



FABIANO DE CARVALHO

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DE UM *SPRAY DRYER* PILOTO**

**LAVRAS - MG
2012**

FABIANO DE CARVALHO

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM *SPRAY*
DRYER PILOTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

**LAVRAS - MG
2010**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Carvalho, Fabiano de.

Construção e avaliação de desempenho de um *spray dryer* piloto
/ Fabiano de Carvalho. – Lavras : UFLA, 2012.

167 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Bibliografia.

1. Secador piloto. 2. Atomização centrífuga. 3. Ovo em pó. 4.
Maltodextrina. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 664.0284

FABIANO DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE *SPRAY DRYER* PILOTO PARA
PRODUÇÃO DE OVO EM PÓ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de janeiro de 2011

| | |
|------------------------------------|------|
| Dr. Alexandre de Paula Peres | UFLA |
| Dr. Jaime Vilela Resende | UFLA |
| Dra. Lanamar de Almeida Castro | UFSJ |
| Dra. Monica Elisabeth Torres Prado | UFLA |

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador

**LAVRAS – MG
2010**

AGRADECIMENTOS

Esta tese doutoral não seria realizável se não existissem pessoas e instituições que, de uma forma ou de outra, se dispusessem a prestar auxílio na direção de superar os múltiplos desafios. São para essas pessoas e instituições, citados a seguir, que desejo expressar meu mais sincero agradecimento.

São elas: Professor Doutor Jefferson Luiz Gomes Corrêa, meu orientador e, acima de tudo, um grande amigo, cuja sabedoria, confiança e entusiasmo me foram aliados benfazejos.

Irmãos Marcelo, Murilo e Alessandra, sempre presentes, condescendentes e de quem sempre se esperara um gesto afetivo.

Colegas e amigos do DCA, Lisa Maria Garcia Botega, Gerson Marques e Joyce Maria, por quem tenho sentimentos de admiração e gratidão, fortalecidos diante de tanta ajuda.

Professores Dra. Fabiana Queiroz Ferrua e Dr. Alexandre de Paula Peres, por me ajudarem a chegar às respostas e pelas provas de amizade.

Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras por me proporcionar uma etapa importantíssima na minha vida profissional.

Instituto Federal de Rondônia e Instituto Federal do Espírito Santo pela compreensão e apoio.

A Empresa - ASA - Aviário Santo Antônio, pela doação de matéria-prima.

CAPES pelo amparo financeiro.

A todos, intensamente, ofereço o meu melhor obrigado!

Agradeço também àqueles que me fizeram críticas mais severas. Eles impulsionaram-me a procurar o êxito a todo o momento.

EPIGRAFE

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito, que nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta, que não conhece vitória, nem derrota”.

(Theodore Roosevelt)

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem olhos abertos para o mistério passará pela vida sem nada ver”.

(Albert Einstein)

Ofereço, cheio de amor, à Patrícia, pessoa de beleza integral e companheira há tanto tempo. O seu sorriso aberto, seu amor vivo e sua admirável dedicação foram essenciais nas horas de controvérsia e dificuldade, mas a sua fé no meu valor foi fundamental: deu-me luz para oferecer o meu melhor, em mais alto grau.

Aos meus filhos Thiago, Bruna e Felipe, razão da minha mais nobre devoção, para que nunca percam a curiosidade e a confiança neles; para que (também!) aprendam a lutar por um ideal, com inteligência e Deus no coração.

Aos meus pais (in memoriam) que não puderam ver – outra vez, que tristeza! –, que aprendi, mesmo com as minhas limitações, através de intensa, por vezes solitária e silenciosa experiência ... Cumpri com minha missão! O caminho foi árduo, duras foram as batalhas, mas gratificante a qualquer tempo... Valeu a pena!

DEDICO

RESUMO

Este trabalho objetivou avaliar o desempenho de um *spray dryer* em escala piloto, projetado para a secagem de ovos, instalado no Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), verificando-se como algumas condições operacionais da secagem afetam a qualidade dos ovoprodutos. Usaram-se três materiais úmidos: ovo líquido integral pasteurizado, ovo integral líquido pasteurizado homogeneizado com solução aquosa de maltodextrina 10 DE (10% e 15%, em massa) e ovo integral líquido pasteurizado homogeneizado com solução aquosa de maltodextrina 20 DE (15% em massa), em volumes que variaram de 10 a 20 litros. Avaliadas algumas temperaturas do ar de entrada, usando água na alimentação, a menor temperatura foi 270°C. Nessa temperatura, usando os produtos de ovos na alimentação, registrou-se uma temperatura de saída de 57°C. Nessas condições, o processo teve uma eficiência térmica de 83,75%. As análises realizadas por peneiramento do ovo particulado, nas diferentes concentrações de maltodextrina, mostraram uma elevada distribuição de tamanho e formas dos grãos, porém

houve prevalência de diâmetros de Sauter de 120 µm a 200 µm. As micrografias

das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram uma grande aglomeração de partículas, que se uniam ao se chocarem nas linhas de fluxo. Grandes números de partículas de maior tamanho não aguentaram o peso de suas estruturas e sofreram colapso. O uso das maltodextrinas melhorou a resistência das paredes, mas não resolveu o problema completamente. Verificou-se que a vazão de descarga da bomba de pressão, que produz a força que desintegra o material líquido em gotas, estava acima dos limites recomendados para o bico atomizador usado. Isso explica por que o padrão de pulverização não foi o ideal, exigindo temperaturas relativamente altas para a desidratação, gerando perdas nos produtos, principalmente do teor proteico. Isso possivelmente foi devido à queima de material já que as amostras com menores partículas apresentaram cores mais saturadas. Contudo, houve uma boa redução de peso nos ovoprodutos, com a retirada de água, a um nível de uma atividade aquosa que permite a inibição da reprodução microbiana. A aglomeração observada possibilitou a formação de estruturas maiores, mais irregulares e mais porosas e, portanto, com boa solubilidade. É possível melhorar o sistema com equipamentos que permitam maior controle nas variáveis do processo.

Palavras-chave: Secador Piloto. Spray Dryer. Atomização Centrífuga. Ovo em Pó. Maltodextrina.

ABSTRACT

This study had as objective to evaluate the performance of a pilot scale spray dryer, designed for drying eggs, in the Department of Food Science (DCA), Federal University of Lavras (UFLA), verifying how a few operational conditions affect the drying quality of egg products. Three wetted materials were used: integral pasteurized liquid egg, integral egg liquid pasteurized homogenized with an aqueous solution of maltodextrin 10 DE (10% and 15% in mass) and integral egg liquid pasteurized with aqueous solutions of maltodextrin 20 DE (15% in mass) in volumes ranging from 10 to 20 liters. Evaluated some inlet temperature, using water in food, the lowest temperature was 270°C. At this temperature, using egg products in food, there was an outlet temperature of 57 ° C. In these conditions, the process has a thermal efficiency of 83.75%. The analysis carried out by sieving the egg particles at different concentrations of maltodextrin, showed a high distribution of size and shapes of grains, but there was a prevalence of Sauter diameters of 120µm to 200µm. The micrographs obtained from electronic scanning microscopy (SEM) images showed a large agglomeration of particles, which joined to collide in the flow lines. A large number of particles from greater size did not bear the weight of their structures and collapsed. The maltodextrins use improved the strength of the walls, but did not solve the problem completely. It was found that the discharge flow pressure pump that produces a force that disintegrate the liquid material into drops, was above the recommended limits for nozzle atomizer used. This explains, in part way the spray pattern was not ideal, requiring relatively high temperatures for dehydration that caused some losses in the products, especially the protein content, possibly by burning material, since the samples with smaller particles had more saturated colors. However, there was a good weight reduction in egg products, with the removal of water to a level of a water activity that allow the inhibition of microbial reproduction. The clustering observed allows the formation of larger structures, more irregular and more porous and therefore with good solubility. It is possible to improve the system with equipment that enables more control on the process variables.

Keywords: Pilot Dryer. Spray Dryer. Centrifugal Atomization. Egg Powder. Maltodextrin.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 | Comparativos de tamanhos de partícula presentes na natureza e suas definições..... | 90 |
| Quadro 2 | Efeito da pressão no desempenho de bicos pulverizadores..... | 91 |
| Quadro 3 | Efeito da densidade específica no desempenho de bicos pulverizadores | 92 |
| Quadro 4 | Efeito do aumento da viscosidade no desempenho de bicos pulverizadores | 94 |
| Quadro 5 | Efeitos gerais do aumento da temperatura do fluido | 94 |
| Quadro 6 | Efeito do aumento da tensão | 96 |
| Tabela 1 | Composição do ovo <i>in natura</i> por 100 g de porção comestível | 29 |
| Tabela 2 | Densidade teórica de gotas | 63 |
| Tabela 3 | Eficiência térmica..... | 64 |
| Tabela 4 | Conversão de densidade | 77 |
| Tabela 5 | Cobertura teórica de várias alturas de pulverização | 79 |
| Tabela 6 | Relação entre diâmetro das gotas, área de superfície por 1 litro líquido vaporizado e tempo de secagem segundo STAHL, P. H. (1980). | 102 |
| Tabela 7 | Eficiência térmica no <i>spray dryer</i> | 138 |
| Tabela 8 | Velocidade (V_{ar}) e pressão do ar (P_{ar}) | 139 |
| Tabela 9 | Resultado das análises realizadas por peneiramento do ovo particulado, em diferentes concentrações de maltodextrina..... | 141 |
| Tabela 10 | Diâmetro médio de Sauter..... | 153 |
| Tabela 11 | Desvio padrão entre o os diâmetros médios de Sauter | 154 |
| Tabela 12 | Propriedades físico-químicas dos ovoprodutos..... | 156 |
| Tabela 13 | Resultado das análises de cor | 159 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 | Os dez maiores produtores mundiais de ovos em 2008 (milhões de toneladas)..... | 23 |
| Figura 2 | Diagrama do ovo de galinha. 1–casca; 2–citoplasma ativo; 3–membrana externa; 4–membrana interna; 5–membrana..... | 24 |
| Figura 3 | (A) Pasteurizador tubular; (B) Pasteurizador em placas | 34 |
| Figura 4 | Isoterma de sorção e o efeito da histerese | 44 |
| Figura 5 | Forças responsáveis pela tensão superficial | 46 |
| Figura 6 | Visão esquemática da transferência de massa e calor na secagem | 51 |
| Figura 7 | Teor de umidade em relação ao tempo de secagem | 52 |
| Figura 8 | Gás aquecido envolvendo a gota de material úmido. O processo de secagem térmica é o resultado de uma transferência simultânea de calor (1) e massa (2), onde a água é evaporada e retirada do produto (3)..... | 54 |
| Figura 9 | Taxa de secagem | 56 |
| Figura 10 | Curva de temperatura | 57 |
| Figura 11 | Tipos de isotermas de dessorção | 58 |
| Figura 12 | Atomização | 61 |
| Figura 13 | Evolução da temperatura de transição vítrea do produto alimentício no decorrer do processo de desidratação | 69 |
| Figura 14 | Sistema <i>spray dryer</i> | 73 |
| Figura 15 | Padrão de Pulverização | 75 |
| Figura 16 | Distribuição das gotas no atomizador por pressão | 76 |
| Figura 17 | Cobertura da Pulverização | 78 |
| Figura 18 | Tipos de Bicos Atomizadores: (A) rotativo; (B) de pressão e (C) duplo fluido..... | 80 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 19 | Bico de pressão: A) tipo espiral, (1) corpo, (2) orifício, (3) câmara de turbulência, (4) placa final, (5) parafuso de pino; (B) bicos com cavilhas ranhuradas, (1) orifício, (2) cabeça do bico, (3) inserção de turbulência | 81 |
| Figura 20 | Gotas sendo geradas | 83 |
| Figura 21 | Atomização centrífuga | 83 |
| Figura 22 | Tipo de Atomizador Centrífugo. (A) tubo de entrada; (B) distribuidor; (C) tigela de suspensão; (D) Eixo; (E) <i>spray</i> | 84 |
| Figura 23 | Esquema do atomizador centrífugo..... | 84 |
| Figura 24 | Discos centrífugos. A posição do orifício é a mesma para todos os quadros..... | 85 |
| Figura 25 | Bicos de dois fluidos | 88 |
| Figura 26 | Distribuição do tamanho das partículas..... | 90 |
| Figura 27 | Densidade vs. fator de conversão | 93 |
| Figura 28 | Tensão superficial da água vs. Temperatura | 95 |
| Figura 29 | Partículas desidratadas. Estruturas característica | 103 |
| Figura 30 | Aplicações de uso geral..... | 105 |
| Figura 31 | Tipos de bombas: A) peristálticas; B) de pistão e C) de engrenagem | 106 |
| Figura 32 | Ciclone | 108 |
| Figura 33 | Dimensões geométricas de um ciclone | 110 |
| Figura 34 | velocidades tangenciais e axiais num ciclone convencional | 113 |
| Figura 35 | Rotor (exaustor centrífugo)..... | 114 |
| Figura 36 | <i>Spray dryer</i> piloto..... | 119 |
| Figura 37 | O preparo das amostras | 119 |
| Figura 38 | Queimador..... | 121 |
| Figura 39 | Difusor de ar..... | 122 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 40 | Porta de acesso à câmara de secagem | 123 |
| Figura 41 | Atomizador..... | 124 |
| Figura 42 | Bomba de alta pressão..... | 125 |
| Figura 43 | Ciclone (à esquerda) e exaustor (à esquerda)..... | 126 |
| Figura 44 | Dorna de alimentação..... | 127 |
| Figura 45 | Sistema de centelhamento elétrico e válvula do gás | 127 |
| Figura 46 | (A) Amostras de ovo em pó, (B) coletadas nas paredes e (C) na base do secador..... | 128 |
| Figura 47 | O sistema <i>spray dryer</i> | 129 |
| Figura 48 | Tubo de <i>Pitot</i> | 131 |
| Figura 49 | Termômetros | 131 |
| Figura 50 | <i>AquaLab</i> para medir atividade de água | 135 |
| Figura 51 | Eficiência térmica do processo..... | 139 |
| Figura 52 | Gráfico da distribuição granulométrica do ovo em pó | 143 |
| Figura 53 | Micrografia ovo em pó <i>in natura</i> (MEV)..... | 143 |
| Figura 54 | Espessura e colapso das paredes | 144 |
| Figura 55 | Micrografia do ovo <i>in natura</i> em pó | 145 |
| Figura 56 | Micrografia do ovo + maltodextrina DE20, a 15% (m/m) | 146 |
| Figura 57 | Micrografias: a) ovo + maltodextrina DE20; b) ovo + maltodextrina DE15, ambos a 15% (m/m)..... | 147 |
| Figura 58 | Aglomerção de partículas no (A) ovo <i>in natura</i> e (B), (C), (D) e (E) com maltodextrina | 148 |
| Figura 59 | Linhas de corrente na câmara de secagem | 149 |
| Figura 60 | Partículas com base achatadas..... | 151 |
| Figura 61 | Com maltodextrina a) DE 20 (15%) e b) DE 10 (10%) | 152 |
| Figura 62 | Desvio padrão entre os diâmetros médios de Sauter | 155 |
| Figura 63 | Tonalidade das amostra | 155 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 64 | Atributos de cor das amostras | 155 |
| Figura 65 | Partículas que se aglomeraram ao se chocarem num movimento de avanço (cocorrente) e recuo (contracorrente) dentro da torre de secagem..... | 164 |
| Figura 66 | Encolhimento de partículas desidratadas | 164 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 22 |
| 2.1 | O ovo..... | 22 |
| 2.2 | Produção mundial | 22 |
| 2.3 | Constituição geral do ovo | 23 |
| 2.4 | A gema..... | 25 |
| 2.5 | A clara | 25 |
| 2.5.1 | Critérios de qualidade..... | 26 |
| 2.5.1.1 | Características físico – químicas | 26 |
| 2.5.1.2 | Para ovo integral líquido | 26 |
| 2.5.1.3 | Para ovo desidratado | 27 |
| 2.5.1.4 | Padrões microbiológicos | 27 |
| 2.5.1.4.1 | Para ovo integral líquido | 27 |
| 2.5.1.4.2 | Para ovos desidratados | 28 |
| 2.6 | Conceitos nutricionais..... | 28 |
| 2.7 | Preservação e conservação de ovos..... | 30 |
| 2.8 | A pasteurização de ovos..... | 31 |
| 2.9 | Processos de pasteurização de ovo comercial | 32 |
| 2.10 | Os benefícios do produto ovo em pó | 33 |
| 2.11 | A umidade em alimentos..... | 35 |
| 2.11.1 | Formas de umidade em alimentos | 35 |
| 2.11.2 | Expressão da atividade de água | 36 |
| 2.11.3 | A importância da atividade da água nos alimentos..... | 37 |
| 2.11.4 | Valores da A_w | 38 |
| 2.11.5 | Propriedades físicas..... | 39 |
| 2.11.5 | Graus de tolerância a baixas atividades de água..... | 39 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.11.6 | Relação entre a atividade de água e a umidade relativa no equilíbrio (<i>HRE</i>) | 40 |
| 2.11.7 | Higroscopicidade | 42 |
| 2.11.8 | Isotermas de secagem | 43 |
| 2.11.9 | Aspectos teóricos da secagem | 44 |
| 2.11.10 | Mecanismo e cinética de secagem | 48 |
| 2.11.11 | Transferência de energia e massa na secagem clássica | 50 |
| 2.11.12 | Secagem de materiais umedecidos | 55 |
| 2.11.13 | Influência da granulometria do adsorvente | 58 |
| 2.12 | Princípios da secagem por atomização | 59 |
| 2.12.1 | O princípio basal da secagem por atomização | 59 |
| 2.12.2 | O número médio de gotas depositadas | 62 |
| 2.12.3 | Eficiência térmica no <i>spray dryer</i> | 63 |
| 2.12.4 | Vantagens da secagem por atomização | 65 |
| 2.12.5 | Limitações e desvantagens da secagem por atomização | 66 |
| 2.12.6 | Decorrências do abaixamento do conteúdo aquoso nos alimentos | 67 |
| 2.12.6.1 | A transição vítrea | 68 |
| 2.12.7 | Coadjuvantes da secagem (material de parede) | 70 |
| 2.13 | Secadores por atomização | 72 |
| 2.13.1 | Antecedentes históricos | 72 |
| 2.13.2 | Dispositivos de pulverização | 74 |
| 2.13.3 | Padrão de pulverização | 74 |
| 2.13.4 | Capacidade do bico | 76 |
| 2.13.5 | Pressão de pulverização | 77 |
| 2.13.6 | Ângulo de pulverização e cobertura | 78 |
| 2.13.7 | Tipos de atomizadores | 79 |
| 2.13.7.1 | Atomização por pressão | 80 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 2.13.7.1.1 | Tamanho das gotas..... | 82 |
| 2.13.7.1.2 | Atomização centrífuga..... | 83 |
| 2.13.7.1.3 | Diâmetro da gota na atomização rotativa..... | 86 |
| 2.13.7.1.4 | Velocidade periférica..... | 87 |
| 2.13.8 | Atomizadores de dois fluidos..... | 88 |
| 2.13.8 | Tamanho da gota..... | 88 |
| 2.13.9 | A distribuição do tamanho das partículas..... | 90 |
| 2.13.10 | Fatores que afetam o desempenho dos bicos de pulverização..... | 91 |
| 2.13.10.1 | Pressão de trabalho..... | 91 |
| 2.13.10.2 | Densidade..... | 91 |
| 2.13.10.3 | Viscosidade..... | 93 |
| 2.13.10.4 | Aumento da temperatura do fluido..... | 94 |
| 2.13.10.5 | Tensão da superfície..... | 95 |
| 2.13.11 | A secagem das gotas..... | 96 |
| 2.13.12 | Tempo de secagem da gota..... | 99 |
| 2.13.13 | Descrição geral dos secadores por Aspersão..... | 102 |
| 2.13.14 | Câmara de secagem..... | 103 |
| 2.13.15 | Sistema de alimentação..... | 105 |
| 2.13.16 | Sistema de separação de produto seco fino..... | 107 |
| 2.13.17 | Sistema de aquecimento do ar..... | 115 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 117 |
| 3.1 | Materiais | 117 |
| 3.1.1 | Matéria-prima..... | 117 |
| 3.1.2 | O secador..... | 117 |
| 3.2 | Preparo das amostras..... | 118 |
| 3.3 | A secagem..... | 120 |
| 3.3.1 | Determinação da temperatura do ar de secagem..... | 120 |

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2 | Primeira etapa | 120 |
| 3.3.3 | Segunda etapa | 123 |
| 3.3.4 | Terceira etapa | 126 |
| 3.3.5 | Quarta etapa | 126 |
| 3.6 | Determinação das condições de funcionamento | 130 |
| 3.6.1 | Eficiência térmica do <i>spray dryer</i> | 130 |
| 3.6.2 | Velocidade e pressão de ar de arraste | 130 |
| 3.7 | Temperatura de entrada e saída | 131 |
| 3.8 | Vazão mássica da alimentação | 132 |
| 3.9 | Análises químicas dos ovoprodutos | 132 |
| 3.9.1 | Determinação do teor de umidade | 132 |
| 3.9.2 | Proteína | 132 |
| 3.9.3 | Cinzas | 133 |
| 3.9.4 | Extrato etéreo | 133 |
| 3.10 | Propriedades físicas dos ovoprodutos..... | 133 |
| 3.10.1 | Análise de colorimetria (L^* , a^* , b^*)..... | 133 |
| 3.10.2 | Solubilidade | 134 |
| 3.10.3 | Atividade de água | 134 |
| 3.10.4 | Molhabilidade (higroscopicidade) | 135 |
| 3.11 | Distribuição granulométrica | 135 |
| 3.12 | Caracterização microestrutural..... | 136 |
| 3.13 | Análises estatística..... | 137 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 138 |
| 4.1 | Temperatura de secagem e eficiência térmica | 138 |
| 4.2 | Fluxo de arraste e pressão de ar | 139 |
| 4.3 | Vazão mássica de alimentação | 140 |
| 4.4 | Granulometria do ovo em pó..... | 141 |
| 4.5 | Caracterização microestrutural..... | 142 |

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6 | Diâmetro médio de Sauter | 153 |
| 4.7 | Avaliação das propriedades físico-químicas dos ovoprodutos | 155 |
| 4.8 | Análise da cor das amostras | 158 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 162 |
| 6 | CONCLUSÃO | 165 |
| 6.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 165 |
| | REFERÊNCIAS | 167 |

1 INTRODUÇÃO

Desde longa época que a disponibilidade de alimentos não acompanha o crescimento populacional. Por isso, a produção de alimentos, bem como sua conservação, é um problema estratégico do mundo moderno que deve ser resolvido com a máxima urgência.

O efeito conservador de produtos alimentares transformados pelas técnicas industriais de secagem se deve à indisponibilização da água para as condições propícias ao desenvolvimento microbiano, ou para a deterioração química.

A secagem por atomização permite uma secagem extremamente rápida dos seus sistemas aquosos, sem que os constituintes sólidos se aqueçam em demasia. É recomendada para secagem de produtos sensíveis e, portanto, amplamente utilizada nas indústrias farmacêutica e química. Os secadores por atomização são desenvolvidos com o objetivo de atender um mercado altamente exigente, que reclama por uma produção horária elevada, porém a um custo inferior aos demais métodos de secagem. De fato, de todos os sistemas de secagem, é talvez, em princípio, o mais simples e menos dispendioso, mas continuam sendo equipamentos caros. Além disso, uma vez construídos são pouco flexíveis a modificações operacionais. Esse fato, explica a deficiência de trabalhos publicados na literatura nacional e internacional sobre eles. Mas, essa deficiência foi o fator que motivou este estudo e a busca por conhecimentos nesse campo tornou o objetivo deste trabalho.

Este trabalho objetivou construir no Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) um *spray dryer* em escala piloto, de baixo custo, para se avaliar o seu desempenho na secagem

de ovos e ovoprodutos de com maltodextrina. Verificou-se como algumas condições operacionais de secagem afetam a qualidade dos produtos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O ovo

O ovo é o produto da ovulação da galinha, que consiste em: gema, clara (albúmen) e casca.

A domesticação das galinhas resultou na possibilidade de dispor desse alimento em todo momento, pois, até então, as pessoas se alimentavam de ovos encontrados nos ninhos das aves silvestres. Desse modo, seu consumo foi insignificante até o século V a.C., quando o frango chegou à Grécia e à Itália e o ovo se tornou um ingrediente indispensável na cozinha, especialmente em sobremesas.

Foram excluídos dos *menus* nos tempos da Quaresma, no século VIII, mas na Idade Média passou a ser absolutamente parte importante na dieta das pessoas humildes de toda Europa.

Desde a primeira metade do século XX é considerado como uma fonte de nutrientes e classificado como um protetor da saúde alimentar, ocasião em que foi identificada a maioria das vitaminas e aminoácidos (FUNDAÇÃO GRUPO EROSKI, 2010).

2.2 Produção mundial

Os dez maiores produtores mundiais de ovos produzem juntos, mais de 42 milhões de toneladas de ovos (Figura 1). No entanto, a produção somada dos países colocados entre a segunda e a décima posições ainda é menor que a produção isolada do líder no setor, a China.

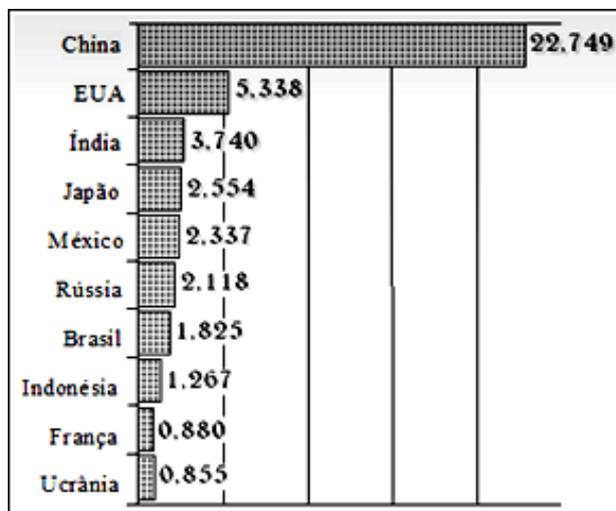


Figura 1 Os dez maiores produtores mundiais de ovos em 2008 (milhões de toneladas)

Fonte: REVISTA PRODUÇÃO ANIMAL – AVICULTURA (2010)

Os dados da Figura 1 são da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION FOOD - FAO*) e foram compilados pelo Departamento de Agricultura dos EUA (USDA). Eles mostram que a China foi responsável por 53,3% do volume produzido, distribuindo-se os restantes 46,7% entre os outros nove maiores produtores. Nesse posicionamento, o Brasil aparece na sétima posição, com volume correspondente a 4,3% do total produzido pelos 10 maiores produtores (REVISTA PRODUÇÃO ANIMAL – AVICULTURA, 2010).

2.3 Constituição geral do ovo

O corte transversal de um ovo de galinha permite diferenciar com nitidez as partes fundamentais que o constituem e outras também com alguma importância (Figura 2).

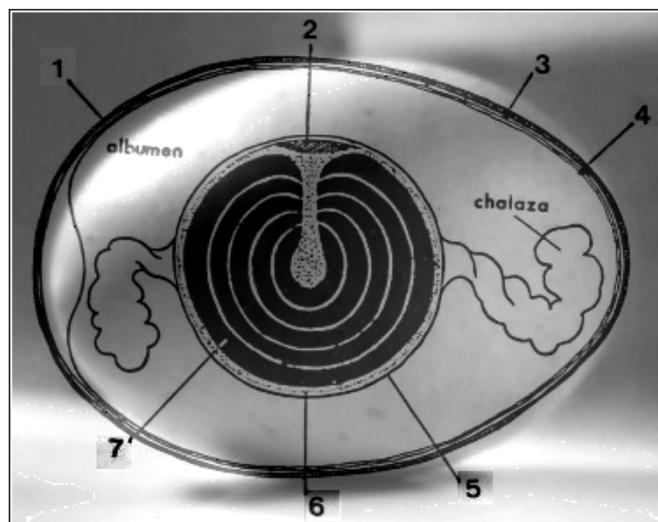


Figura 2 Diagrama do ovo de galinha. 1-casca; 2-citoplasma ativo; 3-membrana externa; 4-membrana interna; 5-membrana
 Fonte: Adaptado de Observação... (2011)

A gema é a parte central do ovo com uma forma esferoide, cor amarela, textura coloidal viscosa, rodeada pela membrana vitelina e a clara ou albúmen, formada por 88% de água e o restante basicamente por proteínas. A casca é o produto resultante da combinação de íons cálcio e bicarbonato, de acordo com a

reação: $\text{Ca}_2 + \text{HCO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$. A matriz cálcica é separada do albúmen

por uma membrana. Entre os seus componentes minerais o cálcio é o mais importante junto a pequenas quantidades de mucopolissacarídeos e proteínas, que colaboram de alguma maneira para a formação da matriz. A porção densa e firme é formada por camadas albuminosas de proteínas mucinas retorcidas espessas (a calaza, que liga a gema a cada um dos dois polos do ovo) seguidas

por outra camada albuminosa. O escudo tem duas membranas internas com uma camada protetora chamada cutícula (FURTADO; SCHOFFEN-ENKE, 2005).

2.4 A gema

A gema representa um terço do volume do ovo sem casca. É composta por 50% de água; 34% de lipídios e 16% de proteína, além de alguma glicose e sais minerais. É uma emulsão de gordura em água, composta de 1/3 de proteínas e 2/3 de lipídeos. Assim, fase líquida é uma solução de água com várias proteínas em suspensão organizadas em pequenos grânulos. Os lipídeos são principalmente os fosfolipídios, tais como as lecitinas, um emulsificante que estabiliza misturas de água e óleo e esteróis (SARCINELLI; VENTURINI; SILVA, 2007).

2.5 A clara

A clara, também designada por albúmen, é formada por um material semissólido gelatinoso, com elevado conteúdo hídrico e proteico (albumina). No seu interior diferenciam-se dois cordões proteicos (calazas) que manterão a gema no centro da clara, mas permitindo-lhe girar e oscilar.

A clara participa com cerca de 60% da composição do ovo (dois terços do volume do ovo sem casca). É constituída majoritariamente por água, porém contém 10% de proteína. São 13 proteínas de alto valor biológico; as principais são a ovoalbumina e a ovotransferrina, que representam 66 % de todas as proteínas da clara.

Entre as proteínas estão ainda:

- a) a lisosima, uma enzima termoestável, que normalmente está enrolada sobre si mesma, numa forma globular, com atividade bacteriostática;
- b) a ovomucina, uma glicoproteína que confere à clara a estrutura de gel, ou seja, forma o líquido viscoso da clara, dando-lhe alguma coesão, fazendo-a escorrer como água;
- c) ovoglobulina, importante na formação de espuma; e
- d) ovomucoide, importante em reações alérgicas (FUNDAÇÃO GRUPO EROSKI, 2010).

2.5.1 Critérios de qualidade

A Resolução nº 5 de 5 de julho de 1991 (BRASIL, 1991) exige que todos os produtos de ovos para o consumo devem ser pasteurizados e atender às seguintes especificações:

2.5.1.1 Características físico – químicas

Empregando-se métodos físico-químicos oficiais foram determinadas algumas características ovo in natura e dos ovoprodutos, com a adição de maltodextrina, desidratados.

2.5.1.2 Para ovo integral líquido

- a) sólidos totais, mínimo 23,0%;
- b) pH: de 7,0 a 7,8;
- c) cinzas, máxima 1,1%;
- d) proteínas (N x 6,25), mínimo 11,7%; e

- e) gordura, mínimo 10,0%.

2.5.1.3 Para ovo desidratado

- a) sólidos totais, mínimo 96,0%;
- b) pH: 7,0 – 9,0;
- c) cinzas, máxima 4,0 %;
- d) proteínas (N x 6,25), mínimo 45,0%; e
- e) gordura, mínimo 40,0%.

2.5.1.4 Padrões microbiológicos

Em 2 de janeiro de 2001 a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), publicou a Resolução RDC 12, que atribuiu critérios e padrões

microbiológicos para os alimentos industrializados (BRASIL, 2001). Assim:

2.5.1.4.1 Para ovo integral líquido

- a) contagem padrão: máx. 5×10^4 ;
- b) coliformes fecais: ausência em 1g;
- c) *salmonela*: ausência em 25g; e
- d) *S. aureus*: ausência em 1g.

2.5.1.4.2 Para ovos desidratados

- a) contagem padrão: máx. 5×10^4 ;
- b) coliformes fecais: ausência em 1g;
- c) *S. aureus*: ausência em 0,1g; e
- d) *Salmonella*: ausência em 25g.

2.6 Conceitos nutricionais

Embora os benefícios do consumo do ovo para a saúde sejam ainda discutíveis para a maioria das pessoas, por um ingênuo preconceito do colesterol que ele contém, deve-se considerar, entretanto, o ovo como uma potência nutricional, já que possui em média apenas 75 calorias/ovo e proteínas de alta qualidade. Tem ainda quantidades variadas de vitaminas essenciais (13 ao todo, incluindo A, B12 e ácido fólico) e minerais. É notavelmente rico em ácido oleico (monoinsaturado), avaliados por seus efeitos benéficos sobre a saúde, e a principal fonte de fosfolipídios alimentares, contribuindo significativamente para atender as necessidades de ácido linoleico, que o organismo não consegue sintetizar. Um ovo fornece, ainda, grande parte da colina recomendada pelos organismos responsáveis por educação nutricional (de 500 mg/dia). Também é a melhor fonte dietética de lecitina (fosfatidilcolina), de grande interesse nutricional devido à sua importância em diversos processos metabólicos, na construção de membranas celulares e do neurotransmissor acetilcolina. A Biotina é outro importante nutriente encontrado nos ovos, relacionada com a

proteção da pele, com um grande número de reações do organismo e com a manutenção das funções corporais. Os ovos contêm riboflavina (20% da RDA), selênio (12%) e vitamina K (31%) (FUNDAÇÃO GRUPO EROSKI, 2010).

Estudos recentes mostram que o ovo é uma fonte de carotenoides (luteína, zeaxantina), compostos antioxidantes que podem ajudar a prevenir a degeneração macular e retardar a catarata (TORRES, 2008).

