



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**



**ESTUDO DA EXTRAÇÃO MECÂNICA DE BIXINA DAS SEMENTES
DE URUCUM EM LEITO DE JORRO**

FABIANO GUIMARÃES E CUNHA

**Uberlândia – MG
2008**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



**ESTUDO DA EXTRAÇÃO MECÂNICA DE BIXINA DAS SEMENTES
DE URUCUM EM LEITO DE JORRO**

Fabiano Guimarães e Cunha

Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo

Co-Orientador: Carlos Henrique Ataíde

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- C972e Cunha, Fabiano Guimarães e, 1982-
Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em
leito de jorro / Fabiano Guimarães e Cunha. - 2008.
92 f. : il.
- Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Co-orientador: Carlos Henrique Ataíde.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Processo de leito de jorro - Teses. 2. Corantes - Teses. I. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. II. Ataíde, Carlos Henrique. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.047.79

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 25 DE ABRIL DE 2008.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
Co-orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Luis Alexandre Pedro de Freitas
FCFRP/USP

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores e amigos Marcos Barroso e Carlos Ataíde, pelo empenho e dedicação com que acompanharem meu trabalho e pelo apoio dado durante todo esse período. Agradeço também a eles por mais essa contribuição na minha formação profissional e também pessoal.

Aos meus amigos de jornada que ajudaram a tornar esses anos mais fáceis. Em especial a Kássia, Kris, Letícia, Leandro e Talita.

Aos meus amigos e alunos de IC que me ajudaram muito na realização desse trabalho: Alexandre, Amanda, Carol, Edelize, Marcão, Lucas e Raiana.

Aos professores da FEQ/UFU por seus ensinamentos e principalmente pela amizade. Em especial ao Professor Humberto Molinar Henrique pela grande ajuda com a instrumentação da unidade experimental.

A Dona Ione e ao Sr. Alcides (Cidão), pelos cuidados e pela amizade durante esse tempo.

Agradeço a Capes e ao CNPq pela concessão de bolsa e incentivo à pesquisa.

A todos que indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação. Muito Obrigado

SUMÁRIO

ÍNDICE DE TABELAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 - Corantes.....	6
2.1.1 - História dos Corantes na Produção de Alimentos.....	6
2.1.2 - Corantes Naturais <i>versus</i> Corantes Artificiais.....	7
2.1.3 - Legislação No Brasil.....	9
2.1.4 - O Urucum.....	11
2.1.5 - Corante Bixina.....	17
2.1.6 - Tecnologias de Obtenção de Corantes do Urucum.....	21
2.2 - O Leito de Jorro.....	24
2.2.1 - Histórico e Características.....	24
2.2.2 - Tipos de leito de jorro.....	26
2.2.3 - Fluidodinâmica do Leito de jorro.....	27
2.2.4 - Quedas de Pressão.....	32
2.2.5 - Velocidade de Jorro Mínimo.....	34
2.2.6 - Extração Mecânica da Bixina em Leito de Jorro.....	35
2.3 - A Técnica de Fluidodinâmica Computacional.....	36
2.3.1 - Revisão do Modelo Utilizado Nas Simulações (CFD).....	38
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	42

3.1 - A Caracterização das Sementes de Urucum.....	42
3.1.1 - A Determinação da Densidade das Sementes.....	42
3.1.2 - A Determinação do Diâmetro da Esfera de Volume Mesmo Volume que o da Partícula (d_p).....	42
3.2 - A Determinação da Concentração de Bixina no Pó Extraído.....	43
3.3 - A Unidade Experimental.....	44
3.3.1 - O Procedimento Experimental.....	46
3.4 - O Planejamento de Experimentos.....	46
3.5 - Influência da Distância do Tubo Draft à Base.....	48
3.6 - A Execução Numérica.....	48
3.6.1 - A Malha Computacional.....	48
3.6.2 - O Modelo Matemático.....	48
3.6.3 - O Procedimento de Resolução.....	49
 CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 50
4.1 - Resultados Experimentais.....	50
4.1.1 - A Caracterização Física das Sementes.....	50
4.1.2 - As Curvas Características.....	51
4.1. 3 - Condições de Jorro Mínimo.....	57
4.1. 4 - Tempo de Processamento das Sementes.....	59
4.1. 5 - Resultados do Planejamento Experimental.....	60
4.1.6 - Estudo da Influência da Altura do Tubo <i>Draft</i> à Base (h_t) no Processo de Extração Mecânica.....	64
4.1.7 - Cinética de Concentração.....	66
4.2 - Resultados Simulados em CFD.....	67
4.2.1 - Velocidades de Jorro Mínimo Simuladas, Perfis de Concentração e Vetor Velocidade das Partículas.....	67
4.2.2 - Estudo da Influência da Distância do Tubo Draft à Base utilizando CFD.....	71
 CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	 75

