	0,080	11,331
5	40,5	7,205	7,234	0,029	4,108
6	49	5,321	5,337	0,016	2,266
7	57	6,983	6,987	0,004	0,567
8	65	5,464	5,466	0,002	0,283
9	73,5	6,593	6,593	0,000	0,000
10	82	6,719	6,720	0,001	0,142
11	90	7,818	7,820	0,002	0,283
Total				0,706	100

Tabela A.23 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	5,206	5,397	0,191	7,674
2	15	5,959	6,213	0,254	10,205
3	23,5	5,613	5,944	0,331	13,299
4	32	5,979	6,309	0,330	13,258
5	40,5	5,883	6,192	0,309	12,415
6	49	6,233	6,554	0,321	12,897
7	57	6,251	6,563	0,312	12,535
8	65	6,106	6,292	0,186	7,473
9	73,5	6,389	6,521	0,132	5,303
10	82	7,759	7,831	0,072	2,893
11	90	6,006	6,057	0,051	2,049
Total				2,489	100

Tabela A.24 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,365	7,499	0,134	13,590
2	15	8,712	8,970	0,258	26,166
3	23,5	7,935	8,193	0,258	26,166
4	32	7,667	7,817	0,150	15,213
5	40,5	8,358	8,486	0,128	12,982
6	49	7,884	7,923	0,039	3,955
7	57	5,709	5,722	0,013	1,318
8	65	7,627	7,630	0,003	0,305
9	73,5	5,383	5,386	0,003	0,305
10	82	5,726	5,724	0,000	0,000
11	90	7,178	7,173	0,000	0,000
Total				0,986	100

Tabela A 25 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,27	7,752	0,482	36,935
2	15	7,124	7,428	0,304	23,295
3	23,5	7,345	7,603	0,258	19,770
4	32	7,331	7,440	0,109	8,352
5	40,5	7,291	7,318	0,027	2,069
6	49	5,435	5,477	0,042	3,218
7	57	7,12	7,163	0,043	3,295
8	65	5,514	5,538	0,024	1,839
9	73,5	6,709	6,720	0,011	0,843
10	82	7,135	7,138	0,003	0,230
11	90	6,405	6,407	0,002	0,153
Total				1,305	100

Tabela A.26 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,971	8,366	0,395	24,323
2	15	7,147	7,584	0,437	26,909
3	23,5	6,961	7,403	0,442	27,217
4	32	5,901	6,150	0,249	15,333
5	40,5	8,073	8,126	0,053	3,264
6	49	7,846	7,862	0,016	0,985
7	57	7,083	7,095	0,012	0,739
8	65	5,328	5,335	0,007	0,431
9	73,5	7,851	7,858	0,007	0,431
10	82	7,767	7,771	0,004	0,246
11	90	7,534	7,536	0,002	0,123
Total				1,624	100

Tabela A.27 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,264	7,531	0,267	24,406
2	15	8,237	8,518	0,281	25,686
3	23,5	7,927	8,225	0,298	27,239
4	32	7,673	7,832	0,159	14,534
5	40,5	7,744	7,785	0,041	3,748
6	49	7,581	7,599	0,018	1,645
7	57	5,164	5,174	0,010	0,914
8	65	7,594	7,599	0,005	0,457
9	73,5	5,567	5,572	0,005	0,457
10	82	5,186	5,191	0,005	0,457
11	90	7,427	7,432	0,005	0,457
Total				1,094	100

Tabela A.28 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,207	6,506	0,299	38,432
2	15	7,103	7,345	0,242	31,105
3	23,5	6,687	6,822	0,135	17,352
4	32	6,139	6,197	0,058	7,455
5	40,5	8,135	8,160	0,025	3,213
6	49	7,76	7,768	0,008	1,028
7	57	5,582	5,588	0,006	0,771
8	65	5,672	5,674	0,002	0,257
9	73,5	7,547	7,550	0,003	0,386
10	82	7,764	7,764	0,000	0,000
11	90	7,531	7,531	0,000	0,000
Total				0,778	100

Tabela A.29 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,179	6,284	0,105	6,059
2	15	7,092	7,268	0,176	10,156
3	23,5	6,587	6,850	0,263	15,176
4	32	5,883	6,167	0,284	16,388
5	40,5	8,242	8,555	0,313	18,061
6	49	7,734	7,982	0,248	14,310
7	57	5,562	5,684	0,122	7,040
8	65	5,568	5,653	0,085	4,905
9	73,5	7,526	7,593	0,067	3,866
10	82	7,673	7,710	0,037	2,135
11	90	7,453	7,486	0,033	1,904
Total				1,733	100

Tabela A.30 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,442	7,692	0,250	26,233
2	15	8,233	8,500	0,267	28,017
3	23,5	8,027	8,219	0,192	20,147
4	32	7,645	7,758	0,113	11,857
5	40,5	7,999	8,068	0,069	7,240
6	49	7,414	7,441	0,027	2,833
7	57	5,58	5,593	0,013	1,364
8	65	7,832	7,843	0,011	1,154
9	73,5	5,33	5,333	0,003	0,315
10	82	5,37	5,375	0,005	0,525
11	90	7,468	7,471	0,003	0,315
Total				0,953	100

Tabela A.31 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,197	7,573	0,376	30,594
2	15	7,139	7,441	0,302	24,573
3	23,5	7,125	7,329	0,204	16,599
4	32	7,085	7,212	0,127	10,334
5	40,5	7,196	7,266	0,070	5,696
6	49	5,215	5,277	0,062	5,045
7	57	6,999	7,041	0,042	3,417
8	65	5,759	5,780	0,021	1,709
9	73,5	6,538	6,552	0,014	1,139
10	82	6,459	6,464	0,005	0,407
11	90	6,251	6,257	0,006	0,488
Total				1,229	100

Tabela A.32 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	8,031	8,929	0,898	50,308
2	15	6,81	7,305	0,495	27,731
3	23,5	6,674	6,826	0,152	8,515
4	32	5,881	5,968	0,087	4,874
5	40,5	8,002	8,053	0,051	2,857
6	49	7,916	7,946	0,030	1,681
7	57	7,143	7,172	0,029	1,625
8	65	5,534	5,549	0,015	0,840
9	73,5	7,426	7,434	0,008	0,448
10	82	7,709	7,719	0,010	0,560
11	90	7,605	7,615	0,010	0,560
Total				1,785	100

Tabela A.33 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,804	7,979	0,175	21,685
2	15	7,069	7,238	0,169	20,942
3	23,5	6,807	6,937	0,130	16,109
4	32	6,024	6,121	0,097	12,020
5	40,5	8,015	8,091	0,076	9,418
6	49	7,763	7,830	0,067	8,302
7	57	6,682	6,715	0,033	4,089
8	65	5,575	5,601	0,026	3,222
9	73,5	7,508	7,523	0,015	1,859
10	82	7,668	7,676	0,008	0,991
11	90	7,859	7,870	0,011	1,363
Total				0,807	100

Tabela A.34 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,304	6,421	0,117	41,489
2	15	6,299	6,393	0,094	33,333
3	23,5	6,903	6,916	0,013	4,610
4	32	6,533	6,549	0,016	5,673
5	40,5	5,717	5,742	0,025	8,865
6	49	6,482	6,485	0,003	1,064
7	57	5,492	5,491	0,001	0,355
8	65	6,293	6,294	0,001	0,355
9	73,5	5,97	5,971	0,001	0,355
10	82	6,529	6,538	0,009	3,191
11	90	6,552	6,554	0,002	0,710
Total				0,282	100

Tabela A.35 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,136	6,283	0,147	19,241
2	15	6,308	6,444	0,136	17,801
3	23,5	5,372	5,540	0,168	21,990
4	32	6,291	6,393	0,102	13,351
5	40,5	6,173	6,242	0,069	9,031
6	49	6,42	6,473	0,053	6,937
7	57	6,065	6,108	0,043	5,628
8	65	6,226	6,246	0,020	2,618
9	73,5	6,372	6,384	0,012	1,571
10	82	6,426	6,436	0,010	1,309
11	90	6,558	6,562	0,004	0,524
Total				0,764	100

Tabela A.36 - Diâmetro do disco de 40 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,594	7,674	0,080	25,237
2	15	6,835	6,898	0,063	19,874
3	23,5	6,562	6,611	0,049	15,457
4	32	5,857	5,906	0,049	15,457
5	40,5	8,113	8,145	0,032	10,095
6	49	7,799	7,818	0,019	5,994
7	57	6,839	6,851	0,012	3,785
8	65	5,551	5,555	0,004	1,262
9	73,5	7,599	7,603	0,004	1,262
10	82	7,775	7,777	0,002	0,631
11	90	7,397	7,400	0,003	0,946
Total				0,317	100

Tabela A.37 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,586	7,900	0,314	49,841
2	15	8,373	8,520	0,147	23,333
3	23,5	7,878	7,949	0,071	11,270
4	32	8,137	8,178	0,041	6,508
5	40,5	7,841	7,865	0,024	3,809
6	49	7,688	7,707	0,019	3,016
7	57	5,559	5,573	0,014	2,223
8	65	7,64	7,639	0,000	0,000
9	73,5	5,475	5,470	0,000	0,000
10	82	5,106	5,102	0,000	0,000
11	90	7,583	7,580	0,000	0,000
Total				0,630	100

Tabela A.38 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,652	7,261	0,609	43,593
2	15	7,163	7,481	0,318	22,763
3	23,5	7,266	7,574	0,308	22,047
4	32	7,03	7,133	0,103	7,373
5	40,5	7,212	7,244	0,032	2,291
6	49	5,23	5,240	0,010	0,716
7	57	6,84	6,850	0,010	0,716
8	65	5,176	5,178	0,002	0,143
9	73,5	6,631	6,631	0,000	0,000
10	82	6,797	6,802	0,005	0,358
11	90	6,186	6,183	0,000	0,000
Total				1,397	100

Tabela A.39 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,36	7,670	0,310	27,337
2	15	8,296	8,639	0,343	30,247
3	23,5	8,006	8,297	0,291	25,661
4	32	7,725	7,856	0,131	11,552
5	40,5	8,011	8,047	0,036	3,175
6	49	7,566	7,574	0,008	0,705
7	57	5,612	5,617	0,005	0,441
8	65	7,617	7,622	0,005	0,441
9	73,5	5,354	5,358	0,004	0,353
10	82	5,314	5,315	0,001	0,088
11	90	7,574	7,574	0,000	0,000
Total				1,134	100

Tabela A.40 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,369	6,633	0,264	34,555
2	15	6,187	6,420	0,233	30,497
3	23,5	6,542	6,654	0,112	14,660
4	32	6,28	6,354	0,074	9,686
5	40,5	5,534	5,566	0,032	4,188
6	49	6,402	6,425	0,023	3,010
7	57	5,418	5,435	0,017	2,225
8	65	6,283	6,288	0,005	0,654
9	73,5	5,787	5,790	0,003	0,393
10	82	6,161	6,162	0,001	0,131
11	90	6,45	6,450	0,000	0,000
Total				0,764	100

Tabela A.41 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,868	7,119	0,251	17,890
2	15	7,03	7,263	0,233	16,607
3	23,5	7,1	7,306	0,206	14,683
4	32	7,095	7,311	0,216	15,396
5	40,5	7,037	7,192	0,155	11,048
6	49	5,306	5,415	0,109	7,769
7	57	6,944	7,019	0,075	5,346
8	65	5,381	5,433	0,052	3,706
9	73,5	6,394	6,436	0,042	2,994
10	82	6,773	6,813	0,040	2,851
11	90	7,786	7,810	0,024	1,711
Total				1,403	100

Tabela A.42 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 16.800 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,999	7,190	0,191	23,609
2	15	7,344	7,561	0,217	26,823
3	23,5	6,894	7,065	0,171	21,137
4	32	7,485	7,650	0,165	20,395
5	40,5	7,228	7,273	0,045	5,562
6	49	5,708	5,718	0,010	1,236
7	57	7,116	7,123	0,007	0,865
8	65	5,295	5,298	0,003	0,373
9	73,5	6,469	6,469	0,000	0,000
10	82	6,945	6,943	0,000	0,000
11	90	6,281	6,281	0,000	0,000
Total				0,809	100

Tabela A.43 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,904	7,277	0,373	55,755
2	15	7,246	7,397	0,151	22,571
3	23,5	7,068	7,142	0,074	11,061
4	32	7,4	7,433	0,033	4,933
5	40,5	7,074	7,086	0,012	1,794
6	49	5,21	5,220	0,010	1,495
7	57	7,15	7,157	0,007	1,046
8	65	5,672	5,675	0,003	0,448
9	73,5	6,413	6,413	0,000	0,000
10	82	6,966	6,970	0,004	0,598
11	90	5,846	5,848	0,002	0,299
Total				0,669	100

Tabela A.44 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,414	7,604	0,190	20,021
2	15	8,314	8,525	0,211	22,234
3	23,5	7,796	8,025	0,229	24,131
4	32	7,681	7,853	0,172	18,124
5	40,5	7,785	7,858	0,073	7,692
6	49	7,695	7,743	0,048	5,058
7	57	5,542	5,555	0,013	1,370
8	65	7,483	7,493	0,010	1,054
9	73,5	5,231	5,232	0,001	0,105
10	82	5,2	5,202	0,002	0,211
11	90	7,331	7,331	0,000	0,000
Total				0,949	100

Tabela A.45 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,019	7,227	0,208	28,454
2	15	7,27	7,531	0,261	35,704
3	23,5	6,939	7,075	0,136	18,604
4	32	7,326	7,381	0,055	7,524
5	40,5	7,127	7,166	0,039	5,335
6	49	5,382	5,393	0,011	1,505
7	57	7,126	7,136	0,010	1,368
8	65	5,377	5,385	0,008	1,094
9	73,5	6,638	6,641	0,003	0,412
10	82	6,873	6,873	0,000	0,000
11	90	6,333	6,332	0,000	0,000
Total				0,731	100

Tabela A.46 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,369	7,500	0,131	36,901
2	15	8,299	8,418	0,119	33,521
3	23,5	8,046	8,102	0,056	15,775
4	32	7,855	7,883	0,028	7,887
5	40,5	7,79	7,807	0,017	4,789
6	49	7,381	7,377	0,000	0,000
7	57	4,976	4,977	0,001	0,282
8	65	7,591	7,583	0,000	0,000
9	73,5	5,42	5,413	0,000	0,000
10	82	5,396	5,399	0,003	0,845
11	90	7,449	7,448	0,000	0,000
Total				0,355	100