Por outro lado, nas aves, o trato reprodutivo, o urinário e digestivo se reúnem na cloaca. Para ser expelido o ovo entra em contato com fezes, que contêm numerosos germes. Uma possível contaminação por bactérias, principalmente pelas temíveis *salmonelas*, as causadoras da assustadora infecção nomeada salmonelose (gastrenterite), fazem com que algumas pessoas, após terem sofrido uma intoxicação alimentar causada pela *salmonela*, excluam do seu consumo de ovos frescos ou qualquer preparação fabricada a partir deles. Mas, mesmo que haja uma invasão pela casca, contaminações maciças raramente vencerão os mecanismos de defesa naturais da clara, tais como: as membranas da casca, o pH alcalino e a lisozima, as quais dissolvem bactérias. Assim sendo, certamente essas proteções relevarão a deterioração à insignificância durante armazenamentos por curtos períodos (SEIBEL, 2005).

Assim, hoje em dia os ovos constituem um dos alimentos mais abundantes e comuns da dieta humana, ainda com tantas opiniões mal formadas, sem maior ponderação ou conhecimento, porque sua composição é admirável (Tabela 1) e seu custo é baixo.

Tabela 1 Composição do ovo *in natura* por 100 g de porção comestível

| COMPOSIÇÃO | | | |
|------------------|----------|----------|----------|
| Água | 75,2 g | Magnésio | 12,1 mg |
| Energia | 160 kcal | Ferro | 2,2 mg |
| Energia | 669 kJ | Iodo | 12,7 mcg |
| Nitrogênio total | 2,03 | Zinco | 2,0 mg |

| | | | |
|--------------------------------|---------|--------------|----------|
| Nitrogênio proteico | 1,93 g | Vitamina B1 | 0,11 mg |
| Carboidratos | 0,68 g | Vitamina B2 | 0,37 mg |
| Lipídios totais | 12,1 g | Niacina | 0,08 mg |
| Ácidos graxos saturados | 3,3 g | Ácido fólico | 51,2 mcg |
| Ácidos graxos monoinsaturados | 4,9 g | Vitamina B12 | 2,1 mcg |
| Ácidos graxos poli-insaturados | 1,8 g | Vitamina B6 | 0,12 mg |
| Colesterol | 410 mg | Vitamina A | 227 mcg |
| Fibra | 0 g | Vitamina D3 | 1,8 mcg |
| Cálcio | 56,2 mg | Vitamina E | 2,0 mg |

Fonte: ANAPO (2012)

2.7 Preservação e conservação de ovos

O armazenamento tem papel fundamental na conservação dos ovos, pois é durante esse período que ocorrem trocas de origem física, química e microbiana. Muitos produtos são comercializados congelados, principalmente produtos destinados à exportação. Porém, o congelamento causa mudanças no

ovo, sobretudo na textura da gema. Quando a temperatura da gema atinge -6°C ,

a viscosidade aumenta e ocorre gelatinização. Geralmente, essa gelatinização tem sido considerada irreversível. Todavia, Palmer et al. (1970 citados por ALLEONI; ANTUNES, 2001) observaram que aquecendo a gema crua de 45 a 55°C por uma hora a geleificação é revertida, mas parcialmente. O produto geleificado não pode ser processado como o produto líquido e, em alguns casos, ele pode causar uma dificuldade de misturar a outros ingredientes e ter uma aparência indesejável.

Alleoni e Antunes (2001) constataram que ovos com sete dias de armazenamento à temperatura de 25°C apresentam maior rigidez do que ovos frescos; já na temperatura de 8°C, constataram que não existe efeito do tempo de armazenamento na dureza dos géis. Em ovos com 14 dias de armazenamento à temperatura de 25°C, observou-se uma maior solubilidade e menor estabilidade da espuma, dureza do gel e qualidade da clara.

O armazenamento de ovos líquidos congelados ou de ovos desidratados resulta na redução do número de bactérias que podem apresentar atividade. Mas, uma contagem bacteriana baixa nesses produtos não significa, necessariamente, alta qualidade. Para a avaliação da qualidade do ovo, deve-se conhecer algo sobre seu histórico de armazenamento (GUT; PINTO; TELIS-ROMERO, 2003).

2.8 A pasteurização de ovos

A finalidade da pasteurização é eliminar os microrganismos patogênicos nos ovoprodutos líquidos. Para tal, Linden e Lorient (1996 citados por SEIBEL, 2005) recomendaram uma aplicação de tratamentos térmicos de 2 minutos ou 30 segundos a temperaturas de 58 ou 64,4°C respectivamente (para a pasteurização do ovo inteiro, gemas ou claras). Muller e Tobin (1996 citados por SEIBEL, 2005) notaram que temperaturas elevadas de armazenamento destruíam efetivamente *Salmonella* dos sólidos da clara do ovo.

Entretanto, *Salmonella* é mais termorresistente na gema que no ovo inteiro, devido ao seu menor pH e maior conteúdo de sólidos. Por essa razão, os requisitos mínimos de pasteurização diferem com o tipo de ovoproduto.

A pasteurização do ovo é importante como operação que precede a aplicação de outros métodos de conservação, como o congelamento e a evaporação. Camargo et al. (1989) ressaltaram que o binômio tempo-

temperatura deve ser bem controlado, porque a clara pode coagular pela ação do calor. Mas, a pasteurização pouco afeta a gema. Mesmo assim, na clara pode diminuir sua capacidade de formar espumas estáveis, produzindo espumas de menores volumes (SEIBEL, 2005). Bobbio e Bobbio (1992) lembram, ainda, que a presença de glicose na clara leva à ocorrência do escurecimento não enzimático pelo aquecimento.

2.9 Processos de pasteurização de ovo comercial

Um dos processos térmicos mais usados na indústria de alimentos é a pasteurização. Entende-se por pasteurização o emprego conveniente de calor com a finalidade de destruir ou reduzir os microrganismos patogênicos (ou não) a níveis aceitáveis. Têm por desígnio assegurar a constituição física do ovo, ou partes dele, após a remoção da casca.

Esse processo tem início logo após a padronização, onde as porcentagens de sólidos são ajustadas.

Têm-se estudado distintas combinações de temperatura e tempo para pasteurizar. Mas basicamente se reduzem a duas: pasteurização lenta, ou descontínua, e pasteurização rápida, ou contínua. Nos dois procedimentos o tratamento térmico não é intenso (sempre acontece em temperaturas inferiores a 100°C e pressão atmosférica normal). Como afirmou Anon (1995), esses procedimentos são destinados aos alimentos que oferecem condições para a proliferação bacteriana. Sobretudo das formas microbianas mais resistentes, em alimentos ácidos ou muito ácidos (pH menor que 4,6), ou alimentos que são submetidos posteriormente à refrigeração, congelamento e desidratação, por exemplo, como ovos. A eficiência da pasteurização depende, antes de tudo, da qualidade da matéria-prima utilizada (LEPEK, 1998).

A pasteurização dos ovos pode ser feita em trocador de calor de placas ou tubular (Figura 3). Quando feita em trocador de calor de placas ela é similar ao empregado no processo de pasteurização de leite, diferindo apenas na temperatura e no tempo de retenção empregado.

2.10 Os benefícios do produto ovo em pó

Ovoprodutos são utilizados como ingredientes em várias formulações de alimentos, já que desempenham diversas propriedades funcionais, que proporcionam aos alimentos processados, cor, viscosidade, emulsificação, geleificação e formação de espuma.

A indústria de ovos representa um expressivo segmento do mercado de alimentos, com uma grande oferta de derivados de ovos, tais como ovos desidratados, congelados e líquidos.

Em pó, os ovos são fáceis de usar, armazenar e podem ser usados para a maioria dos tipos de pratos de ovos ou receitas que exigem ovos *in natura* (HONEYVILLE FOOD PRODUCTS, 2010). A desidratação ocorre a altas temperaturas, de forma que a água é evaporada de modo rápido, preservando as principais características iniciais. Quando misturados com água produzem ovos líquidos que podem ser utilizados com a qualidade dos ovos frescos.

Um quilo de ovo em pó adicionado à água produz 4 quilos de ovos líquidos, equivalente a 81-90 ovos grandes frescos (integrais). Além disso, os ovos em pó, produzidos de ovos pasteurizados, não necessitam de refrigeração. Um quilograma de clara de ovo em pó, quando adicionado à água, produz 8 quilos de claras de ovo líquido. Um quilo de clara de ovo líquido equivale a 17 claras de ovos grandes.

Além da conveniência (facilidade de uso, redução de volume e peso), o ovo em pó oferece uma vida útil muito longa (mais de um ano, sob condições ideais) e não necessitam de refrigeração (HONEYVILLE FOOD PRODUCTS, 2010).

Assim, os ovoprodutos têm algumas vantagens relativamente ao ovo em casca, especificamente:

- a) maior versatilidade;
- b) manipulação e distribuição mais fácil;
- c) fácil utilização e dosagem;
- d) maior segurança alimentar; e
- e) economia de tempo e de mão de obra.

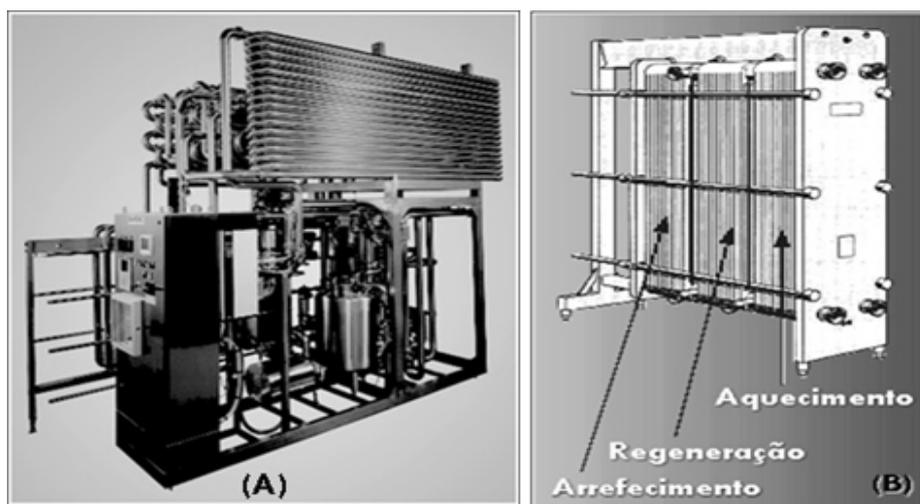


Figura 3 (A) Pasteurizador tubular; (B) Pasteurizador em placas
Fonte: Gut, Pinto e Telis-Romero (2003)

Certamente a vida útil dos produtos de ovo tem aumentado com o congelamento do ovo líquido, mas é no produto desidratado que é a vida útil de

estocagem, ou vida de prateleira (em inglês: *shelf-life*), pode ultrapassar 180 dias, em ambiente seco e sem refrigeração.

2.11 A umidade em alimentos

A maioria dos materiais contém certa quantidade de água, com exceção do vidro e os metais.

Para todos os seres a água é absolutamente essencial, porque possui muitas propriedades incomuns que são críticas para a vida.

Para um alimento, o teor de água, ou umidade, é um dos mais importantes e mais avaliados índices para prever sua segurança. Uma umidade fora das recomendações técnicas resulta na instabilidade química, na deterioração microbiológica e nas alterações fisiológicas nos materiais (VICENZE, 2005).

2.11.1 Formas de umidade em alimentos

Admite-se que a água aparece sob duas formas nos alimentos: água livre (água de capilaridade) e a ligada (água de adesão, higroscópica ou imobilizada). A água ligada, ou vicinal, existe diretamente unida aos grupos hidrófilos de proteínas, permanecendo fortemente unida, a ponto de resistir à ação de uma força mecânica. Não possui qualquer capacidade solvente. Constitui cerca de 0,5

a 0,4% da água total presente no alimento e é onde não ocorre crescimento

microbiano, nem reações químicas. Mantém-se unicamente por forças superficiais e capilares e sua orientação é independente (não se submete a qualquer grupo carregado). Possui baixa pressão de vapor, alta energia de ligação e não oferece disponibilidade como solvente. Tem reduzida mobilidade molecular e propriedades dielétricas diferentes das da água livre (COX; NELSON, 2005).

A água livre ou água não ligada é definida como a água que se comporta como água pura e onde as ligações de hidrogênio predominam. Presente nos espaços intergranulares e poros: refere-se à água que atua como agente dispersante e solvente. Em geral, constitui mais que 95% da água total presente nos alimentos (CÁNOVA; MERCADO, 1996).

Há, ainda, a água parcialmente ligada, também denominada como água da camada intermediária. Encontrando-se ligada aos componentes dos alimentos através de ligações de hidrogênio ou força de *van der Waals*. Possuem

baixíssima capacidade como solvente. Constitui aproximadamente 2 a 3% da

água total do alimento e é onde o crescimento microbiano ocorre lentamente (HONORATO, 2006).

2.11.2 Expressão da atividade de água

A atividade de água é um conceito conhecido há vários anos, mas somente nos últimos anos vem sendo aplicado nas indústrias químicas, farmacêuticas e alimentícias.

O grau de disponibilidade de água em um alimento pode ser expresso como atividade de água (A_w , abreviação do inglês: *water activity*).

Guilbert e Morin (1986 citado por HONORATO, 2006) definiram a disponibilidade de água como a relação entre a fugacidade da água no alimento (f) e a fugacidade da água pura (f_0), numa mesma temperatura (equação 2.1).

$$A_w = \frac{f}{f_0} \quad (2.1)$$

Conforme explicou Coultate (1996 citado por HONORATO, 2006), para o caso de se trabalhar com baixa pressão e baixa temperatura, pode-se substituir a razão entre as fugacidades pela relação entre as pressões.

Assim, a atividade de água (A_w) será a relação que existe entre a pressão de vapor de um alimento (P) com relação ao vapor de água pura (P_0), à mesma temperatura, como mostra a equação (2.2).

$$A_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.2)$$

Portanto, como concluiu Ordóñez (2005 citado por GAVA; SILVA; GAVA, 2009), a água nos alimentos exerce uma pressão de vapor, que depende da quantidade e da concentração de solutos na água e da temperatura.

2.11.3 A importância da atividade da água nos alimentos

A água é, por norma, o principal constituinte dos sistemas biológicos, visto que possui muitas propriedades incomuns que são críticas para a vida: possui alta tensão superficial e é capaz de dissolver um grande número de substâncias, portanto, é o solvente mais importante. Essas qualidades próprias da água permitem a ocorrência de reações químicas e alterações enzimáticas necessárias ao conjunto de meios para a vida (COX; NELSON, 2005).

A base fundamental da maioria das técnicas de conservação dos alimentos é diminuir a ação da água ou deixá-la numa forma menos reativa, ou seja, provocar um ambiente desfavorável ao crescimento microbiano e às reações químicas que afetam a estabilidade dos produtos. Mas, apesar do conteúdo de água ser o fator individual que mais influi na alteração dos alimentos, tem-se demonstrado que alimentos com o mesmo conteúdo de água

se alteram de forma distinta. Portanto, a quantidade de água não é por si só uma ferramenta indicativa da degradação dos alimentos. Na verdade, o que especifica o grau de estabilidade de um produto alimentício é o grau de disponibilidade da água (GRIZOTTO; AGUIRRE; MENEZES, 2005).

2.11.4 Valores da A_w

A atividade de água pode variar entre um máximo de 1,0, onde a água se encontra totalmente disponível (equivalente à água pura), e 0,0, onde a água livre é inexistente (equivalente a um osso seco). Isso significa que dois alimentos poderão ser formados pela mesma quantidade de água, mas ter um A_w diferente, bastando para isso, que um deles tenha uma quantidade superior de água imobilizada quimicamente em relação ao outro para que o valor seja inferior (DIAS, 2006).

Ainda, segundo o mesmo autor, quanto à atividade aquosa nos alimentos existe a seguinte classificação: a) alimentos com um A_w elevados, entre 0,99 e 0,90 (a maioria dos frescos), normalmente compostos por mais de 50% de água

em relação ao seu peso (carne, pescado, produtos lácteos); e b) alimentos com A_w pequeno, ou abaixo dos 0,90 (os secos), que sofram tratamentos para reduzir disponibilidade da água.

A água pode se tornar indisponível de várias formas: a) solidificada por congelamento (imóvel); b) orientadas em torno das moléculas de soluto (esfera de hidratação), quando se aumenta da concentração de eletrólitos (como o NaCl), ou não eletrólitos (como a sacarose); c) absorvidas pelos componentes insolúveis dos alimentos (camada de hidratação hidrofóbica, em forma de multicamadas); e d) removida através de técnicas de secagem (desidratação) (DIAS, 2006).

2.11.5 Propriedades físicas

A A_w também está relacionada com a textura dos alimentos. Os alimentos com uma A_w elevada têm uma textura mais mole e succulenta. Quando a A_w desses produtos diminuem, aparecem atributos de textura indesejáveis como secura e endurecimento. Em contraste, os alimentos com uma baixa A_w são nitidamente mais frágeis. A A_w também afeta outras propriedades como a aglomeração de pós e granulados.

2.11.6 Graus de tolerância a baixas atividades de água

Todos os microrganismos têm valores limítrofes de A_w para sua sobrevivência, fora dos quais se cessam as atividades metabólicas e de reprodução. Na generalidade das bactérias isso acontece para valores de A_w inferiores a 0,97, havendo exceções como é o caso *S. aureus* (a bactéria mais

tolerante a baixa atividade de água), cujo crescimento se verifica para valores até 0,86. Já os fungos são bem mais tolerantes à ausência de água disponível, podendo alguns casos crescerem em alimentos com A_w igual 0,62, razão pela qual se verifica o seu aparecimento em determinados alimentos secos. Essa tolerância a reduzidos A_w deve-se ao fato deles transferirem nutrientes e compostos tóxicos através da sua membrana celular para se dissolverem na água ambiental. Mas, as células microbianas consomem muita energia, quer para excluir solutos do seu ambiente interno, quer para desenvolver suas atividades metabólicas na presença de alta concentração de solutos. Como consequência, os microrganismos podem ter suas taxas de crescimento reduzidas, ou mesmo morrerem, em situações extremas (DIAS, 2006).

Uma vez que o crescimento microbiano é o fator importante na preservação dos alimentos (talvez o mais importante); o A_w é uma das melhores maneiras de prever e controlar a deterioração dos alimentos e determinar a sua vida de prateleira, de tal forma, que a esterilidade pode ser alcançada com o controle da atividade da água e aplicação de calor, normalmente necessário para alimentos com um A_w acima dos 0,85. A própria legislação já exige, para determinados alimentos, limites superiores de A_w como forma de garantir a segurança alimentar (DIAS, 2006).

2.11.7 Relação entre a atividade de água e a umidade relativa no equilíbrio (HRE)

Os materiais biológicos possuem propriedade de perder ou ganhar água do ambiente, convergindo, constantemente, para uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e as condições do ar ambiente. Esse equilíbrio é alcançado quando a pressão parcial de vapor de água no produto iguala-se a do ar que o

envolve. Desse modo, quando atingido o equilíbrio dinâmico, a atividade de água e a umidade relativa são numericamente iguais. No equilíbrio, a A_w está relacionada com a umidade relativa (% URE, expressa como percentagem) e é sempre 100 vezes maior que o valor de A_w do ambiente (equação 2.3) (BEZERRA, 2009).

$$A_w = \frac{P}{P_s} = \frac{\%URE}{100} \quad (2.3)$$

A relação entre a URE e a A_w permite prever quais alimentos irão ganhar ou perder umidade, quando forem expostos a um ar com determinada umidade.

Segundo Ditchfield (2000), o grau em que a água interage com os componentes químicos presentes e contribui para a textura do alimento é definido como teor de umidade (g de água/100g de sólidos) e seu estado termodinâmico é definido pelo potencial químico na equação (2.4).

$$\mu_1 = \mu_0 + RT \ln A_w \quad (2.4)$$

onde:

μ_1 = potencial químico da água;

μ_0 = potencial químico no estado padrão;

R = constante dos gases;

T = temperatura absoluta; e

A_w = atividade de água termodinâmica.

2.11.8 Higroscopicidade

A forma como a água afeta a natureza física e as propriedades dos alimentos é complicada devido à interação entre a água e o meio. Envolve estruturas físicas, bem como a composição química dos diversos solutos, incluindo polímeros, colóides ou partículas dispersas.

Martins (2001 citado por BEZERRA, 2009), definiu a higroscopicidade como a propriedade de absorver a umidade da atmosfera. Dependendo do tipo de produto alimentício, a higroscopicidade pode ser benéfica, como no caso de pães e bolos, ou prejudicial como no caso das balas, açúcares e etc..

A higroscopicidade é uma característica muito marcante nos alimentos em pó, sendo influenciada, inclusive, pelo conteúdo de umidade do próprio produto (PEREIRA, 2000).

No caso de pós de frutas, os açúcares (sacarose, glicose e frutose) são responsáveis por fortes interações com a molécula de água por causa dos terminais polares presentes nessas moléculas (BEZERRA, 2009).

2.11.9 Isotermas de secagem

Os conceitos teor de umidade e a disponibilidade da água se relacionam, essa relação é expressa em termos de isotermas de sorção (adsorção e dessorção). Geralmente, para um mesmo alimento, uma isoterma de adsorção (fixação de moléculas de água na superfície de outra substância, o adsorvente) apresenta valores inferiores aos da isoterma de dessorção (processo inverso), fenômeno conhecido como histerese (HONORATO, 2006).

A Figura 4 representa uma isoterma de sorção típica, que indica a relação entre teor de umidade e atividade de água.

Quando a atividade de água é menor que 0,3, se considera que a água está relativamente sobre sítios polares de alta energia, entre 0,3 e 0,7 se refere à multicamada de água, acima de 0,7 se aproxima à condição de condensação da água (HONORATO, 2006).

A região I, da Figura 1, compreende atividade de água de 0 a 0,2 (ou 0,3), correspondente a água fortemente ligada, chamada camada monomolecular.

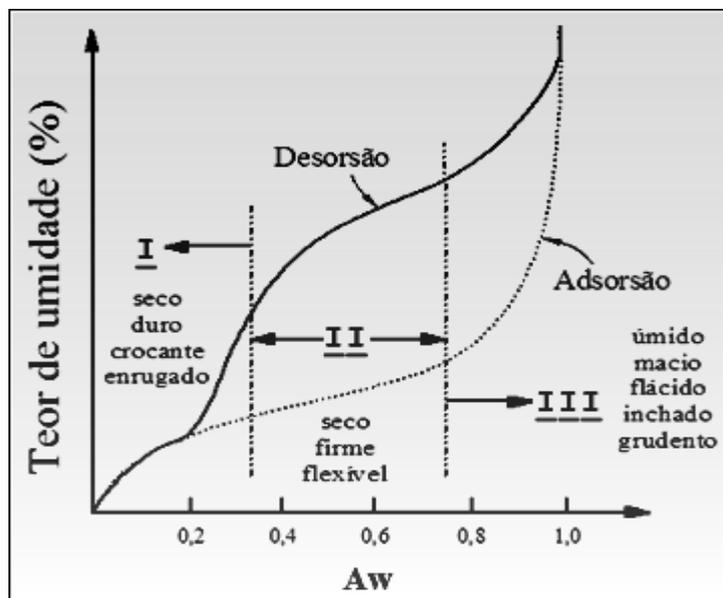


Figura 4 Isoterma de sorção e o efeito da histerese
 Fonte: Adaptado de Cheftel, Cheftel e Besançon (1983)

Essa atividade de água corresponde à umidade de equilíbrio para a carne de vaca, por exemplo, de 4% a 6%, ou para o leite em pó 2% (CHEFTEL; CHEFTEL; BESANÇON, 1983).

As velocidades de reações mínimas se encontram no limite máximo da monocamada (A_w igual a 0,3).

O valor da monocamada de um alimento proporciona boa estimativa da quantidade de água que permite a máxima estabilidade de um produto seco, daí o conhecimento desse valor ser de fundamental importância prática (FENNEMA, 1993).

2.11.10 Aspectos teóricos da secagem

Na molécula da água, a forte eletronegatividade que caracteriza o núcleo do átomo de oxigênio provoca o movimento dos elétrons na direção deste, deixando os hidrogênios desguarnecidos dos seus próprios elétrons. Acentua-se, assim, a assimetria da molécula de água que, apesar de ser globalmente neutra, apresenta uma distribuição irregular das cargas elétricas que lhe confere uma polaridade (nessas circunstâncias, os átomos de hidrogênio assemelham-se, em certa medida, a um simples próton). A água é uma substância polar e comporta-se como um dipolo, portanto todas as propriedades da água resultam dessa estrutura molecular e da carga parcial que carrega. Essa polaridade e as interações fracas resultantes dela originam duas forças determinantes para o comportamento incomum da água: as forças de coesão, resultante da atração natural da água por outras moléculas de água; e as de adesão, resultantes da atração da água por outras moléculas polares. As forças de coesão, natural entre as moléculas da água, fazem com que a passagem da água do estado líquido ao estado de vapor seja mais exigente (do ponto de vista energético) que a maioria das outras substâncias, pois as ligações de hidrogênio absorvem calor quando se formam. Isso faz com que a água tenha um alto calor específico e aqueça (ou esfrie) com dificuldade. Por outro lado, entretanto, o rompimento das ligações de hidrogênio libera calor levando a vaporização (WOLF et al., 2006).

Em um fluido cada molécula interage com as que o rodeiam. O raio de ação das forças moleculares é relativamente pequeno, abrange as moléculas vizinhas mais próximas. Nas camadas superficiais de um líquido, deverão existir forças intermoleculares que não se encontram na condição de equilíbrio, resultando numa tensão na superfície livre do material (tensão superficial), que provoca um efeito que faz com que sua superfície se comporte como uma membrana elástica. A tensão superficial de líquidos resulta do desbalanço de forças intermoleculares em regiões interfaciais, nas quais existe a variação

brusca da densidade. Desse modo, a força resultante numa molécula próxima à interface líquido/vapor é diferente daquela sobre uma molécula que se encontra numa região completamente homogênea no interior do líquido, na qual a força resultante é nula (WOLF et al., 2006).

A tensão superficial é uma medida da intensidade das forças intermoleculares que resulta muito fortemente das dimensões da molécula, ou seja, da área que esta ocupa na interface líquido/gás, ou seja, da sua área superficial (Figura 5).

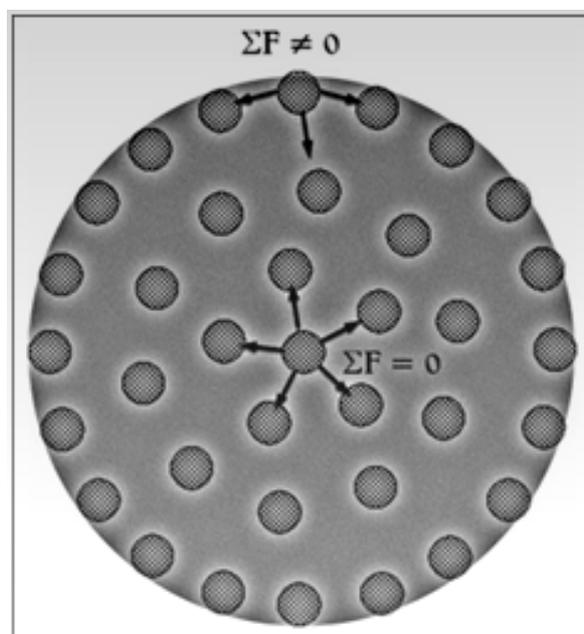


Figura 5 Forças responsáveis pela tensão superficial

$$P_l - P_g = (D - 1) \frac{\sigma}{R} \quad (2.5)$$

Onde:

P_i = pressão interna;
 P_e = pressão externa;
 D = diâmetro da gota;
 σ = tensão superficial; e
 R = raio da gota.

A lei de *Young-Laplace* diz que a pressão interna de uma gota pode ser modificada tanto pela variação da tensão superficial quanto pela variação do raio da gota (WOLF et al., 2006).

Em geral, a tensão superficial diminui com o aumento da temperatura, já que as forças de coesão diminuem com o aumento da agitação térmica (MAK; WONG, 1990).

Fisicamente, o aumento da temperatura faz com que a energia cinética das moléculas e o efeito das colisões também aumentem até um limite, no qual as forças intermoleculares não se tornem mais dominantes e acabem por desagrupar as moléculas em regiões específicas, promovendo passagem de um estado líquido para um estado de vapor. Além disso, as forças intermoleculares nos líquidos (forças adesivas) provocam os fenômenos de superfície, responsáveis pela subida de líquido em tubos capilares (capilaridade) (MAK; WONG, 1990).

Quando o ar dessecante entra em contato com a gota, a evaporação da água na superfície cria forças de capilaridade que puxam a água livre das zonas mais internas, fazendo a água fluir para a sua superfície do material a ser seco.

O grau de pressão de vapor, ou pressão de saturação, que exerce a umidade em uma solução líquida depende da natureza da umidade e da temperatura (MAK; WONG, 1990).

Portanto, a transição de fase líquida/vapor refere-se ao processo pelo qual o líquido pode ser transformado em vapor (ou vice-versa) por meio da modificação de variáveis do sistema como pressão, temperatura e volume (MAK; WONG, 1990).

2.11.11 Mecanismo e cinética de secagem

O valor da pressão parcial do vapor d'água, em função da temperatura T, para o equilíbrio:



é a variável termodinâmica mais importante da secagem, e pode ser determinado com a ajuda da seguinte expressão (Equação 2.6) (ARAUJO; GUERREIRO; PRIMO, 2006):

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \exp \left[14,7316 - \frac{5422}{T + 273,16} \right] \quad (2.6)$$

com $p_{\text{H}_2\text{O}}$ expressa em atmosferas e T em graus *Celsius*.

Sempre que a pressão parcial da água em equilíbrio no sistema superar a pressão do gás dessecante na câmara de secagem, a taxa de transferência da água, do estado líquido para o gasoso, aumenta consideravelmente, tornando-se violenta; diz-se, nesse caso, que a água entra em ebulição, ou seja, a água contida na substância úmida, ao tentar estabelecer essa pressão, se evapora. Portanto, se um material é exposto a um fluxo contínuo de gás com um teor de umidade que exerce uma determinada pressão parcial no gás (ar aquecido, por exemplo), o material perderá umidade por evaporação até que a pressão parcial

de vapor do gás seja igual à pressão de vapor de umidade. Desse modo, o vapor d'água cria um gradiente de pressão que põe em execução o transporte a umidade para a superfície do alimento para ser arrastada pelo ar a alta temperatura, ou seja, a umidade é transferida do interior do sólido à superfície por difusão e para o meio ambiente por convecção (ARAUJO; GUERREIRO; PRIMO, 2006).

Segundo Costa (2007), para uma secagem mais completa da maior parte dos materiais, aproveita-se o fenômeno da difusão do vapor d'água no ar. A transferência da umidade dos diversos materiais, na forma de vapor d'água para o ar exterior, depende de vários fatores:

- a) pressão do vapor d'água no material p_v (*material*), que depende da temperatura do mesmo e de sua atividade de água A_w (p_s/p_{s0});
- b) pressão atmosférica do ar envolvente p ;
- c) superfície de contato do material com o ar envolvente S ;
- d) coeficiente de aproveitamento da evaporação, que diz respeito à velocidade com que a umidade é disponibilizada para a evaporação na superfície do material.

Baseados nessas dependências é que poderão ser analisados os diversos tipos de secagem por difusão do vapor d'água no ar e, principalmente, o desenvolvimento de técnicas visando a sua intensificação e redução do consumo de energia, tanto mecânica como calorífica, que eventualmente intervenham no processo. Essa troca térmica material úmido/ar nos limites do sistema pode ser considerada como adiabática, mas é sem dúvida um processo de transferência e deve ser considerado como tal, para obterem-se os melhores resultados da operação. Assim, aspectos, como fator de contato, diferenças médias de

temperatura ou de pressões de vapor, devem ser cuidadosamente observados (COSTA, 2007).

2.11.11 Transferência de energia e massa na secagem clássica

O mecanismo mais importante de transferência de massa é a difusão que vai do centro do material à sua superfície molhada, iniciando-se (Figura 6), a partir desse ponto, a remoção da umidade por meio de convecção forçada (ARAUJO; GUERREIRO; PRIMO, 2006). O processo de difusão do vapor d'água no ar depende da diferença das pressões de vapor entre o material a secar e o ar, o que envolve a evaporação da água da superfície molhada e, portanto, necessariamente uma troca térmica de calor sensível, pois ele provoca apenas variação na temperatura do corpo, sem que aconteça mudança no seu estado de agregação, por calor latente (temperatura não varia, mas seu estado de agregação se modifica) (Figuras 7,8 e 9).

A taxa de secagem em secadores por atomização é fortemente influenciada pelos parâmetros do processo, por exemplo, temperatura, umidade, velocidade do gás de secagem e, principalmente, pelo diâmetro da gota.

Além desses fatores, impurezas presentes no líquido também afetam a taxa de secagem, pois as propriedades físicas e químicas do material são alteradas e a pressão de vapor saturado sobre a superfície líquida diminui, causando um decréscimo na transferência de massa de vapor da superfície do material para o ar (FAVALLI, 2002).

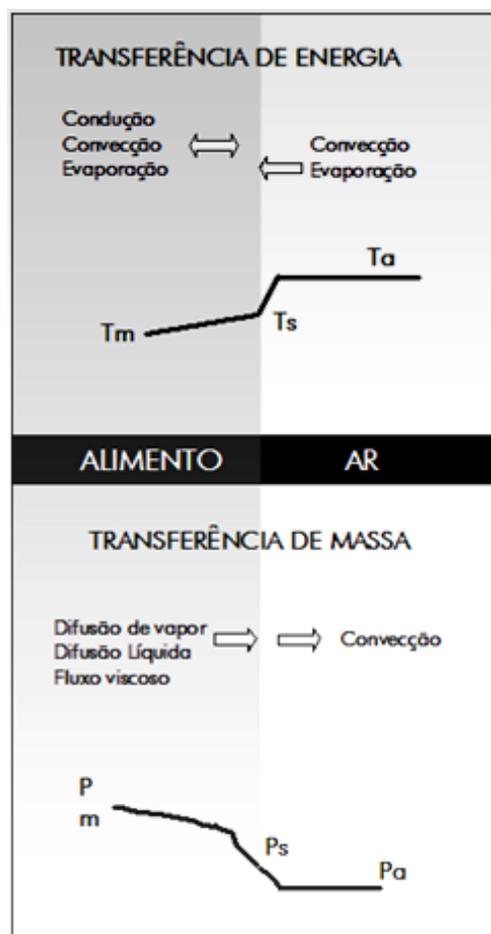


Figura 6 Visão esquemática da transferência de massa e calor na secagem

Em geral, os materiais submetidos à secagem são compostos por uma parte sólida e uma certa quantidade de água. A quantidade de água num material pode ser definida na base seca (kg de água/kg sólido seco) ou na base úmida (kg água/kg sólido úmido).