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
---	-----------

APÊNDICE A

Placa de Orifício.....	82
------------------------	----

APÊNDICE B

Calibração da Instrumentação de Aquisição de Dados.....	87
---	----

APÊNDICE C

Resultados Experimentais da Caracterização Física das Sementes.....	91
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Usos de corantes de urucum em alimentos.....	19
Tabela 2.2: Usos do Extrato de urucum em alimentos.....	20
Tabela 2.3: Processos de extração de corante de urucum.....	23
Tabela 3.1: Dimensões do Leito de Jorro.	44
Tabela 3.2: Variáveis e seus repetíveis níveis.....	47
Tabela 3.3: Condições operacionais para análise da influência de três variáveis na extração mecânica da bixina em leito de jorro.	47
Tabela 4.1: Propriedades físicas da semente de urucum.....	51
Tabela 4.2: Condições de jorro mínimo.....	57
Tabela 4.3: Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões obtidas usando a Equação de MATHUR e GISHLER (1955) para o leito de jorro convencional.....	58
Tabela 4.4: Condições operacionais para análise da influência de três variáveis na extração mecânica da bixina em leito de jorro.	61
Tabela 4.5: Efeitos Estatísticos significativos.	62
Tabela 4.6: Velocidade de jorro mínimo simulada (CFD) e experimental para a configuração sem draft.....	71
Tabela 4.7: Número de células, faces e nós gerados em cada configuração do leito de jorro.	71
Tabela A1: Perfis de velocidade e queda de pressão fornecida pela placa de orifício.....	84
Tabela A2: Funções velocidade ajustadas e vazão de ar fornecida pelo soprador.....	85
Tabela B1: Dados experimentais da calibração da instrumentação de aquisição de dados.....	88
Tabela C1: Resultados experimentais da caracterização física das sementes.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ilustração externa e interna dos frutos do urucuzeiro.	1
Figura 1.2: Superfície da semente de urucum.....	2
Figura 2.1: Vista parcial de uma planta de Urucuzeiro.	12
Figura 2.2: (a) Floração e frutificação de Urucuzeiro, (b) Frutos (cachopas) de Urucuzeiro, (c) Sementes de Urucuzeiro, (d) Sementes em maturação plena.	12
Figura 2.3: (a) Secador natural para sementes de Urucuzeiro, (b) Secador artificial para sementes de Urucuzeiro.	14
Figura 2.4: Estrutura dos carotenóides bixina e norbixina, cis e trans.....	18
Figura 2.5: Representação do leito de jorro cilíndrico.	25
Figura 2.6: Diagramas esquemáticos do leito de jorro convencional e dos leitos com o tubo draft poroso e não poroso.	27
Figura 2.7: Curva típica de queda de pressão em função da vazão de fluido.	29
Figura 3.1: A Unidade Experimental.	44
Figura 3.2: Malha adotada.	48
Figura. 4.1: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com configuração convencional, $M_S = 2 \text{ Kg}$ e $H_0 = 17\text{cm}$)	53
Figura. 4.2: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com configuração convencional, $M_S = 2,5 \text{ Kg}$ e $H_0 = 19\text{cm}$)	53
Figura. 4.3: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo draft, $h_t = 4\text{cm}$, $M_S = 2\text{Kg}$ e $H_0 = 17\text{cm}$).	55
Figura. 4.4: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo draft, $h_t = 7\text{cm}$, $M_S = 2\text{Kg}$ e $H_0 = 17\text{cm}$).	55
Figura. 4.5: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo draft, $h_t = 4\text{cm}$, $M_S = 2,5\text{Kg}$ e $H_0 = 19\text{cm}$).	56
Figura. 4.6: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo draft, $h_t = 7\text{cm}$, $M_S = 2,5\text{Kg}$ e $H_0 = 19\text{cm}$).	56
Figura. 4.7: Variação da massa de pó extraída e da produtividade do processo em função do tempo de processamento ($M_S = 2,5\text{kg}$, sem a presença do tubo draft).....	59
Figura 4.8: Resultados experimentais de variação da massa de pó extraída (M_P) com o tempo para diferentes alturas de tubo draft (h_t).	63
Figura 4.9: Resultados experimentais de variação produtividade (P_T) com o tempo para diferentes alturas de tubo draft (h_t).	64
Figura 4.10: Variação da massa de pó extraída (M_P) com o tempo para diferentes alturas de tubo draft (h_t).	65