Tabela A.47 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,313	6,610	0,297	20,177
2	15	6,205	6,436	0,231	15,693
3	23,5	6,458	6,662	0,204	13,859
4	32	6,3	6,485	0,185	12,568
5	40,5	5,56	5,726	0,166	11,277
6	49	6,369	6,512	0,143	9,715
7	57	5,478	5,579	0,101	6,861
8	65	6,339	6,408	0,069	4,688
9	73,5	5,779	5,809	0,030	2,038
10	82	6,357	6,382	0,025	1,698
11	90	6,415	6,436	0,021	1,427
Total				1,472	100

Tabela A.48 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 21.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,96	7,126	0,166	28,328
2	15	7,172	7,294	0,122	20,819
3	23,5	7,045	7,143	0,098	16,724
4	32	6,996	7,093	0,097	16,553
5	40,5	7,105	7,163	0,058	9,898
6	49	5,345	5,366	0,021	3,584
7	57	7,121	7,131	0,010	1,706
8	65	5,461	5,464	0,003	0,512
9	73,5	6,465	6,474	0,009	1,536
10	82	6,943	6,945	0,002	0,341
11	90	6,281	6,281	0,000	0,000
Total				0,586	100

Tabela A.49 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,994	7,102	0,108	17,676
2	15	8,379	8,522	0,143	23,404
3	23,5	7,955	8,080	0,125	20,458
4	32	7,691	7,791	0,100	16,367
5	40,5	7,816	7,851	0,035	5,728
6	49	7,601	7,641	0,040	6,547
7	57	5,118	5,145	0,027	4,419
8	65	7,698	7,719	0,021	3,437
9	73,5	5,157	5,163	0,006	0,982
10	82	4,956	4,961	0,005	0,818
11	90	7,561	7,562	0,001	0,164
Total				0,611	100

Tabela A.50 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,849	6,977	0,128	16,645
2	15	7,358	7,488	0,130	16,905
3	23,5	6,944	7,051	0,107	13,914
4	32	7,081	7,192	0,111	14,434
5	40,5	7,138	7,217	0,079	10,273
6	49	5,387	5,447	0,060	7,802
7	57	6,782	6,831	0,049	6,372
8	65	5,514	5,554	0,040	5,202
9	73,5	6,782	6,813	0,031	4,031
10	82	7,064	7,081	0,017	2,211
11	90	6,433	6,450	0,017	2,211
Total				0,769	100

Tabela A.51 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $2,88.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,136	7,265	0,129	25,195
2	15	7,29	7,441	0,151	29,492
3	23,5	7,063	7,176	0,113	22,070
4	32	7,044	7,115	0,071	13,867
5	40,5	6,849	6,873	0,024	4,687
6	49	5,401	5,415	0,014	2,734
7	57	6,987	6,991	0,004	0,781
8	65	5,246	5,249	0,003	0,586
9	73,5	6,499	6,501	0,002	0,391
10	82	6,769	6,767	0,000	0,000
11	90	6,314	6,315	0,001	0,197
Total				0,512	100

Tabela A.52 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 20 cm de altura, vazão de $1,96.10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,12	7,135	0,015	14,706
2	15	8,293	8,316	0,023	22,549
3	23,5	8,005	8,020	0,015	14,706
4	32	7,736	7,755	0,019	18,627
5	40,5	7,754	7,776	0,022	21,568
6	49	7,657	7,665	0,008	7,844
7	57	5,042	5,036	0,000	0,000
8	65	7,779	7,777	0,000	0,000
9	73,5	5,169	5,169	0,000	0,000
10	82	5,246	5,241	0,000	0,000
11	90	7,348	7,343	0,000	0,000
Total				0,102	100

Tabela A.53 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 30 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	6,96	7,037	0,077	17,661
2	15	7,168	7,265	0,097	22,248
3	23,5	6,971	7,041	0,070	16,055
4	32	6,912	6,963	0,051	11,697
5	40,5	7,093	7,137	0,044	10,092
6	49	5,272	5,304	0,032	7,339
7	57	7,027	7,051	0,024	5,505
8	65	5,423	5,441	0,018	4,128
9	73,5	6,35	6,360	0,010	2,294
10	82	6,707	6,712	0,005	1,147
11	90	7,827	7,835	0,008	1,835
Total				0,436	100

Tabela A.54 - Diâmetro do disco de 50 mm com rotação de 28.000 rpm, 40 cm de altura, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

Amostra	Distância (cm)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Umidade adsorvida (g)	% adsorvida
1	7	7,348	7,393	0,045	34,351
2	15	8,052	8,084	0,032	24,427
3	23,5	7,651	7,668	0,017	12,977
4	32	7,679	7,689	0,010	7,633
5	40,5	7,647	7,661	0,014	10,687
6	49	7,261	7,265	0,004	3,053
7	57	5,639	5,645	0,006	4,580
8	65	7,573	7,575	0,002	1,527
9	73,5	5,201	5,200	0,000	0,000
10	82	5,204	5,202	0,000	0,000
11	90	7,065	7,066	0,001	0,765
Total				0,131	100

8.2 APÊNDICE B

As Figuras B.1 a B.15 demonstram a influência da vazão e da rotação para cada diâmetro de disco atomizador.