Segundo Favalli (2002) existem valores característicos da quantidade de água num sólido que podem ser identificados para cada material, como segue:

- a) umidade máxima: é a quantidade de água no sólido quando todos os espaços vazios estão totalmente preenchidos;
- b) umidade inicial: é a quantidade presente no início do período de secagem;
- c) umidade crítica: é a quantidade de água que caracteriza a mudança do período de taxa de secagem constante para o de taxa de secagem decrescente;
- d) umidade de equilíbrio: é a quantidade mínima de água da qual o material pode ser teoricamente seco, dadas as condições do processo. A água nele contida está em equilíbrio com o vapor presente no gás de secagem; e
- e) umidade higroscópica máxima: é a quantidade de água no sólido em equilíbrio com uma atmosfera saturada.

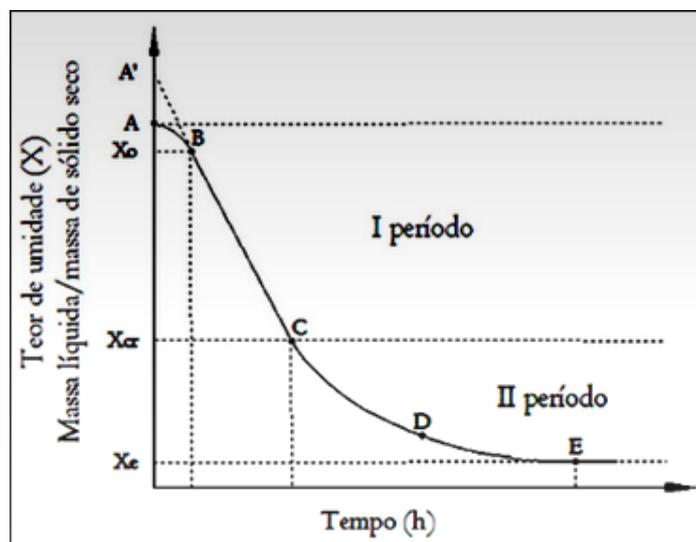


Figura 7 Teor de umidade em relação ao tempo de secagem
Fonte: Adaptado de Favalli (2002)

a) Trecho AB:

$$T_{\text{sólido}} < T_{\text{ambiente}}$$

O calor transferido do ar para o sólido é maior do que o calor retirado do sólido para evaporar água;

b) Trecho BC:

Período de taxa constante.

$$T_{\text{sólido}} = T_{\text{bulbo úmido}}$$

O calor é transferido para a superfície de secagem do sólido basicamente por convecção. A velocidade de secagem é inalterada com a diminuição do teor de umidade.

c) Trecho CDE:

Período de taxa decrescente. Inicia quando a umidade do sólido atinge um valor determinado chamado umidade crítica.

Dividido em duas zonas: zona de superfície de secagem não saturada e zona em que o fluxo interno de água controla o processo.

d) X_e (ponto E):

A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor de umidade atingível no processo de secagem.

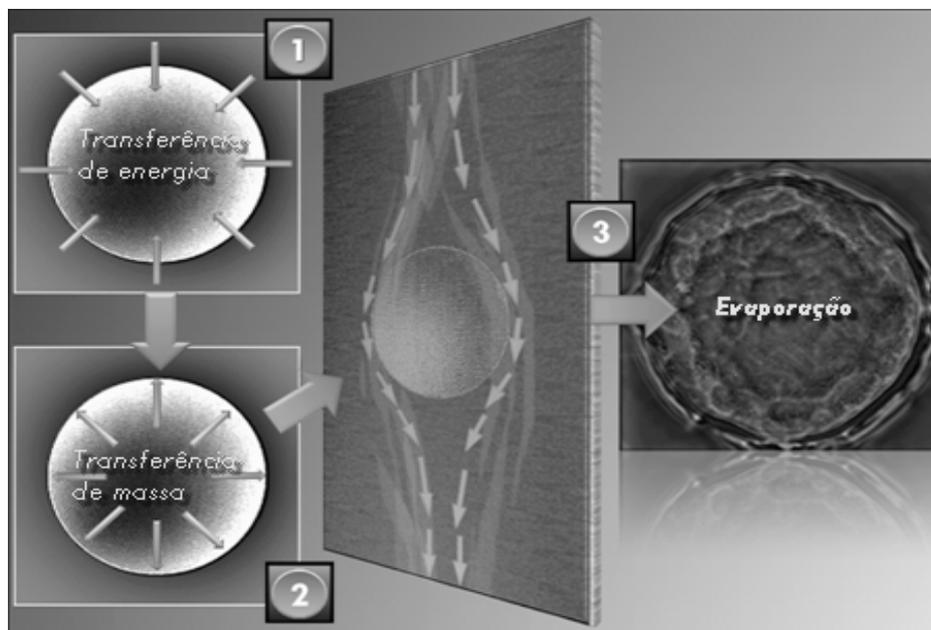


Figura 8 Gás aquecido envolvendo a gota de material úmido. O processo de secagem térmica é o resultado de uma transferência simultânea de calor (1) e massa (2), onde a água é evaporada e retirada do produto (3)

Ainda, segundo Favalli (2002), durante a secagem ocorrem três zonas distintas:

- a) zona de superfície de secagem não saturada (trecho \overline{CD}): segue imediatamente a umidade crítica. Nesse estágio, a superfície do sólido apresenta áreas secas que se ampliam na proporção em que a secagem prossegue e, conseqüentemente a taxa de secagem diminui, pois é relativa a toda a área do sólido (em contato com o ar). A taxa de difusão interna do líquido é menor que a taxa de evaporação na superfície do sólido, com menor resistência. A energia que era utilizada para a evaporação na fase anterior, acaba

sendo utilizada para elevar a temperatura do sólido. A temperatura do sólido aumenta, porque recebe do ar a mesma quantidade de calor que corresponderia ao período de taxa constante, sem, no entanto, ocorrer igual evaporação.

- b) Zona em que o fluxo interno de água controla a operação (Trecho **DE**):

Caracteriza-se pelo controle a taxa de secagem pelo fluxo interno de água. Os fatores que influenciam a taxa de secagem são os mesmo que afetam a difusão da água através de sólidos. Observa-se que a umidade do ar não tem efeito na taxa de secagem, mostrando que esta depende da resistência à difusão da água. À medida que a quantidade de umidade diminui, por causa da secagem, a velocidade da difusão interna da umidade decresce. A evaporação ocorre dentro da estrutura do sólido.

2.11.13 Secagem de materiais umedecidos

Segundo Strumillo e Kudra (1986), um processo de secagem de materiais umedecidos com água em condições externas constantes é bem ilustrado por diagramas qualitativos de três tipos:

- a) curva de secagem, na qual a quantidade de água no material é função do tempo de secagem;
- b) curva da taxa de secagem, na qual a taxa de secagem é apresentada em função da umidade do material (Figura 9); e
- c) curva de temperatura na qual a temperatura do material é expressa em função da quantidade de água (Figura 10).

O termo X é a quantidade de água no material e os subscritos 0, cr e eq indicam, respectivamente, a umidade inicial, crítica e de equilíbrio, como descrito no início desta seção.

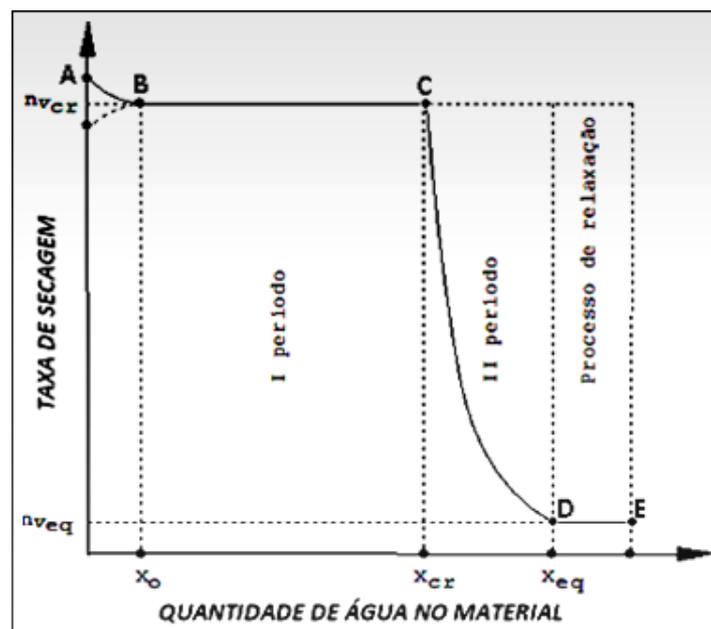


Figura 9 Taxa de secagem
Fonte: Adaptado de Favalli (2002)

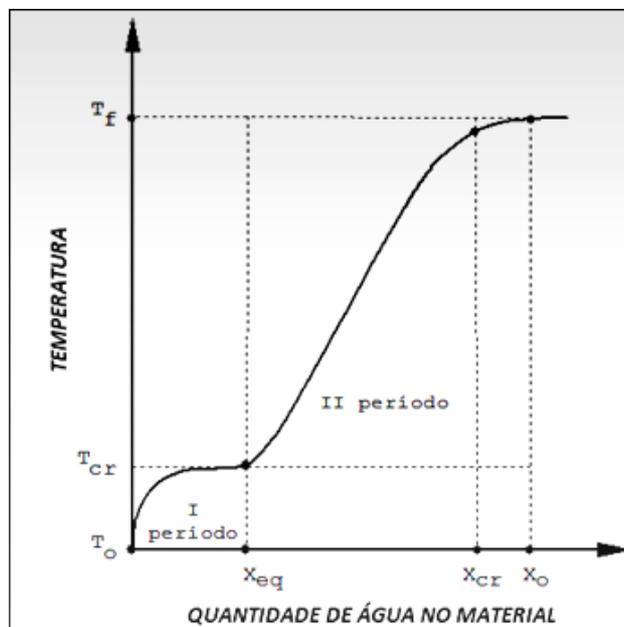


Figura 10 Curva de temperatura
 Fonte: Adaptado de Favalli (2002)

O segmento AB (ou A'B) representa o período inicial de secagem; BC, que ocorre após a relaxação, é linear. C é o ponto crítico e, após esse ponto, a curva se aproxima assintoticamente da umidade de equilíbrio do material, denominado processo de relaxação, indicado pela letra D na figura. O ponto em que termina o período a velocidade constante (ponto crítico), marca o instante em que a água líquida que está sobre a superfície é insuficiente para manter uma película contínua que cubra toda a área de secagem. Para sólidos não porosos aparece o ponto crítico quando se evapora a umidade superficial. Em geral, necessita-se de mais tempo para secar os últimos 10% que os primeiros 50% do material, pois ao atingir o ponto crítico, a taxa de secagem cai rapidamente, como demonstra a figura 6 (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

2.11.14 Influência da granulometria do adsorvente

A fixação da água e as características das isotermas de dessorção variam consideravelmente de um alimento para outro. A isoterma é resultado do comportamento dos diversos constituintes químicos do alimento com relação à água (CHEFTEL; CHEFTEL; BESANÇON, 1983).

Uma classificação dos diferentes tipos de isotermas universalmente empregadas é a classificação a que as divide em cinco diferentes tipos (Figura 11) (BASU et al., 2006).

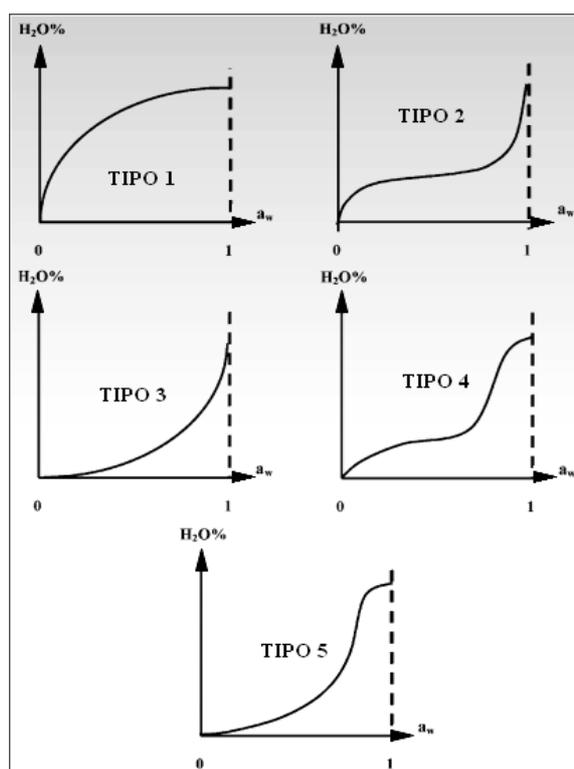


Figura 11 Tipos de isotermas de dessorção
Fonte: Basu et al. (2006)

As dimensões das partículas do adsorvente influenciaram consideravelmente na eficiência do processo. As partículas de menor diâmetro apresentaram melhores resultados, pois quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a área superficial total disponível para o contato entre o adsorvente e o adsorvato (geralmente água).

2.12 Princípios da secagem por atomização

De acordo com Le Maguer (1987 citado por CÁNOVAS; MERCADO, 1996) o efeito de tirar a água dos produtos alimentícios pode afetar suas propriedades, sejam físicas, biológicas ou químicas, tais como atividade enzimática, contaminação microbiológica, crocância, viscosidade, dureza, aroma, sabor e palatividade.

Uma secagem inadequada pode, muitas vezes, trazer consequências desastrosas ao alimento. Pesquisas nesse tema visam à obtenção de modelos matemáticos e de uma metodologia adequada, que possam descrever o processo de forma a evitar a ocorrência de perdas.

2.12.1 O princípio basal da secagem por atomização

Em quase todos os tipos de secadores se procura aumentar ao máximo a superfície do alimento que se está secando. Em geral, o alimento a ser desidratado é subdividido em pequenos pedaços ou em finas camadas, para que haja maior velocidade de transferência de calor e massa com o meio de aquecimento. Isso por que reduz-se a distância com que o calor necessita viajar para chegar ao centro do alimento e aumenta área de superfície, produzindo mais

área de contato com o ar dessecante e maior campo no qual a umidade poderá escapar (POTT; HOTCHKISS, 1998).

Partindo do princípio que considera o contorno esférico como a forma tomada pelo material quando atomizado por um bico de "spray", a relação superfície/volume pode ser calculada pela equação (2.7).

$$\frac{S}{V} = \frac{\pi D^2}{\left(\frac{\pi D^3}{6}\right)} = \left(\frac{6}{D}\right) \quad (2.7)$$

Nessa equação (Equação 3.1) pode ser observado que, à medida que diminui o diâmetro das gotas (D), a relação superfície (S)/volume (V) aumenta sensivelmente.

De fato tomando-se como exemplo um cm^3 de material úmido, atomizado na forma esférica, em um recipiente que o exponha para a evaporação da sua superfície superior, com um cm^2 de área, e o transformarmos em um *spray* com n gotas de $10 \mu\text{m}$ de diâmetro médio (um micron é um milionésimo de um metro – para se ter uma ideia: o cabelo humano tem cerca de 56 microns de diâmetro), têm-se:

$$1 \text{ cm}^3 = n_{\text{gotas}} \cdot \left(\frac{\pi D^3}{6}\right) \quad (2.8)$$

$$n_{\left(\frac{\text{gotas}}{\text{cm}^3}\right)} = \frac{6}{\pi D^3} \quad (2.9)$$

Portanto, para $D = 10 \mu\text{m}$, têm-se:

$$n_{\left(\frac{\text{gotas}}{\text{cm}^3}\right)} = \frac{6}{\pi D^3} = \frac{6}{\pi(0,001)^3} \cong 1,910 \times 10^9 \text{ gotas} \quad (2.10)$$

A área superficial disponível será:

$$S_{\left(\frac{\text{gotas}}{\text{cm}^2}\right)} = \pi(0,001)^2 \times 1,910 \times 10^9 = 6000 \text{ cm}^2 \quad (2.11)$$

É óbvio que o processo de atomização (Figura 12) é um processo muito eficiente para promover o aumento da superfície para evaporação.

Segundo Rosa, Tsukada e Freitas (2003), a eficácia do *spray dryer* está baseada no princípio do aumento de área de contato material úmido/agente secante. Para esferas, quando se diminui o diâmetro pela metade, tem-se um aumento de oito vezes na sua área superficial.

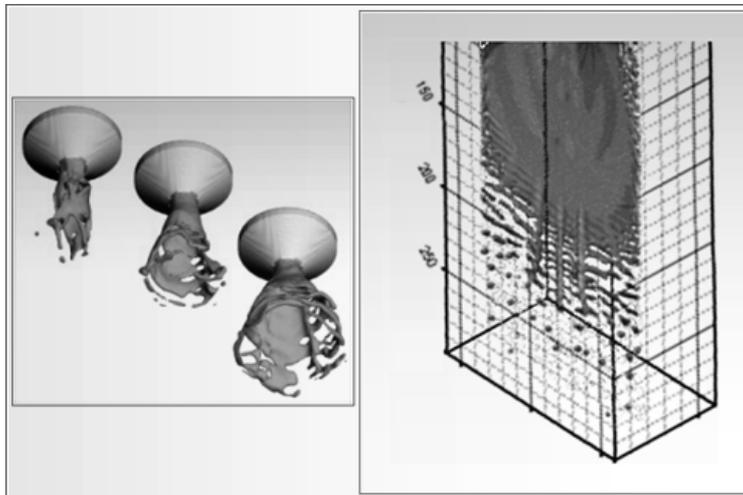


Figura 12 Atomização
Fonte: Simulent (2012)

2.12.2 O número médio de gotas depositadas

De acordo com Matthews (1982 citado por CHAIM; VALARINI, 2009), o número médio de gotas que se deposita por centímetro quadrado em uma superfície plana pode ser calculado pela equação (2.12):

$$n = \frac{60}{\pi} \times \left(\frac{100}{d}\right)^3 \times Q \quad (2.12)$$

Onde: n é o número médio de gotas que se deposita por cm^3 ;

d é o diâmetro da gota (μm); e

Q é o volume aplicado em litros por 10.000 m^2 .

Assim, um líquido pulverizado em gotículas de 100 microns gera uma área superficial de $3.400 \text{ m}^2 / \text{kg}$. Quando pulverizado em gotículas de 20 microns, sua área chegará a $17.000 \text{ m}^2 / \text{kg}$, o que corresponde a espalhar um galão de líquido sobre a superfície toda de dois campos de futebol. No caso de um mililitro ser pulverizado a um tamanho médio de 50 microns, terá oito milhões de gotículas, cada uma com área de $7,85 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, mas a área somada de todas elas seria de $62,83 \text{ cm}^2$ (cerca de 60 vezes maior que a área das 20 gotas) (ROSA; TSUKADA; FREITAS, 2003).

A Tabela 2 demonstra a densidade teórica de gotas quando se pulveriza um litro de material líquido por 10.000 m^2 .

Tabela 2 Densidade teórica de gotas

| DIÂMETRO DAS GOTAS (μm) | NÚMERO DE GOTAS POR cm^2 |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 19.999 |
| 20 | 2.387 |
| 50 | 153 |
| 100 | 19 |
| 200 | 2,4 |
| 400 | 0,298 |
| 1000 | 0,019 |

2.12.3 Eficiência térmica no *spray dryer*

Segundo Masters (1976), a eficiência térmica (η_{geral}) é definida como a fração do calor total fornecido ao secador, utilizados no processo de evaporação no caso de uma operação verdadeiramente adiabática, ela pode ser aproximada pela relação (Equação 2.13):

$$\eta_{\text{geral}} = \left(\frac{T_e - T_s}{T_e} \right) \cdot 100 \quad (2.13)$$

Onde: T_s = temperatura de saída e T_e = temperatura de entrada

Deve-se considerar, entretanto, um decaimento de 10% da temperatura de entrada, devido à infiltração de ar frio na entrada. Assim, a temperatura de entrada é afetada e deve ser corrigida segundo a correlação (Equação 2.14):

$$T_c = (0,90 \times T) + (0,10 \times T_{a,f}) \quad (2.14)$$

Onde:

T_c = temperatura corrigida;

T = temperatura do ar na entrada da torre; e

T_{af} = Temperatura do ar frio.

Assim, a fórmula para o cálculo da eficiência térmica fica (Equação 2.15):

$$\eta_T = \left(\frac{T_e - T_s}{T_e - T_{af}} \right) \cdot 100 \quad (2.15)$$

A seguir (Tabela 3), uma estimativa de eficiência térmica para:

- a) $T_s = 60^\circ\text{C}$ (temperatura de saída); e
- b) $T_{af} = 25^\circ\text{C}$ (temperatura do ar frio).

Tabela 3 Eficiência térmica

| Temperatura de entrada | Temperatura do ar frio | Temperatura retificada (10% corrigida) | Temperatura de saída | Eficiência térmica |
|------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|--------------------|
| T_e (°C) | T_{af} (°C) | T_c (°C) | T_s (°C) | η_t |
| 300 | 25 | 272,5 | 60,00 | 85,86 % |
| 280 | 25 | 254,5 | 60 | 84,75 |
| 250 | 25 | 227,5 | 60 | 82,72 |
| 200 | 25 | 182,5 | 60 | 77,78 % |
| 150 | 25 | 137,5 | 60 | 68,89 % |

A Tabela 3 demonstra um aumento da eficiência térmica com o aumento da temperatura do gás na entrada. No entanto, definir a melhor temperatura do processo é complicado por uma série de fatores limitantes. Dentre os quais incluem os seguintes:

- a) descoloração do produto por aquecimento, particularmente de material depositado nas proximidades da entrada de ar quente;

- b) possíveis danos de alguns ingredientes, principalmente os termossensíveis; e
- c) queima de produto no topo na torre.

2.12.4 Vantagens da secagem por atomização

Segundo Master (1976), a secagem por atomização tornou-se o método mais importante para a desidratação de alimentos líquidos, como leite, café e ovo em pó, e também é amplamente utilizado nas indústrias farmacêutica e química.

O processo de secagem é muito rápido (alguns segundos) o que permite um alto rendimento. O aquecimento e a transferência de massa durante a secagem ocorrem com filmes de ar e vapor ao redor das gotículas. As evaporações da água livre nas partículas refrigeram-nas, permitindo o uso de altas temperaturas do ar de secagem, sem afetar a qualidade do produto. Essa proteção do vapor mantém a partícula na temperatura de saturação. Como a partícula não se torna seca, a evaporação continua acontecendo e a temperatura dos sólidos se aproxima da temperatura da saída. Devido a isso, produtos sensíveis podem ser secos em temperaturas relativamente altas (LANNES; MEDEIROS, 2003). Portanto, atomização é um dos processos mais adequados para desidratação de alimentos termossensíveis devido ao rápido contato do alimento com temperaturas inferiores a 100°C (MASTERS, 1976) (normalmente se realiza a temperatura superficial, de 45-50°C). Por essa razão, é possível secar algumas suspensões bacterianas sem destruir os organismos.

Segundo Gutiérrez (2000) a desidratação de alimentos oferecem algumas vantagens: a) melhoram a estabilidade do produto, já que são conservados à temperatura ambiente; b) oferecem uma notável redução de peso

e volume, barateando os custos de transporte, armazenamento e distribuição; d) produzem alimentos mais concentrados em nutrientes (mais que qualquer outro método de conservação); e f) melhoram a aparência do produto, pois é possível obter certa homogeneidade.

A secagem por atomização é também usada para a preservação dos alimentos, permitindo secar os sólidos e sólidos solúveis com a mais alta qualidade e com a mínima degradação das características essenciais. O processo é contínuo e constantemente controlado. É possível controlar muitos dos fatores que influenciam a estrutura em pó, a fim de obter as propriedades desejadas (MASTERS, 1976).

2.12.5 Limitações e desvantagens da secagem por atomização

A secagem pelo processo de nebulização é de difícil utilização em alimentos ricos em açúcares, devido aos fenômenos pegajosidade e higroscopicidade, que minimizam o seu rendimento. O escoamento e reconstituição desses alimentos em pó são possíveis apenas com adição de substâncias que minimizam esses problemas, tais como maltodextrina, goma arábica, agentes antiaglomerantes, utilização de temperaturas mais baixas na câmara de secagem, dentre outras técnicas (MASTERS, 1976).

O calor requerido por unidade de peso do produto é alto, pois o conteúdo de umidade na alimentação pode ser grande comparado com a maior parte dos outros tipos de secadores e o rendimento térmico é baixo (devido às restrições na temperatura de entrada do ar e a temperatura de saída, que é relativamente alta). A recuperação dos gases de saída do produto em pó pode ser problemática ou pode necessitar um equipamento auxiliar que custa um preço elevado. Todas as impurezas que eventualmente confinantes à alimentação gasosa serão retidas nos

produtos. O custo do equipamento é alto, particularmente no caso de equipamentos de pequena capacidade. Além disso, o sistema com um todo requer muito espaço (MASTERS, 1976).

2.12.6 Decorrências do abaixamento do conteúdo aquoso nos alimentos

Um dos problemas associados ao processo de secagem por aspersão é a dificuldade de prever a qualidade do produto. Nesse ponto, a qualidade do produto consiste de parâmetros como teor de umidade, degradação térmica, retenção de aroma, forma e tamanho das partículas, compactação, etc. Os parâmetros de qualidade no produto final é o resultado da história da partícula quando submetido à temperatura do ar, umidade inicial, teor de sólidos inicial, viscosidade, densidade, degradação térmica (OETTERER et al., 2006).

Como nos demais métodos de secagem, os produtos não oferecem melhor qualidade que as matérias-primas de partida. Os desidratados sofrem modificações que não se limitam à perda de água, por exemplo: alguns alimentos evaporados podem apresentar uma cor mais intensa, pois o aumento da concentração dos sólidos e a diminuição da A_w favorecem algumas reações químicas (escurecimento não enzimático). Nos extremos $A_w < 0,4$ e $A_w > 0,7$ não há escurecimento. A $A_w < 0,4$ não escurece devido à imobilização dos componentes; não há água que permita que os componentes se unam para reagir. A $A_w > 0,7$ há efeito de diluição dos componentes tornando o meio viscoso, o que também não permite a reação. Porém ovos em pó apresentam em média A_w em torno de 0,5, que permite o escurecimento (OETTERER et al., 2006).

Os alimentos desidratados, de modo geral, não apresentam atividade enzimática porque as reações enzimáticas cessam quando a umidade atinge níveis que impedem a mobilidade das enzimas, isto é, A_w menor que 0,40.

Entretanto, a atividade enzimática pode iniciar-se caso o produto absorva umidade do ambiente onde é armazenado (SARANTÓPOULOS; OLIVEIRA; CANAVESI, 2001 citado por BEZERRA, 2009).

A absorção ou ganho de umidade constitui uma alteração física que ocorre em alimentos de baixa atividade de água ou umidade. Essa alteração tem efeitos diferentes conforme o produto, os quais podem deteriorar a qualidade do produto, como alterações de textura (amolecimento ou aglomeração), crescimento microbiológico, oxidação de lipídeos e pigmentos, atividade enzimática (escurecimento enzimático e não enzimático), perda de vitaminas e outras reações específicas para cada alimento, além disso, o ganho de umidade promove o aumento da atividade de água do produto que pode levar, dentre outros, a um desenvolvimento microbiano (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

Na desidratação poderá ocorrer uma aglomeração devido à aproximação das superfícies umedecidas. A turbulência na câmara de secagem gera forças suficientes para causar a união de partículas adjacentes e produzir a aglomeração. Desse modo, haverá uma perda de qualidade e, conseqüentemente, limitação da vida de prateleira (COSTA, 2007).

2.12.6.1 A transição vítrea

Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância dos constituintes alimentares, isto é, não há regularidade no arranjo dos seus constituintes moleculares (MARINHO, 2005).

A maioria dos produtos alimentícios com conteúdo de umidade reduzido existe em um estado amorfo, ou com partes amorfas. Isso por que nos processos de remoção de água, principalmente nos de remoção rápida, alguns constituintes

alimentares perdem sua mobilidade rapidamente antes de se arranjam em uma disposição ordenada e se arrumam numa disposição caótica, fora do ideal cristalino (MARINHO, 2005).

Dependendo da temperatura de conservação e sua composição (principalmente o conteúdo de água), a forma vítrea é extremamente higroscópica e absorve água. Isso contribui para sua instabilidade, porque a adsorção de água aumenta a velocidade de cristalização dos materiais amorfos, especialmente carboidratos. Além disso, a forma amorfa retém ar na sua estrutura o que pode originar grandes cristais, que dificultam sua reconstituição (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2010).

A Figura 13 demonstra que operação de secagem inicia-se com um aumento da temperatura do produto alimentício no trajeto \overline{AB} , sem que haja modificação de sua composição.

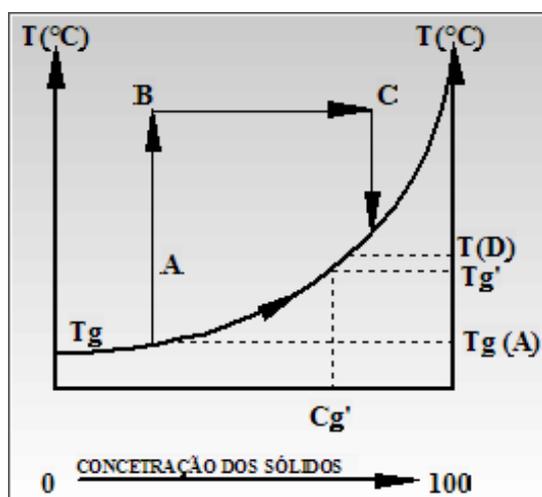


Figura 13 Evolução da temperatura de transição vítrea do produto alimentício no decorrer do processo de desidratação

Fonte: Collares (2001)

Em seguida, acontece a evaporação da água que se dá a uma temperatura aproximadamente constante (trajeto \overline{BC}). Após a secagem, o produto é resfriado a uma temperatura próxima à temperatura de armazenamento (trajeto \overline{CD}) (COLLARES, 2001).

A temperatura de transição vítrea do produto se eleva no decorrer do processo de secagem, como consequência do aumento da concentração de sólidos do material. É aconselhável que a temperatura final do produto desidratado, $T(D)$, seja inferior à temperatura de transição vítrea (T_g) na concentração de sólidos alcançada e, portanto, o material encontra-se no estado vítreo durante o armazenamento.

2.12.7 Coadjuvantes da secagem (material de parede)

Durante o processo de secagem por atomização à medida que as partículas são lançadas no meio gasoso (fluxo de ar quente, o mais comum) em movimento descendente (ou ascendente), elas tomam a forma esférica que poderão ser “empacotadas” (revestidas) por determinado material, denominado material de parede, que se depositam como uma fina camada na superfície das partículas formando microcápsulas (ANSELMO et al., 2006).

As microcápsulas podem ter diâmetros que variam de unidades micrométricas até unidades milimétricas e apresentam formas diversas, dependendo dos materiais e métodos usados para sua obtenção (ANSELMO et al., 2006).

A variedade de material de parede, comumente usado no processo de empacotamento de partículas em cápsulas comestíveis (exemplo: compostos de sabor, pigmentos, acidulantes, nutrientes, enzimas, conservantes) é relativamente

limitada e inclui gomas naturais, carboidratos, proteínas, ceras e alguns polímeros naturais quimicamente modificados (ANSELMO et al., 2006).

Um dos materiais mais utilizados como encapsulante na secagem por atomização é a maltodextrina, isso devido ao seu baixo custo e por apresentar baixa higroscopicidade, evitando a aglomeração das partículas. Esse material de parede tem também, efeito antioxidante e uma ótima retenção de substâncias voláteis que estão na ordem de 65 a 80% (ANSELMO et al., 2006).

As maltodextrinas são biopolímeros (carboidratos) originados da hidrólise parcial do amido e têm extensa utilização como ingredientes por proporcionarem características desejáveis a alimentos processados, com fórmula molecular $[(C_6H_{10}O_5)_n(H_2O)]$. São classificadas pelo seu grau de hidrólise, expresso em dextrose equivalente (DE), que é a porcentagem de açúcares redutores calculados como glicose em relação ao peso seco do amido. O grau de decomposição química fica entre aquele do amido e do xapote de amido, com um DE entre 2 e 20. Usualmente esses compostos são produzidos na forma de pó, com um conteúdo de umidade variando de 3,0 a 5,0%. São brancos, possuem boa escoabilidade (em inglês: *free-flowing*), com sabor muito suave e com pouca (ou nenhuma) doçura (COLLARES, 2001).

Nos Estados Unidos, a *FDA* ("*Food and Drug Administration*") define maltodextrina como um sacarídeo não adocicado e nutritivo que consiste de unidades de D-glicose unidas por ligações $\alpha(1-4)$ e que apresenta DE menor que 20 (COUTINHO; CABELLO, 2008).

Nas indústrias de alimentos, as maltodextrinas podem ser utilizadas como agente espessante, para auxiliar a secagem por atomização, como substituto de gorduras, como formador de filmes, no controle do congelamento, para prevenir cristalizações e como complemento nutricional. Nessas aplicações, várias propriedades físicas, químicas e biológicas são requeridas. Sendo assim, a

caracterização das maltodextrinas apenas pelo valor da DE não tem sido suficiente para orientar o desempenho do produto em variadas aplicações.

As maltodextrinas são produzidas de amidos de diferentes fontes botânicas e com o mesmo DE podem apresentarem propriedades diferentes, refletindo a composição molecular formada durante o processo de hidrólise (COUTINHO; CABELLO, 2008).

2.13 Secadores por atomização

O processo de secagem por atomização é mais antigo que se imagina. A ideia básica da secagem por atomização é a produção de pós altamente dispersivos a partir de um fluido que evapora o solvente.

2.13.1 Antecedentes históricos

Entre os métodos de secagem, um dos mais bem sucedidos – senão o mais – é o método de secagem por atomização, ou *spray drying* (Figura 14). No entanto, esse processo é mais antigo que se imagina normalmente. As primeiras descrições datam de 1860 com o primeiro desenho patenteado em 1872 (WESTERGAARD, 2004).