Figura 4.11: Massa total produzida (M_T) para diferentes alturas de tubo <i>draft</i> (h_t).	65
Figura 4.12: Variação da concentração do pó extraído com o tempo para: $h_t = 4\text{cm}$ e 7cm	67
Figura 4.13: Distribuição de fração volumétrica de sólidos para $M_S = 2\text{ kg}$, a) U_{jm} ; b) $U = 1,18 U_{jm}$ sem tubo <i>draft</i> ; c) com tubo <i>draft</i> , $h_t = 7\text{ cm}$, na mesma velocidade do caso b.....	68
Figura 4.14: Distribuição de fração volumétrica de sólidos para o leito com $M_S = 2,5\text{ kg}$, a) U_{jm} b) $U = 1,11U_{jm}$ sem tubo <i>draft</i> ; c) com tubo <i>draft</i> , $h_t=7\text{ cm}$, na mesma velocidade do caso b	69
Figura 4.15: Vetor de velocidade das partículas ($M_S = 2\text{ kg}$): a) leito de jorro convencional; b) leito de jorro com tubo <i>draft</i> ($h_t = 7\text{ cm}$)	70
Figura 4.16: Vetor de velocidade das partículas ($M_S = 2,5\text{ kg}$): a) leito de jorro convencional, b) leito de jorro com tubo <i>draft</i> ($h_t=7\text{ cm}$).....	70
Figura 4.17: Perfil de fração volumétrica de sólidos para o leito de jorro com o tubo <i>draft</i> para as diferentes distâncias do <i>draft</i> à base ($h_t = 4, 5, 6\text{ e }7\text{cm}$).....	72
Figura 4.18: Velocidade do ar ao longo do leito de jorro para $h_t = 4, 5, 6\text{ e }7\text{ cm}$	73
Figura 4.19: Velocidade do urucum ao longo do leito de jorro para $h_t = 4, 5, 6\text{ e }7\text{ cm}$	73
Figura A1: Vista frontal e lateral da placa de orifício utilizada.	83
Figura A2: Vista lateral do conjunto placa de orifício e flanges utilizado.....	83
Figura A3: Ajuste dos valores de vazão de ar e queda de pressão fornecida pela placa a à Equação 2.	85
Figura B1: Ajuste linear dos valores de queda de pressão fornecida pelo manômetro e da voltagem fornecida pelo transdutor diferencial.	89
Figura B2: Ajuste linear dos valores de queda de pressão fornecida pelo manômetro e da voltagem fornecida pelo transdutor do tipo sonda.	89

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

C_b	Concentração de bixina	[%]
C_D	Coeficiente de arraste	[-]
D_{485nm}	Densidade ótica (absorbância) da diluição em 485 nm	[-]
D_c	Diâmetro da coluna	[m]
D_i	Diâmetro do orifício	[m]
d_p	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula	[mm]
d_t	Diâmetro do tubo <i>draft</i>	[cm]
D_s	Distância entre as partículas	[mm]
DP	Desvio Padrão	[-]
e_{ss}	Coeficiente de restituição das partículas	[-]
F	Taxa de recirculação de partículas.	[kg/s]
f	Fator de Arraste	[-]
$\vec{F}$	Força externa do corpo	[m/s ²]
$\vec{F}_{lift}$	Força de ascensão	[N]
$\vec{F}_{vm}$	Força mássica virtual,	[N]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
$g_{0,ss}$	Função distribuição radial	[m]
H	Altura do leito de partículas	[m]
H_c	Altura da seção cônica	[m]
H_M	Altura máxima	[m]
H_o	Altura do leito estático de partículas	[m]
H_{cil}	Altura da parte cilíndrica do leito de jorro	[m]
H' e h	Altura das seções cônicas do leito de jorro	[m]
h_t	Distância do tubo <i>draft</i> à base do leito de jorro	[m]
L_t	Comprimento do tubo <i>draft</i>	[cm]
K_{gs}	Coeficiente de troca de momento entre as fases, kg m ⁻³ s ⁻¹	[kg/m ³ s]
k_{θ_s}	Coeficiente de difusão de energia, J kg ⁻¹	[J/kg]
M	Massa de sólidos no leito	[Kg]
M_P	Massa de pó extraída	[g]