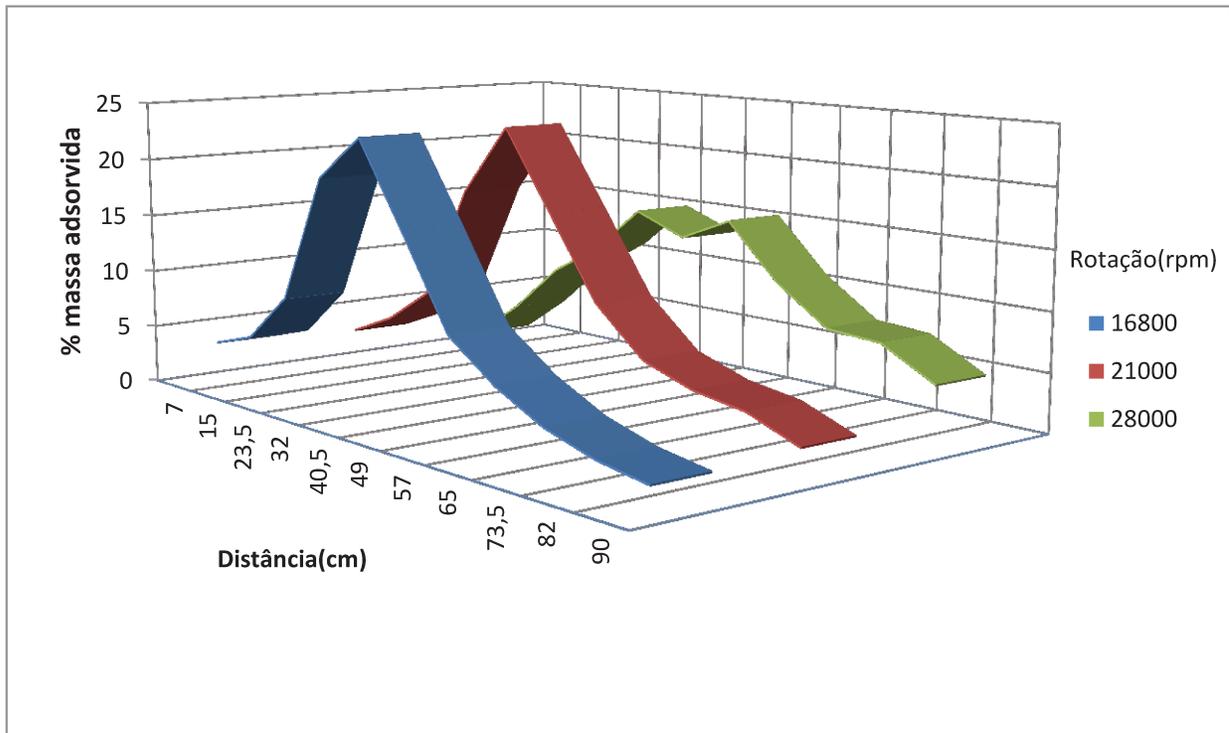


Figura B.1 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura

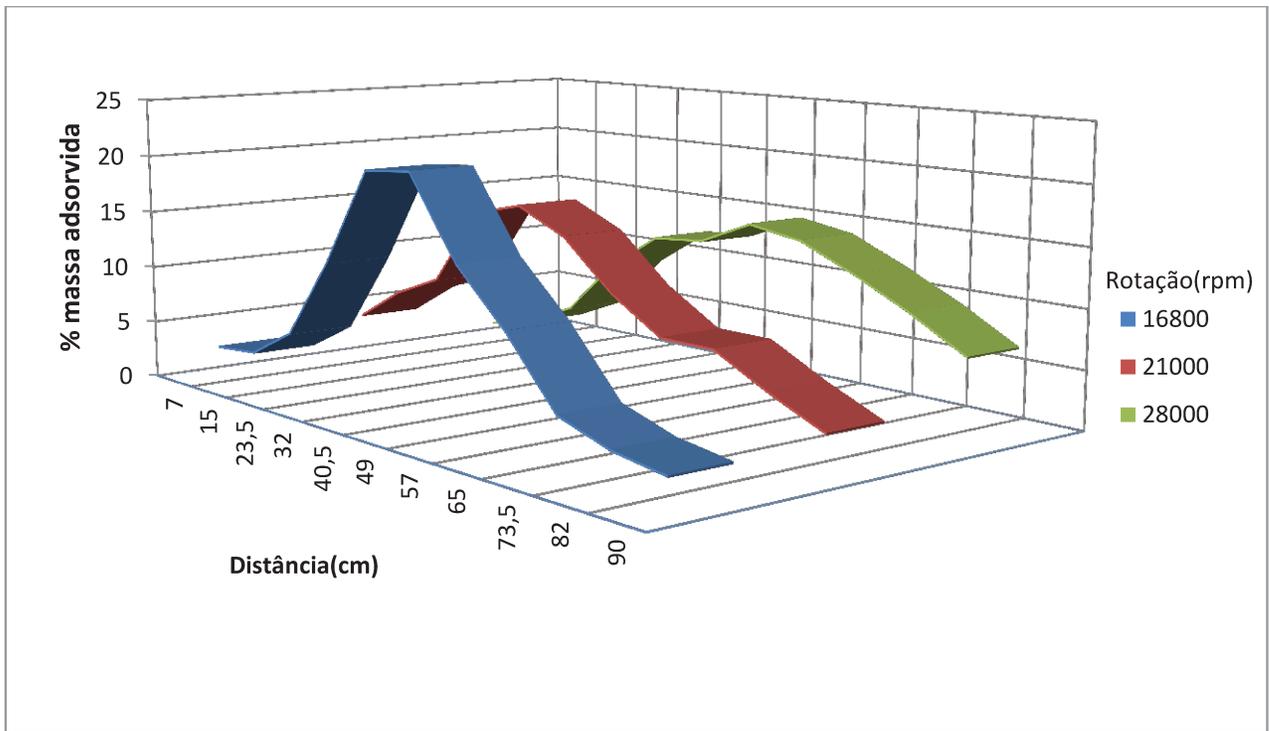


Figura B.2 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura

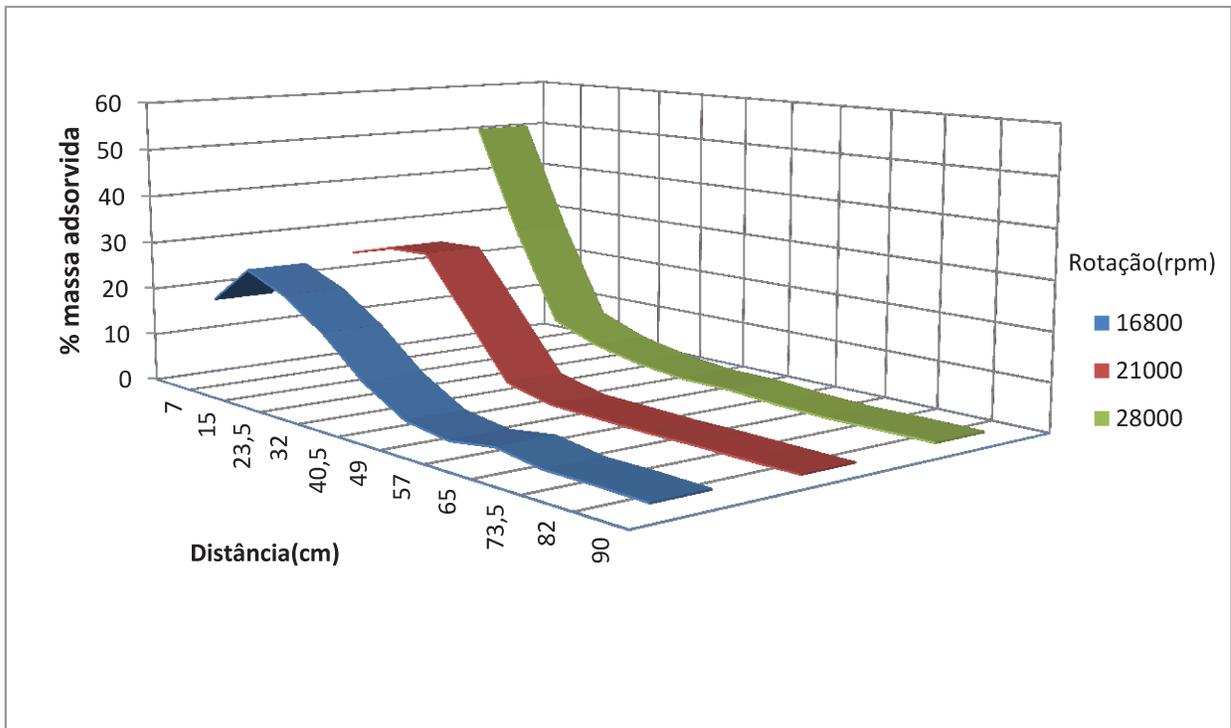


Figura B.3 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura

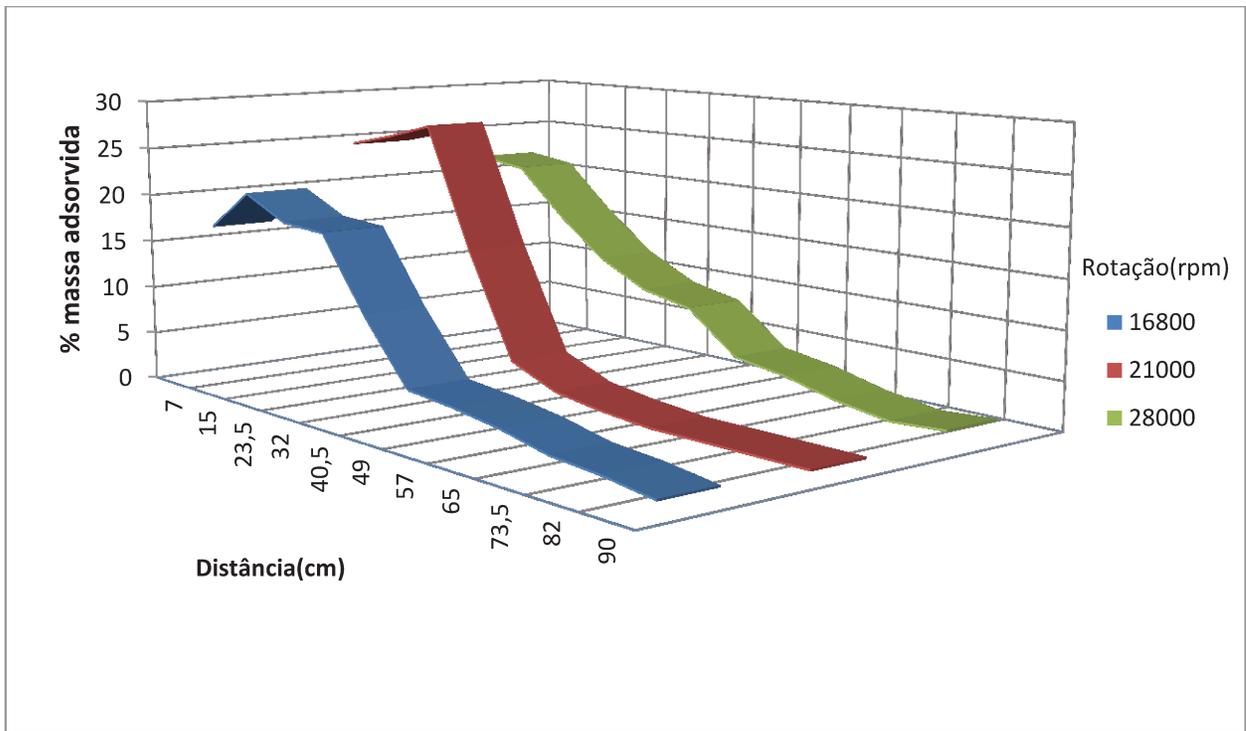


Figura B.4 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura

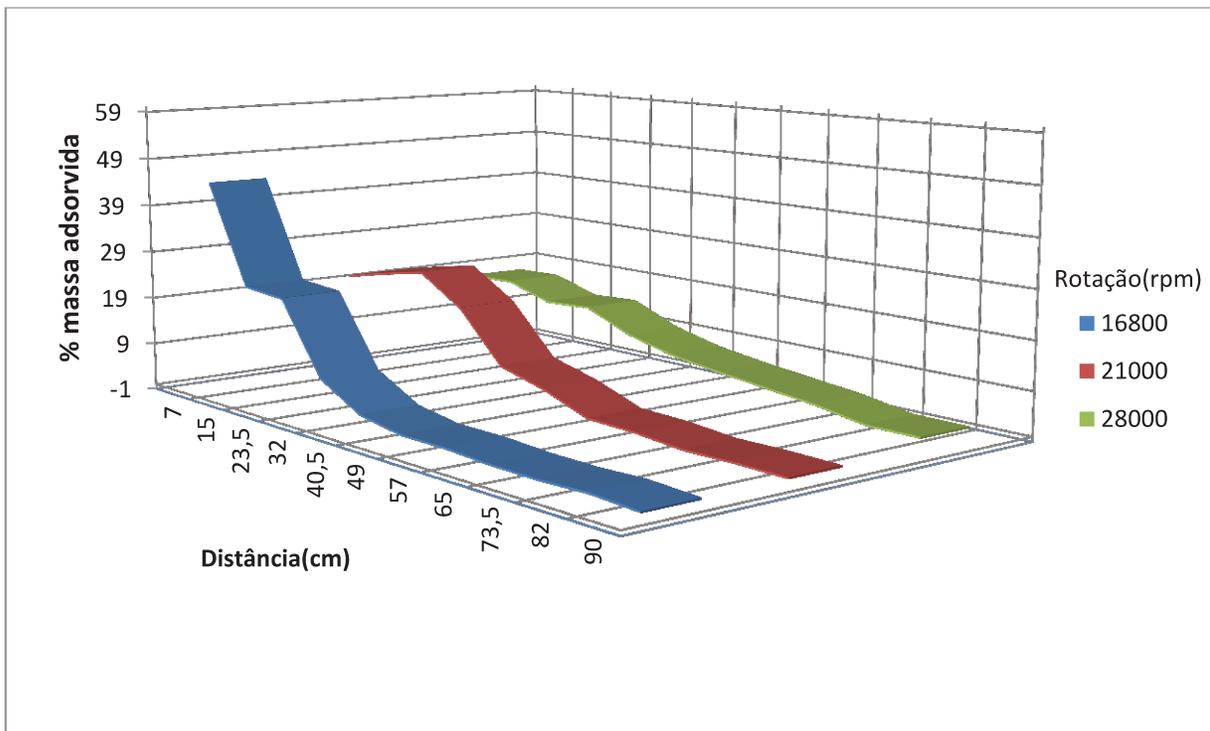


Figura B.5 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura

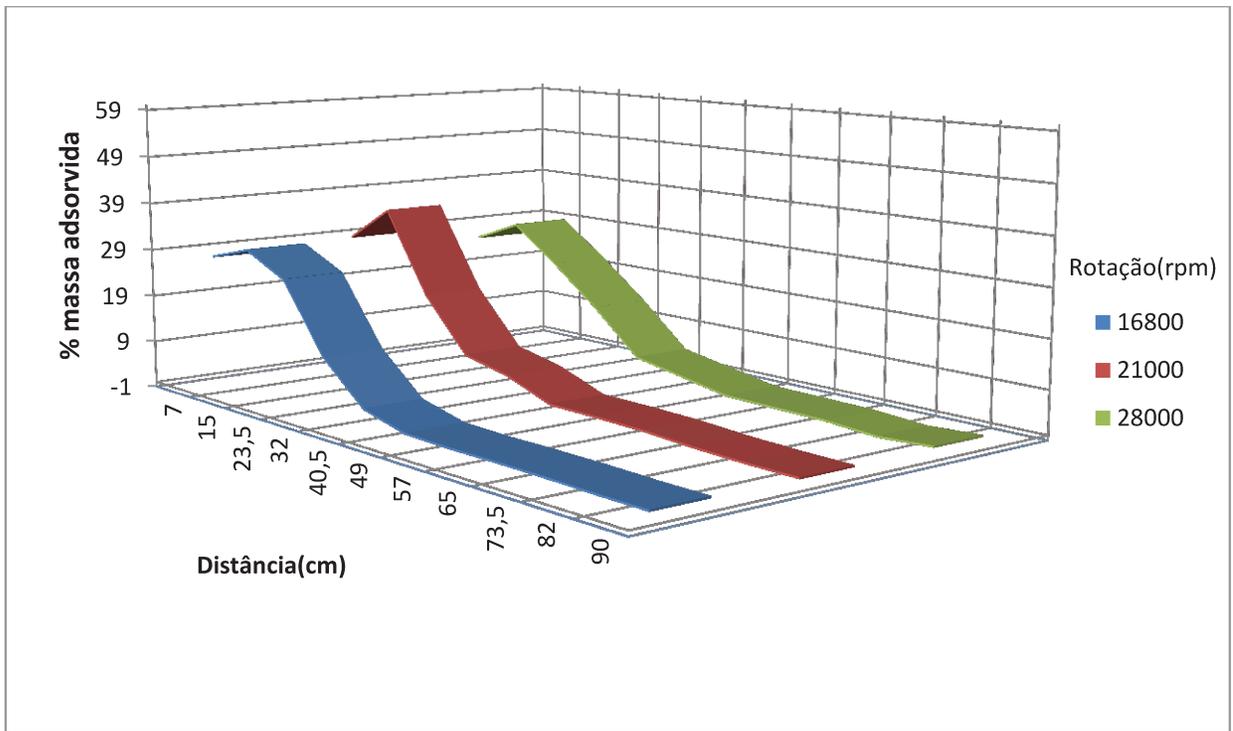


Figura B.6 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura.

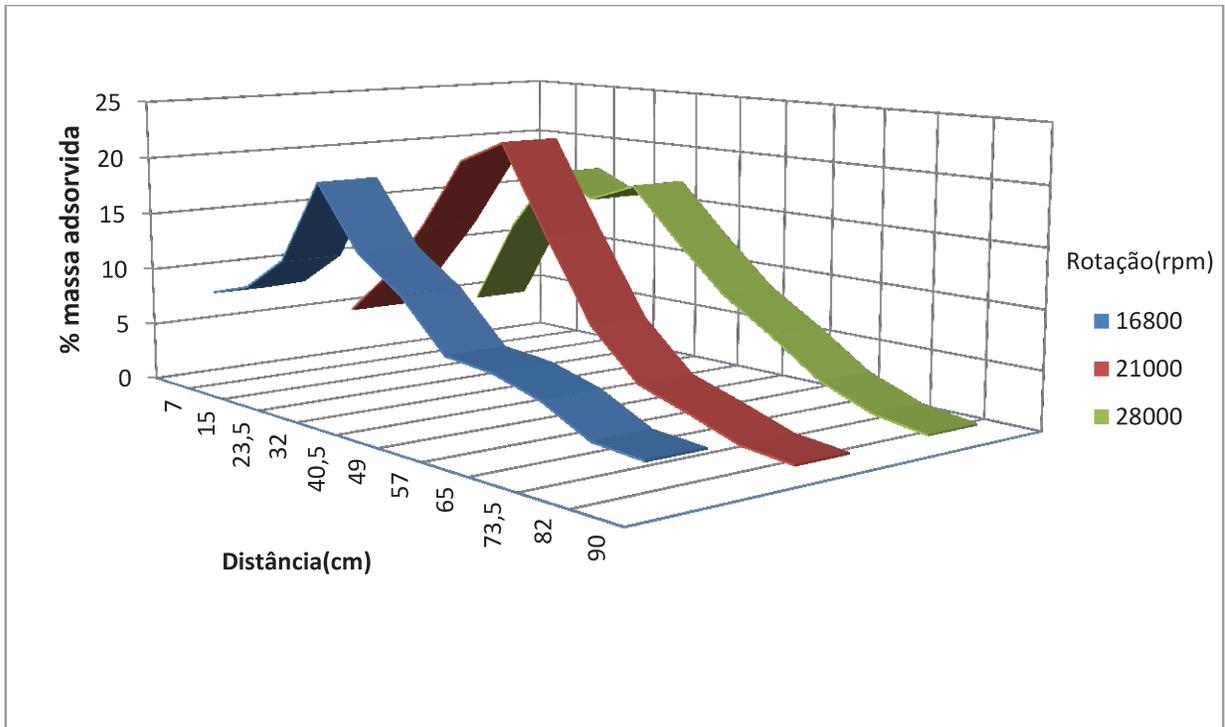


Figura B.7 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura.

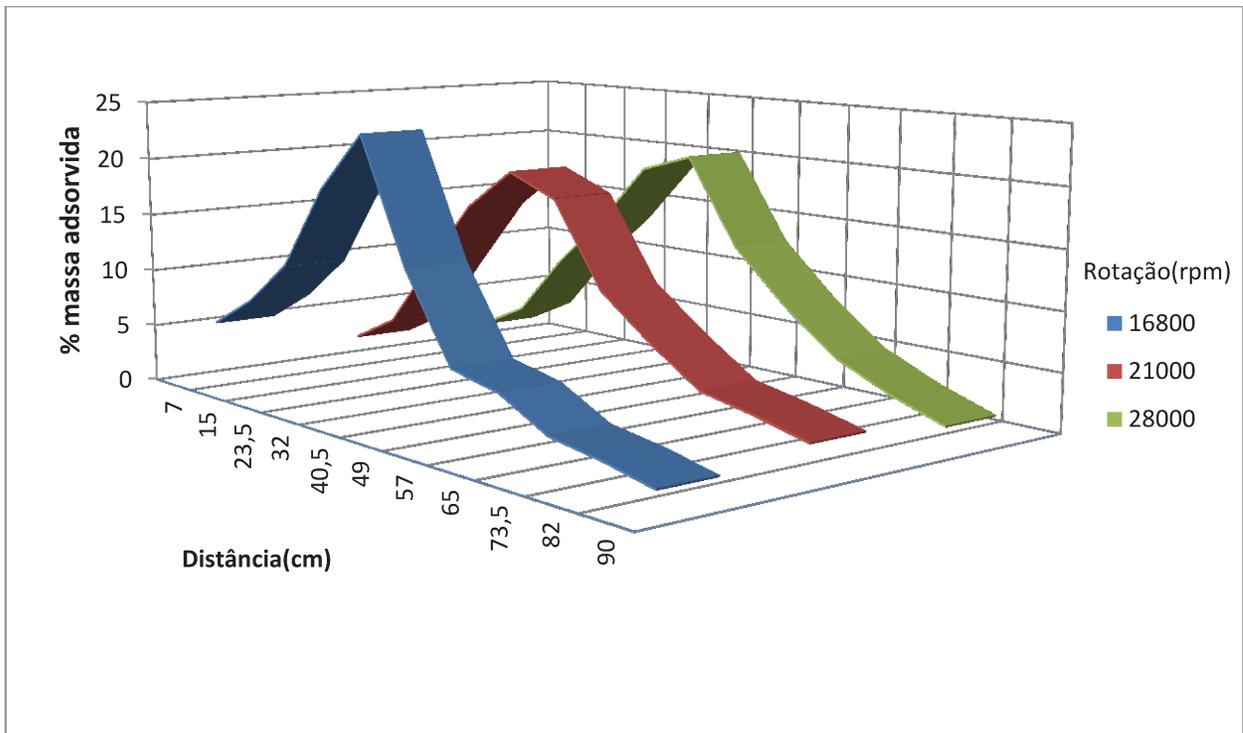


Figura B.8 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura.