A ideia básica na secagem por atomização é provocar a mistura dentro de um recipiente (câmara de secagem) entre um gás aquecido (ar) e uma massa fluida, pulverizada em forma de gotículas com grande proporção de superfície, para provocar pelo contato direto a evaporação do solvente (sobretudo água) de forma rápida e uniforme.

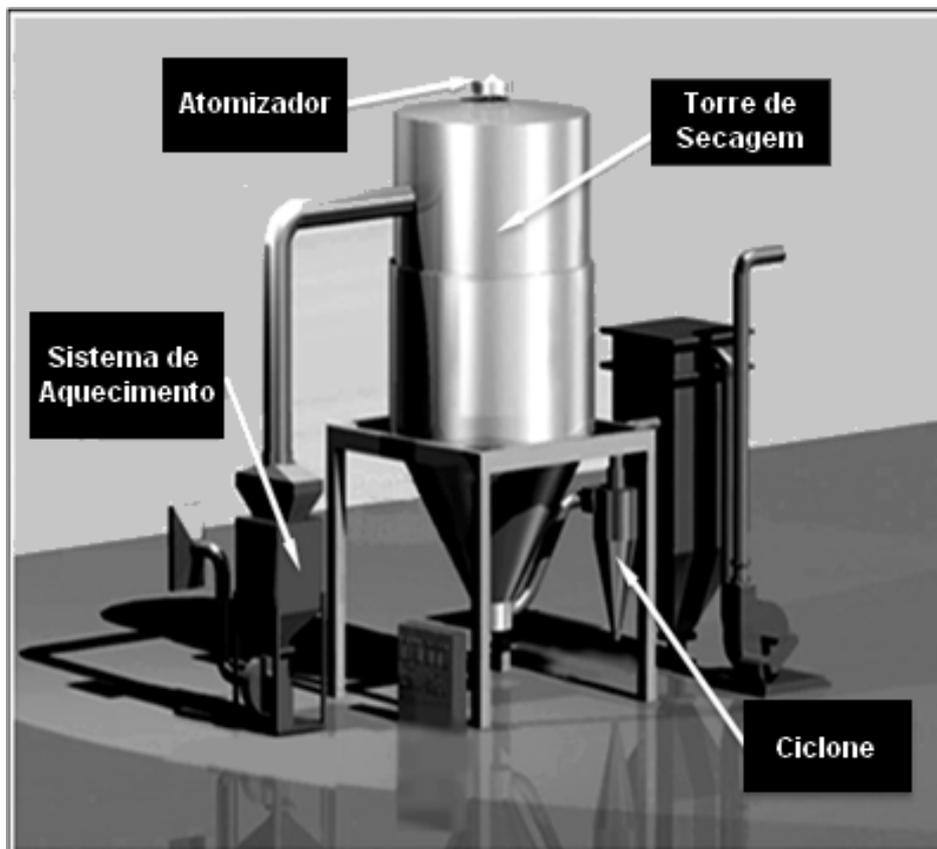


Figura 14 Sistema *spray dryer*
Fonte: Adaptado de Ohkawara (2012)

Contudo, os secadores por pulverização estão limitados, portanto, a alimentos que podem ser bombeados (com comportamento líquido), tais como líquidos e pastas de baixa viscosidade e purês; mesmo assim, são notadamente aplicados (em larga escala) para a secagem de produtos das linhas alimentícia e farmacêutica (ROSA; TSUKADA; FREITAS, 2003).

2.13.2 Dispositivos de pulverização

Um requisito fundamental para a secagem por atomização a é a conversão eficiente do material úmido em gotículas com tamanho uniforme, a fim de garantir a secagem homogênea na secção transversal da torre e facilitar a recuperação do produto na sua reconstituição. Essa transformação, do fluido em um *spray* é atribuída por alguns investigadores à turbulência gerada na câmara de turbilhamento dos bicos atomizadores. Porém, a dispersão sob pressão de material no *spray dryer* requer certo trabalho, que é despendido para vencer a tensão superficial e aumentar a superfície total do fluido. A capacidade de produzir trabalho, ou seja, de transformar ou mover algo é definida como energia (WESTERGAARD, 2004).

Segundo Mrak e Stewart (1963) a energia de atomização é igual ao produto da tensão superficial e nova superfície total criada e a dispersão pode ser feita de várias maneiras, mas em todas as ocasiões materializa numa vaporização eficiente.

Houghton (1941 citado por MRAK; STEWART, 1963) classificou os bicos de pressão como: bicos de cone oco, bicos de cone sólido, bicos de jato e bicos de impacto. Apenas o primeiro deles (os bicos de pressão com um padrão de pulverização de cone oco) é comumente encontrado na secagem de alimentos em *spray dryers*.

2.13.3 Padrão de pulverização

Segundo a Spraying Systems Co. (1995) existem diferentes tipos de bicos no mercado, cada qual com características específicas para uma determinada aplicação. Essas variações são importantes, pois permitem utilizar

aquele mais adequado a cada situação, minimizando assim as perdas de produtos.

O padrão de pulverização usado em *spray dryer* é aquele essencialmente formado por um anel circular de líquido de cone oco (Figura 15).

A Figura 16 demonstra o padrão de um bico atomizador do tipo cone oco. A configuração geométrica do padrão de pulverização forma-se assim que deixa o bocal.

Esse padrão é formado geralmente pelo uso de uma entrada tangencial à câmara de turbilhamento, ou por um difusor ranhurado interno, colocado imediatamente acima do orifício.

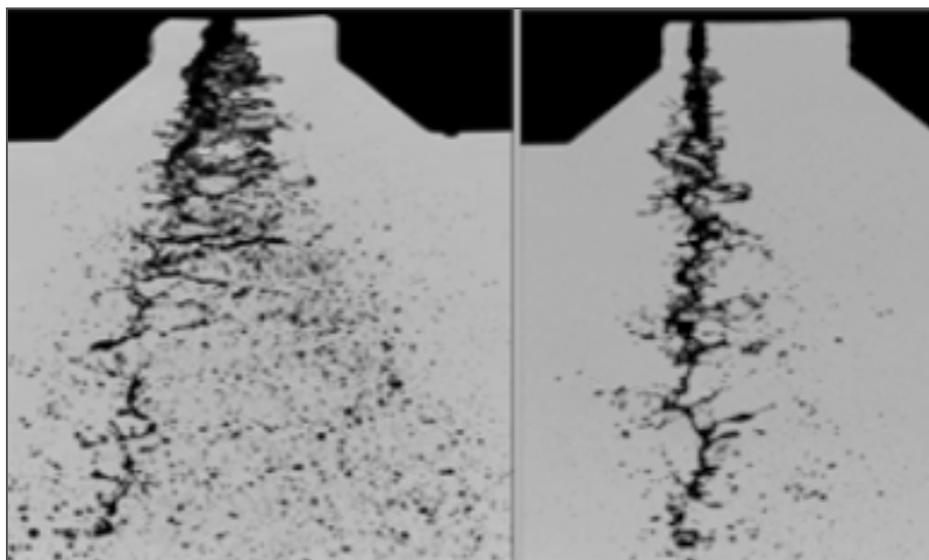


Figura 15 Padrão de Pulverização
Fonte: Niro Powder Technology (2004)

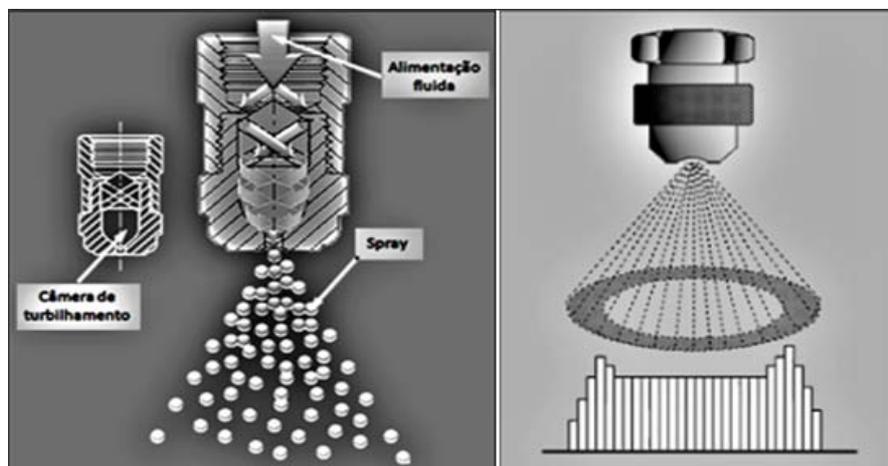


Figura 16 Distribuição das gotas no atomizador por pressão
 Fonte: Adaptado de *Spray Systems Co.* (1995)

2.13.4 Capacidade do bico

Segundo a *Spraying Systems Co.* (1995), toda a capacidade das tubulações tem por base a água. Como o peso específico de um líquido afeta a sua vazão, as capacidades tabuladas devem ser multiplicadas pelo fator de conversão (Tabela 4) aplicável ao peso específico do líquido pulverizado, da forma que é mostrado a seguir:

A fórmula (equação 2.16) para conversão de densidade é:

$$l/min \text{ (pulverizado)} = \left(\frac{l/min \text{ (água)}}{\text{Fator de Conversão}} \right) \quad (2.16)$$

Tabela 4 Conversão de densidade

| QUILOS POR LITRO | FATOR DE CONVERSÃO |
|------------------|--------------------|
| 0,84 | 0,92 |
| 0,96 | 0,98 |
| 1,00 – Água | 1,00 |
| 1,08 | 1,04 |
| 1,20 | 1,10 |
| 1,28 | 1,13 |
| 1,32 | 1,15 |
| 1,44 | 1,20 |
| 1,68 | 1,30 |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.5 Pressão de pulverização

A capacidade do bico varia com a pressão de pulverização do pulverizado.

Em geral, tem-se a seguinte relação entre a vazão (*l/min*) (equações 2.17 e 2.18) e a pressão (bar):

$$l/min_1 = (l/min_2) \sqrt{\frac{bar_1}{bar_2}} \quad (2.17)$$

Ou melhor:

$$Capacidade (kg/h) = K \cdot \sqrt{P} \quad (2.18)$$

Assim, para dobrar a vazão deve-se aumentar a pressão quatro vezes. A pressão mais alta não apenas aumenta a vazão através do bico, mas também influencia o tamanho da gota e a taxa de desgaste do orifício. Conforme a pressão aumenta, o tamanho das gotas diminui e a taxa de desgaste do orifício aumenta (SPRAYING SYSTEMS Co., 1995).

2.13.6 Ângulo de pulverização e cobertura

Os valores dos ângulos de pulverização e cobertura baseiam-se na consideração de que o ângulo de pulverização permanece o mesmo em toda a distância de pulverização (Figura 17). Na prática, o ângulo de pulverização tabulado não se mantém para maiores distâncias de pulverização. Líquidos mais densos que a água formam ângulos menores e os menos densos formam ângulos maiores (SPRAING SYSTEMS Co., 1995).

Os valores seguintes (Tabela 5) são baseados no pressuposto de que o ângulo de pulverização permanece o mesmo durante toda a distância de pulverização.

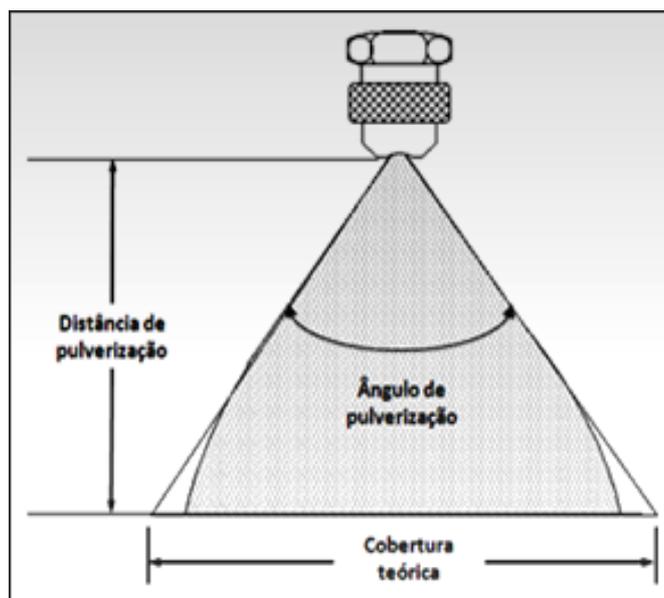


Figura 17 Cobertura da Pulverização

Tabela 5 Cobertura teórica de várias alturas de pulverização

| Ângulo de Pulverização ou Incluso | Cobertura teórica de várias alturas de pulverização a várias distâncias (cm) do orifício do bico | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 cm | 30 cm | 40 cm | 50 cm | 60 cm | 70 cm | 80 cm | 90 cm |
| 15° | 5,3 | 7,9 | 10,5 | 13,2 | 15,8 | 18,4 | 21,1 | 23,7 |
| 20° | 7,1 | 10,6 | 14,1 | 17,6 | 21,2 | 24,7 | 28,2 | 31,7 |
| 25° | 8,9 | 13,3 | 17,7 | 22,2 | 26,6 | 31,0 | 35,5 | 39,9 |
| 30° | 10,7 | 16,1 | 21,4 | 26,8 | 32,2 | 37,5 | 42,9 | 48,2 |
| 35° | 12,6 | 18,9 | 25,2 | 31,5 | 37,8 | 44,1 | 50,5 | 56,8 |
| 40° | 14,6 | 21,8 | 29,1 | 36,4 | 43,7 | 51,0 | 58,2 | 65,5 |
| 45° | 16,6 | 24,9 | 33,1 | 41,4 | 49,7 | 58,0 | 66,3 | 74,6 |
| 50° | 18,7 | 28,0 | 37,3 | 46,6 | 56,0 | 65,3 | 74,6 | 83,9 |
| 55° | 20,8 | 31,2 | 41,7 | 52,1 | 62,5 | 72,9 | 83,3 | 93,7 |
| 60° | 23,1 | 34,6 | 46,2 | 57,7 | 69,3 | 80,8 | 92,4 | 104 |
| 65° | 25,5 | 38,2 | 51,0 | 63,7 | 76,5 | 89,2 | 102 | 115 |
| 73° | 29,6 | 44,4 | 59,2 | 74,0 | 88,8 | 104 | 118 | 133 |
| 80° | 33,6 | 50,4 | 67,1 | 83,9 | 101 | 118 | 134 | 151 |
| 85° | 36,7 | 55,0 | 73,3 | 91,6 | 110 | 128 | 147 | 165 |
| 90° | 40,0 | 60,0 | 80,0 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 |
| 95° | 43,7 | 65,5 | 87,3 | 109 | 131 | 153 | 175 | 196 |
| 100° | 47,7 | 71,5 | 95,3 | 119 | 143 | 167 | 191 | 215 |
| 110° | 57,1 | 85,7 | 114 | 143 | 171 | 200 | 229 | 257 |
| 130° | 85,8 | 129 | 172 | 215 | 257 | — | — | — |
| 140° | 110 | 165 | 220 | 275 | — | — | — | — |
| 150° | 149 | 224 | 299 | — | — | — | — | — |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.7 Tipos de atomizadores

O efeito de atomização pode ser conseguido usando vários tipos de dispositivos. Os dispositivos básicos incluem: atomizadores rotativos; bicos de pressão; bicos pneumáticos e bicos de ultrassom. Os mais dois primeiros são os mais usados em *spray dryers* (Figura 18).

O transporte de alimentos para o dispositivo de atomização é facilitado por vários tipos de bombas, porém as bombas peristálticas são as mais utilizadas. Entretanto, há uma restrição na alimentação viscosa, pois as propriedades físicas

da alimentação nem sempre permitem um abastecimento uniforme e contínuo. Um alimento muito viscoso pode causar problemas de entupimento (KRZYSZTOF, 2009).

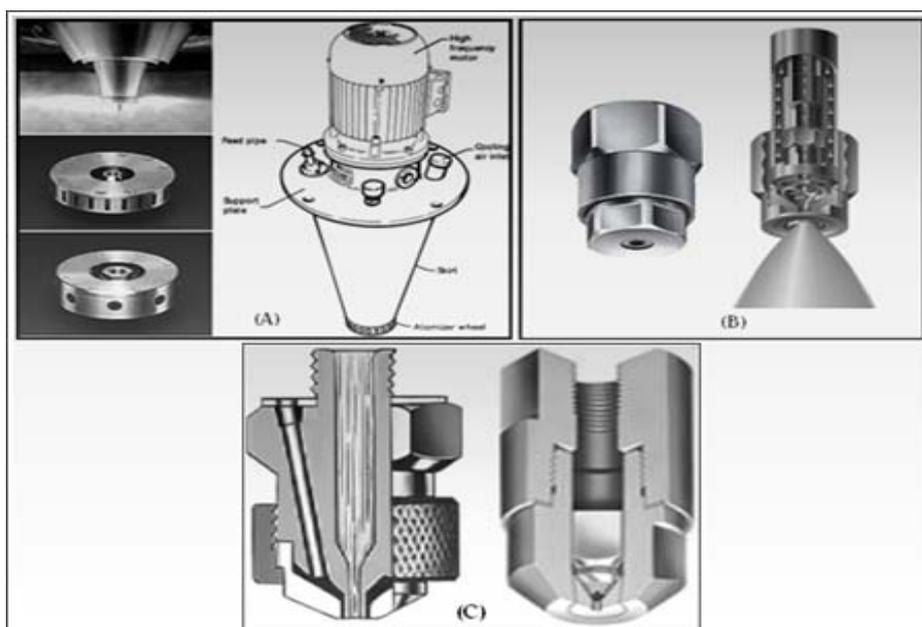


Figura 18 Tipos de Bicos Atomizadores: (A) rotativo; (B) de pressão e (C) duplo fluido

Fonte: GEA Process Engineering (2012) e Spraying Systems (1995)

2.13.7.1 Atomização por pressão

A função básica dos bicos de pressão (Figura 19) é converter a energia de pressão (proporcionada pela bomba de alta pressão) em energia cinética na forma de uma película delgada, que se dividirão em milhares de gotículas, cuja estabilidade de cada uma é determinada pelas propriedades do fluente, tais como viscosidade, tensão superficial, densidade e umidade, além do meio onde é

atomizado. A maioria dos bicos de pressão existente tem uma câmara em espiral que produz uma rotação do líquido, de forma a deixar o orifício (segundo componente principal dos bicos de pressão) com formato de cone oco. A conformação da atomização é uma função da pressão operacional (WESTERGAARD, 2004).

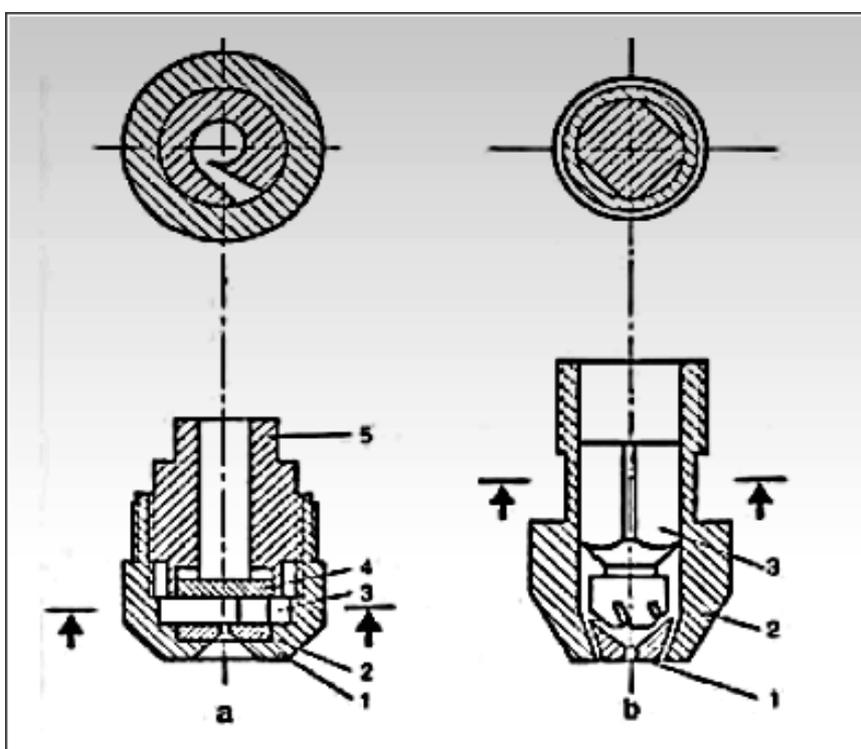


Figura 19 Bico de pressão: A) tipo espiral, (1) corpo, (2) orifício, (3) câmara de turbulência, (4) placa final, (5) parafuso de pino; (B) bicos com cavilhas ranhuradas, (1) orifício, (2) cabeça do bico, (3) inserção de turbulência

Fonte: Masters (1976)

2.13.7.1.1 Tamanho das gotas

O tamanho das gotas produzidas a partir de um bico de pressão varia inversamente com a pressão e ângulo de pulverização e diretamente com a taxa de alimentação e viscosidade.

Uma vez que o material deixa o bico de pulverização, somente o tamanho de gotas, o número e a velocidade das gotas pode ser medido. Como regra geral pode-se dizer que quanto maior for viscosidade, densidade, tensão superficial e menor a pressão, maior será o tamanho das gotas.

Muitas fórmulas têm sido apresentadas para medir o tamanho das gotas, mas segundo Westergaard (2004), a seguinte (equação 2.19) apresenta certo grau de confiança:

$$ds = 157. \left(\frac{\sigma}{P} \right)^{0.5} + 597. \left[\left(\frac{\mu}{\sigma \cdot PL} \right)^{0.45} \times \left(\frac{Q}{K_a \cdot d_o \cdot \left(\frac{P}{PL} \right)} \right)^{1.5} \right] \quad (2.19)$$

Onde:

ds = diâmetro médio da partícula pulverizada (microns);

σ = tensão superficial do líquido (dinas/cm);

P = pressão do bico (p.s.i.);

μ = viscosidade do bico (poise);

PL = densidade do bico (g/cm^3);

Q = grau de alimentação volumétrica/unidade de tempo;

K_a = constante do bico (depende do ângulo de pulverização);

d_o = diâmetro do orifício.

2.13.7.1.2 Atomização centrífuga

A velocidade das gotas atomizadas é de cerca de $v = 7,6 \text{ m / s}$. Nos atomizadores centrífugos, ou rotativos, o líquido é continuamente acelerado até a borda de um disco atomizador por forças centrífugas, num movimento de rotação em relação a um referencial inercial, produzido pela sua rotação (WESTERGAARD, 2004).

As Figuras 20, 21 e 22 demonstram o processo de formação das gotículas. A Figura 23 o esquema de um atomizador rotativo.

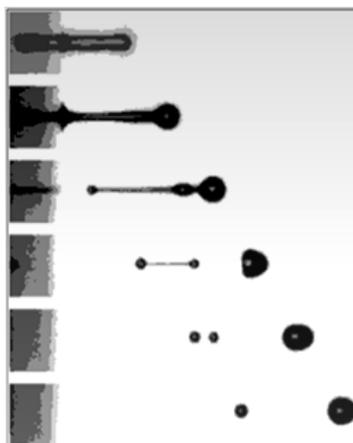


Figura 20 Gotas sendo geradas
Fonte: Frohn e Roth (1965)

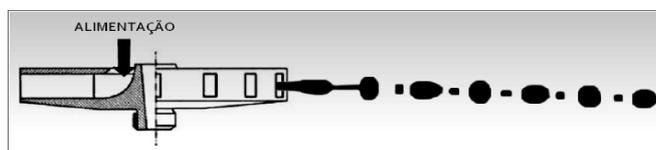


Figura 21 Atomização centrífuga
Fonte: Adaptado de Krzystof (2009)

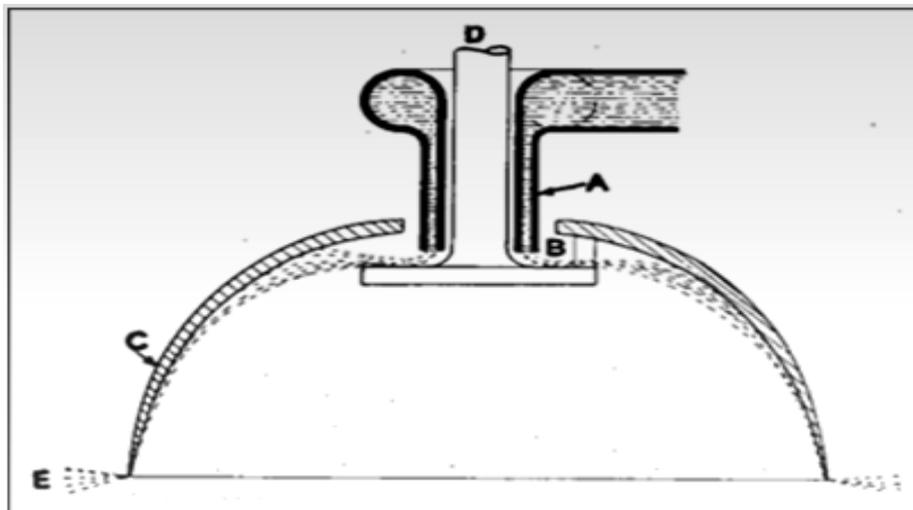


Figura 22 Tipo de Atomizador Centrífugo. (A) tubo de entrada; (B) distribuidor; (C) tigela de suspensão; (D) Eixo; (E) *spray*
 Fonte: Crossley (2011)

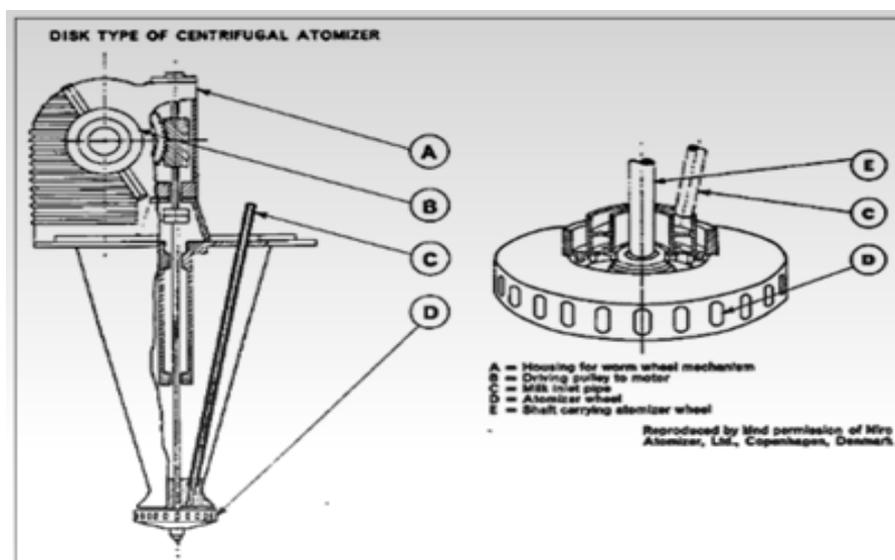


Figura 23 Esquema do atomizador centrífugo
 Fonte: Westergaard (2004)

Segundo Westergaard (2004), os discos devem ter um desenho que permita ao líquido alcançar a velocidade periférica antes da descarga. Com esse fim, os discos têm sulcos de diferentes desenhos (Figura 24) para evitar que o líquido se mova na direção da superfície interna.



Figura 24 Discos centrífugos. A posição do orifício é a mesma para todos os quadros

Fonte: Westergaard (2004)

2.13.7.1.3 Diâmetro da gota na atomização rotativa

Segundo Rosa, Tsukada e Freitas (2003), a seguinte expressão (equação 2.20) proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938), permite o cálculo do tamanho da gota produzida por um disco atomizador:

$$D_{vs} = \frac{1920\sqrt{\alpha}}{V_R} + 597 \left[\left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma\rho}} \right)^{0.45} \times \left(\frac{1000Q_L}{Q_a} \right)^{1.5} \right] \quad (2.20)$$

Onde:

D = diâmetro médio das gotas, mm;

μ = viscosidade, cP;

α = distância do bico onde ocorre a quebra do jato em gotas, cm;

σ = tensão superficial do líquido, dina/cm²;

ρ = densidade do líquido, g/cm²;

V_R = velocidade relativa ar-líquido no bico, cm/s;

Q_L = vazão do líquido, l/min.; e

Q_A = vazão do ar, l/min.

2.13.7.1.4 Velocidade periférica

Segundo Westergaard (2004), na atomização rotativa a velocidade periférica é amplamente aceita como a principal variável de ajuste de um tamanho de gota especificado. A velocidade periférica varia em função do diâmetro e da velocidade da roda e é calculada pela seguinte forma (equação 2.21):

$$V_p = \frac{\pi \times D \times N}{1000 \times 60} \quad (2.21)$$

Onde:

V_p = velocidade periférica, m /seg;

D = diâmetro do disco, mm; e N = velocidade do disco, rpm.

No entanto, mesmo que não se altere a velocidade periférica a prática demonstra que o tamanho da gota não permanece necessariamente constante, há uma tendência: rodas maiores produzem partículas maiores (WESTERGAARD, 2004).

2.13.8 Atomizadores de dois fluidos

Nesses sistemas, o bico dispersa a alimentação líquida ao lado de um meio gasoso à alta velocidade, por isso são chamados de bicos pneumáticos (Figura 25).

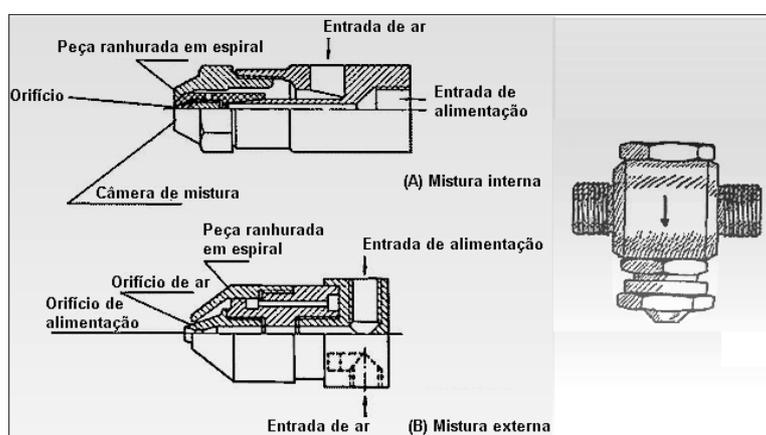


Figura 25 Bicos de dois fluidos

Fonte: Adaptado de Westergaard (2004)

A energia (cinética) necessária para atomização é fornecida por ar comprimido. A atomização é criada devido a altas forças de cisalhamento de atrito entre a superfície do líquido e do ar com uma velocidade alta, inclusive velocidade sônica e por vezes submetidas a uma rotação para se obter uma atomização máxima (WESTERGAARD, 2004).

2.13.8 Tamanho da gota

A atomização de dois de líquidos é o único método satisfatório para produzir partículas muito pequenas, principalmente de líquidos altamente viscosos.

Muitos cientistas têm tentado calcular o diâmetro médio das gotas e a relação entre as condições de tamanho e as condições de trabalho; mas, segundo Westergaard (2004), a equação mais conhecida é a equação 2.22:

$$d_s = \left(\frac{1410}{V}\right) \left(\frac{\sigma}{PL}\right)^{0.5} 191 \left(\frac{\mu}{(\sigma PL)}\right)^{0.45} \times \left(\frac{1000}{J}\right)^{1.5} \quad (2.22)$$

Onde: d_s = diâmetro médio da gota, micras;

V = velocidade do ar com respeito ao líquido no orifício do bico, pé/seg.;

σ = tensão superficial, dinas/cm;

PL = densidade do líquido, libras/pé³;

μ = viscosidade, centipoises; e

J = relação de volume ar/líquido nos orifícios de ar e líquido, respectivamente.

A Figura 26 demonstra a distribuição do tamanho das gotas entre os bicos de pressão e bicos de dois fluidos

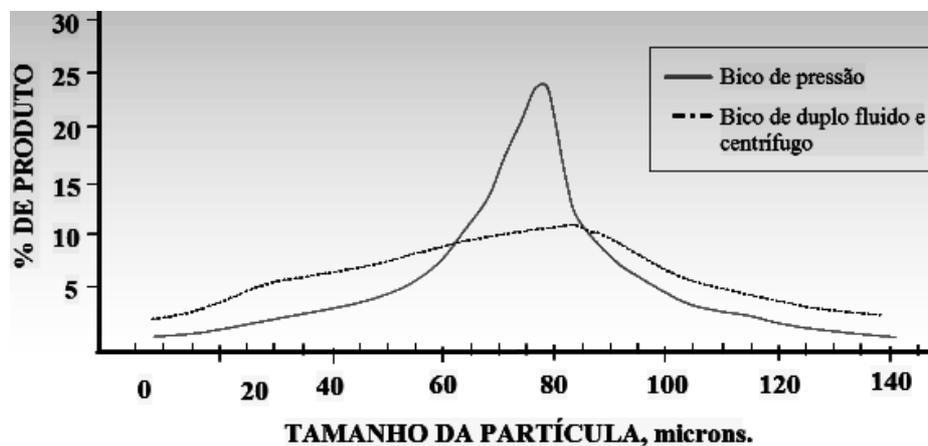


Figura 26 Distribuição do tamanho das partículas
 Fonte: Spray Drying Systems (2012)

2.13.9 A distribuição do tamanho das partículas

O Quadro 1 mostra diversos tamanhos de gotas na natureza.

Quadro 1 Comparativo de tamanhos de partícula presentes na natureza e suas definições

| TAMANHO DA PARTÍCULA DMV (microns) | EXEMPLO COMPARATIVO | TEMPO DE QUEDA DE 3m (segundos) |
|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 5000 a 2000 | Chuva Pesada | 0,085 a 0,9 |
| 2000 a 1000 | Chuva Intensa | 0,9 a 1,1 |
| 1000 a 500 | Chuva moderada | 1,1 a 1,6 |
| 500 a 100 | Chuva Leve | 1,6 a 11 |
| 100 a 50 | Névoa | 11 a 40 |
| 50 a 10 | Névoa Umida | 40 a 1020 |
| 10 a 2,0 | Névoa Seca | 1020 a 25400 |
| 1,0 a 0,01 | Vapor | Suspensão no ar |
| 0,01 a 0,001 | Fumaça | Suspensão no ar |

Fonte: Rosa, Tsukada e Freitas (2003)

2.13.10 Fatores que afetam o desempenho dos bicos de pulverização

Bicos de pulverização são componentes precisos designados para produzir um desempenho muito específico, conforme condições especiais como: pressão de trabalho, densidade específica, viscosidade, aumento da temperatura do fluido e tensão da superfície.