M_S	Massa da carga de sementes processados no leito	[Kg]
M_T	Massa de total de pó extraída	[g]
p	Pressão	[N /m ²]
p_s	Pressão de sólidos	[N /m ²]
Pr	Produtividade de pó	[g/Kg.h]
Q_{jm}	Vazão de jorro mínimo	[m ³ /h]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re_s	Número de Reynolds da partícula	[-]
$\vec{R}_{sg}$	Força de interação entre as fases	[N]
S_ϕ	Termo de geração da propriedade	[-]
ΔP_M	Queda de pressão máxima	[Pa]
ΔP_{jm}	Queda de pressão no jorro mínimo	[Pa]
ΔP_s	Queda de pressão no leito de jorro	[Pa]
t	Tempo de processamento	[h]
U	Velocidade das sementes de urucum	[m/s]
U_{jm}	Velocidade de jorro mínimo	[m/s]
U_S	Velocidade superficial de jorro	[m/s]
v	Velocidade do ar	[m/s]
v_{jm}	Velocidade de jorro mínimo	[m/s]
Símbolos Gregos		
α_g	Fração volumétrica da fase gasosa,	[-]
α_s	Fração volumétrica da fase de granular	[-]
$\alpha_{s,max}$	Máxima fração volumétrica de sólidos	[-]
ϵ	Porosidade	[-]
ϵ_s	Concentração de sólidos	[-]
ϵ_{mf}	Porosidade mínima de fluidização	[-]
$\gamma_{\theta s}$	Energia de dissipação devido à colisão	[-]
λ_s	Viscosidade bulk de sólidos	[Pa.s]

μ	Viscosidade da fase fluida	[Pa.s]
μ_s	Viscosidade de cisalhamento	[Pa.s]
ϕ_c	Ângulo da parte cônica	[-]
θ_s	Temperatura granular	[-]
ρ_g	Densidade da fase continua	[Kg/m ³]
ρ_s	Densidade da fase granular	[Kg/m ³]
ρ_p	Densidade da partícula sólida	[Kg/m ³]
ρ_s	Densidade da semente de urucum	[Kg/m ³]
τ_s	Tempo de relaxação da partícula	[s]
$\bar{\tau}_s$	Tensor tensão de sólidos, N m ⁻²	[N/m ²]
ϕ_{gs}	Troca d energia entre as fases fluida e sólida	[J]
Ψ ou ϕ	Esfericidade	[-]

RESUMO

O interesse e o consumo dos corantes naturais têm aumentado muito nos últimos anos. As sementes do urucum possuem um corante situado nas partes externas denominado bixina. O leito de jorro por se tratar de um equipamento barato e de operação simples, pode ser uma excelente alternativa para extração mecânica da bixina da superfície das sementes de urucum, em pequenas e médias propriedades rurais. Entretanto, apesar de apresentar algumas características fluidodinâmicas interessantes para a referida aplicação, tais como um intenso movimento das partículas e um efetivo contato gás-sólido, o leito de jorro apresenta algumas restrições, que tem limitado a sua utilização. Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos das variáveis: uso do tubo *draft*, a carga de sementes e a velocidade do ar no processo na extração mecânica da bixina em leito de jorro. A técnica da fluidodinâmica computacional (CFD) foi utilizada para descrever numericamente a fluidodinâmica do escoamento das sementes de urucum e do ar no leito de jorro. Por meio dos resultados obtidos foi possível obter as condições operacionais que maximizam a eficiência de remoção e permitem a obtenção de um produto com a qualidade adequada. A partir do planejamento experimental realizado para estudar o efeito da carga de sementes, da vazão do ar e da presença do draft na extração mecânica da bixina, foi possível concluir que a presença do “*draft*” foi a variável que teve o maior efeito em todas as respostas estudadas (massa de pó extraído, produtividade e concentração de bixina). Uma vez que a presença do tubo interno mostrou ser a variável que governa a cinética de atrição, foi estudado o efeito da distância do tubo à base do leito (h_t), tendo em vista a maximização da produção do corante. Os resultados experimentais mostraram que a distância do *draft* à base (h_t) que mais favorece a extração mecânica da bixina em leito de jorro é de 4cm. Os resultados da simulação por CFD ajudaram na compreensão do melhor desempenho para a configuração do leito de jorro com tubo *draft* e $h_t = 4$ cm. Com as simulações também foi possível obter valores de velocidade para a condição de jorro mínimo próximo dos valores experimentais, com erros relativos na ordem de 4%.