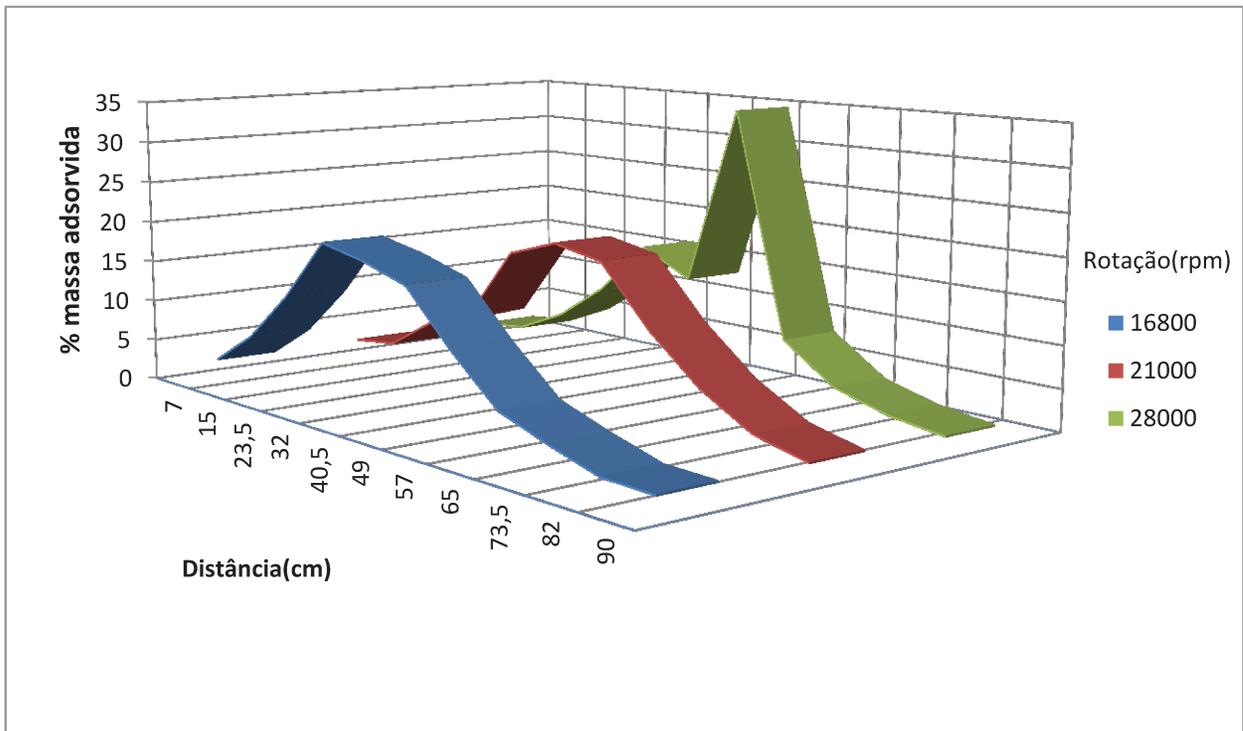


Figura B.9 - Diâmetro do disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura.

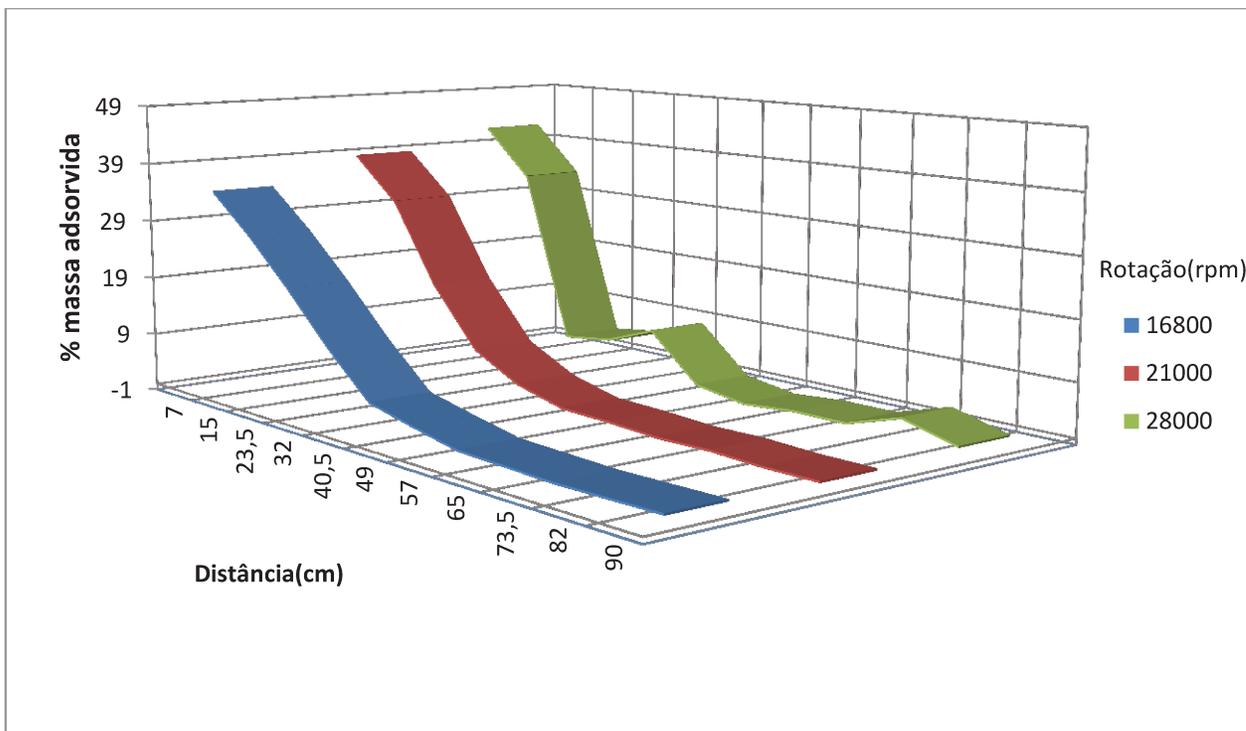


Figura B.10 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura.

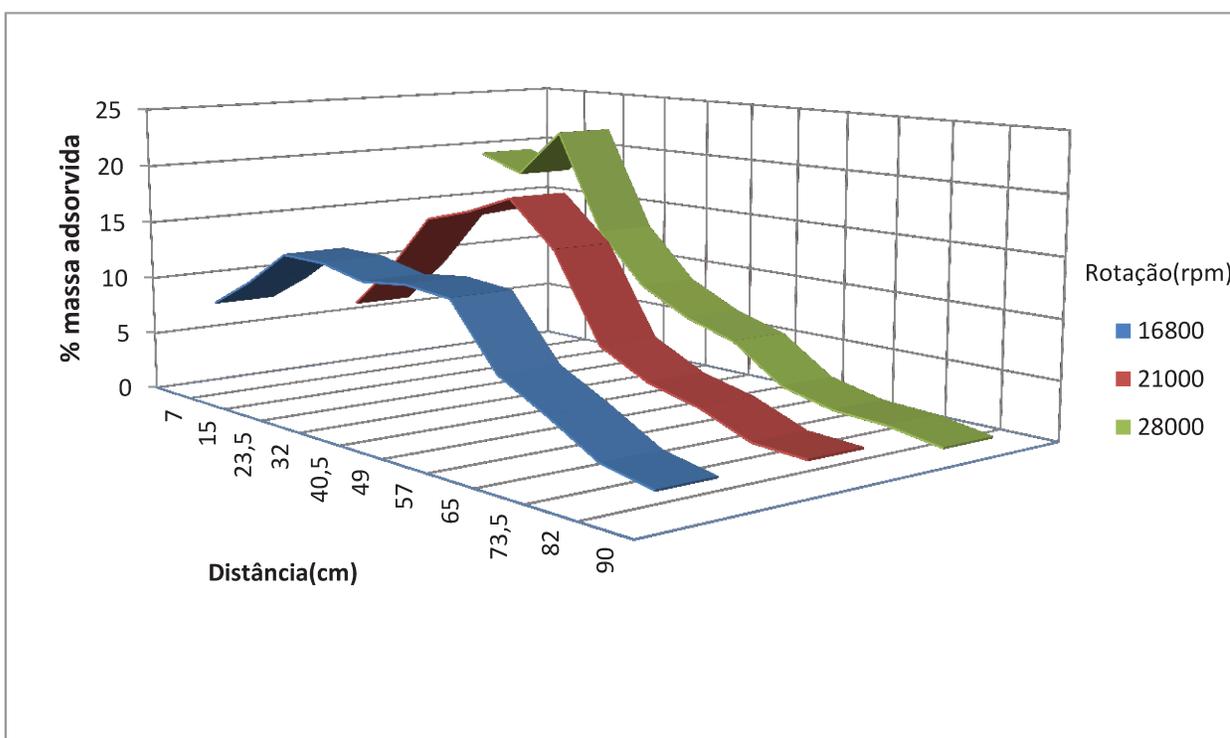


Figura B.11 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura.

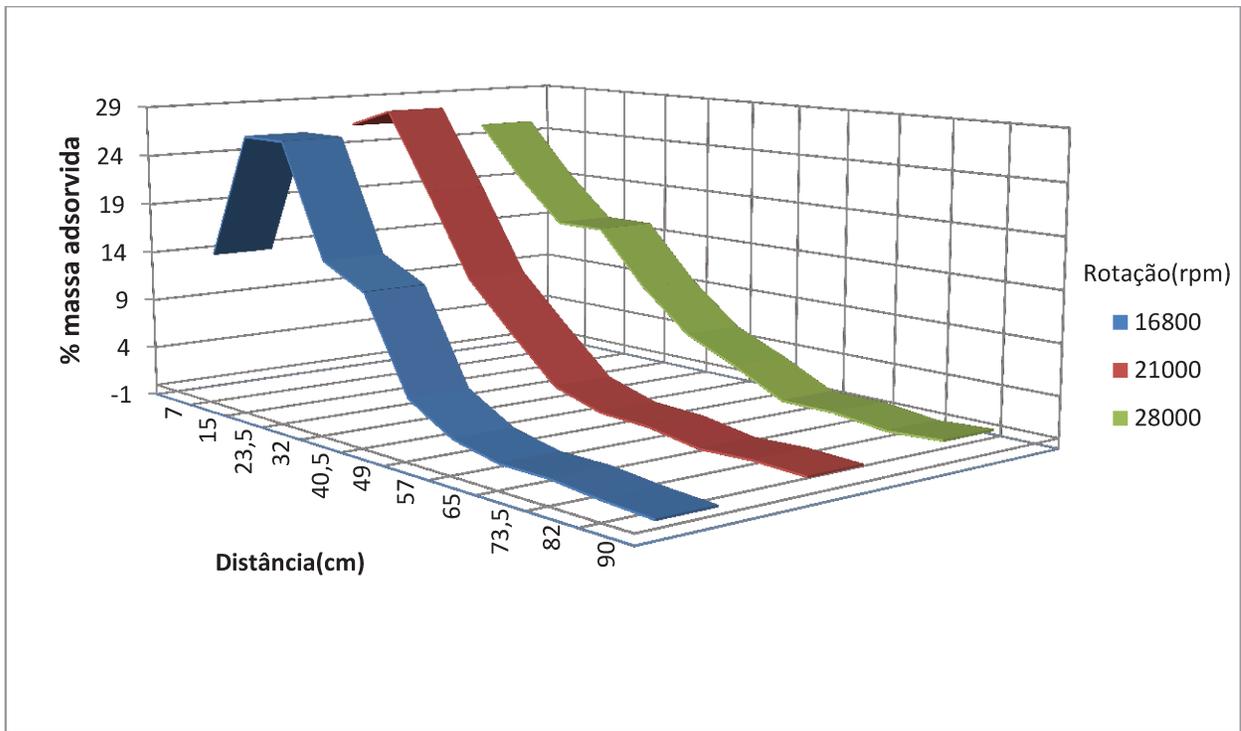


Figura B.12 - Diâmetro do disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura.

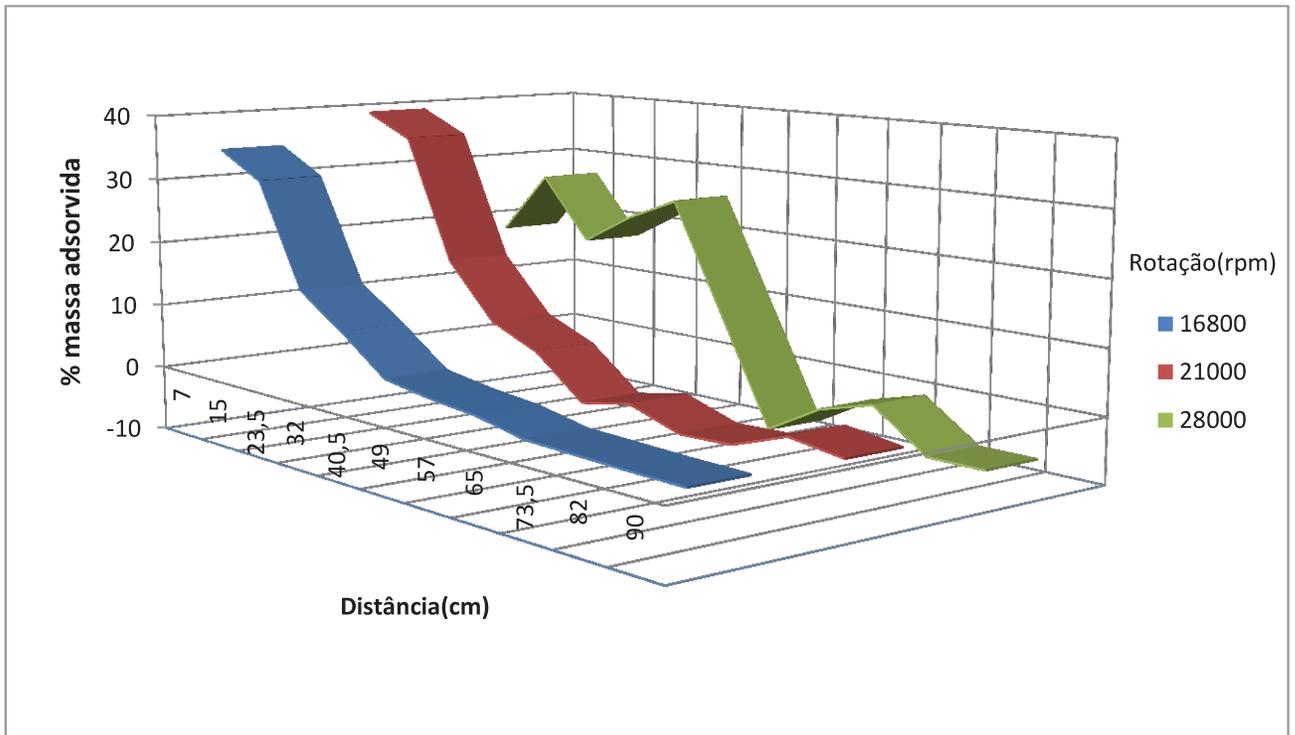


Figura B.13 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 20 cm de altura.