2.13.10.1 Pressão de trabalho

Segundo a Spraying Systems Co. (1995), alguns bicos podem funcionar abaixo ou acima dos valores limites de variação de pressão comumente utilizados, porém, a maioria sofre modificações nas suas performances, como demonstrado no Quadro 2:

Quadro 2 Efeito da pressão no desempenho de bicos pulverizadores

| AUMENTO NA PRESSÃO DE TRABALHO | DESEMPENHO |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Qualidade padrão | Melhora |
| Vazão | Aumenta |
| Ângulo de pulverização | Aumenta, depois diminui |
| Tamanho da gota | Diminui |
| Velocidade | Aumenta |
| Impacto | Aumenta |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.10.2 Densidade

A densidade específica é a relação de massa de um dado volume de líquido à massa do mesmo volume de água. Em pulverização, o principal efeito da densidade específica de um líquido (exceto água) está na vazão do bico de pulverização. Quando baseadas em pulverização de água usa-se um fator de

conversão ou a seguinte fórmula (Equação 2.23) para a determinação a vazão do bico ao usar um líquido que não seja água.

$$\text{Vazão de líquido pulverizado} = \frac{\text{vazão de água}}{\sqrt{\text{densidade específica}}} \quad (2.23)$$

O fator de conversão multiplicado pela vazão do bico ao pulverizar água favorece a vazão do bico ao pulverizar um líquido com uma densidade específica correspondente ao fator de conversão (Figura 27). Esse fator de conversão somente explica o efeito da densidade específica sobre a vazão e não explica outros fatores que afetam a vazão (SPRAYING SYSTEMS Co., 1995).

O efeito da densidade específica no desempenho de bicos pulverizadores é demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3 Efeito da densidade específica no desempenho de bicos pulverizadores

| AUMENTO DA DENSIDADE ESPECÍFICA | DESEMPENHO |
|----------------------------------------|-------------------|
| Qualidade padrão | Desprezível |
| Vazão | Diminui |
| Ângulo de pulverização | Desprezível |
| Tamanho da gota | Desprezível |
| Velocidade | Diminui |
| Impacto | Desprezível |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

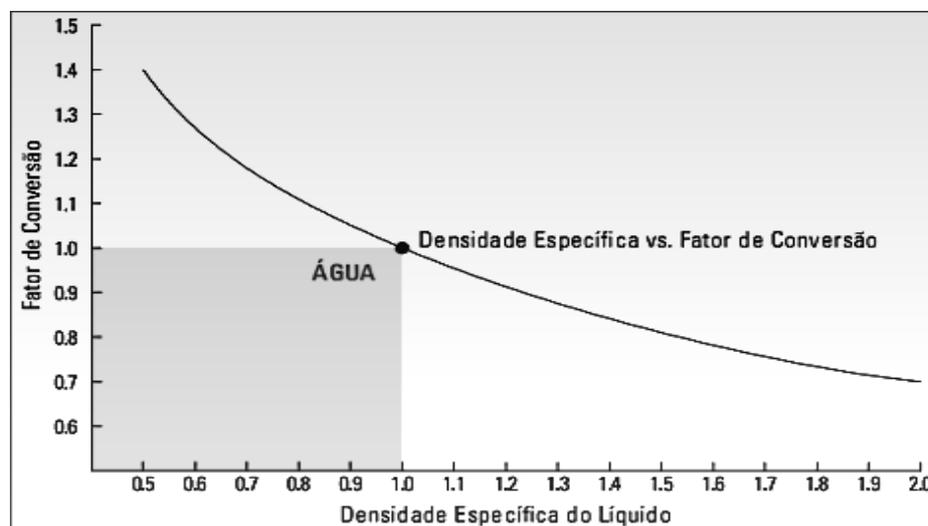


Figura 27 Densidade vs. fator de conversão
Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.10.3 Viscosidade

Viscosidade absoluta (dinâmica) é a propriedade de um líquido que resiste a mudanças na forma ou na disposição de seus elementos durante a vazão. A viscosidade do líquido é o fator principal que afeta a formação do padrão de pulverização e, em menor escala, a vazão. Líquidos com viscosidade acentuada requerem uma pressão mínima mais alta para iniciar a formação de um padrão de pulverização e fornecer um ângulo de pulverização mais estreito quando comparado com os de água. Esse efeito relaciona-se com o acréscimo de dificuldades no processo de pulverização, ou seja, com a redução do ângulo de pulverização e a menor capacidade de dispersão. Viscosidade mais baixa resulta em menor energia para atomização e melhora a eficiência de transferência (SPRAYING SYSTEMS Co., 1995).

A redução pode ser feita com: (a) calor; (b) solvente (de regra, água); (c) combinação de calor e solvente; (d) agitação.

No Quadro 4 os efeitos gerais de viscosidade, que não seja de água.

Quadro 4 Efeito do aumento da viscosidade no desempenho de bicos pulverizadores

| AUMENTO DA VISCOSIDADE | DESEMPENHO |
|-------------------------------|------------------------------------------|
| Qualidade padrão | Deteriora |
| Vazão | Nos jatos cone cheio e cone oco: aumenta |
| Ângulo de pulverização | Diminui |
| Tamanho da gota | Aumenta |
| Velocidade | Diminui |
| Impacto | Diminui |
| Desgaste | Diminui |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.10.4 Aumento da temperatura do fluido

Embora as mudanças de temperatura do líquido não afetem o desempenho de pulverização de um bico, geralmente afetam a viscosidade, a tensão da superfície e a densidade específica, o que influencia o desempenho do bico pulverizador (SPRAYING SYSTEMS Co., 1995).

No Quadro 5 têm-se os efeitos gerais do aumento da temperatura do fluido.

Quadro 5 Efeitos gerais do aumento da temperatura do fluido

| AUMENTO DA VISCOSIDADE | DESEMPENHO |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Qualidade padrão | Melhora |
| Vazão | Depende do fluido pulverizado e do bico utilizado |
| Ângulo de pulverização | Aumenta |
| Tamanho da gota | Diminui |
| Velocidade | Aumenta |
| Impacto | Aumenta |
| Desgaste | Depende do fluido pulverizado e do bico utilizado |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.10.5 Tensão da superfície

A superfície de um líquido tende a assumir o menor tamanho possível; atuando nesse sentido, como uma membrana sob tensão. Qualquer porção da superfície do líquido extrai uma tensão sobre porções adjacentes ou sobre outros objetos com o qual esteja em contato. Essa força está no plano da superfície e sua quantidade por unidade de extensão é a tensão da superfície. A tensão superficial surge nos líquidos como resultados do desequilíbrio entre as forças agindo sobre as moléculas da superfície em relação àquelas que se encontram no interior da solução. A tensão superficial é também denominada coesão específica ou constante de capilaridade; ela depende da natureza do líquido; via de regra, ela diminui à medida que a temperatura se eleva (Figura 28); ela se anula em temperatura crítica (SPRAYING SYSTEMS Co., 1995).

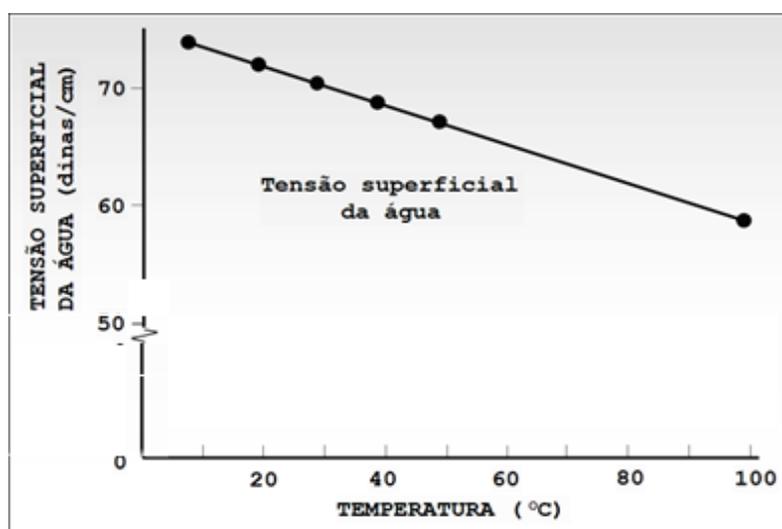


Figura 28 Tensão superficial da água vs. temperatura

A medida para água é de aproximadamente 73 dinas por cm a 21°C (70°F). Os efeitos principais da tensão da superfície estão na pressão mínima de funcionamento, no ângulo de pulverização e no tamanho da gota.

A propriedade da tensão da superfície é mais aparente nas pressões de funcionamento baixas. Uma tensão de superfície mais alta reduz o ângulo de pulverização, principalmente nos bicos pulverizadores (do tipo cone oco).

Tensões de superfícies baixas permitem que um bico seja usado com uma pressão mais baixa.

O Quadro 6 demonstra os efeitos gerais da tensão de superfície sobre o desempenho de bicos de pulverização (SPRAYING SYSTEMS Co, 1995).

Quadro 6 Efeito do aumento da tensão

| AUMENTO DA TENSÃO SUPERFICIAL | DESEMPENHO |
|--------------------------------------|-------------------|
| Qualidade padrão | Desprezível |
| Vazão | Sem efeito |
| Ângulo de pulverização | Diminui |
| Tamanho da gota | Aumenta |
| Velocidade | Desprezível |
| Impacto | Desprezível |
| Desgaste | Sem efeito |

Fonte: Spraying Systems Co. (1995)

2.13.11 A Secagem das gotas

Como a difusão e o fluxo capilar é força motora durante a secagem gota, existe, portanto, uma diferença entre a pressão de vapor de água na superfície da gota (P_{vs}) e da pressão parcial de água no ar ambiente (P_{var}). Segundo Marters (1976) a taxa de evaporação (dW/dt), em termos de transferência de massa, pode ser expressa pela equação 2.23.

$$\frac{dW}{dt} = 2\pi Dv. D. (F_{Vs} - F_{Var}) \quad (2.23)$$

Onde: D_v = coeficiente de difusão e D = diâmetro da gota.

Assim que uma gota entra em contato com o meio de secagem (ar aquecido), a evaporação ocorre a partir do filme de vapor saturado que é rapidamente formado na superfície da gota.

A secagem ocorre em duas fases.

A primeira fase (a taxa constante), nessa etapa a capilaridade extrai a umidade de dentro da partícula para manter as condições de superfície saturada e a umidade evapora rapidamente na superfície. No ponto crítico o conteúdo de umidade da gota diminui. É caracterizado pela presença de uma primeira fase sólida, formada na superfície da gota (MARTERS, 1976) (equação 2.24).

$$\frac{dW}{dt} = \left(\frac{2\pi K_d D_{av} \Delta T}{\lambda_e} \right) \quad (2.24)$$

Onde: K_d = condutividade térmica média do filme gasoso evaporado em torno de um de gota;

D_{av} = diâmetro médio de gotas;

λ = calor latente de evaporação; e

ΔT = diferença de temperatura entre o ar circundante e as gotas (superfície das

partículas).

A segunda fase, ou período de taxa decrescente, ocorre com a queda no teor de umidade, a taxa de difusão de água para a superfície também diminui. Assim, a difusão é quem controla a taxa de secagem nesse andamento (equação 2.25).

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{12K_d \Delta T}{\lambda_c D_c^2 \rho_s} \quad (2.25)$$

Onde: ρ_s é a densidade do sólido.

Durante a etapa de secagem a taxa constante e a temperatura de bulbo úmido (T_{bu}) representam a temperatura na superfície da gota (T_s).

O aumento da taxa de secagem, para um nível superior ao da difusão da água na superfície da gota, leva à formação de uma crosta seca e, portanto, um aumento em T_s . Reduzir a temperatura de entrada (T_i) e, conseqüentemente, a temperatura da saída (T_j) leva a uma menor DT (equação 2.26) e um ritmo mais lento de secagem.

$$\Delta T = T_{ar} - T_s \quad (2.26)$$

é dado pela diferença de temperatura média logarítmica (DTML) na equação 2.27:

$$DTML = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_1}{2,303 \log_{10} \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_1} \right)} \quad (2.27)$$

ΔT_0 representa $T - T_{bu}$; e

ΔT_1 representa $T_f - T_{bu}$ (MAA citado por MAUERER, 2006).

T_f é fortemente dependente de T_i . Na prática, a temperatura baixa do orifício do pulverizador está mais perto de T de saída do que a T entrada. Consequentemente é mais apropriado expressar ΔT pela equação 2.28:

$$\Delta T = T_f - T_s \quad (2.28)$$

2.13.12 Tempo de secagem da gota

Kajiyama e Park (2008), mencionaram que a transferência de massa e calor em condições de escoamento turbulento ao redor da gota líquida, permite que a taxa de secagem seja expresso como (equação 2.29):

$$t_c = \frac{\rho_l \lambda d_0^2}{6K_g (T_a - T_w)} \quad (2.29)$$

Na condição de ponto de transição de taxa de secagem constante para o decrescente, o líquido puro não contém sólidos.

Na condição final ($t = t_c$; $d = d_c$), tem-se (equação 2.30):

$$t_c = \frac{\rho_l \lambda_c (d_0^2 - d_c^2)}{6K_g (T_a - T_w)} \quad (2.30)$$

Segundo Kajiyama e Park (2008) a velocidade de evaporação em gotas contendo sólidos é menor que a velocidade em gotas de líquido puro. A presença de sólidos provoca um decréscimo na pressão de vapor do líquido. A formação da estrutura sólida altera o processo de secagem, assim a taxa nesse período decrescente é expressa como (equação 2.31):

$$\frac{dX}{dt} = - \frac{12 K_g (\Delta T)}{c \lambda D_c^2} \quad (2.31)$$

Integrando a equação acima, para a condição inicial ($t = 0$; $X = X_c^{BS}$) e condição final ($t = t_d$; $X = X_f^{BS}$), e isolando o tempo tem-se:

$$t_d = \frac{\rho_s d_c^2 \lambda_a (X_c^{BS} - X_f^{BS})}{12 K_g \Delta T_m} \quad (2.32)$$

Portanto, a equação para estimar o tempo total de secagem será (equação 2.33):

$$t = \frac{\rho_l \lambda_c (d_0^2 - d_c^2)}{8K_g (T_a - T_w)} + \frac{\rho_s d_c^2 \lambda_d (X_c^{BS} - X_f^{BS})}{12 K_g \Delta T_m} \quad (2.33)$$

Sendo:

X = umidade do produto;

t = o tempo de secagem do produto;

h = coeficiente de transmissão de calor;

A = área superficial da gota;

λ = calor latente de evaporação da água;

d = diâmetro da gota;

Re = o número de *Reynolds*;

ΔT = a diferença de temperatura entre o produto e o Ar;

t_c = tempo de secagem no período de taxa constante (°C) do produto;

t_d = tempo de secagem no período de taxa decrescente (°C) do produto;

ρ_l = a densidade do líquido, kg/m³;

λ_c = o calor latente de vaporização da água no período de taxa constante, J/kg água;

λ_d = o calor latente de vaporização da água no período de taxa decrescente; J/kg água;

d_0 = o diâmetro inicial da gota, m;

K_g = a condutividade térmica do ar; W/m.K;

T_a = a temperatura do ar quente, °C;

T_w = a temperatura de bulbo úmido do ar, °C;

ρ_s = a densidade do produto sólido, kg/m³;

d_c = o diâmetro da gota no tempo de transição das taxas de secagem, m;

X_c^{BS} = a umidade do semissólido no período de transição das taxas de secagem, base seca, kg água/kg produto;

X_f^{BS} = a umidade final do sólido, base seca, kg água/kg sólido seco; e

ΔT_m = a média da diferença de temperatura entre o ar e o produto ao longo do secador (°C).

De acordo com Mauerer (2006) o processo de atomização em gotas pequenas, além de aumentar a área da superfície do líquido, diminui o tempo de secagem, visto que depende do diâmetro das gotas (Tabela 6).

Tabela 6 Relação entre diâmetro das gotas, área de superfície por 1 litro líquido vaporizado e tempo de secagem segundo STAHL, P. H. (1980)

| DIÂMETRO DA GOTA | | |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| (μm) | ÁREA DE SUPERFÍCIE (ALIMENTAÇÃO DE 1LITRO, m^2) | TEMPO DE SECAGEM DA GOTA (segundos) |
| 1 | 6000 | 0,0001 |
| 10 | 600 | 0,01 |
| 100 | 60 | 1 |
| 100 | 6 | 100 |

Fonte: Mauerer (2006)

2.13.13 Descrição geral dos secadores por Aspersão

Os secadores por aspersão (*spray dryers*) pertencem à família dos processos com partículas em suspensão (SPP). Essa característica pode levar a produtos que apresentam baixa densidade de partículas e que consistem de estruturas ocas (Figura 29).

Há quatro etapas principais no processo de secagem por aspersão: 1) atomização da alimentação (rotativo ou por bocal); 2) meio de contato do líquido pulverizado e o gás concorrente, contracorrente ou misto; 3) evaporação da umidade livre e 4) recuperação do produto (coletor).

Segundo Masters (1997) a secagem por aspersão pode ocorrer de forma concorrente, contracorrente, ou como um processo de escoamento misto. A secagem concorrente expõe as gotas ao agente de secagem à maior temperatura e, dessa forma, ocorre uma rápida evaporação. Além disso, permite que as partículas tenham um menor tempo de residência dentro do sistema e o separador de partículas (geralmente um dispositivo de ciclone) opera com mais eficiência.

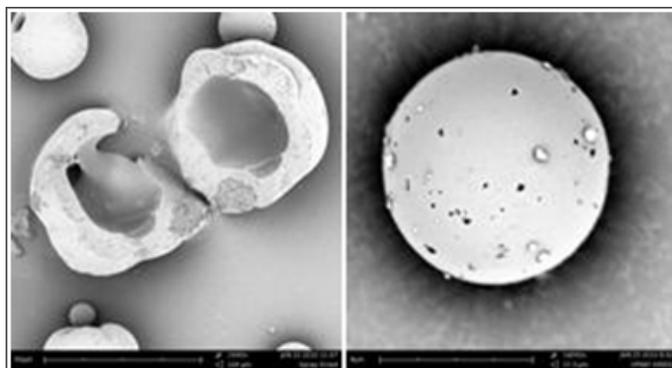


Figura 29 Partículas desidratadas. Estruturas característica
Fonte: Aveka Group (2012)

Já a secagem em contracorrente expõe as partículas que estão quase secas às temperaturas mais elevadas no último estágio. Portanto, produtos extremamente secos podem ser produzidos dessa forma. No entanto, geralmente limitam-se aos produtos menos sensíveis ao calor.

2.13.14 Câmara de secagem

A câmara de secagem é o local onde se dá o contato do material a ser seco e o ar quente.

A Figura 30 demonstra algumas configurações e suas aplicações como:

- a) para aplicações de uso geral: câmara cônica com fluxo de ar concorrente; atomização centrífuga; todo o produto e ar são transportados e separados no ciclone (uma fração grosseira permanece na câmara);
- b) para produtos muito sensíveis ao calor: fundo chato, com saídas laterais de ar e vassoura de ar para refrigerar os elementos antes da coleta; atomização centrífuga;
- c) para partículas de grande tamanho e taxas de evaporação média para produtos não sensíveis ao calor (exemplo, cerâmicos), torre com mistura de dois fluxos de ar; dois bicos atomizadores de dois fluidos ou de pressão;
- d) para grandes partículas frágeis (por exemplo, café): torre com o *spray* concorrente ao fluxo de ar, entrada de ar separada da alimentação, bico atomizador de pressão;
- e) para aplicação em alimentos e produtos lácteos: torre com múltiplos bicos atomizadores de pressão, cada um com intensiva entrada de ar misturado ao *spray*;
- f) para grandes partículas, produtos não sensíveis ao calor (exemplo: detergentes): torre com fluxo de ar contracorrente; com entrada de ar frio na base da torre; múltiplos bicos atomizadores de pressão.

Com relação à escala dos equipamentos, não há limites. Existem equipamentos de bancada, com vazões de alimentação baixas, a grandes e complexos projetos, com vazões acima de 100 toneladas por hora.

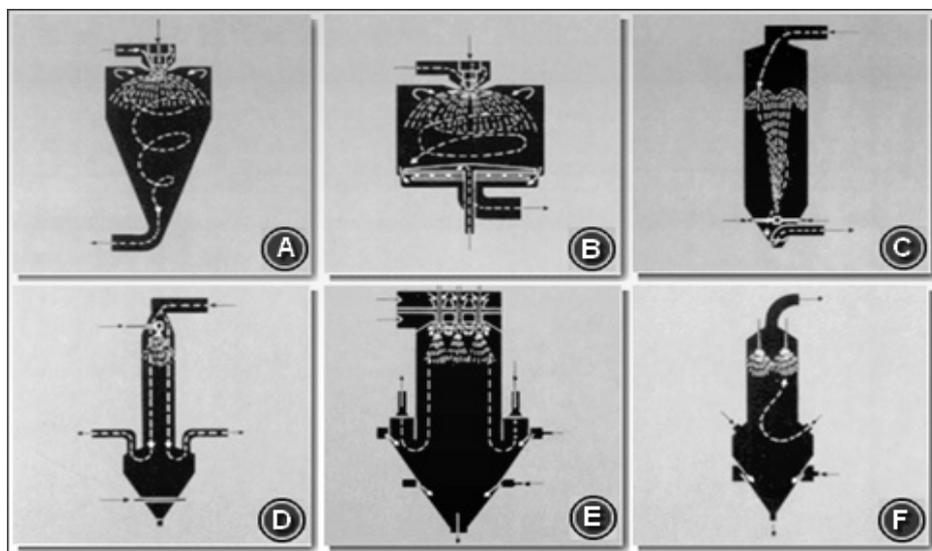


Figura 30 Aplicações de uso geral
Fonte: Bicserve Infoservecis (2012)

2.13.15 Sistema de alimentação

O *spray* é criado ao forçar o fluido através de um orifício. A energia necessária para superar a queda de pressão é fornecida pela bomba de alimentação, que transporta a alimentação para o atomizador por vários tipos de bombas, como bombas de engrenagem, de pistão e peristálticas (Figura 31).

Conforme Rosa, Tsukada e Freitas (2003) no atomizador de pressão, o alimento é bombeado para o bico atomizador a altas pressões (da ordem de 100 a 600 kgf/cm²). Dessa maneira, obrigatoriamente faz-se necessário o uso de bombas especiais de alta pressão e materiais resistentes à abrasão para construção do bico.

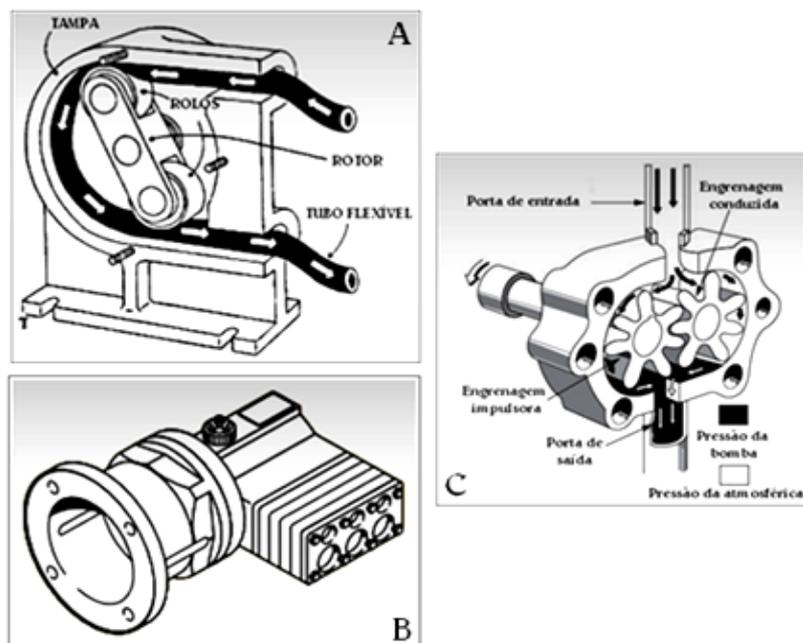


Figura 31 Tipos de bombas: A) peristálticas; B) de pistão e C) de engrenagem
 Fonte: FB Bombas (2012) e Tetlalon (2012)

Do ponto de vista energético, os atomizadores de pressão são, via de regra, os mais econômicos dos três tipos de bicos atomizadores. O bico de pressão tem em geral capacidades para até 100 litros/hora, sendo necessária a combinação de mais de um bico para secadores com vazões de alimentação maiores que esse valor (SPRYING SYSTEMS Co., 1995).

O aumento de vazão no bico pode às vezes ser reconhecido pela diminuição da pressão do funcionamento do sistema, especialmente ao usar bombas de deslocamento positivo (SPRYING SYSTEMS Co., 1995).

Segundo Esteves (2006), tanto os sistemas de pulverização por bocal quanto o sistema duplo fluido estão sujeitos a problemas de entupimento dos

canais (devido às partículas da suspensão), desgastes e erosão nas bombas e válvulas presentes em toda a rede.

2.13.16 Sistema de separação de produto seco fino

O ar de secagem sempre contém uma quantidade de pó de interesse na saída da câmara de secagem (10 a 30%), segundo a Spryng Systems Co. (1995). Assim, é necessário, por razões econômicas e ambientais, limpar o ar de secagem separando as partículas de pó, denominada fração de finos que representam em geral as partículas menores.

Um separador ciclônico (Figura 32) é composto basicamente por um cilindro vertical com fundo cônico, dotado de uma entrada tangencial normalmente retangular. Nele a corrente gasosa carregada com as partículas sólidas entra tangencialmente no recipiente cilíndrico a uma velocidade de aproximadamente 30m/s, e desce girando numa trajetória helicoidal até a base do ciclone, levando as partículas secas para a parede do mesmo. O pó sai pela base mediante um dispositivo fechado e o ar (limpo) sobe numa trajetória também em espiral e sai pela parte superior.

O fluxo seguido pelo gás dentro dos ciclones é, portanto, o de um duplo vórtice: o primeiro forma-se quando o gás realiza uma espiral para baixo na zona periférica até o tronco do cone e o segundo quando o gás limpo sobe ao longo do eixo do ciclone, descrevendo igualmente uma hélice (CÂNDIDO, 2000).

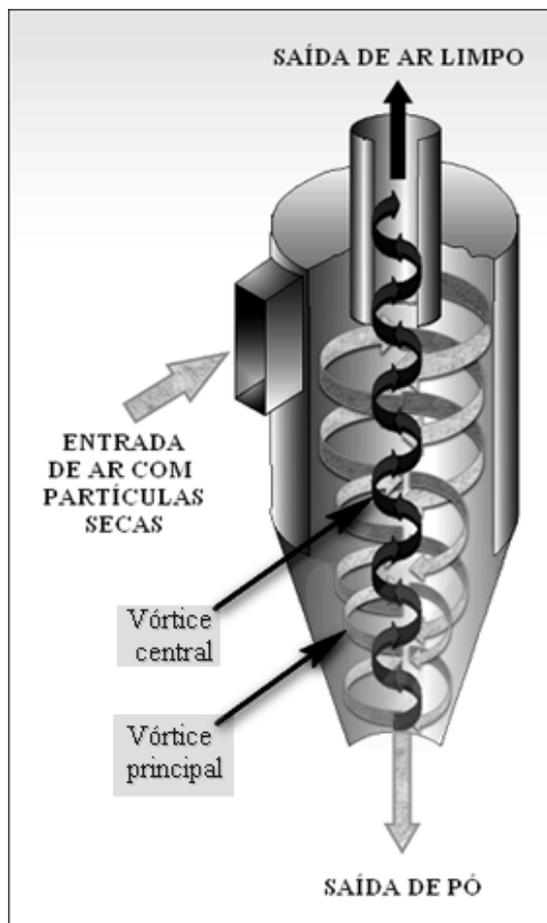


Figura 32 Ciclone

Fonte: Adaptado de Cândido (2000)

As partículas de pó, devido a sua inércia, tendem a se moverem para a periferia do equipamento e dirigem-se por gravidade para o coletor na base cônica. No processo de secagem as partículas formadas não possuem o mesmo tamanho, logo o ciclone que separa essas partículas do ar deve ser projetado para que se tenha a captação do maior número de partículas possível (CÂNDIDO, 2000). A Figura 33 demonstra as dimensões geométricas de um ciclone. Segundo Cândido (2000) normalmente tem-se:

$$B_c = \frac{D_c}{2}; \quad (2.34)$$

$$D_\varepsilon = \frac{D_c}{2}; \quad (2.35)$$

$$H_c = \frac{D_c}{2}; \quad (2.36)$$

$$L_c = 2D_c; \quad (2.37)$$

$$L_c = 2D_c; \quad (2.38)$$

$$S_c = \frac{D_c}{8}; \quad (2.39)$$

$$z_c = 2D_c; \quad (2.40)$$

$$I_c = \frac{D_c}{4}. \quad (2.41)$$

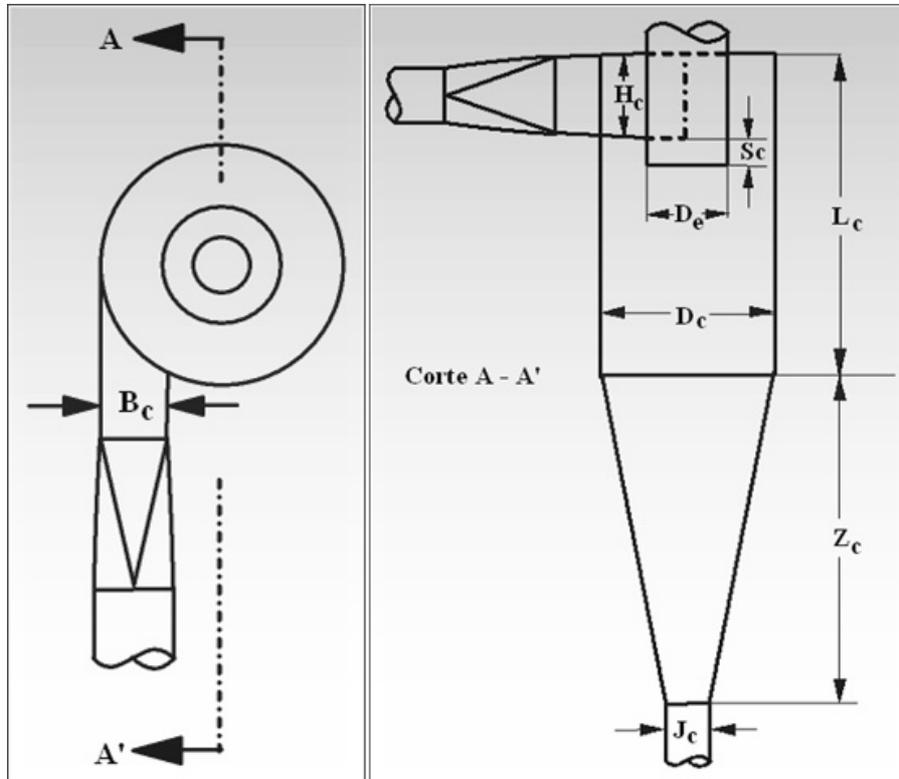


Figura 33 Dimensões geométricas de um ciclone

Segundo Cândido (2000), o tamanho mínimo de uma partícula que se deve separar da corrente gasosa se calcula a partir da seguinte equação (equação 2.42):

$$dp = \left(\frac{18 \mu H V}{g L (\rho_p - \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (2.42)$$

Onde: dp = tamanho mínimo das partículas, m;

μ = viscosidade do gás, g/ms;

H = altura da câmara, m;

g = constante gravitacional, m/s²;

ε_p = densidade da partícula, g/m³; e

ε_g = densidade do gás, g/m³

Por razões de ordem prática, as câmaras de sedimentação são empregadas para a remoção de partículas inferiores a 50×10^{-6} m (50 μ m).

Em condições comuns de operação de ciclones convencionais de baixa resistência e diâmetro muito grande a força centrífuga de separação, ou aceleração, pode aumentar até cinco vezes a força gravitacional, e até 2500, vezes em unidades de alta resistência e de diâmetro pequenos.

Entre as desvantagens do uso dos ciclones convencionais cita-se: baixa eficiência para partículas inferiores a 5×10^{-6} m; abrasão excessivo e

entupimento pela presença de altas concentrações de pó, de materiais higroscópicos e adesivos (CÂNDIDO, 2000).

Para prevenir o arraste de partículas separadas a velocidade da corrente gasosa que entra na câmara de sedimentação não deve exceder de 30 m/s. Lacerda (2007) no seu estudo mostrou exemplo de velocidades tangenciais e axiais num ciclone convencional (Figura 34).

O fluxo de gás dentro dos ciclones é originado por exaustores centrífugos, que são turbomáquinas que transferem energia ao gás para produzir o seu deslocamento.

De modo semelhante às bombas centrífugas de alta pressão, se constroem ventiladores centrífugos com vários rotores em série (Figura 35), para comprimir grandes caudais de ar a pressões não muito elevadas.