Palavras chave: Bixina, CFD, Corantes, Extração Mecânica, Leito de jorro, Tubo *draft*, Urucum.

ABSTRACT

The interest and the consumption of natural dyes have been increasing over the last years. The urucum seeds have a dye located in their external layer called bixin. The spouted bed, since it is an inexpensive equipment and because of its simple operation, can be an excellent alternative for mechanical extraction of the bixin from the surface of the urucum seeds, on small and average country properties. However, despite having some interesting fluidodinamics characteristics for the related application, such as an intense movement of particles and an effective gas-solid contact, the spouted bed presents some restrictions that have limited its application. This work had as objective to study the effect of the variables: use of the draft, the load of the urucum seeds and the air velocity on the process of the mechanical extraction of the bixin in a spouted bed. The computational fluidodinamics technique (CFD) was used to describe numerically the behavior both of the urucum seeds and the air inside the spouted bed. By means of the results obtained it was possible to achieve the operational conditions that maximize the efficiency of removal and allow the attainment of a product with the appropriate quality. From the experimental planning, carried through in order to study the effect of the load of the seeds, the air flow and the presence of the draft in the mechanical extraction of the bixin from urucum seeds, it was possible to get to the conclusion that the presence of the "draft" was the variable that had the highest effect in all the studied answer variables (mass of extracted powder, productivity and bixin concentration). Since the presence of the draft showed to be the variable that governs the attrition kinetics, the effect of the distance from the draft base to the spouted bed base (h_t) was studied, in view of the maximization of the dyeing production. The experimental results showed that the distance from the draft base to the spouted bed base (h_t) that most favors the mechanical extraction of the bixin in spouted bed was the one of 4cm. The results of the simulation through CFD also helped in the understanding of the best performance for the configuration of the spouted bed using a draft, placed at $h_t = 4$ cm. Through the simulations, it was also possible to get values of velocity for the condition of minimum spouting, close to the experimental values, with relative errors of about 4%.

Key words: Bixin, CFD, Draft, Dyes, Mechanical Extraction, Spouted Bed, Urucum.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os corantes são substâncias utilizadas pelas indústrias para colorir, padronizar e recuperar a cor de seus produtos, tornando-os mais atrativos ao consumidor. No passado, os corantes artificiais eram os principais agentes de coloração dos produtos industrializados. Hoje, com base nos resultados de estudos toxicológicos, o uso de inúmeros destes corantes é proibido por legislações de países específicos. Assim, o interesse e o consumo dos corantes naturais têm aumentado muito nos últimos anos. Muitos dos aditivos naturais possuem também características funcionais e não só estéticas. Ressalta-se, entretanto, que cuidados especiais devem ser observados na extração de certos corantes naturais, uma vez que estes podem ser susceptíveis à oxidação ou mesmo sensíveis à luz, ao pH do meio e ao calor.

Dentre esses corantes naturais, destaca-se o urucum de nome científico *Bixa orellana*. As sementes do urucum possuem um corante situado nas partes externas, responsável por sua coloração vermelha/alaranjada, a bixina.

Este destaque do urucum deve-se, em primeiro lugar, por se tratar do corante natural com crescente importância na indústria mundial de alimentos e por ser bastante cultivado em solo brasileiro

A Figura 1.1 apresenta uma ilustração dos frutos do urucuzeiro e a Figura 1.2 apresenta uma ilustração da superfície externa da semente do urucuzeiro.



Figura 1.1: Ilustração externa e interna dos frutos do urucuzeiro.

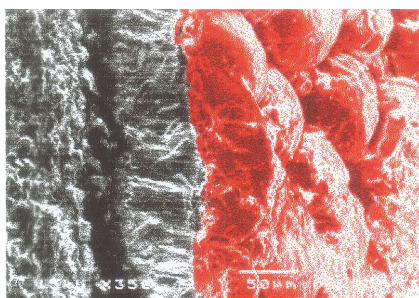


Figura 1.2: Superfície da semente de urucum (MENDONÇA, 1999).