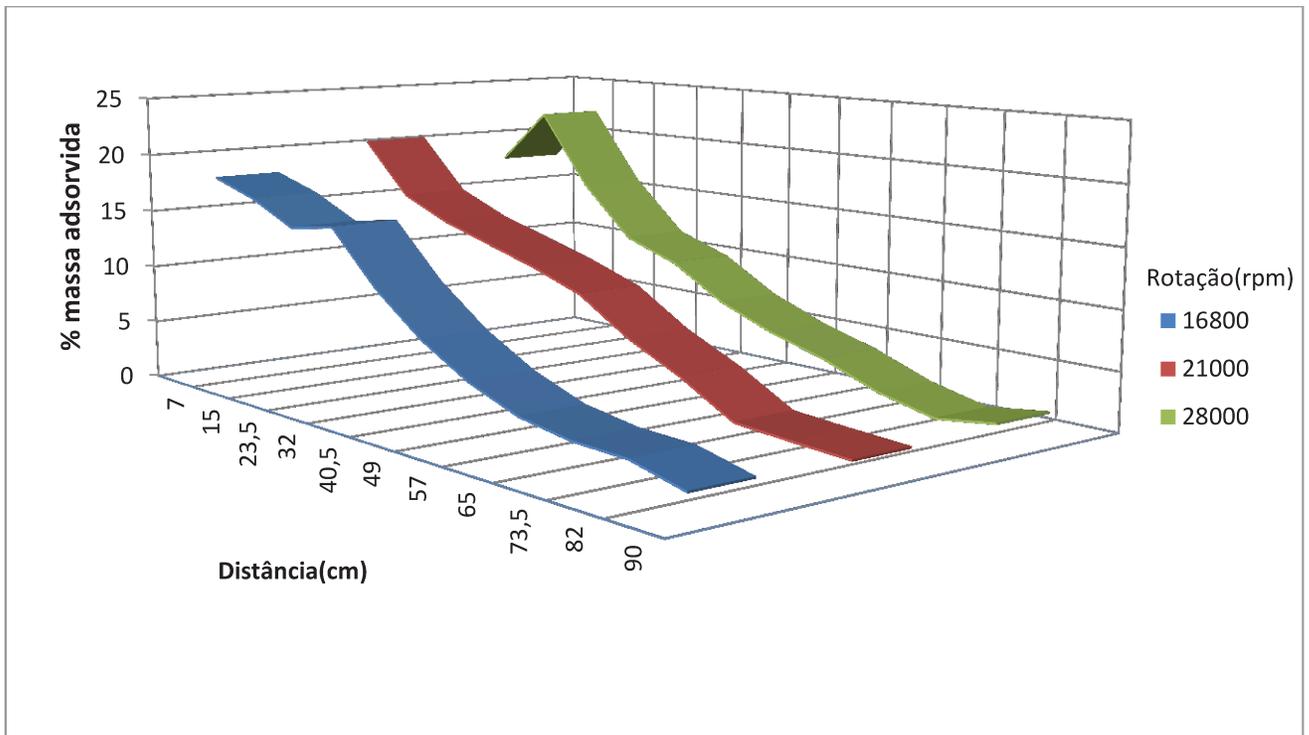


Figura B.14 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 30 cm de altura.

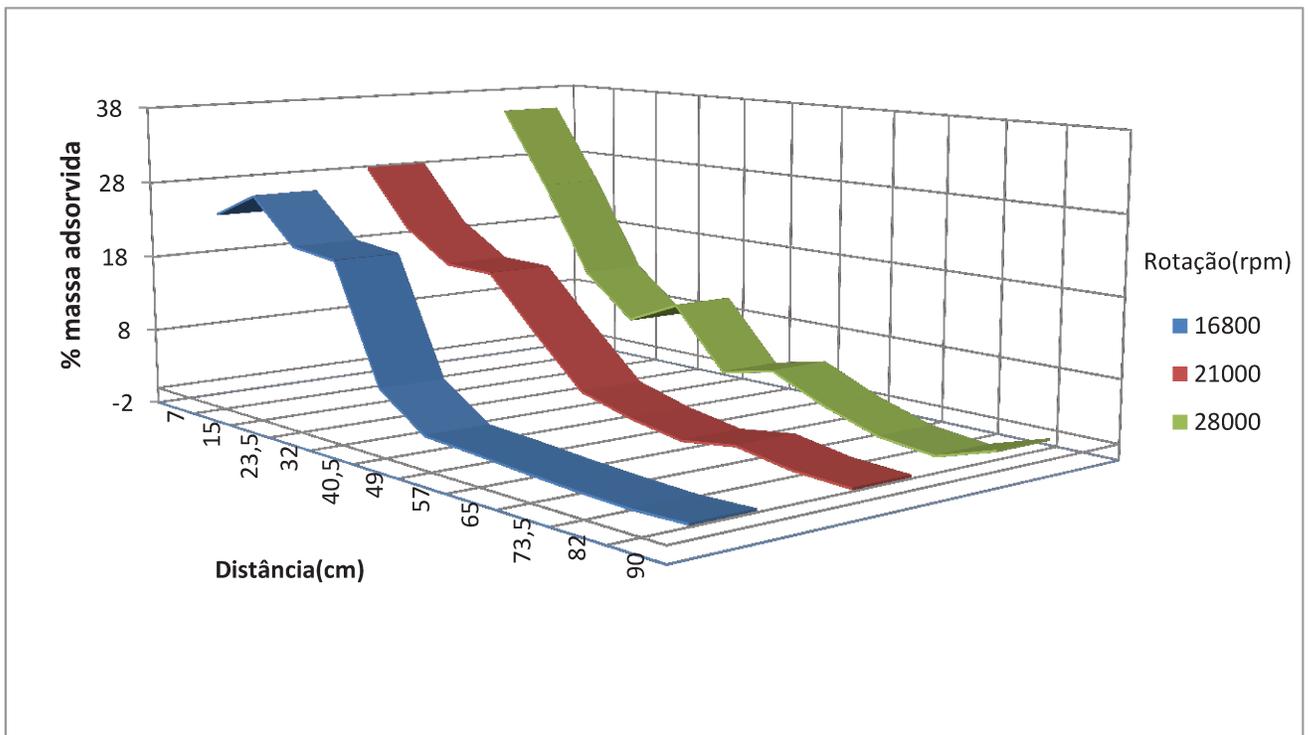


Figura B.15 - Diâmetro do disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, para 40 cm de altura.

8.3 . APÊNDICE C

As Figuras C.01 a C.15 apresentam os gráficos tridimensionais e os modelos gráficos para cada trio de valores de rotação, vazão e disco atomizador.

$$z=a+\text{LORX}(b,c,d)+\text{LORY}(e,f,g)+\text{LORX}(h,c,d)*\text{LORY}(1,f,g)$$

$r^2=0.92004282$ $DF\ Adj\ r^2=0.90819731$ $FitStdErr=2.5176664$ $Fstat=90.40974$
 $a=-0.60982507$ $b=-6.2976963$ $c=-40.009372$ $d=-0.040453751$
 $e=22.238595$ $f=1.0281492e-07$ $g=26.459047$ $h=14.058866$

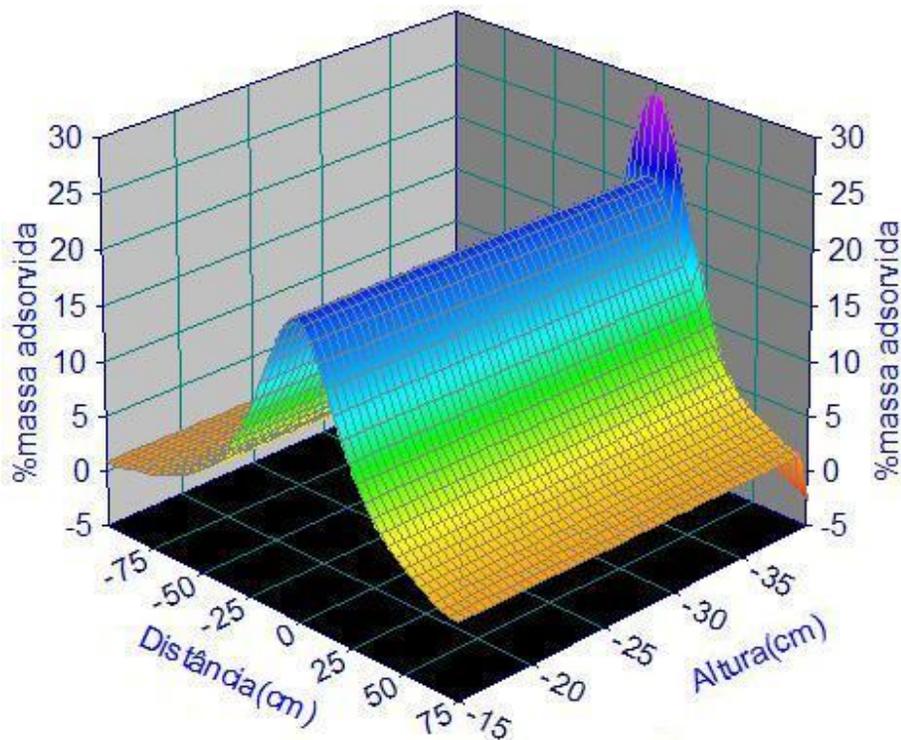


Figura C.1 - Disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 28.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.8530382$ DF Adj $r^2 = 0.83126608$ FitStdErr = 4.6710256 Fstat = 45.606702
 $a = -18.530417$ $b = 20.016576$ $c = -30.869797$ $d = -18.965695$
 $e = 85.462195$ $f = 9.0908569e-19$ $g = 14.193476$ $h = -56.667627$

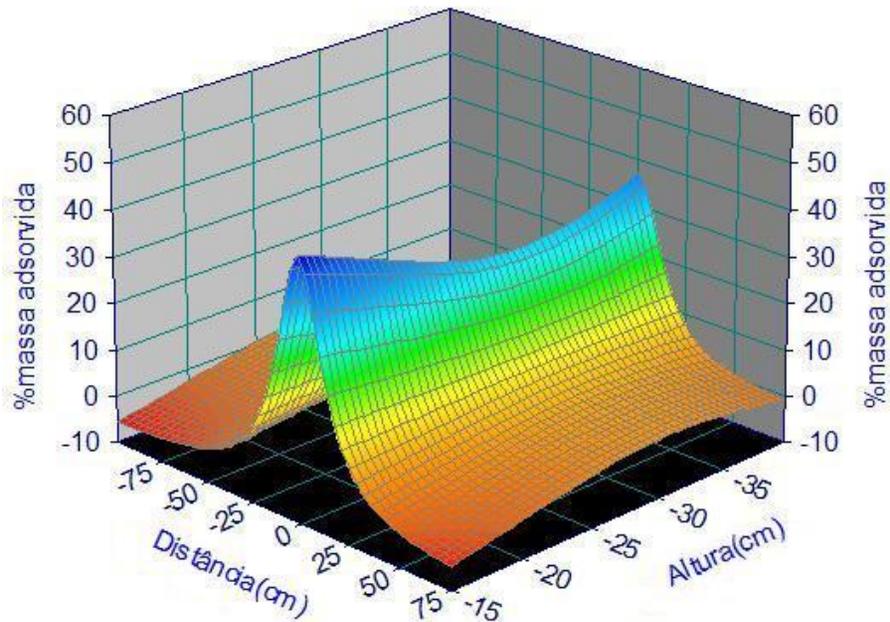


Figura C.2 - Disco de 50 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 21.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.9341562$ DF Adj $r^2 = 0.92440156$ FitStdErr = 2.6708171 Fstat = 111.47288
 $a = 6.4975353$ $b = -9.5069301$ $c = -27.384383$ $d = 8.1956786$
 $e = 13.358294$ $f = -1.3915978e-19$ $g = 11.213177$ $h = 35.610635$

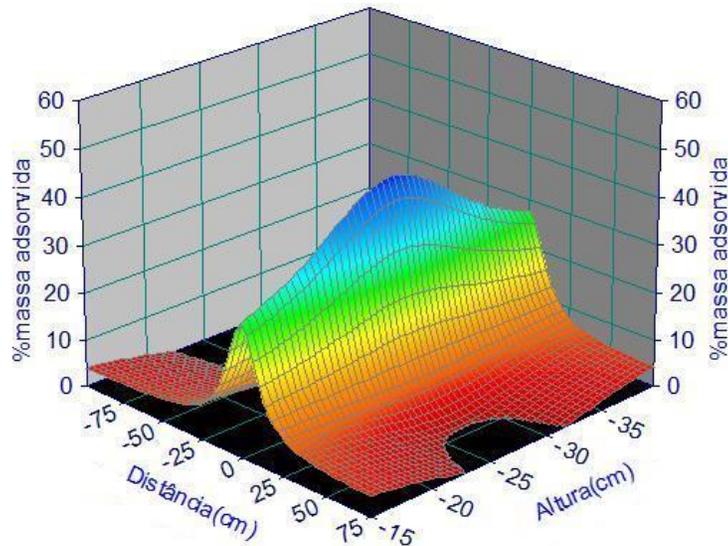


Figura C.3 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 28.000 rpm.

$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$
 $r^2 = 0.87085704$ DF Adj $r^2 = 0.85172475$ FitStdErr = 3.5750763 Fstat = 52.983518
 $a = 0.01230754$ $b = -6.0551135$ $c = -22.568073$ $d = -6.9396799$
 $e = 22.124811$ $f = 4.0700889e-12$ $g = 24.644697$ $h = 14.569075$

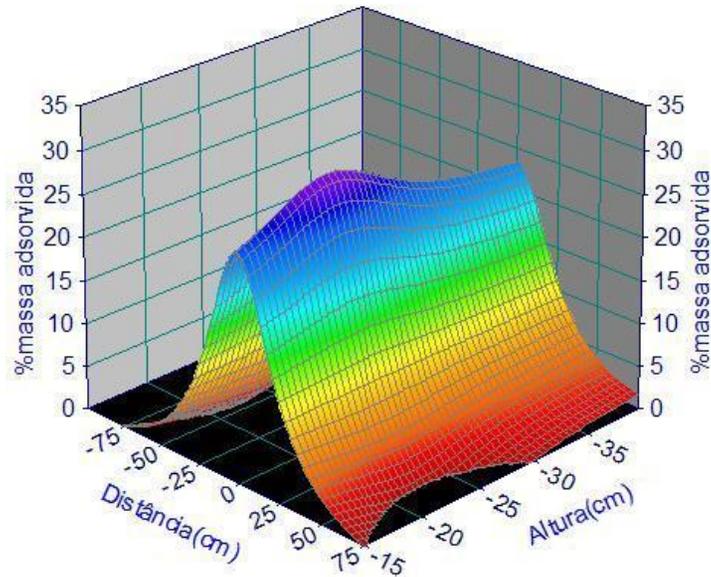


Figura C.4 - Disco de 40 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 16.800 rpm.