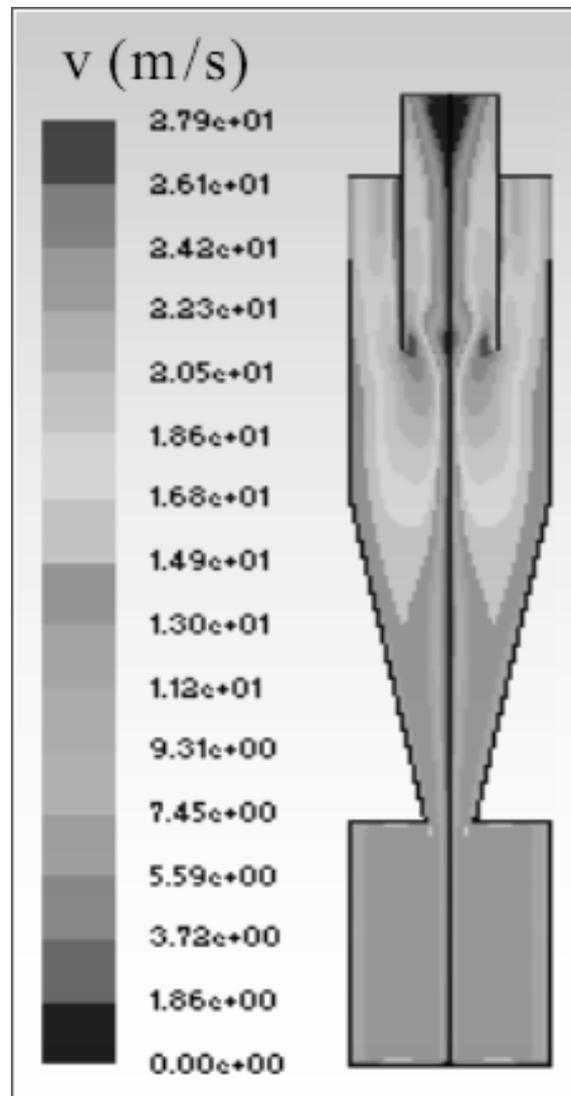


Figura 34 velocidades tangenciais e axiais num ciclone convencional
Fonte: Lacerda (2007)

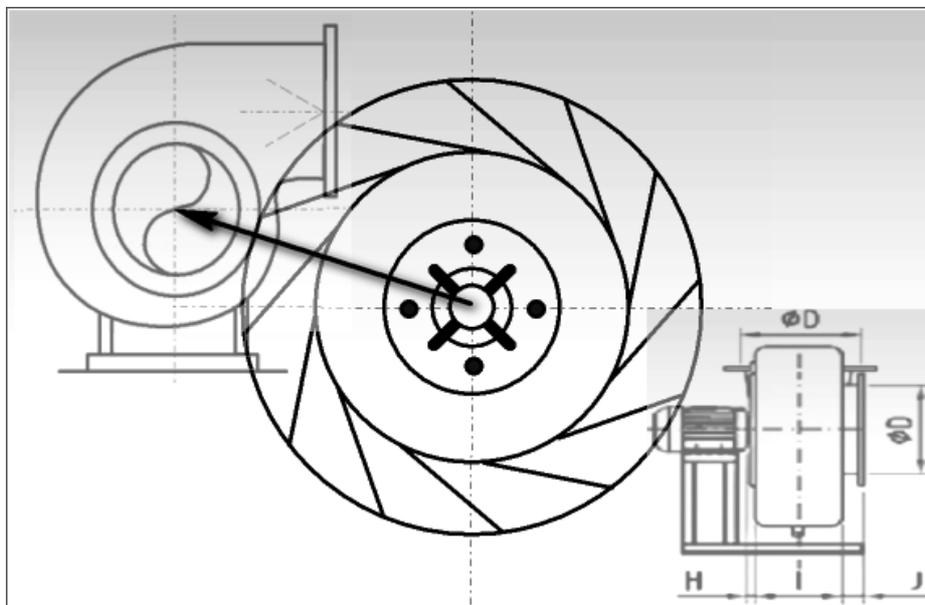


Figura 35 Rotor (exaustor centrífugo)

Nos exaustores as pressões que estão envolvidas normalmente são inferiores a 1kgf/cm^2 (98KPa), porém existem exceções. Mesmo assim, na maioria das situações, nos ventiladores o escoamento é tratado como incompressível, uma vez que o aumento de pressão é muito pequeno e pode ser considerado desprezível.

Partindo da equação de Bernoulli (2.43):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_c = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

(2.43)

Considerando que a massa específica do ar é muito baixa, se comparada com líquidos, assim, para a maioria dos casos práticos, as diferenças de alturas

físicas, entre os pontos pouco representam em termos de pressões. Elas não são consideradas, portanto, e assim a equação de Bernoulli fica (equação 2.44):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_t = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.44)$$

Onde:

H_t = carga;

P = pressão estática na seção transversal considerada;

γ = peso específico;

Z = cota em relação ao plano horizontal de referência;

V = velocidade média; e

g = aceleração da gravidade.

O termo V^2/g designa-se habitualmente por altura cinética; o termo P_2/γ

por altura estática ou piezométrica e o termo z , simplesmente altura geométrica.

2.13.17 Sistema de aquecimento do ar

O ar de secagem pode ser aquecido de diferentes formas:

- a) indiretamente: óleo combustível, gás ou fluido térmico; ou
- b) diretamente: gás ou eletricidade.

Nos aquecedores indiretos os gases de combustão ou um fluido tem fluxos separados do ar de secagem e passam sobre ou através de tubos que atuam como uma superfície de transferência de calor para o ar de secagem. Os aquecedores desse tipo tendem a uma eficiência de 85% na faixa de 175 a 250°C.

Nos aquecedores diretos o ar entra em contato direto com o produto. Os aquecedores desse tipo a gás são baratos, têm alta eficiência e as temperaturas que se pode obter são altas, porém permitem que pequenas quantidades de óxidos de nitrogênio (2 a 5ppm) se misturem aos produtos (WESTERGAARD, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Investigou-se o desempenho do *spray dryer* em escala piloto utilizando-se como material úmido ovo de galinha, na forma líquida e pasteurizada, verificando-se como algumas condições operacionais da secagem afetam a qualidade dos ovoprodutos.

3.1.1 Matéria-prima

O ovo líquido pasteurizado foi fornecido pela empresa de avicultura Aviário Santo Antônio (ASA), em Nepomuceno/MG.

3.1.2 O secador

O secador piloto usado foi do tipo *spray*, desenhado e fabricado, em sua maioria, em Monsenhor Paulo/MG (Figura 36) por Antonio Fabiano de Carvalho e Fabiano de Carvalho, apresentando como principal vantagem o baixo custo e uma média capacidade de carga.

Doado para a Universidade Federal de Lavras, foi montado na planta do Departamento de Ciência dos Alimentos. Entretanto, o equipamento teve que ser modificado devido ao furto da bomba original. O recurso mais imediato foi substituir a bomba inicial de engrenagens por outra produzida em escala industrial, para produzir a mesma vazão de descarga e a mesma pressão de trabalho, que apresentaram resultados satisfatórios nos diversos testes precedentes.

3.2 Preparo das amostras

Usou-se três materiais:

- a) ovo líquido integral pasteurizado;
- b) ovo integral líquido pasteurizado homogeneizado com solução aquosa de maltodextrina DE 10;
- c) ovo integral líquido pasteurizado homogeneizado com solução aquosa de maltodextrina DE 20.

As maltodextrinas DE 10 e DE 20 são produtos da hidrólise do amido, obtidos através da catálise ácida ou de uma ação enzimática específica. A DE é definida como o número total de açúcares redutores, relativamente, a uma linha base de glicose igual a 100, expressa em base seca (TONELI; MURR; PARK, 2005).

As maltodextrinas foram usadas nos tratamentos como veículo de secagem de ovoprodutos por promoverem uma resistência às temperaturas mais elevadas e devido ao seu poder espessante. Assim, foram usadas com as seguintes intenções:

- a) antes da secagem, como auxiliar de dispersão para evitar a aglomeração do produto nas tubulações; e
- b) durante a secagem, para a obtenção de uma granulação homogênea.

As maltodextrinas DE 10 e DE 20 foram pesadas obedecendo a uma relação de 10% (1 kg de maltodextrina/10 kg ovo) e 15% (1,5 kg maltodextrina/10 kg ovo) e dissolvidas em água (Figura 37), antes de serem

adicionadas ao ovo líquido, e homogeneizadas com um misturador da marca IKA-Labortechnik, modelo RW 20.n.

Os volumes das amostras variaram de 10 a 20 litros, por secagem.

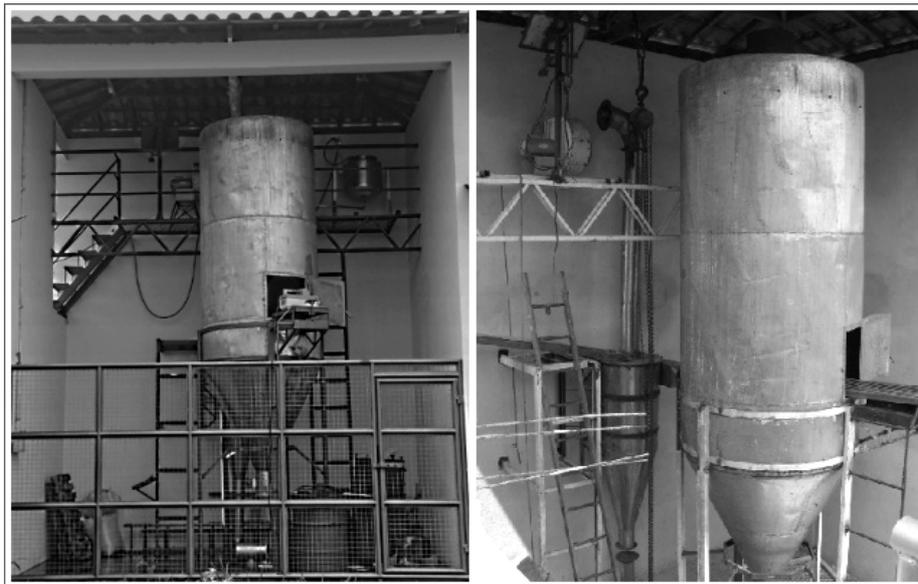


Figura 36 *Spray dryer* piloto



Figura 37 O preparo das amostras

3.3 A secagem

As temperaturas de 290, 270, 250, 170 e 150°C foram avaliadas para o ar de entrada, em pré-testes, usando água na alimentação.

3.3.1 Determinação da temperatura do ar de secagem

A maior temperatura (290°C) foi obtida com a máxima vazão volumétrica de gás combustível para o queimador. Nas temperaturas abaixo de 150°C as secagens foram deficientes por apresentarem vestígio de umidade residual nas bases secador e nas suas paredes. As melhores temperaturas foram 290 e 270°C, com uma desprezível presença de umidade residual na torre de secagem. Entretanto, com a finalidade de conseguir um menor gasto de energia ao aquecer e evaporar os solventes (principalmente água) e impedir a deterioração dos produtos pelo calor adotou-se a temperatura de 270°C em todas as secagens de ovoprodutos.

Os processos de secagem realizaram-se em quatro etapas.

3.3.2 Primeira etapa

Na primeira etapa o ar foi aquecido e lançado para a câmara de secagem. O meio de aquecimento foi por combustão direta de gás (GLP). O gás combustível foi introduzido no centro do queimador a uma vazão volumétrica média de 0,345 MPa e a chama de ignição foi acesa por centelhamento elétrico, através de eletrodos instalados junto ao bico (fabricado em latão forjado). A queima ocorreu em câmara aberta situada no topo da torre de secagem (Figura 38).



Figura 38 Queimador

O escoamento da corrente gasosa (ar dessecante) foi provocado pela ação de um exaustor centrífugo, construído com um rotor de 12 pás retas. O sistema de exaustão forçada distribuiu o calor por um sistema de aberturas

(orifícios de 6,35 mm), feitos numa chapa instalada a alguns centímetros acima do atomizador (Figura 39). Essa chapa foi montada com o objetivo de diminuir a pressão do ar e dispersá-lo para dentro da torre de secagem, num fluxo mais laminar e concorrente à alimentação.

A câmara de secagem é cilíndrica, com uma parte superior com borda curva e um fundo cônico. Está provida de uma porta (Figura 40), para facilitar o acesso dentro da câmara, para desobstruir um eventual desentupimento no atomizador e higienização da torre de secagem.

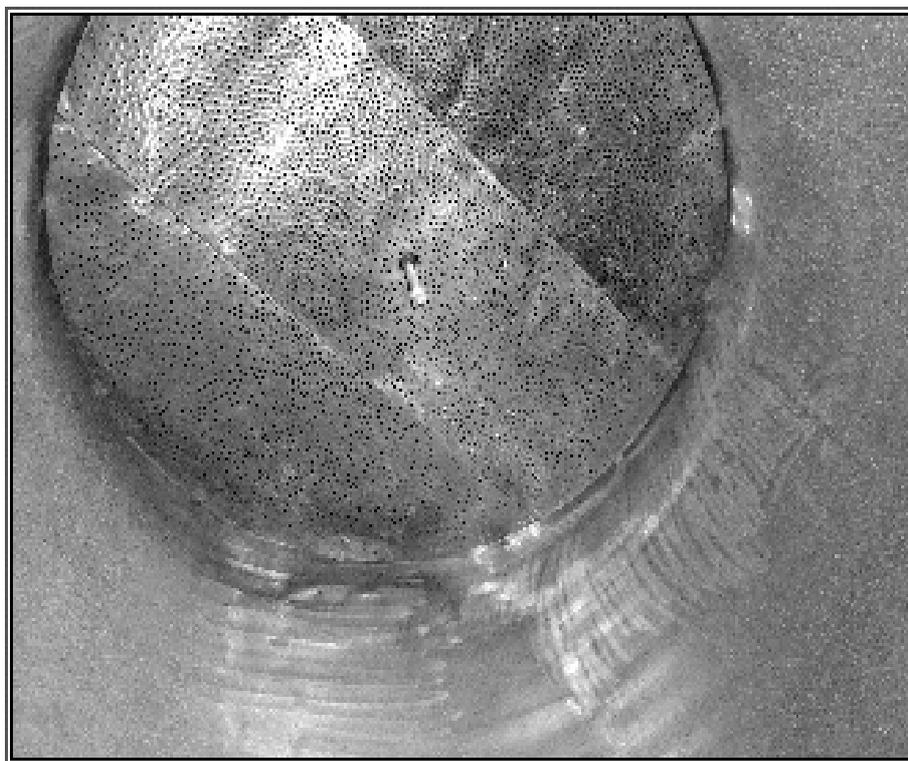


Figura 39 Difusor de ar



Figura 40 Porta de acesso à câmara de secagem

3.3.3 Segunda etapa

A segunda etapa da secagem foi atomizar as amostras líquidas de ovo na câmara de secagem. Nessa etapa as amostras foram pressurizadas por uma bomba e forçadas a atravessar, num movimento giratório, o orifício do atomizador (Figura 41).

O bico atomizador empregado foi da série 104 e SSTC SprayDry[®], tipo *WhirlJet*[®], da *Spraying Systems Co.*, desenvolvido para trabalhar a vazões que variam de 189 a 5110 L/h e pressão de 69 bar (1000 psi). Possui câmara de turbilhamento aberta, sem núcleo interno, para um desempenho com pouco entupimento.

O dimensionamento da bomba foi determinado pelas exigências do bico atomizador (pressão e volume) e pelas perdas na tubulação (pressão). A bomba

utilizada foi da série D/G-03-X da *Hydra-Cell*[®] (Figura 42), uma bomba de diafragma, fornecida pela *Tetralon*[®]. Foi desenvolvida para trabalhar com uma pressão de descarga de 69 bar e uma vazão máxima de 11,3 L/h, acionada por um motor WEG, com potência de 1,50 CV, rotação de 1.200 rpm e frequência de 60 Hz.

Ao atravessar o atomizador, a alimentação surgia como uma película em forma de cone e era rompida em pequenas gotículas.



Figura 41 Atomizador

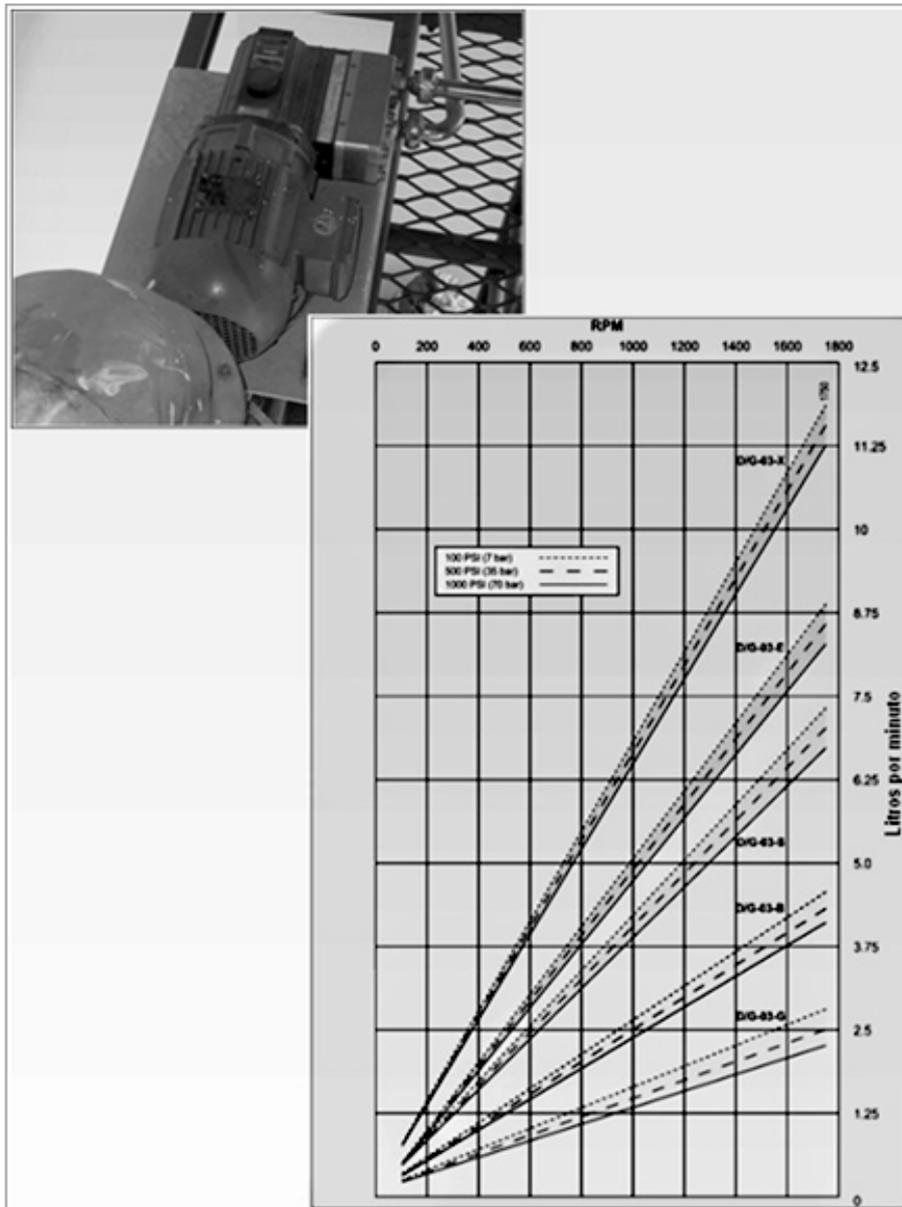


Figura 42 Bomba de alta pressão

3.3.4 Terceira etapa

Nessa etapa o *spray* foi posto em contato com a corrente de gás aquecido, para que os líquidos se evaporassem e os sólidos se transformassem num pó fino. As partículas sólidas menores eram carregadas pela corrente de ar quente e arrastadas até o ciclone para serem separadas e recuperadas na base do coletor (Figura 43). O ar limpo saía pelo exaustor.

3.3.5 Quarta etapa

Essa era a etapa de encerramento. Quando todo o líquido a ser evaporado atravessava a linha de abastecimento e desaparecia na dorna de alimentação (Figura 44), desligava-se a bomba de alta pressão.



Figura 43 Ciclone (à esquerda) e exaustor (à esquerda)

Em seguida se interrompia rapidamente os elementos de aquecimento, fechando-se as válvulas do gás combustível (Figura 45).



Figura 44 Dorna de alimentação

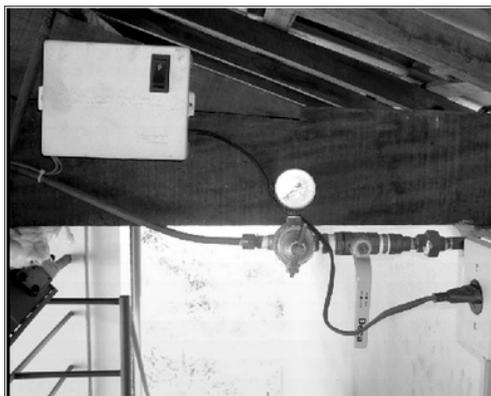


Figura 45 Sistema de centelhamento elétrico e válvula do gás

A exaustão, entretanto, continuava por alguns minutos para que o produto esfriasse. Após cada secagem, recolhia-se o produto (Figura 46) nas paredes e na base da torre de secagem e na base do ciclone efetuava-se a lavagem do sistema *spray dryer* (Figura 47).

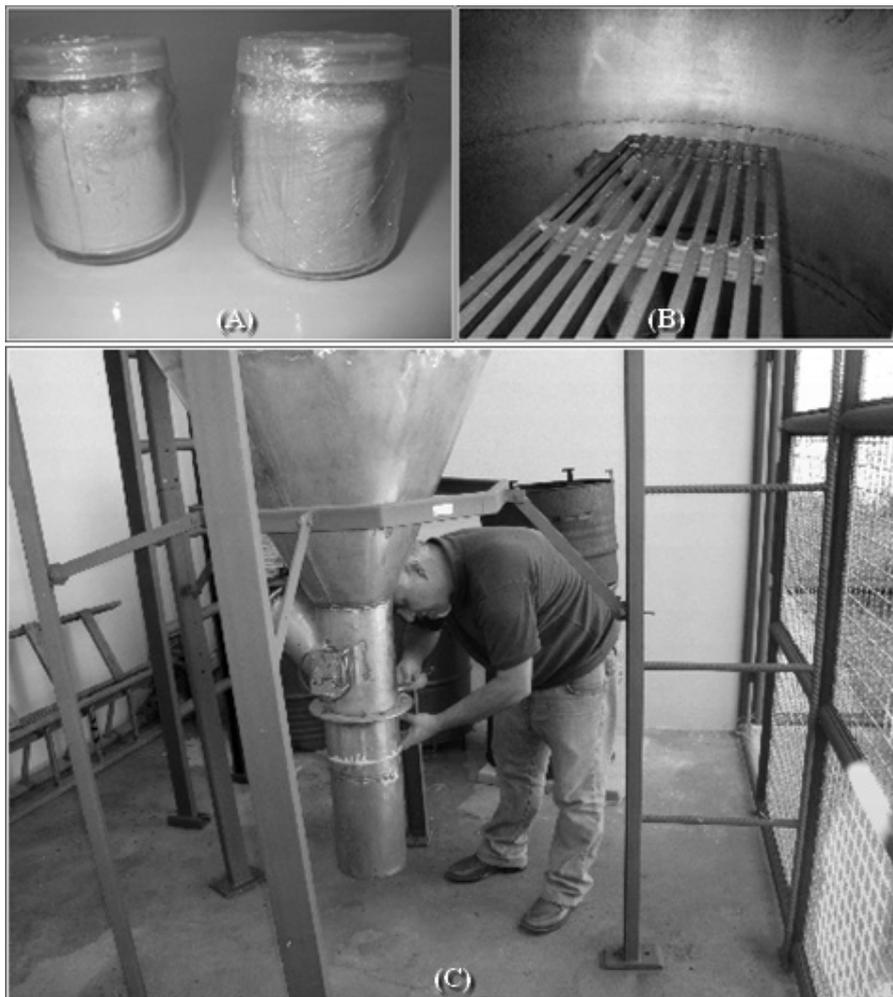


Figura 46 (A) Amostras de ovo em pó, (B) coletadas nas paredes e (C) na base do secador



Figura 47 O sistema *spray dryer*

3.6 Determinação das condições de funcionamento

Embora as condições de secagem pudessem variar pouco, foram realizados diversos testes fornecendo água para alimentação.

Variou-se a temperatura de entrada, na tentativa de encontrar a melhor temperatura em que tivesse um mínimo teor de umidade na torre de secagem, conforme descrito anteriormente.

3.6.1 Eficiência térmica do *spray dryer*

Eficiência térmica do *spray dryer* foi calculada segundo as equações 3.8 e 3.9. Para os cálculos, utilizaram-se as seguintes temperaturas de entrada: 290°C, 270°C, 250°C, 200°C e 150°C.

Foi considerada a temperatura do ar frio à temperatura ambiente em Lavras no dia do experimento ($T_{af} = 20,5^{\circ}\text{C}$).

3.6.2 Velocidade e pressão de ar de arraste

Para a medida de vazão volumétrica de ar utilizou-se Tubo de *Pitot* Telescópico Modelo 166 T da *Hygro-Therm*[®] (Figura48).

O sensor de fluxo de ar possuía partes telescópicas ajustáveis, para facilitar a inserção nos dutos e seções.

Usou-se um manômetro de pressão diferencial com escala dupla *Magnehelic*[®] junto ao Tubo de *Pitot*, para medir pressão e velocidade do ar (faixa de medição de 0 a 64 m/seg e 0 a 2.5 KPa).



Figura 48 Tubo de *Pitot*

3.7 Temperatura de entrada e saída

Para a medida de temperatura de entrada e de saída foram instalados dois Termômetros TMS-100-I-A-1/2NPT-304-0-500C[®], ambos removíveis. Um no topo da torre de secagem ao mesmo nível do atomizador, para medir a temperatura de entrada e outro na saída do secado, para medir a temperatura de saída (Figura 49).

Todas as superfícies foram construídas de aço inoxidável para maior facilidade e praticidade de limpeza.

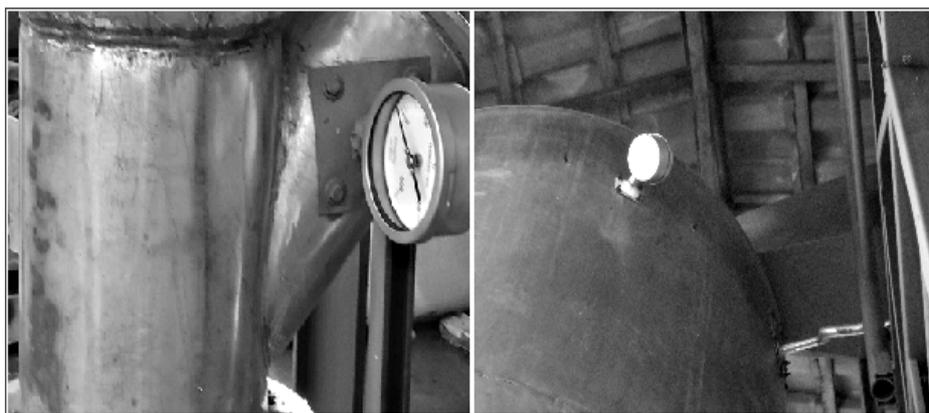


Figura 49 Termômetros

3.8 Vazão mássica da alimentação

Cronometrava-se o tempo de passagem de um 1 litro (volume) de material através do atomizador.

3.9 Análises químicas dos ovoprodutos

Analisaram-se todas as amostras de ovos e ovoprodutos desidratados.

3.9.1 Determinação do teor de umidade

Feita pelo método gravimétrico de acordo com a Association of Official Analytical Chemistry - *AOAC* (2000). Determinou-se a umidade residual em estufa de secagem, onde o pó foi seco, à temperatura de 102 a 105°C, sucessivas vezes, até se obter peso constante. A determinação do teor de água em base úmida se calculou pela diferença em peso (ou seja, perda de peso) e foi determinada como percentagem de acordo com a Equação (3.1):

$$\%U = \left(\frac{M_f - M_i}{M_f} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Onde: M_f = massa final, em gramas e M_i = massa inicial, em gramas.

3.9.2 Proteína

O teor de nitrogênio foi determinado pelo método de *Micro-Kjeldahl* contendo etapas de digestão com H_2SO_4 , destilação com solução de NaOH 50%

e titulação com solução de HCl 0,02 N, conforme procedimento da (AOAC, 2000). Utilizou-se o fator de conversão para proteína bruta igual a 6,25.

3.9.3 Cinzas

A técnica utilizada consistiu na queima das amostras em um forno para remover todo o material orgânico, com aquecimento a 550°C através de mufla, e, posteriormente utilizando balança analítica pesavam-se os resíduos, para identificar o total de cinzas (minerais). Determinou-se o teor de cinzas por diferença de massa.

3.9.4 Extrato etéreo

O extrato etéreo foi obtido por extração com éter etílico, por 5 horas, em aparelho tipo Soxhlet, da Tecnal, segundo normas da AOAC (2000).

3.10 Propriedades físicas dos ovoprodutos

A composição e características físicas dos ovoprodutos são muito variáveis em função da sua forma de obtenção e elaboração.

3.10.1 Análise de colorimetria (L^* , a^* , b^*)

Cor instrumental foi determinada num colorímetro digital Minolta, modelo CR-400, na escala CIE Lab.

Foram analisadas o sólido de cores em tonalidade a^* (a^* positivo, vermelho e a^* negativo, verde), luminosidade L^* (de 0, preto, até 100, branco) e

saturação b^* (b^* positivo, amarelo e b^* negativo, azul), após a secagem dos ovoprodutos.

3.10.2 Solubilidade

Foi determinada de acordo com o método descrito por Eastman & Moore (1984), modificado por Cano-Chauca et al. (2005). Baseou-se em adicionar 1 g do pó para um utensílio com 100 mL de água destilada, sob agitação. Após 5 minutos, transferia-se (cuidadosamente) para um tubo e centrifugava-se por 5 minutos a 3000 g. Em seguida tomava-se uma alíquota do sobrenadante e passava-se para uma placa de *Petri* (pré-pesada) para secagem ao vácuo por 5 horas, à temperatura de 105°C, em estufa de secagem a vácuo. Por diferença de peso, determinou-se o peso final de pó da placa (P), calculando-se a partir daí o percentual de solubilidade.

3.10.3 Atividade de água

Foi determinada usando-se o instrumento *AquaLab* (*Decagon* modelo 3 TE) (Figura 50). Amostras de aproximadamente 5g foram dispostas em recipientes plásticos para leitura com temperatura controlada ($T = 25,0 \pm 0,3$ °C). O *AquaLab* utiliza a técnica de determinação do ponto de orvalho em espelho encapsulado para medir a A_w do produto.

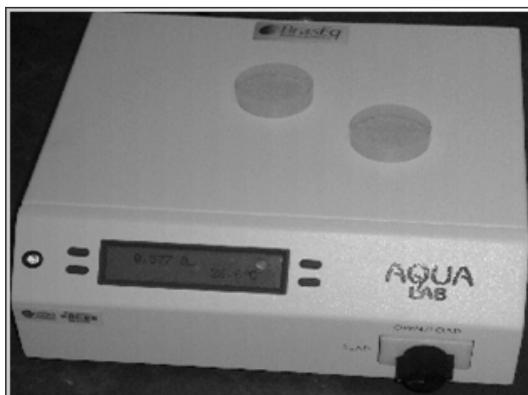


Figura 50 *AquaLab* para medir atividade de água

3.10.4 Molhabilidade (higroscopicidade)

Esse parâmetro foi determinado segundo método de Callahan et al. (1982). Consiste em determinar o teor de umidade de equilíbrio do produto após estocagem em um dessecador com 90% UR, a 25 °C. Foram colocadas num dessecador 300 mg do produto, em uma placa previamente pesada. Foram feitas novas pesagens após sete dias e depois a cada dois dias, até se obter peso

constante. Para promover UR próxima a 90% ($A_w \cong 0,9$) no interior do

dessecador, utilizou-se uma solução saturada de cloreto de bário ($BaCl_2$).

3.11 Distribuição granulométrica

Caracterizaram-se as amostras de ovoprodutos com relação ao tamanho e ao formato de partículas. A distribuição granulométrica das amostras foi feita por meio do método das peneiras padronizadas, como citado por Foust (1982), utilizando o conjunto de peneiras padronizadas da série *Tyler* (4; 8; 14; 28; 35 e 48 *mesh*), correspondentes as aberturas de 0,04; 0,07; 0,11, 0,15; 0,21 e 0,30, respectivamente.

O cálculo do diâmetro médio das amostras de ovoprodutos particulados estudadas foi feito utilizando-se a Equação 3.2, relativa ao cálculo de diâmetro médio de Sauter.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{X_{pe}}{\bar{d}_{p,pe}} \right)} \quad (3.2)$$

Onde:

\bar{d}_p = diâmetro médio de Sauter, mm;

$\bar{d}_{p,pe}$ = diâmetro médio das partículas esféricas, mm;

X_{pe} = comprimento da abertura da peneira, mm.

O diâmetro médio de Sauter foi utilizado neste trabalho pela sua melhor adequação. A distribuição granulométrica com o uso de peneiras é mais adequada para partículas que apresentam formato próximo a uma esfera.

3.12 Caracterização microestrutural

O exame micrográfico foi feito com auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) LEO EVO 40 XVP, para identificação da microestrutura,

análise da superfície, fratura, discordâncias, encolhimento da área superficial e colapso estrutural das amostras particuladas.

3.13 Análises estatística

As análises estatísticas dos resultados foram processadas no *software Sisvar 4.0*, avaliadas pelo teste de comparação de médias (Teste de *Tukey*).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Temperatura de secagem e eficiência térmica

A temperatura do ar de secagem tem um efeito importante sobre o processo de retirada de líquido da dispersão. Foram, portanto, ajustadas para permitir a melhor eficiência térmica possível no processo. As variantes obtidas, usando água na alimentação, estão dispostas na Tabela 7.

Tomando-se as duas melhores eficiências térmicas, considerou-se como a mais adequada (para todas as secagens) a de menor valor (270°C), principalmente por apresentar menor risco de queimar o produto e por favorecer um menor gasto energético. Além disso, sua eficiência térmica de 83,75% (Figura 51) é considerada muito boa, pois significa que houve uma alta taxa de evaporação, apontada pela expressiva diferença entre as temperaturas de entrada e saída da torre de secagem.

Tabela 7 Eficiência térmica no *spray dryer*

| Temperatura de entrada (T_e , em °C) | Temperatura do ar frio (T_{af} , em °C) | Temperatura corrigida (T_c , em °C) | Temperatura de saída (T_s , em °C) | Eficiência térmica (η_T em %) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 290 | 20,50 | 263,05 | 59,00 | 84,13 |
| 270 | 20,50 | 245,05 | 57,00 | 83,75 |
| 250 | 20,50 | 227,05 | 54,50 | 83,54 |
| 170 | 20,50 | 155,05 | 43,00 | 83,28 |
| 150 | 20,50 | 137,05 | 40,00 | 83,27 |

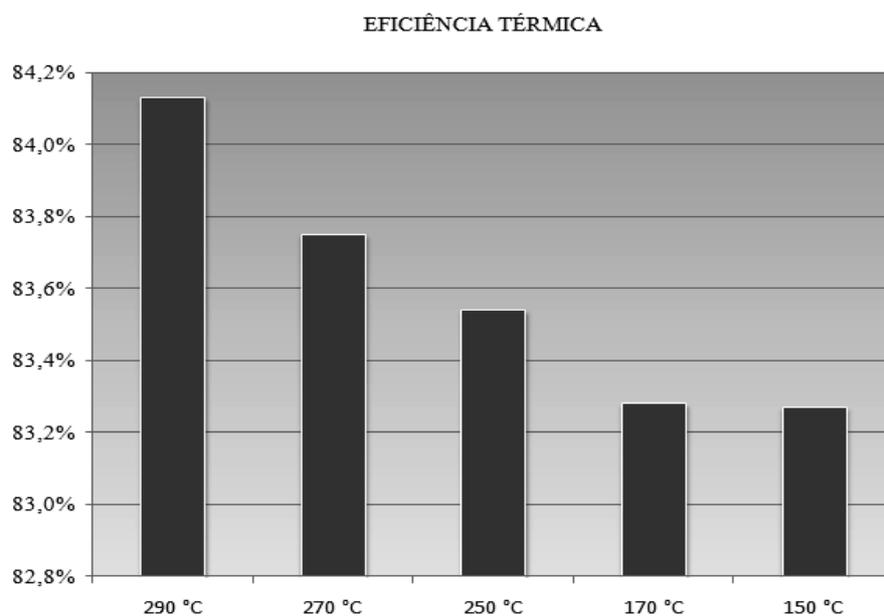


Figura 51 Eficiência térmica do processo

4.2 Fluxo de arraste e pressão de ar

A Tabela 8 demonstra os fluxos de arraste e pressão do ar nas principais entradas e saídas do equipamento.

Tabela 8 Velocidade (V_{ar}) e pressão do ar (P_{ar})

| | Entrada da câmara de secagem | Saída da câmara de secagem | Saída do ciclone |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|------------------|
| Velocidade $_{ar}$ | 24 m/s | 22 m/s | 19 m/s |
| Pressão $_{ar}$ | 0,35 kPa | 0,30 kPa | 0,20 kPa |

A perda de carga entre a saída da torre de secagem e a entrada do ciclone foi mínima, devido à proximidade entre elas. Assim, a velocidade de saída da torre pode ser considerada a velocidade de entrada no ciclone.

A velocidade de entrada do gás no separador ciclônico convencional é baseada na área de entrada do separador, mas geralmente recomenda-se usar velocidades de 15 m / s a 30 m/s (LACERDA, 2007). Assim, no ciclone dimensionado conforme a metodologia de *Stairman*, a velocidade de 19 m/s medida na entrada do ciclone está adequada para uma boa ciclonagem.

A queda de pressão e as perdas de carga, observadas pela diferença entre a velocidade de entrada e saída do sistema de secagem, foram consideradas usuais e estão associadas ao atrito nos dutos, contração e expansão na entrada do ciclone, atrito nas paredes do sistema, perdas cinéticas no ciclone e perdas de pressão estática entre a entrada e a saída.

4.3 Vazão mássica de alimentação

Para cada 125 rotações a bomba de alimentação deveria deslocar um litro, ou seja, no limite do motor (1200 rpm) deveria deslocar 9,6 litros por minuto. A vazão mássica alcançada, medida de forma experimental, foi de 8,7 litros por minuto, significando que o motor trabalhou próximo da sua potência máxima. Entretanto, esse deslocamento foi acima do limite máximo de descarga para os atomizadores modelos AA104, que seria de 5 litros por minuto, indicando que a pulverização pode ter sido imperfeita e que o tamanho individual das gotas pode ter sido, muitas vezes, fora do padrão esperado. A ocorrência de mudança na geometria do cone de pulverização pode ser uma evidência dessa suposição. O esperado para os atomizadores da série é o equivalente a um padrão oco, mas o que se notou foi praticamente um cone

cheio e com o comprimento maior que o esperado. Consequentemente, com um ângulo de pulverização foi menor que o necessário para uma perfeita transferência de calor entre o ar dessecante e a dispersão líquida. Também pode ter gerado escoamento em que as partículas se misturaram de forma turbulenta dentro da torre de secagem, já que houve uma situação de elevado caudal, seguida de um abaixamento da pressão na saída do atomizador.

4.4 Granulometria do ovo em pó

A Tabela 9 demonstra os efeitos da adição da maltodextrina no tamanho dos grãos no ovo em pó.

Tabela 9 Resultado das análises realizadas por peneiramento do ovo particulado, em diferentes concentrações de maltodextrina

| ABERTURA da peneira (mm) | OVO+DE20 (15%) PA (%) | OVO+DE10 (15%) PA (%) | OVO+DE10 (10%) PA (%) | OVO <i>in natura</i> PA (%) |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 0,30 | 59,10 | 53,16 | 51,50 | 50,5 |
| 0,21 | 21,27 | 20,21 | 11,15 | 21,15 |
| 0,15 | 0,15 | 1,05 | 5,07 | 20,65 |
| 0,11 | 18,35 | 18,97 | 22,75 | 7,47 |
| 0,07 | 0,15 | 0,19 | 4,61 | 0,11 |
| 0,04 | 0,36 | 0,10 | 4,15 | 0,07 |
| 0,00 | 0,62 | 6,32 | 0,77 | 0,05 |

Apesar das partículas apresentarem dimensões com variabilidade muito elevada, houve um aumento no tamanho das partículas com a adição de maltodextrina na mistura. A maltodextrina possui um efeito aglutinante, uma vez que tem boas propriedades de ligação e uma viscosidade elevada em solução. Esse efeito é bem visível na Figura 52.

A distribuição na granulometria dos pós-obtidos foi muito ampla e assimétrica. Todavia, a maior parte das populações de partículas concentrara-se em dimensões maiores que 0,30 mm.

A distribuição mais simétrica ocorreu no ovo *in natura*. Assim, uma maior distribuição granulométrica foi devido ao uso da maltodextrina, porque as gotas se aglomeram mais em partículas maiores ao se chocarem dentro da torre de secagem. Um efeito positivo da aglomeração é a produção de partículas mais porosas e facilmente solúveis. Outra vantagem é formação de grânulos sólidos menos suscetíveis a quebra e abrasão, já que um inconveniente da secagem por pulverização é que as partículas que produz são muito finas. Porém, o processo de agrupamento pelo uso da maltodextrina não manteve o tamanho das partículas e houve uma grande irregularidade geométrica nos grânulos.

4.5 Caracterização microestrutural

As micrografias das imagens, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, mostraram partículas esféricas com grande distribuição de tamanhos (Figuras 52 e 53). Segundo Westergaard (2004), esse resultado está de acordo com o conjunto das características dos produtos particulados obtidos em processo de secagem por atomização, que raramente possuem um único tamanho.

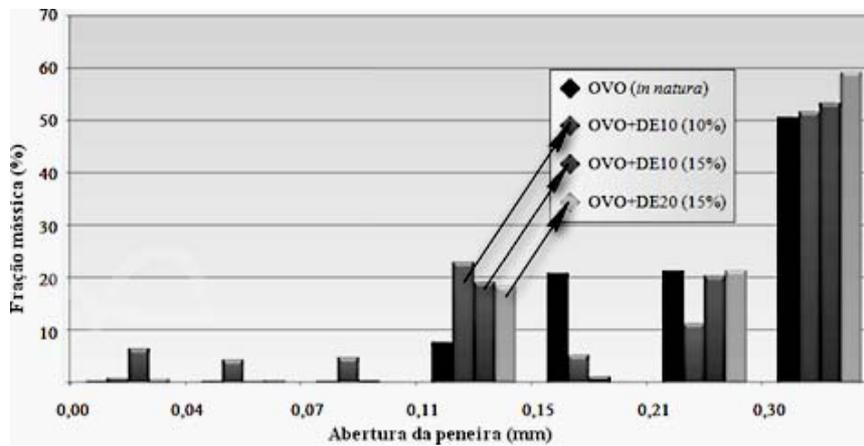


Figura 52 Gráfico da distribuição granulométrica do ovo em pó

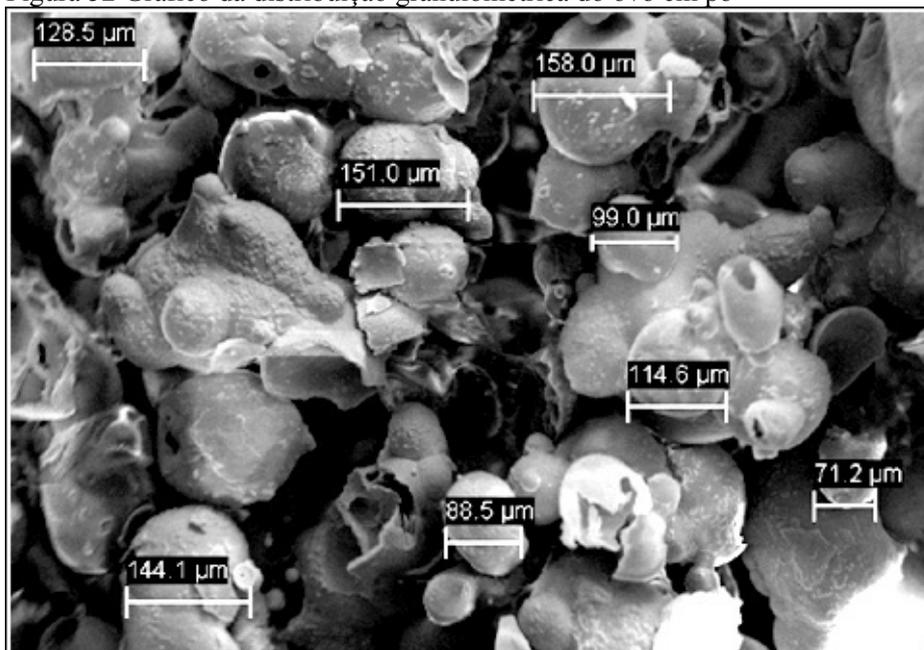


Figura 53 Micrografia ovo em pó *in natura* (MEV)

Assim, como a forma teve uma distribuição no tamanho, a densidade das partículas também variou. É possível visualizar partículas de paredes com espessura distintas (Figura 54), mas com prevalência de paredes delgadas.

Todas as imagens demonstram múltiplas áreas de colapso onde as paredes das partículas quebraram devido a sua fina camada. Provavelmente, esse evento ocorreu por dois motivos: o peso da própria estrutura e o procedimento de recolhimento do pó (feito por leve raspagem).

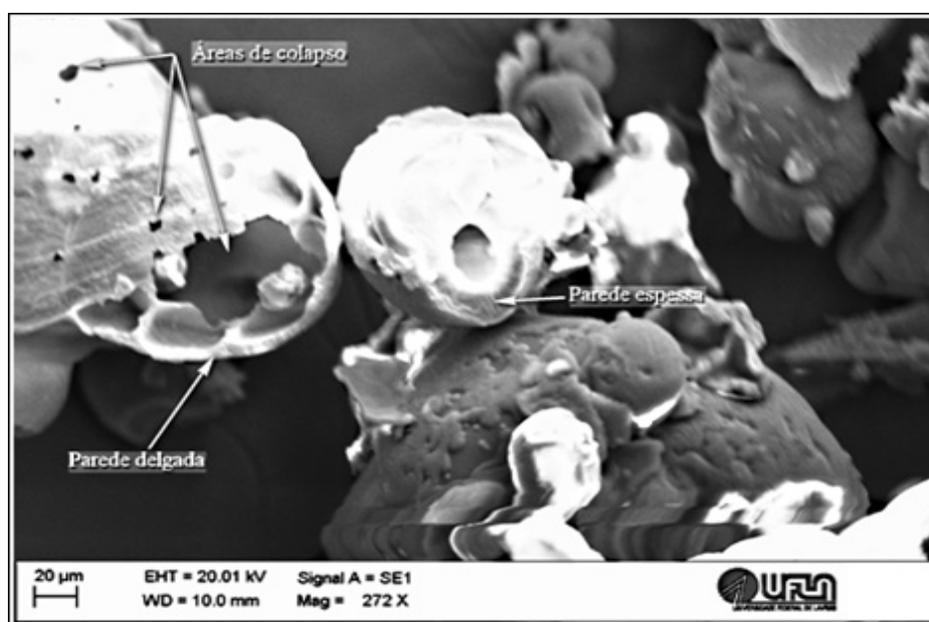


Figura 54 Espessura e colapso das paredes

Com a evaporação da água das gotas há uma concentração dos solutos na sua superfície. Se a concentração for profunda, poderão ocorrer modificações físicas e químicas complexas que enfraquecerão a estrutura da parede do

grânulo, levando a sua queda repentina (colapso) – principalmente nas

partículas maiores, com área superficial maior, em que as paredes devem sustentar maior peso. As partículas colapsáveis são, portanto, aquelas em estado de tensão e peso aparente seco elevado, com alta porosidade e baixo teor de umidade.

Houve uma menor ocorrência de colapso com a adição de maltodextrina (Figuras 55 e 56) e esse fato pode estar associado à habilidade das maltodextrinas de reter água na sua estrutura, conferindo as paredes das partículas propriedades elásticas e coesivas.

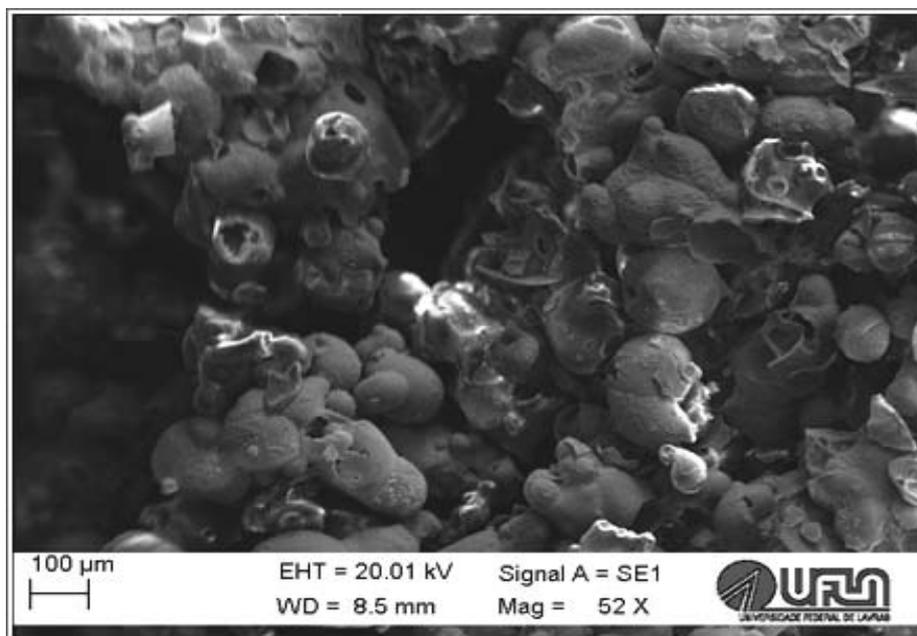


Figura 55 Micrografia do ovo *in natura* em pó

De fato, se observou que os grânulos aditivados com a maltodextrina eram menos pegajosos e, portanto, possivelmente quebraram menos na sua retirada da torre de secagem. Essa suposição fundamenta-se nos resultados dos estudos de Jaya e Das (2004), que analisaram o efeito de maltodextrina sobre a obtenção de manga em pó, que observaram que a adição de maltodextrina elimina a pegajosidade do pó obtido, pois a maltodextrina funciona como agente de corpo e melhora a textura auxiliando na estabilização do produto.

Ao que parece, não houve diferença expressiva no número de colapso entre as estruturas formadas com as diferentes maltodextrinas (DE10 e DE15), embora o uso de maltodextrina com menor dextrose equivalente apresente partículas com o diâmetro médio maior, mais suscetível ao colapso. Assim, as consistências dos grânulos, nas duas situações, parecem muito próximas (Figura 57).

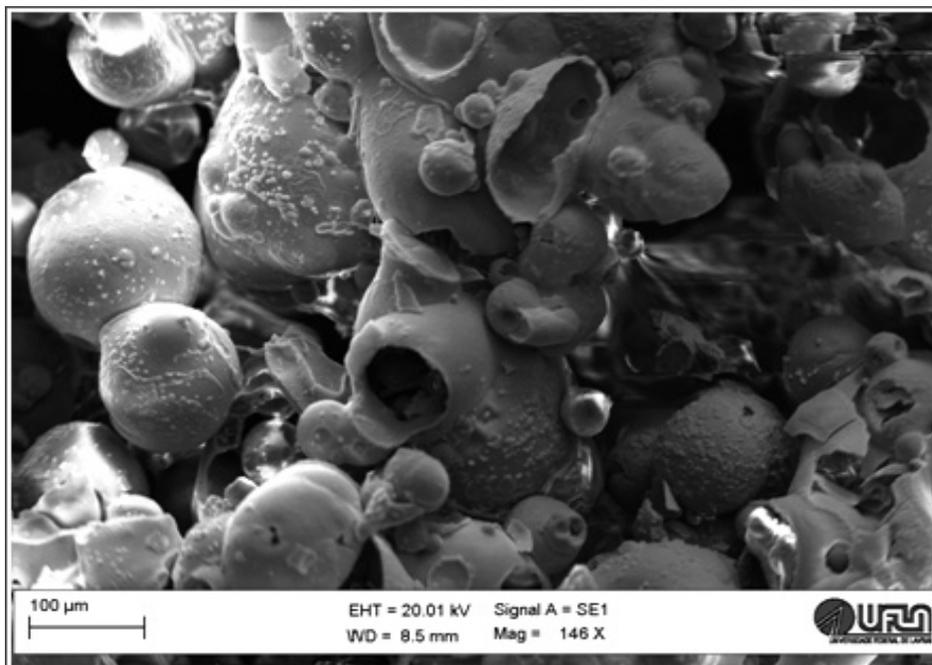


Figura 56 Micrografia do ovo + maltodextrina DE20, a 15% (m/m)

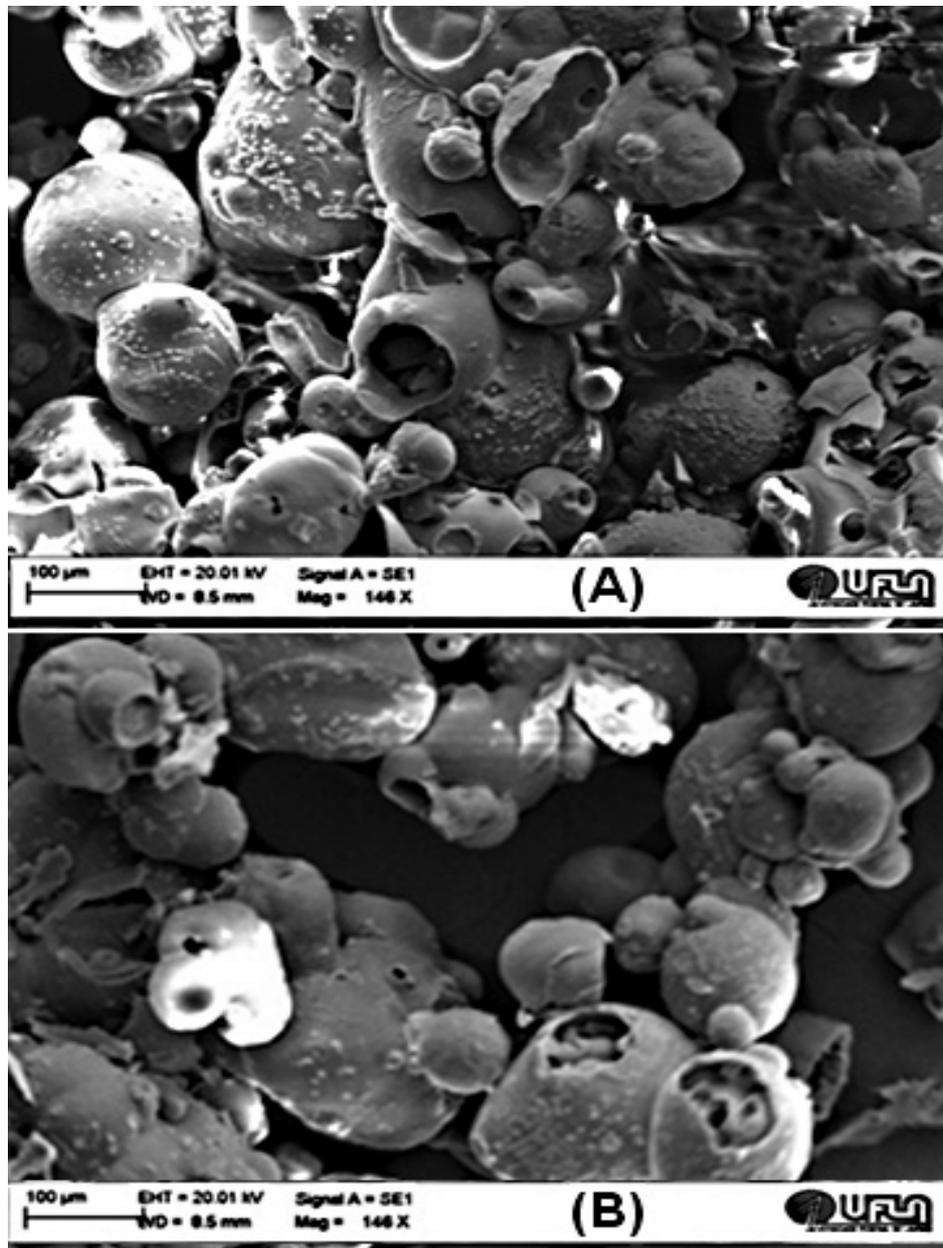


Figura 57 Micrografias: a) ovo + maltodextrina DE20; b) ovo + maltodextrina

DE15, ambos a 15% (m/m)

A Figura 58 demonstra que houve uma intensa aglomeração de partículas. De fato, as dispersões de gotículas no ar ocorrem em várias correntes distintas na torre de secagem. Cada gota está sujeita a diversas temperaturas, em locais e condições de umidade também diferentes, devido ao fluxo não laminar gás através da câmara (Figura 59).

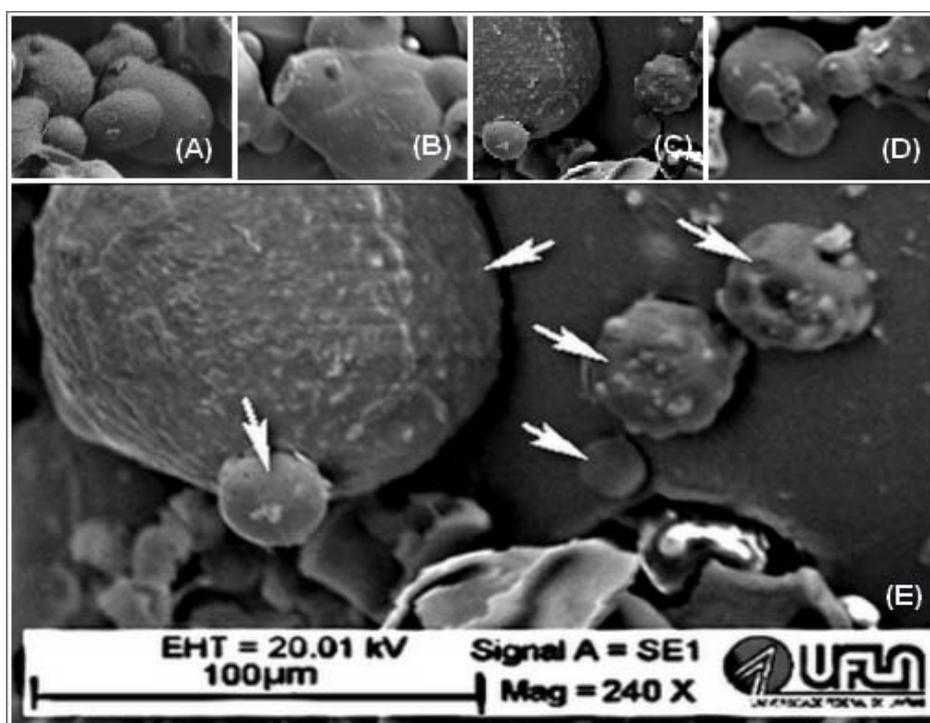


Figura 58 Aglomeração de partículas no (A) ovo *in natura* e (B), (C), (D) e (E) com maltodextrina

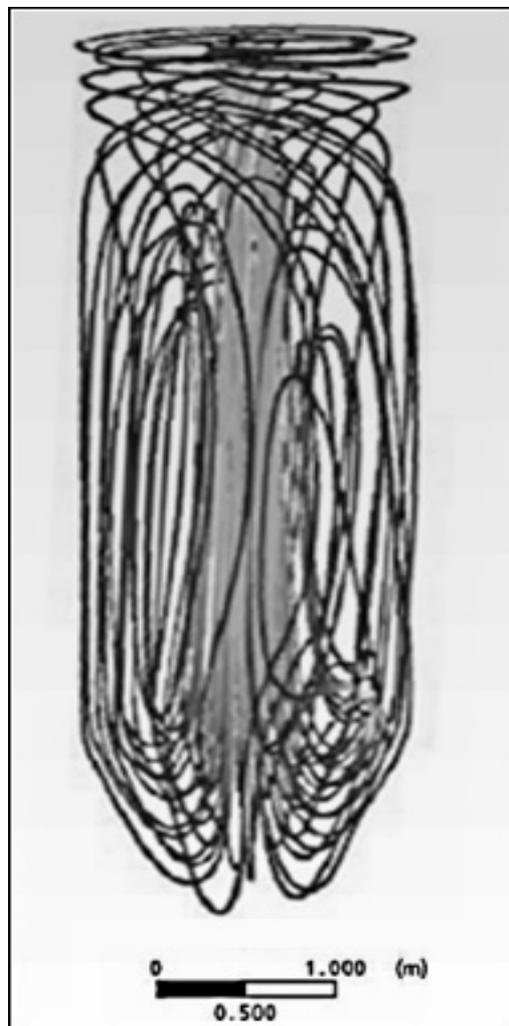


Figura 59 Linhas de corrente na câmara de secagem
Fonte: Pereira et al. (2009)

Assim, é razoável concluir que cada gota perde o seu solvente em diferentes condições, podendo assim formar um tipo peculiar de partícula seca

para cada circunstância desigual. As gotículas menores (menores que 5 μm) são

secas imediatamente em contato com ar quente, não muito longe da entrada de ar de secagem. As partículas sólidas formadas nesse caso são transportadas com o fluxo de ar.

As gotículas de tamanho médio (entre 5 e 30 μm) possuem força

suficiente para se moverem para fora da zona de entrada de ar, mas elas perdem uma parte significativa da sua massa no processo de secagem e ao advirem do turbilhão de inversão do ar, que ocorrem abaixo do ar de entrada.

Já as gotículas maiores possuem maior impulso para escaparem do turbilhão de ar, dirigindo-se para as paredes da câmara onde são depositadas (sem terem tempo suficiente para secarem completamente durante o trajeto). De fato, é possível observar partículas que assumiram uma forma esférica com uma base achatada, por estarem ainda úmidas ao se chocarem nas paredes do *spray dryer* (Figura 60).

A aglomeração ocorre quando as partículas menores colidem com as maiores devido à turbulência e se aderem a elas, formando os aglomerados.

Por outro lado, o uso de maltodextrina com maior dextrose equivalente, com uma maior degradação enzimática, a mistura ficou menos coesiva e, portanto, menos viscosa. Formou-se, assim, um maior conjunto de gotículas com menor tamanho, que se aglomeram mais formando grânulos maiores (Figura 61).

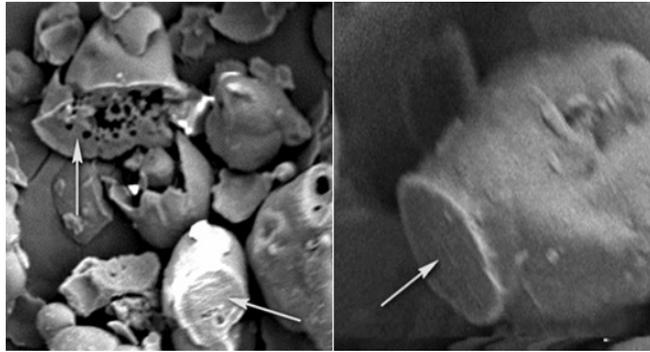


Figura 60 Partículas com base achatadas

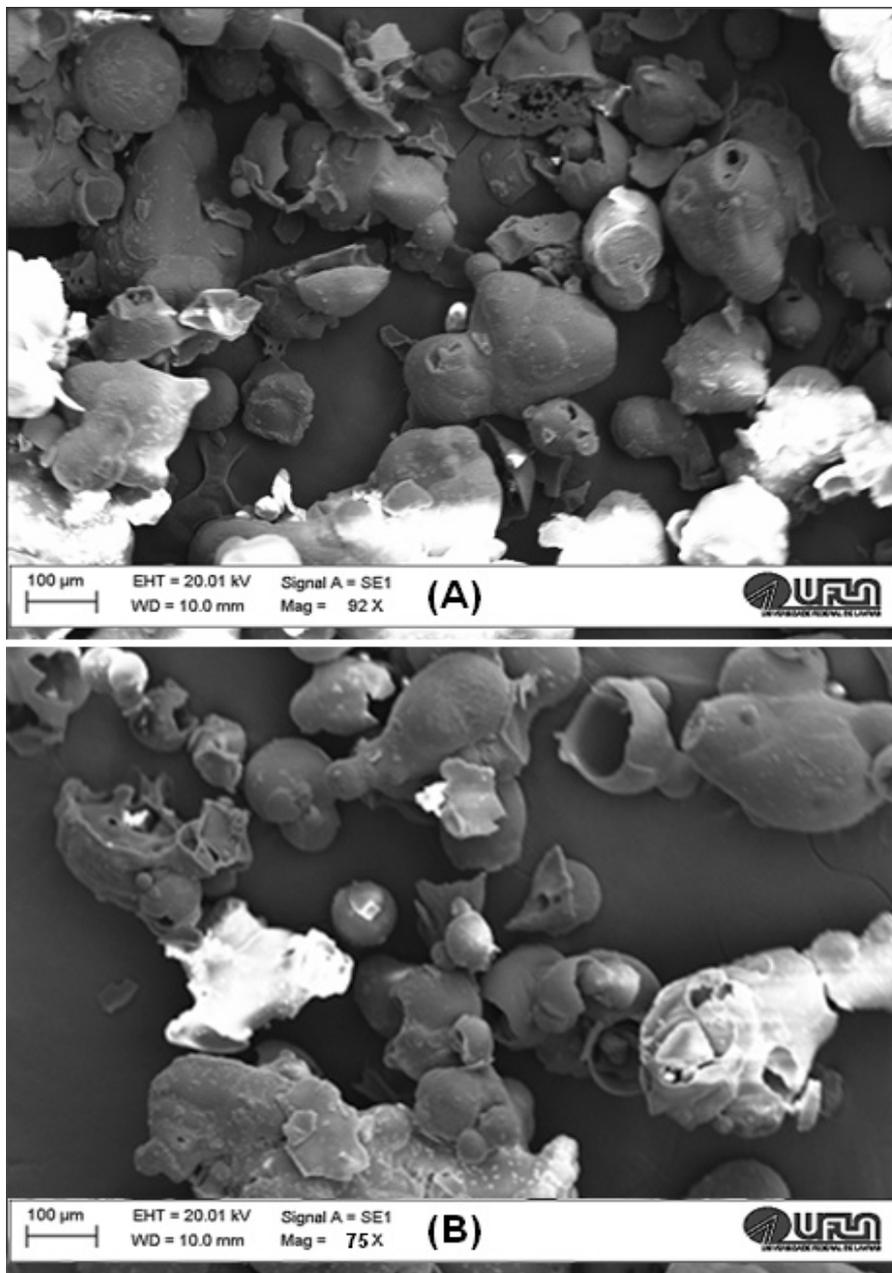


Figura 61 Com maltodextrina a) DE 20 (15%) e b) DE 10 (10%)

4.6 Diâmetro médio de Sauter

Após submeter o material particulado ao peneiramento e pesar as massas (M_i) dos materiais retidos em cada peneira, com diferentes aberturas (A_i), observou-se diferentes percentuais (X_i) (Tabela 10). Houve uma elevada distribuição granulométrica, mostrando um elevado grau de heterogeneidade no leito de partículas com variados diâmetros (D_i). No entanto, considerando-se os materiais particulados com as formas correspondentes à da esfera, com mesmos volumes, mesma área superficial e a relação superfície/volume igual para todas as partículas numa dada peneira, mas diferente em todas elas, os diâmetros médios calculados conforme a metodologia de Sauter (\overline{D}_s) apontou que as médias nos ovoprodutos estabeleceram valores entre 0,122 mm e 0,183 mm. Esses valores são coerentes com os da literatura que descreve partículas com tamanho médio variando de 0,100 a 0,250 mm (WESTERGAARD, 2004).