$z = a + \text{GAUSSX}(b, c, d) + \text{GAUSSY}(e, f, g) + \text{GAUSSX}(h, c, d) * \text{GAUSSY}(1, f, g)$
 $r^2 = 0.35827289$ DF Adj $r^2 = 0.26320221$ FitStdErr = 5.0808196 Fstat = 4.3866018
 $a = 10.653033$ $b = -3.1496609$ $c = -27.004765$ $d = 17.831398$
 $e = -12.765197$ $f = 29.301196$ $g = 7.1999266$ $h = 29.238686$

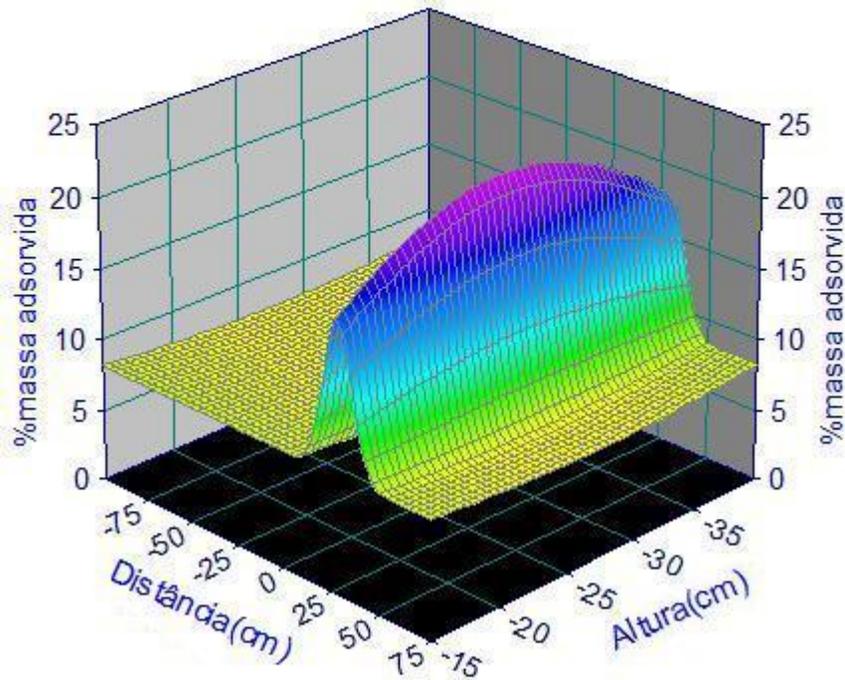


Figura C.5 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 21.000 rpm.

$$z = a + \text{LOGNORMX}(b, c, d) + \text{GAUSSY}(e, f, g) + \text{LOGNORMX}(h, c, d) * \text{GAUSSY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.33429968$ DF Adj $r^2 = 0.23567741$ FitStdErr = 5.9850486 Fstat = 3.9456798
 $a = 10.375884$ $b = -3.0591793$ $c = -27.958425$ $d = 0.75725672$
 $e = -10.457889$ $f = 30.124415$ $g = 7.7250474$ $h = 27.025977$

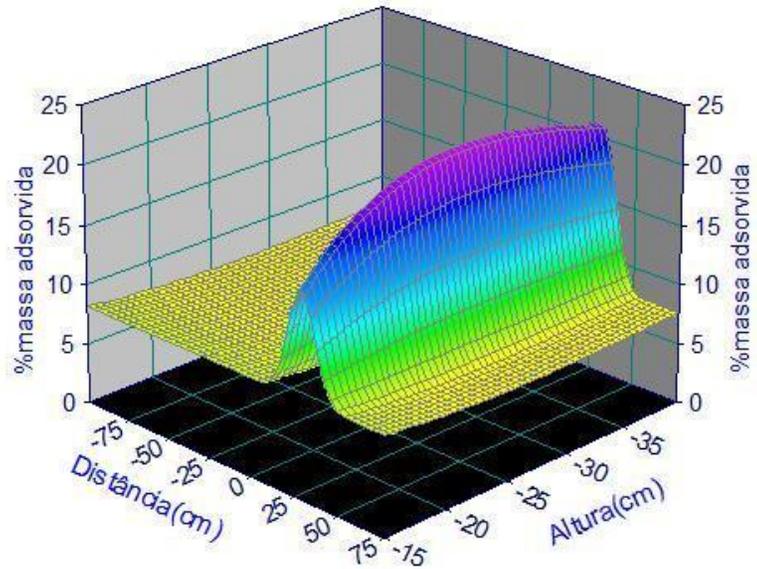


Figura C.6 - Disco de 30 mm, vazão de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 16.800 rpm.

$$z = a + \text{LOGNORMX}(b, c, d) + \text{GAUSSY}(e, f, g) + \text{LOGNORMX}(h, c, d) * \text{GAUSSY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.80919383$ DF Adj $r^2 = 0.78092625$ FitStdErr = 4.7970191 Fstat = 33.32152
 $a = -6.3544391$ $b = 7.4350316$ $c = -32.7401$ $d = 0.17891905$
 $e = 34.321372$ $f = -1.0396916e-19$ $g = 27.208358$ $h = -17.477632$

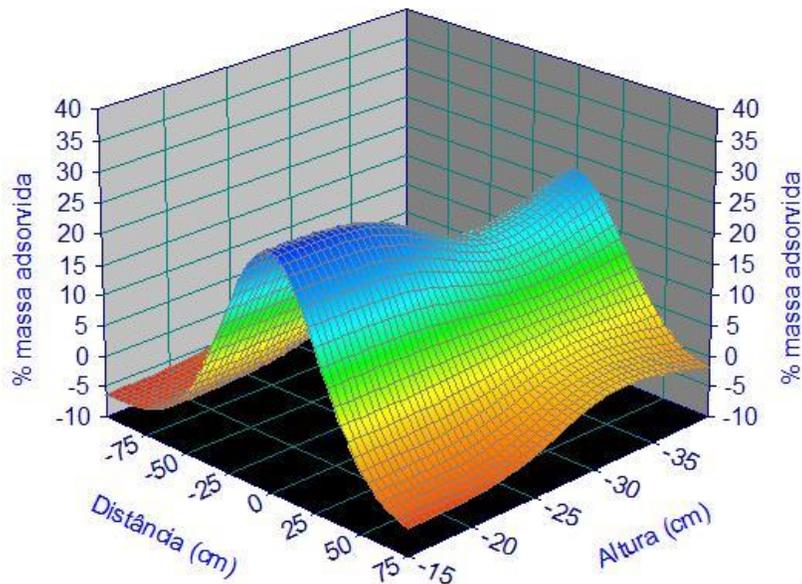


Figura C.7 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 28.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.91356739$ DF Adj $r^2 = 0.90076256$ FitStdErr = 3.0369927 Fstat = 83.0477
 $a = 1.3956423$ $b = -8.7631485$ $c = -20.061454$ $d = 0.12491063$
 $e = 23.260146$ $f = -2.6818221e-20$ $g = 17.450991$ $h = 26.300919$

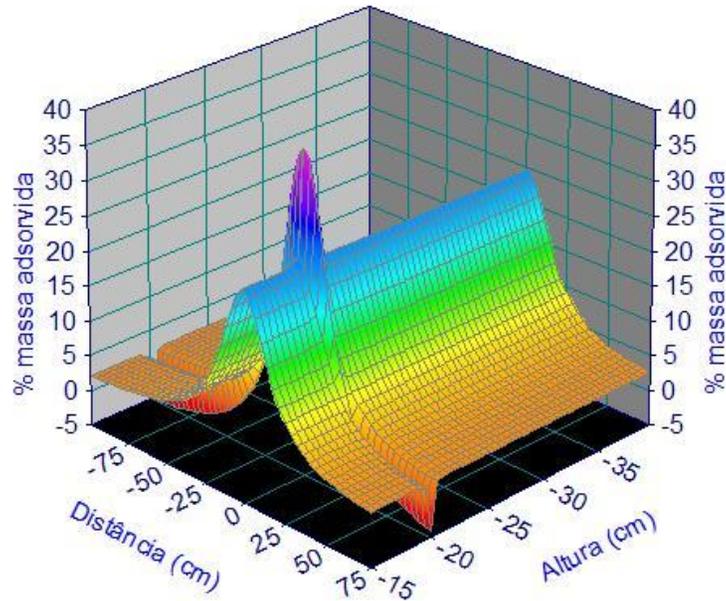


Figura C.8 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 21.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$$

$r^2 = 0.87776933$ DF Adj $r^2 = 0.85966108$ FitStdErr = 3.4813115 Fstat = 56.424127
 $a = -0.87330242$ $b = -4.4624131$ $c = -20.016987$ $d = -0.052909348$
 $e = 26.230554$ $f = -3.6999423e-20$ $g = 21.688815$ $h = 10.425188$

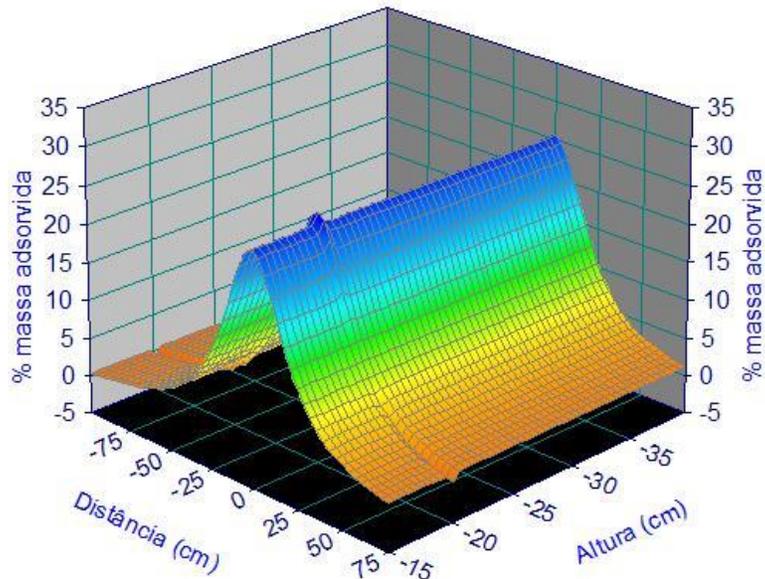


Figura C.9 - Disco de 50 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 16.8000 rpm.

$$z = \text{LORX}(a,b,c) + \text{LORY}(d,e,f) + \text{LORX}(g,b,c) * \text{LORY}(1,e,f)$$

$r^2=0.82506234$ DF Adj $r^2=0.80279755$ FitStdErr=4.1345284 Fstat=44.019007
 $a=-7.7577283$ $b=-20.010394$ $c=-0.010490805$ $d=26.023509$
 $e=-1.3629538e-19$ $f=17.852821$ $g=22.67032$

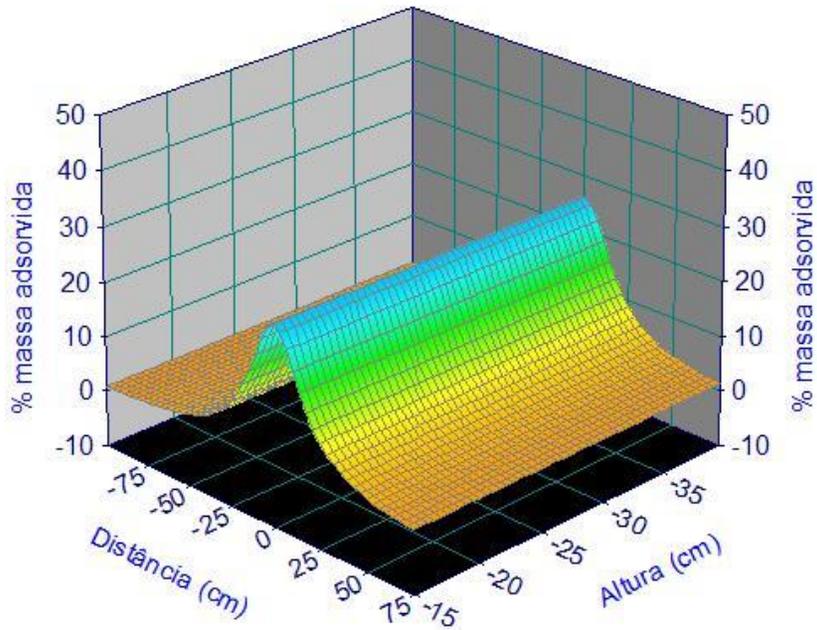


Figura C.10 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 28.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b,c,d) + \text{LORY}(e,f,g) + \text{LORX}(h,c,d) * \text{LORY}(1,f,g)$$

$r^2=0.76406808$ DF Adj $r^2=0.72911521$ FitStdErr=4.9355835 Fstat=25.445443
 $a=1.6054756$ $b=-8.3419393$ $c=-20.02534$ $d=-0.065365787$
 $e=20.945621$ $f=8.9904723e-21$ $g=20.40294$ $h=20.863841$

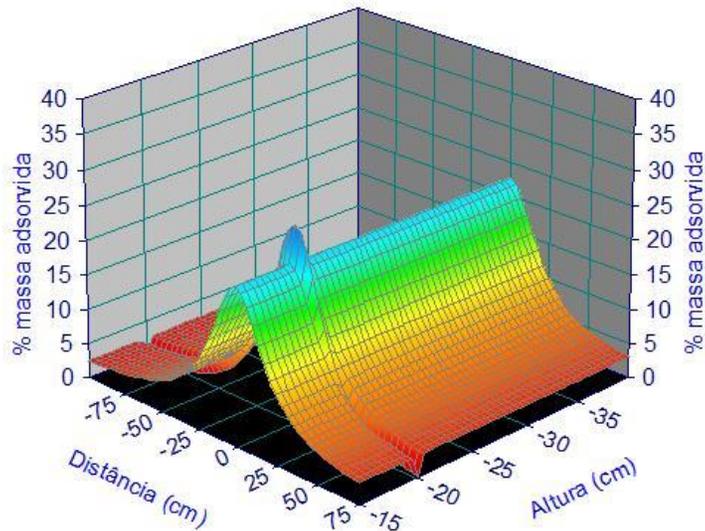


Figura C.11 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 21.000 rpm.

$$z = a + \text{LORX}(b, c, d) + \text{LORY}(e, f, g) + \text{LORX}(h, c, d) * \text{LORY}(1, f, g)$$

$r^2=0.74404486$ DF Adj $r^2=0.70612559$ FitStdErr=4.8007789 Fstat=22.840201
 $a=0.29840141$ $b=-9.8329943$ $c=-20.014906$ $d=-0.03054909$
 $e=20.060014$ $f=-6.7370486e-20$ $g=27.778156$ $h=19.465758$