Tabela 10 Diâmetro médio de Sauter

| | Ai (mm) | Mi (g) | Xi (%) | Di (mm) | Xi/Di | \overline{D}_s (mm) |
|-----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------------|
| OVO + DE10 (15%) | 0,3 | 11,5 | 59,0956 | 0,256 | 2,308421 | 0,175 |
| | 0,212 | 4,14 | 21,2744 | 0,181 | 1,175382 | |
| | 0,15 | 0,03 | 0,1542 | 0,128 | 0,012044 | |
| | 0,106 | 3,57 | 18,3453 | 0,09 | 2,038369 | |
| | 0,074 | 0,03 | 0,1542 | 0,059 | 0,026129 | |
| | 0,044 | 0,07 | 0,3597 | 0,022 | 0,163506 | |
| | 0 | 0,12 | 0,6166 | 0 | 0 | |
| OVO + DE10 (10%) | Ai (mm) | Mi (g) | Xi (%) | Di (mm) | Xi/Di | \overline{D}_s (mm) |
| | 0,3 | 5,55 | 53,1609 | 0,256 | 2,076598 | 0,183 |
| | 0,212 | 2,11 | 20,2107 | 0,181 | 1,116615 | |
| | 0,15 | 0,11 | 1,0536 | 0,128 | 0,082316 | |
| | 0,106 | 1,98 | 18,9655 | 0,09 | 2,10728 | |
| | 0,074 | 0,02 | 0,1916 | 0,059 | 0,03247 | |
| | 0,044 | 0,01 | 0,0958 | 0,022 | 0,043539 | |
| 0 | 0,66 | 6,3218 | 0 | 0 | | |

“continua”

Tabela 10 “conclusão”

| | Ai (mm) | Mi (g) | Xi (%) | Di (mm) | Xi/Di | $\overline{D_s}$ (mm) |
|------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|-----------------------------------------|
| OVO+ DE20 (15%) | 0,3 | 6,7 | 51,4988 | 0,256 | 2,011674 | 0,122 |
| | 0,212 | 1,45 | 11,1453 | 0,181 | 0,615761 | |
| | 0,15 | 0,66 | 5,073 | 0,128 | 0,39633 | |
| | 0,106 | 2,96 | 22,7517 | 0,09 | 2,52797 | |
| | 0,074 | 0,6 | 4,6118 | 0,059 | 0,781667 | |
| | 0,044 | 0,54 | 4,1507 | 0,022 | 1,886661 | |
| | 0 | 0,1 | 0,7686 | 0 | 0 | |
| OVO in natura | 0,3 | 7,575 | 50,5 | 0,256 | 1,972656 | 0,177 |
| | 0,212 | 3,1725 | 21,15 | 0,181 | 1,168508 | |
| | 0,15 | 3,0975 | 20,65 | 0,128 | 1,613281 | |
| | 0,106 | 1,1205 | 7,47 | 0,09 | 0,83 | |
| | 0,074 | 0,0165 | 00,11 | 0,059 | 0,018644 | |
| | 0,044 | 0,0105 | 0,07 | 0,022 | 0,031818 | |
| | 0 | 0,0075 | 0,05 | 0 | 0 | |

O desvio padrão adimensional, calculado com a relação entre o desvio padrão e o diâmetro médio respectivo de Sauter, que indica a probabilidade dos diâmetros acontecerem a certa distância da média (0,164 mm) é demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 Desvio padrão entre o os diâmetros médios de Sauter

| | OVO +DE20 (15%) | OVO +DE10 (15%) | OVO +DE10 (10%) | OVO in natura |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Desvio padrão | 24,678 | 22,734 | 21,850 | 22,243 |

Com a elevação da dextrose equivalente (DE), houve maior possibilidade dos diâmetros acontecerem longe da média (Figura 62), mostrando que o aumento do tamanho dos grânulos é diretamente proporcional à taxa de aspersão e ao tamanho da gota do líquido.

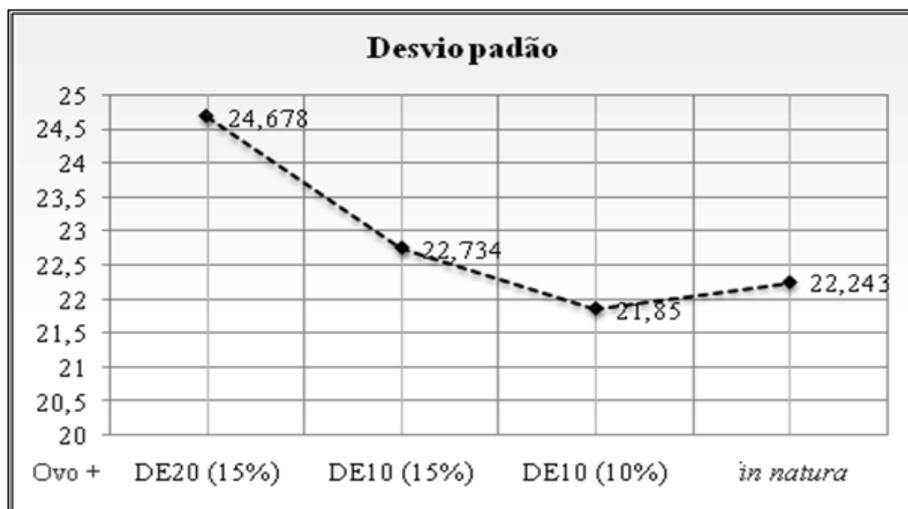


Figura 62 Desvio padrão entre o os diâmetros médios de Sauter

4.7 Avaliação das propriedades físico-químicas dos ovoprodutos

Os resultados obtidos foram processados no *software Sisvar 4.0* (FERREIRA, 2006) e analisados pelo teste de *Tukey*. A Tabela 12 demonstra o resultado da análise de caracterização físico-química para todos os tratamentos, obtidos na secagem por aspersão, na qual os resultados indicaram que houve diferença estatisticamente significativa a 5% de significância em relação às três formulações empregadas na secagem de ovoprodutos.

Segundo Baruffaldi (1998), o valor de 5% de umidade é considerado o máximo para garantir as propriedades do material seco. Assim, a estabilidade da amostra de ovo com maltodextrina DE 10 a 15% pode ter sido comprometida, juntamente com a da amostra com maltodextrina DE 10 a 10%, pois ambas apresentaram menos de 96% de sólidos totais exigidos pela legislação.

Tabela 12 Propriedades físico-químicas dos ovoprodutos

| | OVO <i>in natura</i> | OVO + DE 10 (10%) | OVO + DE 10 (15%) | OVO + DE 20 (15%) |
|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Umidade (%) | 3,94 ^a | 4,50 ^c | 6,80 ^d | 3,45 ^b |
| Extrato Etéreo (%) | 23,60 ^a | 40,00 ^b | 28,27 ^b | 27,09 ^b |
| Proteína (%) | 48,3 ^d | 33,25 ^a | 36,40 ^b | 43,84 ^c |
| Cinzas (%) | 3,30 ^a | 3,60 ^a | 3,14 ^a | 3,04 ^a |
| Atividade de Água | 0,5513 ^c | 0,5175 ^b | 0,4735 ^d | 0,4485 ^a |
| Solubilidade (%) | 83,63 ^a | 86,04 ^b | 90,54 ^b | 87,20 ^b |
| Molhabilidade (s) | 275 ^b | 271 ^b | 227 ^b | 126 ^a |

* Valores seguidos com letras iguais numa mesma letra, não diferenciam entre si, pelo teste de *Tukey*, ao nível 5% de probabilidade.

A umidade do ar de entrada tem um efeito significativo sobre o desempenho e a eficácia do processo de secagem. As condições de secagem são alteradas de acordo com a umidade do ar atmosférico. Goula e Adamopoulos (2003) demonstraram essa hipótese em escala laboratorial. Assim, como a secagem do ovo líquido com adição de maltodextrina 10 DE foi feita em dia chuvoso, quando massas de ar estavam com alta umidade relativa (94%, maior que nos demais dias, entre 79 e 83%), é possível que a situação de umidade tenha afetado o teor final de umidade no produto.

Houve um aumento da umidade residual com adição de maltodextrina.

Sierra, Rosa e Gabas (2007) apresentaram resultado semelhante num estudo sobre a qualidade de mamão papaia seco em *spray dryer* com adição de maltodextrina DE 10 e 20. Na prática, a maltodextrina por ter propriedade aglutinante produzindo aglomerados de partículas com maior volume. Mas, ao aumentá-lo, diminui-se a área de contato com o ar quente e, por esse motivo, o material particulado resultante apresentou maior umidade residual.

O aquecimento e a transferência de massa durante a secagem ocorrem com filmes de ar e vapor ao redor das gotículas. Entretanto, essa proteção do

vapor mantém a partícula na temperatura de saturação adiabática e são bem menores para as partículas menores, porque elas possuem menos umidade. Em vista disso, elas ficam mais expostas às temperaturas relativamente altas usadas

no processo – imediatamente ao serem formadas e novamente quando voltarem

no fluxo de inversão.

O motivo mais provável para os baixos valores proteicos nos ovoprodutos com maltodextrina seria a queima de algumas partículas menores, constituídas em maior número, com o aumento da densidade na alimentação úmida.

Sob o estresse térmico e sob a ação do oxigênio no ar dessecante no interior da torre de secagem, é possível que uma parte de extratos etéreos presente nos ovoprodutos sofresse uma série de reações produzindo numerosos compostos de degradação. Assim, termoxidação pode ter sido a causa dos variados níveis dos extratos estéreo encontrados nos ovoprodutos. Mas, os valores indicam que o uso da maltodextrina como material de parede permitir maior proteção, ou maior retenção.

Todos os valores de atividade de água obtidos foram menores que 0,60 e permitem a inibição da reprodução microbiana. Em relação ao grau de dextrose equivalente (DE), houve diferenças do ponto de vista significativo em 5% ($p < 0,05$), porque as maltodextrinas têm a habilidade de formar géis e reter água, formando sólidos higroscópicos (SLADE; LEVINE, 1988).

As amostras com maltodextrinas possuíram uma solubilidade muito similar e não houve diferenças estáticas em 5%. Em relação ao ovo *in natura*

houve aumento da solubilidade, porque a adição maltodextrina possibilitou a formação de estruturas maiores, mais irregulares e mais porosas. As superfícies irregulares dos grânulos formados permitiram que a água entrasse pelos poros e que o pó ganhasse mais solubilidade, conforme descrito na Tabela 12.

A molhabilidade, ou capacidade de absorver água em sua superfície foi maior nos aglomerados maiores, menos esféricos. As amostras com concentrações maiores de maltodextrina molhavam-se mais rapidamente, pois suas partículas, com as superfícies mais irregulares, possuíam maior atividade capilar.

Não houve diferença estatística ($p < 0,05$) em relação aos percentuais de cinzas nas amostras.

4.8 Análise da cor das amostras

Quanto à cor (Tabela 13), aumentando-se a quantidade de maltodextrina, aumentou-se o valor do parâmetro “b” (azul-/amarelo+), que mede a

intensidade da cor amarela e “a” (vermelho+/verde-), que mede a

intensidade da cor vermelha. Geralmente, espera-se que a adição de

maltodextrina aumente o brilho das amostras e diminua sua saturação, deixando-a menos amarela. Houve de fato, aumento no brilho das amostras (equivalente ao preto e branco, L*), mas em relação à saturação, ocorreu justamente o contrário: as amostras ficaram mais saturadas, tendendo mais para o amarelo escuro.

Tabela 12 Resultado das análises de cor

| <i>OVO in natura</i> | | | <i>OVO + maltodextrina DE10 (10%)</i> | | |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 71,31 | 3,78 | 32,12 | 72,54 | 5,55 | 34,13 |
| 70,35 | 4,28 | 32,13 | 72,59 | 5,59 | 34,28 |
| 73,01 | 4,31 | 32,51 | 71,98 | 5,78 | 34,63 |
| 71,94 | 3,69 | 33,21 | 73,30 | 5,30 | 33,71 |
| 71,30 | 5,08 | 31,44 | 72,92 | 5,28 | 33,47 |
| 72,08 | 4,75 | 33,46 | 73,16 | 5,29 | 33,66 |
| Médias | | | Médias | | |
| 71,67 | 4,32 | 32,48 | 72,75 | 5,46 | 33,98 |

“continua”

Tabela 13 “conclusão”

| <i>OVO + maltodextrina DE10 (15%)</i> | | | <i>OVO + maltodextrina DE20 (15%)</i> | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 70,62 | 5,22 | 32,77 | 72,41 | 3,99 | 32,92 |
| 68,88 | 5,14 | 32,08 | 71,95 | 4,11 | 32,93 |
| 72,48 | 5,52 | 34,35 | 74,31 | 3,32 | 32,91 |
| 71,81 | 5,34 | 33,96 | 73,89 | 3,69 | 33,01 |
| 72,05 | 5,59 | 34,26 | 73,82 | 3,57 | 33,18 |
| 72,21 | 5,45 | 34,37 | 74,03 | 3,52 | 32,51 |
| Médias | | | Médias | | |
| 71,34 | 5,38 | 33,63 | 73,40 | 3,70 | 32,91 |

Na prática, houve um aumento nas variáveis “a”, que mede a intensidade de vermelho (Figuras 63 e 64). Reações oxidativas, caramelização e reações de *Maillard* em carboidratos e proteínas podem ter sido a causa. Contudo, o maior valor na amostra com maltodextrina DE10 (10%), com maior perda do teor proteico, reforça a possibilidade de partículas menores queimadas presentes nas amostras. Além disso, como todos ovoprodutos apresentaram A_w em torno de 0,5 permitiu o escurecimento, pois seus componentes não imobilizados reagiram produzindo compostos escuros.

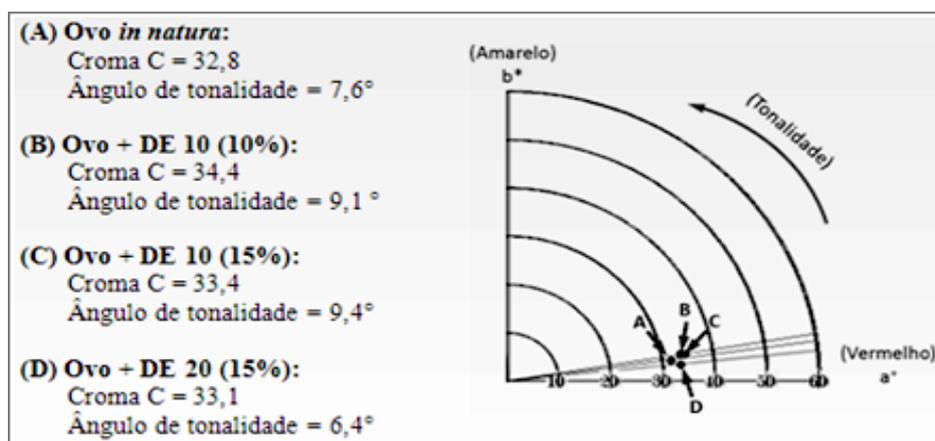


Figura 63 Tonalidade das amostra

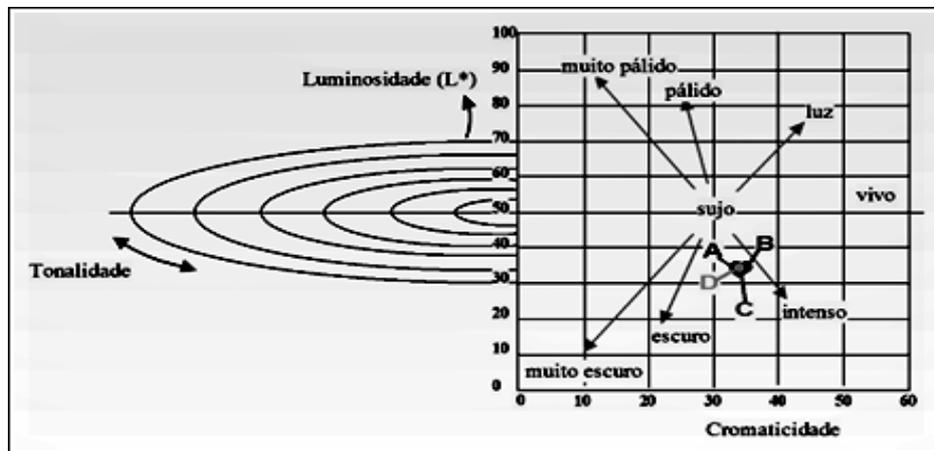


Figura 64 Atributos de cor das amostras

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Espera-se que todas as gotas tenham tempo suficiente para secarem antes de entrarem em contato com a superfície do secador. A câmara de secagem deve ter volume suficiente para garantir um tempo aceitável de contato entre a nuvem atomizada e o gás aquecido (ar) e evitar uma alta aderência. Deve-se também estimar as dimensões das gotas para dizer que dimensões são necessárias para evitar depósitos molhados sobre as paredes quentes da torre de secagem. Portanto, quando isso ocorre, duas explicações são possíveis: uma pulverização com grandes volumes, ou mau dimensionamento da câmara de secagem.

A pulverização com grandes volumes apresenta uma forte relação com a distribuição e o tamanho das gotas produzidas pelo bico. Quando o bico de pressão converte a energia potencial do material úmido em energia cinética, forçando-o a atravessar o orifício bocal, sob a pressão da bomba alimentadora, forma-se uma fina película de alta velocidade na saída. O material que deixa o bico forma-se um filme instável que se desintegra, formando ligamentos e depois gotas. A força motora que promove a desintegração é a turbulência formada dentro do atomizador. Se a turbulência for baixa, formam-se gotas muito grandes, se for excessivamente alta, a pulverização é ruim, com grande variação no tamanho das gotículas. Assim, pressão de descarga e vazão da mássica da bomba devem obedecer às instruções do fabricante do atomizador para uma boa pulverização.

A turbulência no interior da torre de secagem e a desigualdade de tamanho das gotas aumentam o risco de colisão entre partículas menores (secas) com outras maiores (ainda úmidas), que se aderem umas às outras, formando aglomerados. A evidência de que o bico produziu um espectro de gotas de

tamanhos variados, foi o alto grau de aglomeração das partículas. As imagens obtidas por microscopia eletrônica mostram que partículas menores não só colidiram com estruturas maiores como as adentraram (Figura 65).

A não utilização de gotas de tamanhos adequados obrigou a utilização de temperaturas de secagem relativamente altas, proporcionando perdas. A propósito disso, como o *spray dryer* não possui um varredor pneumático, nem válvula rotativa para a retirada de material seco na base da torre sem interromper o processo, forçosamente as secagens experimentais tiveram que ser rápidas, com duração máxima de 5 minutos, para evitar o aquecimento excessivo dos produtos dentro da torre de secagem, ou seja, não foi praticável secar grandes volumes. Com isso, foi impossível um balanço material, pois o material era sempre insuficiente para uma medição confiável da quantidade de material entrando e deixando o sistema.

Em produtos desidratados com material de parede, principalmente maltodextrinas, é comum observar uma camada dura superficial. No entanto, quando a temperatura de secagem é mais baixa, a camada permanece úmida e flexível por mais tempo e, dessa forma, as partículas podem murchar e enrugar quando resfriadas (Figura 66), fenômeno esse denominado encolhimento.

De acordo Nijdam e Langrish (2006 citado por TONN, 2006), quando a temperatura é suficientemente alta, a umidade evapora rapidamente e a casca se torna seca e dura, de modo que as partículas não murçam quando o vapor formado dentro do vacúolo condensa (no momento em que se movem para as regiões mais frias do secador).

Não foi observado encolhimentos nos ovoprodutos particulados.

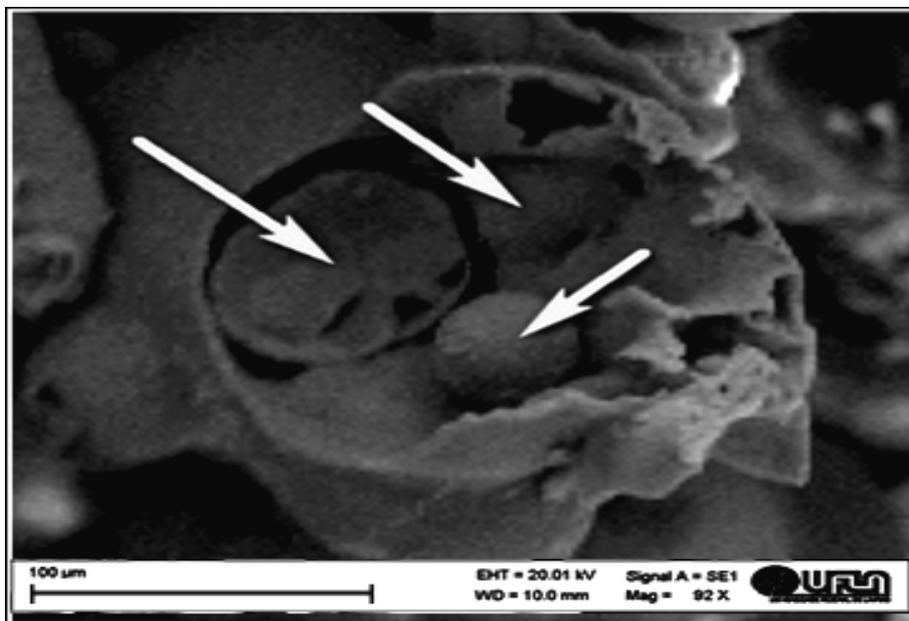


Figura 65 Partículas que se aglomeraram ao se chocarem num movimento de avanço (cocorrente) e recuo (contracorrente) dentro da torre de secagem

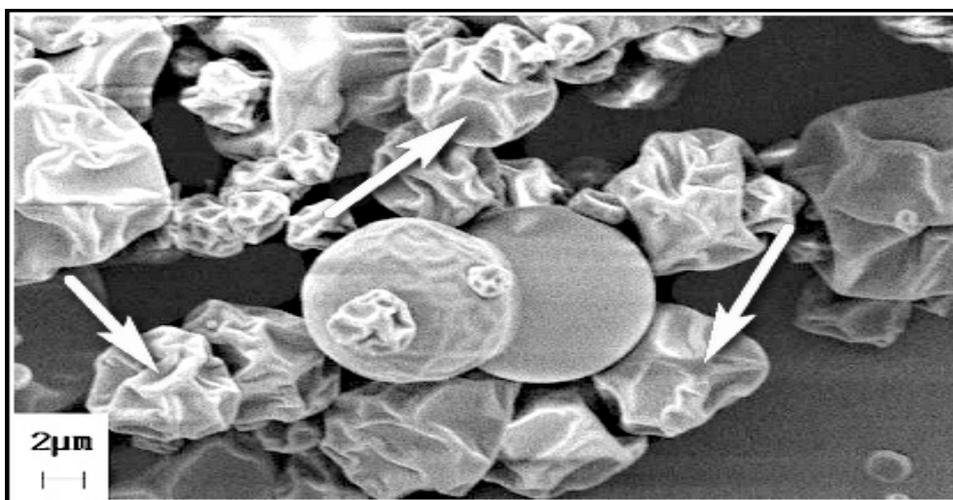


Figura 66 Encolhimento de partículas desidratadas
Fonte: Tonn (2006)

6 CONCLUSÃO

A menor temperatura que permitiu uma secagem homogênea dos ovoprodutos foi 270°C.

A vazão de descarga da bomba de alimentação está acima do limite exigido pelo atomizador. Assim, a pulverização foi imperfeita.

Mesmo com elevada taxa de evaporação e uma boa eficiência térmica no processo, houve perdas de princípios nutritivos, principalmente, proteínas.

Houve uma intensa aglomeração de partículas e um grande número de partículas colapsadas.

A cor e a solubilidade dos produtos estão de acordo com a literatura, mas houve uma grande distribuição no tamanho e nas formas dos ovoprodutos

particulados e prevaleceram os diâmetros acima de 30 µm.

O pó obtido teve uma boa instantaneização, dissolvendo facilmente em água.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuação deste trabalho, ficam as seguintes recomendações:

- a) melhorar o padrão de pulverização e o fluxo de arraste. Para isso, será necessária a instalação de dois inversores de frequência: um para o acionamento da bomba de pressão e outro para o exaustor.

Para obter o pulverizado com desempenho mais eficiente, com disposição uniforme de pulverização, e com padrão de cone oco, as vazões terão que variar entre 3 a 5 Lpm a 69 bar (1000 psi).

A recomendação é o inversor CFW-10 para a bomba e o CFW-6, para o exaustor, da WEG. Ambos atendem os alcances de frequência dos motores. Com isso será possível alterar as vazões mássicas de produto úmido para valores dentro dos limites do atomizador;

- b) diminuir escoamentos turbulentos melhorando o sistema de difusão do ar para o interior da torre de secagem;
- c) instalar um sistema de varredura pneumática na câmara de secagem, para além de resfriar o produto, removê-lo das paredes do secador;
- d) instalar válvulas rotativas nas saídas para recolhimentos de produto sem a necessidade de interromper o processo de secagem. Isso possibilitará a secagem de grandes volumes e, conseqüentemente um balanço de massa do processo.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, A. C. C.; ANTUNES, A. J. Unidade Haugh como medida da qualidade de ovos de galinha armazenados sob refrigeração. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 681-685, Dec. 2001.
- ANSELMO, G. C. S.; MATA, M. E. R. M. C.; ARRUDA, P. C.; SOUSA M. C. Determinação da Higroscopicidade do Cajá em Pó por Meio da Secagem por Atomização. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, vol. 6, nº 2, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, pp. 58-65. 2006.
- ARAUJO, S. D. O. ; GUERRERO, J. R. H.; PRIMO, A. R. M. Análise do desempenho térmico de fibras locais no resfriamento evaporativo. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife. **Anais...** Recife: [s. n.], 2006. v. 1, p. 300-309.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. 17th ed. Gaithersburg, 2000. v. 1-2.
- AVISITE . Revista Produção Animal – Avicultura, Nov., Ed. 43, 2010. Disponível em: www.avisite.com.br/noticias/default.asp?codnoticia=11071
- BARUFFALDI, R.; OLIVEIRA, M. N. **Fundamentos da Tecnologia de Alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1998. 317p.
- BASU, S.; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: a review. **Drying Technology**, New York, v. 24, p. 917–930, 2006.
- BEZERRA, T. S. **Comportamento higroscópico de pós de diferentes variedades de manga**. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- BOBBIO, P.; BOBBIO, F. **Química do processamento de alimentos**. 2. ed. São Paulo: Varela, 1992. p. 84-86.

BRASIL. Resolução nº 12, de 2 de janeiro de 2001. Aprova o Regulamento Técnico sobre Padrões Microbiológicos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 10 jan. 2001.

BRASIL. Resolução n. 30, de 5 de julho de 1991. **Boletim de Serviço [do] Superior Tribunal de Justiça**, Brasília, DF, n. 24, p. 12, 15 jul. 1991.

CALLAHAN, J. C. et al. **Equilibrium moisture content of pharmaceutical excipients**. *Drug Development Industrial Pharmacy*, New York, v. 8, n. 3, p. 355-369, 1982.

CAMARGO, C. E. O.; RAMOS, L. C. S.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; FELÍCIO, J. C.; PETTINELLI JÚNIOR, A.; CASTRO, J. L. de; YOKOO, E. Y. **Linhagens diaplóides de trigo: produção de grãos, características agrônômicas e tolerância à toxicidade de alumínio**. *Bragantia*, v. 58, n. 2, p. 235

CÂNDIDO, M. G. L. C. **Ciclones de recirculação para captura de poeiras finas**. 2000. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade do Porto, Porto, 2000. .

CANO-CHAUCA, M. et al. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 6, n. 4, p. 420-428, 2005.

CÁNOVAS, G. V. B.; MERCADO, H. V. **Dehydration of foods**. New York: Chapman & Hall, 1996. p. 335.

CHAIM, A.; VALARINI, P. J. Eficiência de deposição de agrotóxicos em cultura rasteira. In: VALARINI, P. J.; ALFREDO, J. B. L. (Org.). **Impacto ambiental da agricultura irrigada em Guaira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 91-114..

CHEFTEL, J. C.; CHEFTEL, H.; BESANÇON, P. **Métodos de conservación**. Zaragoza: Acribia, 1983. v. 2, cap.7, p.173-202.

COLLARES, F. **Desprendimento de filmes de pastas alimentícias durante a secagem sobre superfícies de sólidos e sua relação com a Transição Vítrea**. 2001. 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

COSTA, E. C. **Secagem industrial**. São Paulo: E. Blucher, 2007. 196 p.

COUTINHO, A. P. C.; CABELLO, C. Características estruturais e físico-químicas de maltodextrinas de mandioca e batata-doce. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 16-32, 2008.

COX, M. M.; NELSON, D. L. **Lehninger principles of biochemistry**. 4th ed. New York: W. H. Freeman & COLTD, 2005. p. 12-80.

CROSSLEY, E. L. **Dried milk**. Disponível em: <http://whqlibdoc.who.int/monograph/WHO_MONO_48_%28p347%29.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2011.

DIAS, J. **A importância da actividade da água nos alimentos**. 2006. Disponível em: <http://www.hipersuper.pt/2006/12/08/A_importancia_da_actividade_da_>. Acesso em: 22 jan. 2012.

DITCHFIELD, C. **Estudos dos métodos para a medida da actividade de água**. 2000. 195 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) - Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2000..

ESTEVES, B. N. **Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (Spray Dryer) no tamanho de partícula e densidade aparente do café solúvel**. 2006. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FAVALLI, C. R. **Modelagem e simulação do processo de atomização de revestimento cerâmico**. 2002. 151 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2002.

FENNEMA, O. R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. **Química de alimentos de Fennema**. 4. ed. São Paulo: Artmed, 2010. p. 231

FENNEMA, R. O. **Química de los alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1993. 1095 p.

FERREIRA, D. F. **SISVAR 4.0**: Sisvar. Lavras: UFLA, 2006.

FOUST, A. S. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982. p. 617-620.

FROHN, A.; ROTH, N. **Dynamics of droplets**. Stuttgart: Institut für Thermodynamik der Luft - und Raumfahrt, 1965. p. 69.

FUNDAÇÃO GRUPO EROSKI. **El huevo de gallina**. 2010. Disponível em: <<http://www.consumer.es>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

FURTADO, P. B. S.; SCHOFFEN-ENKE, D. B. **Influência da dieta no conteúdo de lipídios da carne e do ovo**. Pelotas: UFPEL, 2005.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; GAVA, J. R. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações**. São Paulo: Nobel, 2009. p. 95.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation. **Drying Technology**, New York, v. 21, n. 7, p. 1273-1289, 2003.

GRIZOTTO, R. K.; AGUIRRE, J. M.; MENEZES, H. C. Frutas estruturadas de umidade intermediária obtidas de polpas concentradas de abacaxi, manga e mamão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, dez. 2005.

GUT, J. A. W.; PINTO J. M.; A. L. G.; TELIS-ROMERO, J. Pastel rization of egg yolk in plate heat exchangers thermophysical properties and process simulation. **Annual Meeting**, San Francisco, p. 16-21, Nov. 2003. Session 123.

GUTIÉRREZ, José B. **Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos**. Díaz de Santos, Spanish, p. 438-441. 2000.

HONEYVILLE FOOD PRODUCTS. Disponível em: <<http://store.honeyvillegrain.com/powderdriedwholeeggstandeggwhites.aspx>>. Acesso em: 23 fev. 2012.

HONORATO, G. C. **Concepção de um secador rotatório para secagem do cefalotórax do camarão**. 2006. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

JAYA, S.; DAS, H. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 63, p. 125–134, 2004.

KAJIYAMA, T.; PARK, K. J. Influência da umidade inicial da alimentação no tempo de secagem em secador atomizador. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2008.

KRZYSZTOF C., KRZYSZTOF S. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. **Journal of pharmaceutical sciences**. Vol. 99, p575–586. SEP 2009.

LACERDA, A. F. **Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes**. 2007. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L. Processamento de achocolatado de cupuaçu por spray-dryer. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 115-123, jan./mar. 2003.

LEPEK, L. S. F. **Efeito da radiação ionizante na viscosidade do ovo industrializado**. 1998. 77 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1998.

MAK, S. Y.; WONG, K. Y. **The measurement of the surface tension by the method of direct pull**. American Journal Physics, New York, v. 58, n. 8, p. 791-792, Aug. 1990..

MARINHO, J. R. D. **Macromoléculas e polímeros**. São Paulo: Manole, 2005.

MASTERS, K. **Spray drying**: an introduction to principles, operations and applications. 2nd ed. New York: J. Wiley & Sons, 1976. 337 p.

MAUERER, A. **Secondary structural changes of spray dried proteins with fourier transform infrared spectroscopy**. 2006. Disponível em: <http://www.pharmtech.uni-erlangen.de/publications/12_Mauerer_06.pdf>. Acesso em: 22 out. 2011.

MRAK, E. M.; STEWART, G. F. **Advances in food research**. London: Academic, 1963. 558 p.

NIRO A/S. Milk Powder Technology: **Evaporation and Spray Drying**. Niro Powder Technology. 5th edition. Dinamarca. Copenhagen, 2004. P. 69-173.

OBSERVAÇÃO do ovo de galinha não embrionado. Disponível em: <<http://rge.fmrp.usp.br/cursos/zm/obsovo.htm>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

OETTERER, M.; REGINATO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Editora Manole, São Paulo. p.171-192. 2006.

PEREIRA, E. et al. Estudo da influência da geometria da entrada do ar na simulação de um spray dryer. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 20., 2009, Campinas. **Anais...** Campinas: ENEMP, UNICAMP, 2009. 1 CD ROM.

POTT, N. N.; HOTCHKISS, J. H. **Foods science**. 5th ed. Maryland: Aspen Publishers, 1998. p. 439-500.

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

REVISTA PRODUÇÃO ANIMAL – AVICULTURA , Campinas, v. 4, n. 43, nov. 2010. Disponível em: <www.avisite.com.br/revista>. Acesso em: 23 jan. 2012.

SARCINELLI, M. F.; VENTURINI, K. S.; SILVA, L. C. **Características dos ovos**. Vitória: UFES, 2007. Boletim Técnico.

SEIBEL, N. **Preservação e conservação de ovos**. Pelotas: UFPEL, 2005.

SIERRA, D. M. ; ROSA, N. N. ; GABAS, A. L. **Influência das condições de secagem e adição de estabilizantes em polpa de papaya em pó**. Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP, 2007.

SLADE, L.; LEVINE, H. Non-equilibrium melting of native granular starch: part i. temperature location of the glass transition associated with gelatinization of A-Type Cereal Starches. **Carbohydrate Polymers**, Berking, v. 8, p. 183-208, 1988.

SPRAING SYSTEMS Co. **Engenharia de desenvolvimento e produção de bicos de pulverização e acessórios**. São Bernardo do Campo, 1995. (Catálogo 55).

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying**: principles, applications and design. New York: Gordon and Breach, Dec. 1986. p. 352-359.

TONELI, J. T. C. L.; MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 181-204, 2005. Especial.

TONON, R. V.; BRABET, Catherine; HUBINGER, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**. v. 88, p. 411–418. 2008.

TORRES, R. J. A. et al. Conceitos atuais e perspectivas na prevenção da degeneração macular relacionada à idade. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 3, p. 103-158, June 2008.

VICENZE, Raul. **Introdução a Análise de Alimentos**. Química Industrial de Alimentos – UNIJUI, 2005.

WESTERGAARD, V. **Milk powder technology**: evaporation and spray drying. 5th ed. Copenhagen: Niro A/S, 2004. p. 69-173.

WOLF, F. G.; SANTOS, L. O. E. ; PHILIPPI, P. C. Formação e dinâmica da interface líquido–vapor simulada pelo método Lattice-Boltzmann. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 28, n. 2, p. 167–175, 2006.