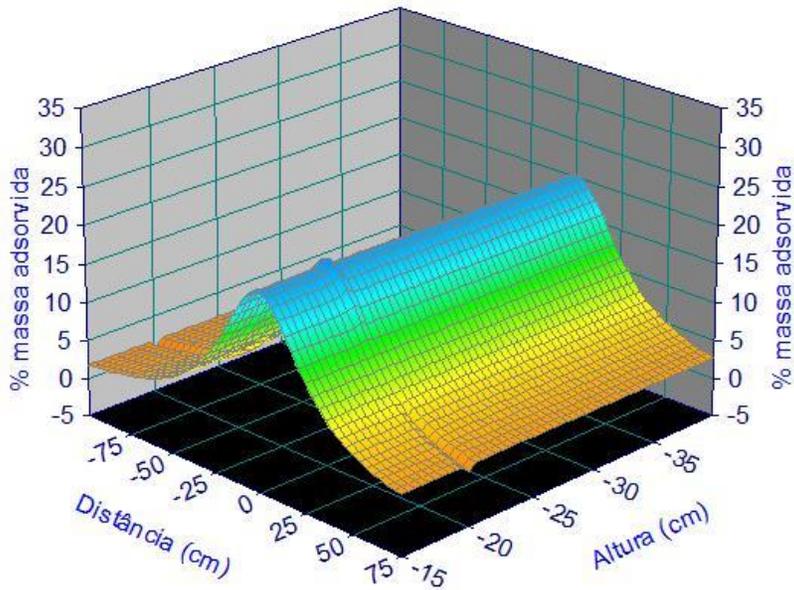


Figura C.12 - Disco de 40 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 16.800 rpm.

$$z = a + b/x + cy + d/x^2 + ey^2 + fy/x + g/x^3 + hy^3 + iy^2/x + jy/x^2$$

$r^2=0.23343582$ DF Adj $r^2=0.086019634$ FitStdErr=7.1550632 Fstat=1.7932975
 $a=8.8098259$ $b=-93.625317$ $c=-3.6061636e-19$ $d=1440.2846$ $e=0.00045314212$
 $f=-2.2453767e-17$ $g=16889.743$ $h=-6.041893e-24$ $i=0.063898778$ $j=-3.0028349e-16$

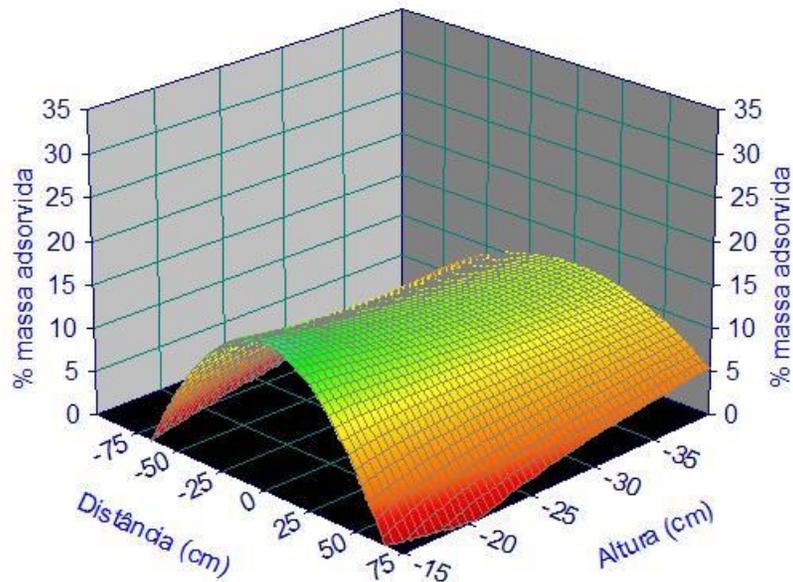


Figura C.13 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, rotação 28.000 rpm.

$z=a+b/x+cy+d/x^2+ey^2+fy/x+g/x^3+hy^3+iy^2/x+jy/x^2$
 $r^2=0.31378172$ DF Adj $r^2=0.18181667$ FitStdErr=6.0279131 Fstat=2.6927666
 $a=7.8773196$ $b=-152.26461$ $c=-2.2572042e-18$ $d=103.84195$ $e=0.00068255197$
 $f=-1.2868955e-16$ $g=3966.8924$ $h=-3.3985648e-24$ $i=0.071333896$ $j=-1.6815875e-15$

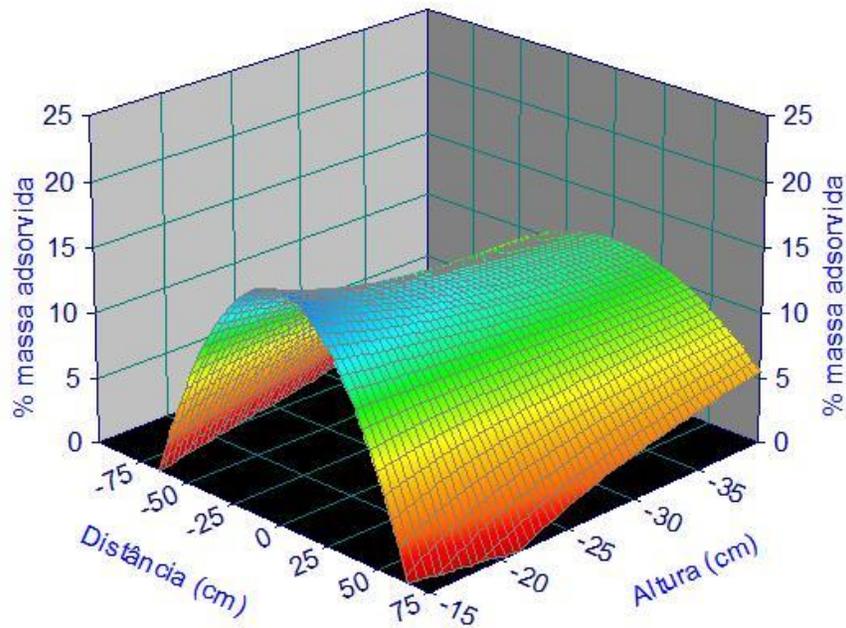


Figura C.14 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 21.000 rpm.

$z=a+b/x+cy+d/x^2+ey^2+fy/x+g/x^3+hy^3+iy^2/x+jy/x^2$
 $r^2=0.45430432$ DF Adj $r^2=0.34936284$ FitStdErr=4.971491 Fstat=4.9026367
 $a=16.53589$ $b=100.08306$ $c=6.3405598e-18$ $d=936.78169$ $e=-0.0030010883$
 $f=3.5988889e-16$ $g=5358.4482$ $h=-3.3041602e-25$ $i=-0.02074313$ $j=4.7144507e-15$

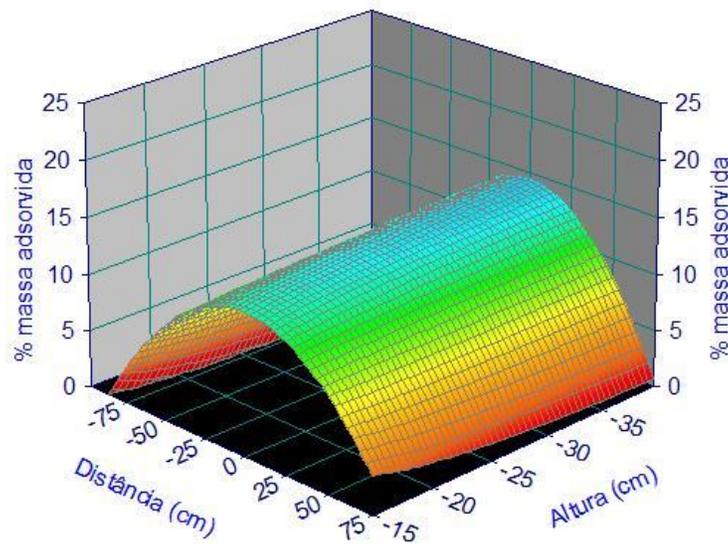


Figura C.15 - Disco de 30 mm, vazão de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h, rotação 16.800 rpm.

8.4 APÊNDICE D

As Figuras D.01 a D.11 apresentam os gráficos tridimensionais com os tamanhos dos raios de pulverização, para cada disco atomizador, vazão de alimentação e rotação.

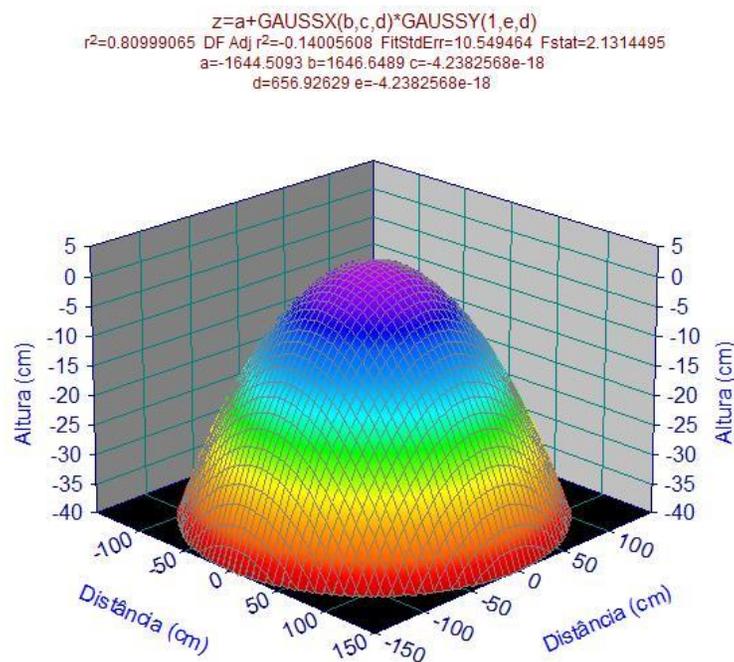


Figura D.1 - Raio de pulverização para disco atomizador de 30 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

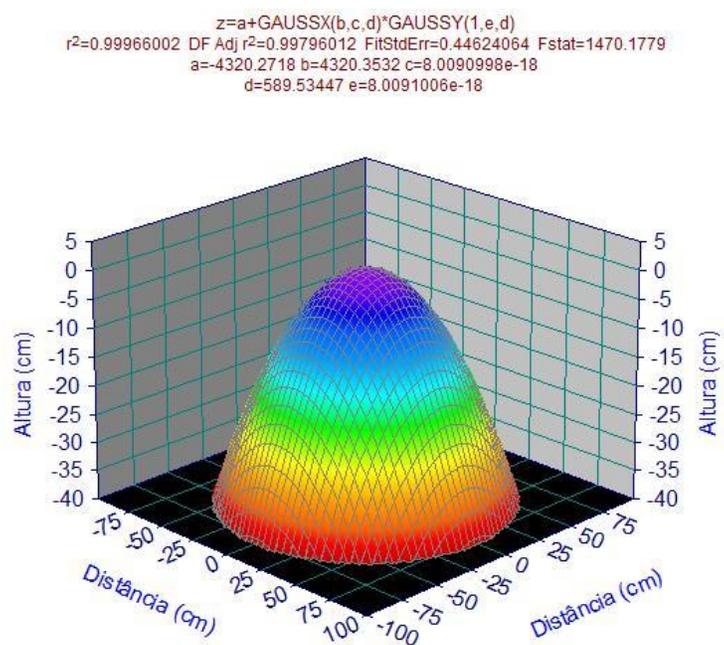


Figura D.2 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

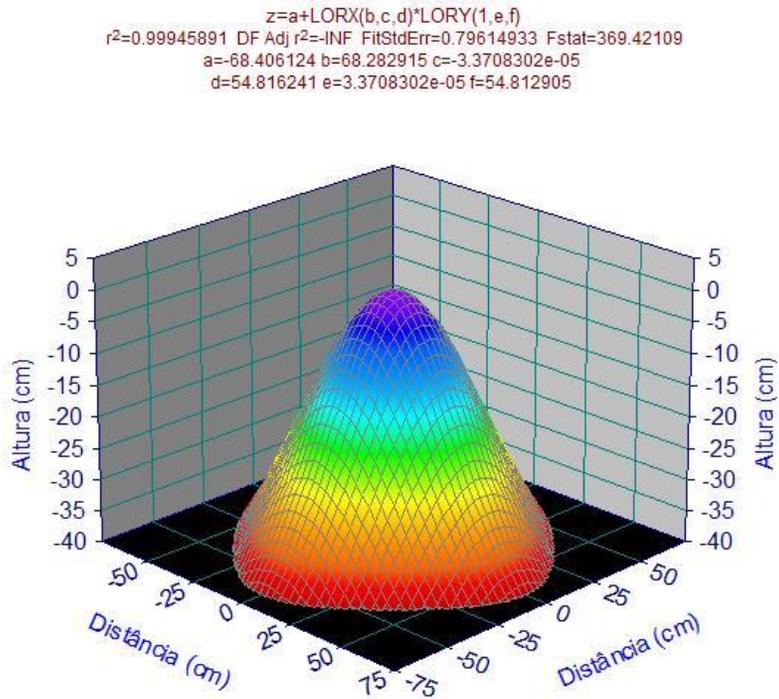


Figura D.3 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 16.800 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

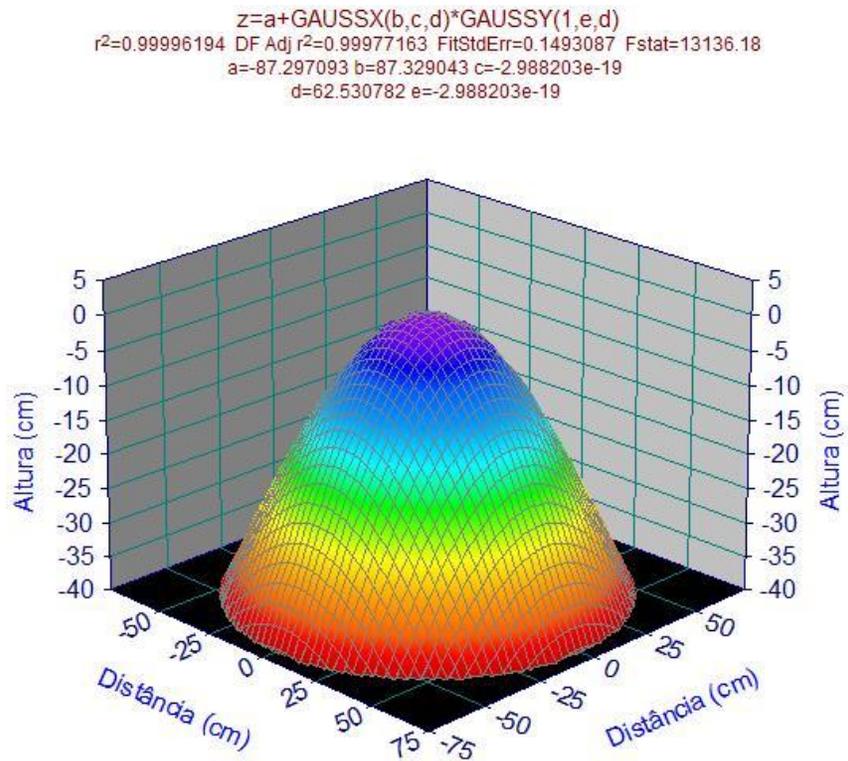


Figura D.4 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

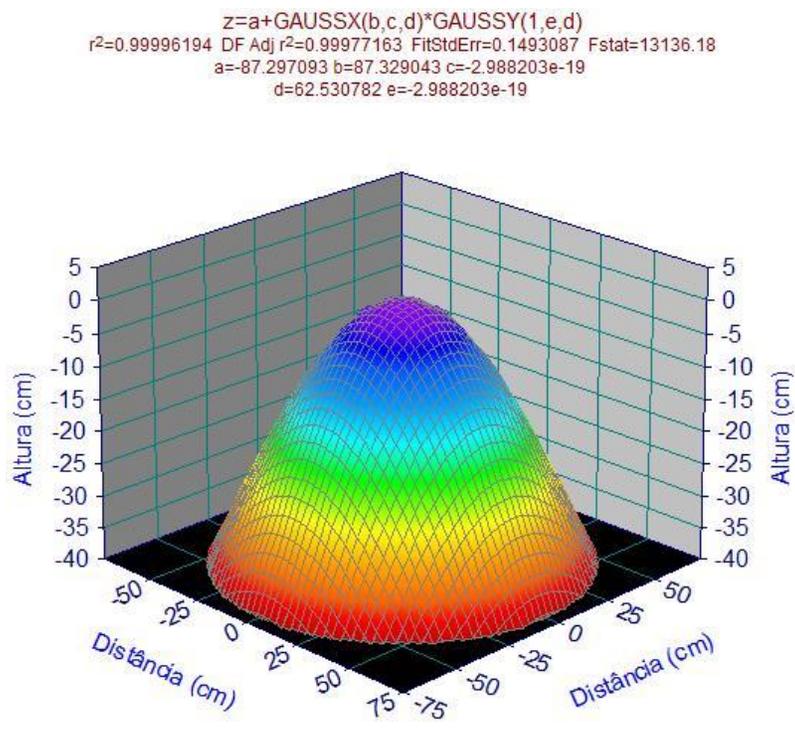


Figura D.5 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

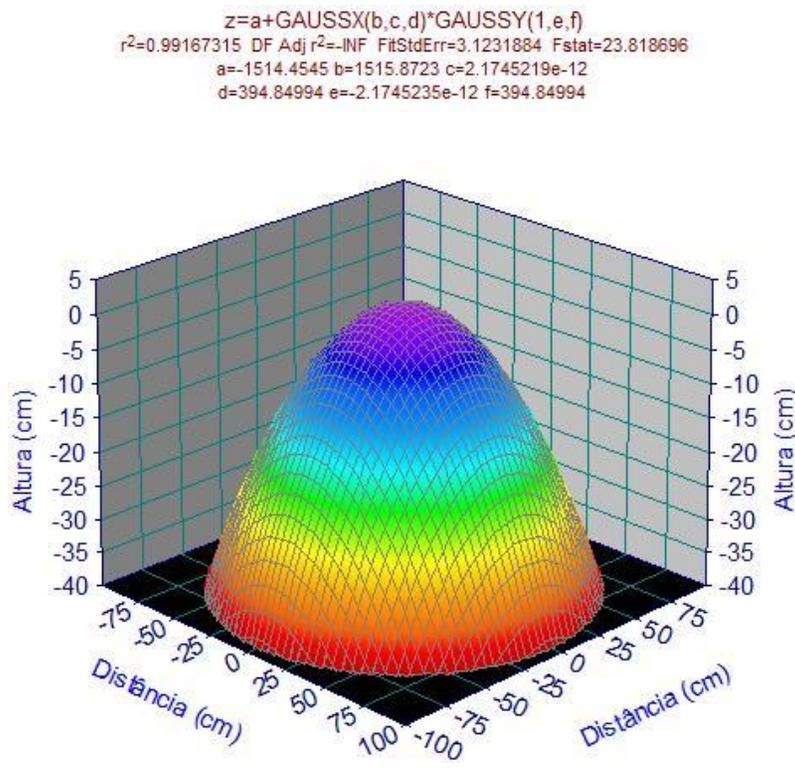


Figura D.6 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

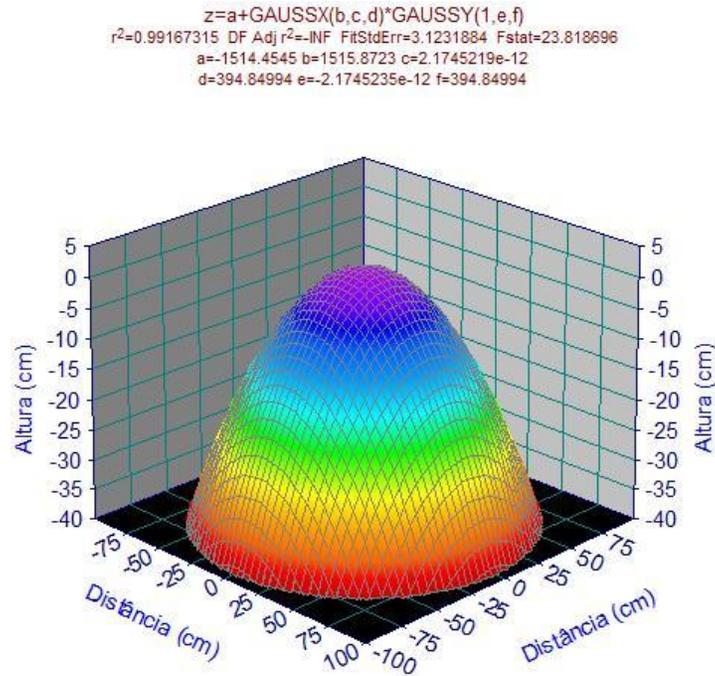


Figura D.7 - Raio de pulverização para disco atomizador de 40 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

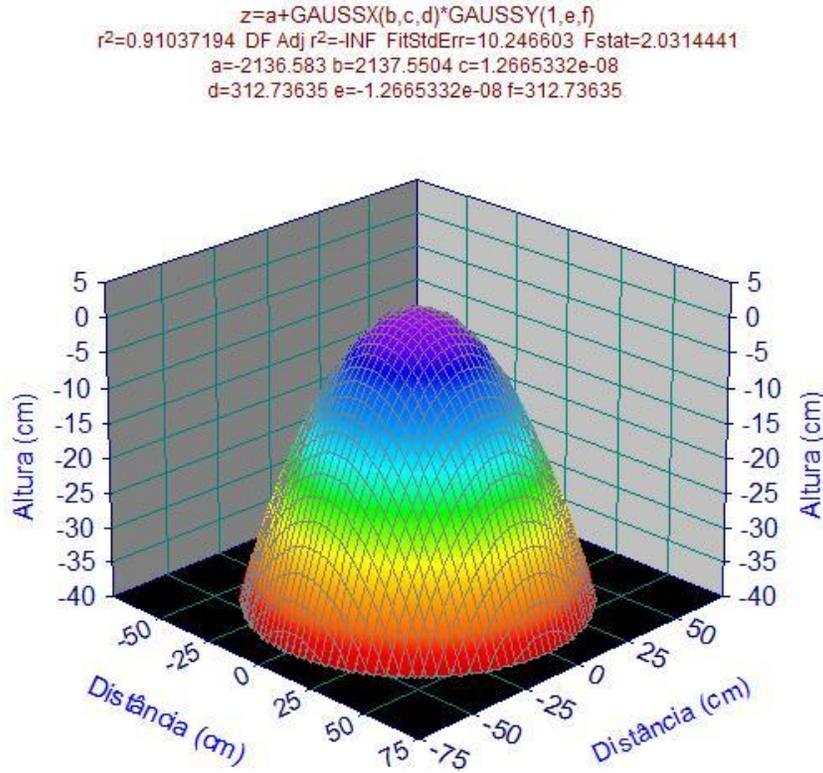


Figura D.8 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$

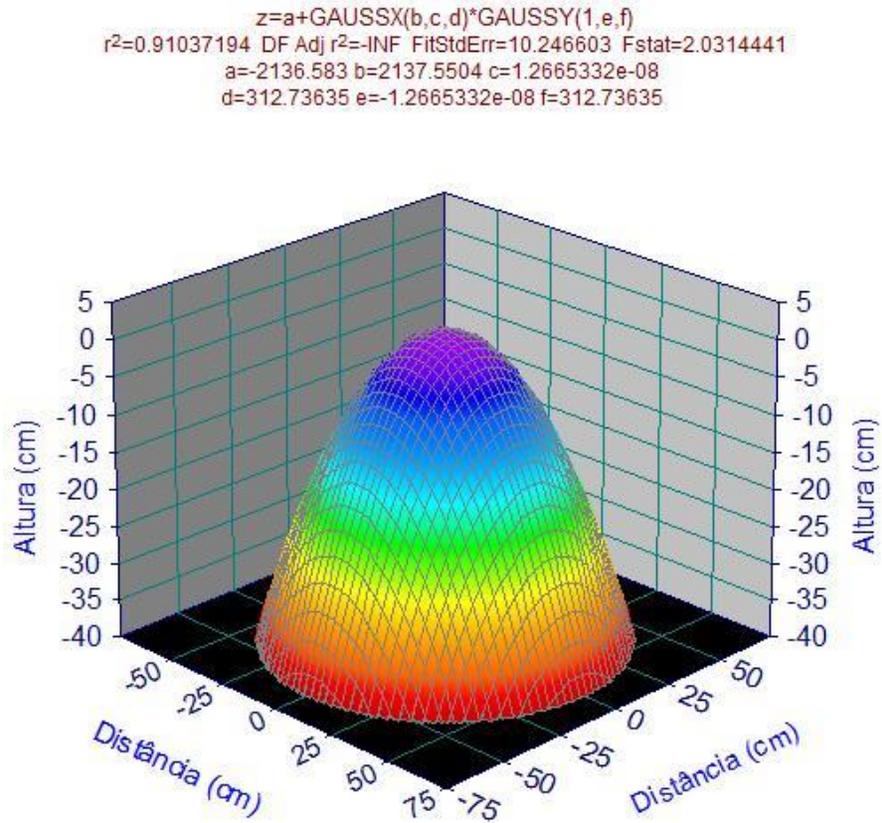


Figura D.9 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 21.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3}$ m³/h

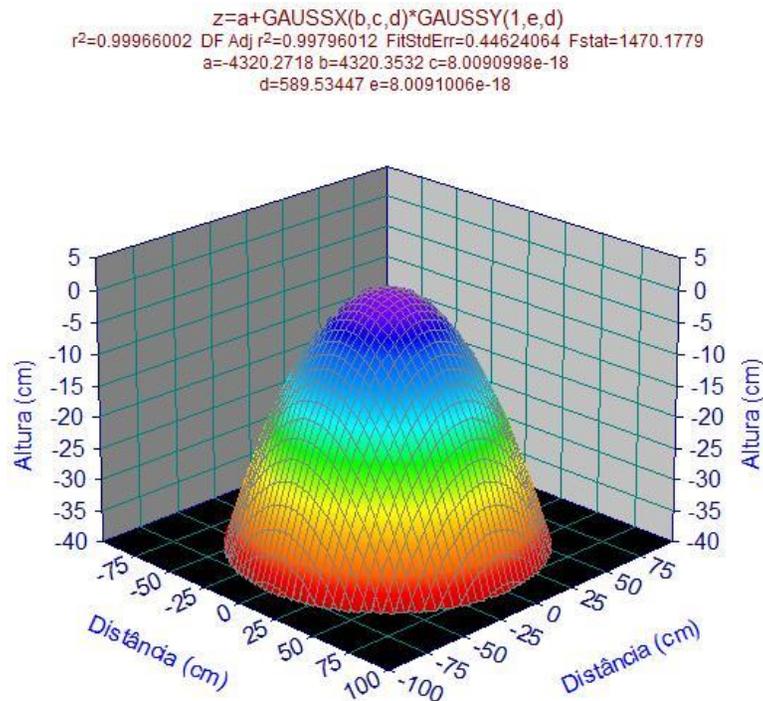


Figura D.10 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $2,88 \cdot 10^{-3}$ m³/h

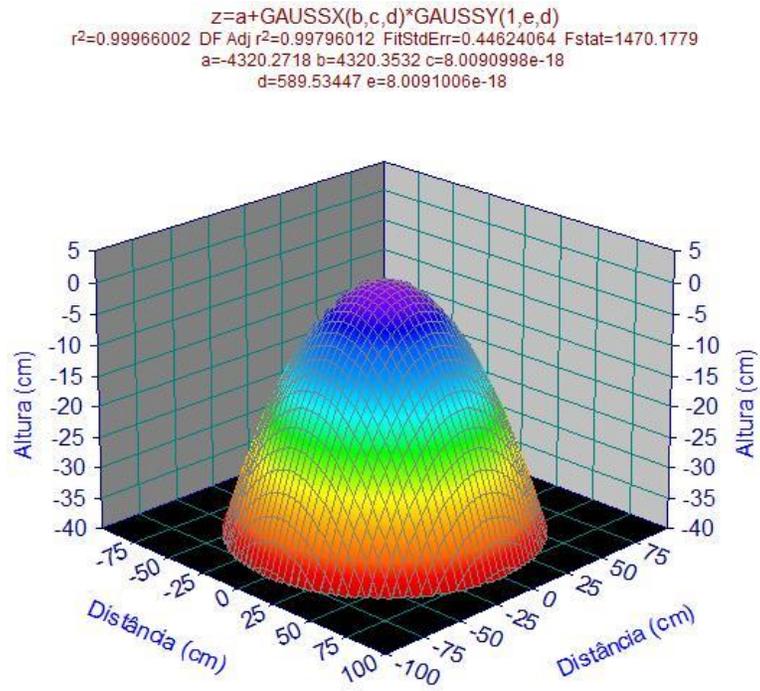


Figura D.11 - Raio de pulverização para disco atomizador de 50 mm, rotação de 28.000 rpm e vazão de alimentação de $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$