O corante de urucum é extraído há séculos pelos índios, que utilizam seu poder tintorial como “maquiagem” tribal. O urucum tem sido objeto de profissionalização de cultivo, deixando no passado remoto a coleta selvagem. Em 2007, apenas no estado de São Paulo, foram plantados cerca de 1,7 mil hectares o que envolveu cerca de 300 pequenos produtores. Seu concentrado, denominado anato, apresenta um espectro de cores variando do amarelo claro ao vermelho escuro. Este concentrado de bixina é utilizado satisfatoriamente na coloração de produtos industriais como os de confeitaria; os derivados do leite (queijo, manteiga, etc.), os de salsicharias, massas em geral e na produção de cosméticos.

A bixina encontra-se concentrada nas camadas mais externas das sementes de urucum. O fato do pigmento corante estar localizado na superfície das sementes, facilita o processo de extração ao permitir que se opere com os grãos inteiros, sem necessidade de trituração.

A técnica tradicional usada na obtenção desse corante é a extração sólido-líquido, tendo como extratores, solventes específicos. A implantação da técnica de extração por solventes em pequenas e médias cooperativas rurais torna-se inviável, tendo em vista o baixo rendimento da extração frente aos altos custos requeridos: (i) na aquisição dos equipamentos e acessórios necessários; (ii) na manutenção e compra de insumos; (iii) no controle das variáveis operacionais para se manter a qualidade do corante, que está sujeito à contaminação; à oxidação e à degradação térmica. Assim, o pequeno e médio produtor rural brasileiro prefere vender a semente in natura por preços relativamente baixos, comparados ao valor do corante industrializado.

As indústrias brasileiras compram do produtor a uma média de US\$ 0,17 por percentual de bixina, ou por US\$ 0,50 por quilo de semente, e vendem no mercado o

corante lipossolúvel a R\$ 10/kg e o hidrossolúvel a R\$ 2,50/kg em média. O primeiro é principalmente vendido para aplicações em margarinas, maioneses, recheios de biscoito e massas, enquanto o segundo destina-se às salsichas, embutidos, balas e confeitos.

Além dos processos de extração por solvente, a bixina também pode ser extraída por processos puramente mecânicos (MASSARANI et al., 1992), que consistem geralmente de técnicas físicas simples que promovem a raspagem entre os grãos visando a separação de sua camada externa que contém o corante, o qual é obtido na forma predominante de bixina.

Conforme mencionado anteriormente, a extração por solventes é tradicionalmente usada para remover a bixina da superfície das sementes de urucum. Este processo é caro e requer vários estágios para obtenção do pigmento e recuperação do solvente. Novas técnicas têm sido estudadas para este processo, como por exemplo, a extração do pigmento através da atrição e do impacto. Um dos equipamentos já estudados com este objetivo é o leito de jorro (MASSARANI et al., 1992), devido às suas características fluidodinâmicas que permitem combinar, em uma mesma unidade, a atrição de partículas e a secagem das sementes.

O leito de jorro por se tratar de um equipamento barato e de operação simples, pode ser então uma excelente alternativa para extração mecânica da bixina da superfície das sementes de urucum, em pequenas e médias propriedades rurais. Ressalta-se que este equipamento pode ser facilmente instalado em uma propriedade ou em uma cooperativa rural (PASSOS et al., 1997).

Cabe ressaltar, entretanto, que apesar de apresentar algumas características fluidodinâmicas interessantes para a referida aplicação, tais como um intenso movimento das partículas e um efetivo contato gás-sólido, o leito de jorro apresenta algumas restrições como, por exemplo, a limitação da altura do leito de partículas, dificuldade de *scale up* do equipamento e a impossibilidade de se trabalhar com partículas muito finas; o que tem limitado a sua utilização (PASSOS et al., 1997). O melhor conhecimento do escoamento fluido-partícula no leito de jorro pode ser vital para a otimização dessa técnica na extração mecânica da bixina da superfície das sementes de urucum, e tornar viável a sua utilização para este fim.

Um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos na fluidodinâmica de um leito de jorro passa necessariamente pelo desenvolvimento de uma modelagem com base nas equações de conservação de massa, momentum e energia, com suas equações constitutivas pertinentes. O crescente desenvolvimento tecnológico abriu novas possibilidades para a abordagem deste problema, com a utilização de cálculos e soluções para os mais completos modelos matemáticos. Atualmente os microcomputadores já apresentam velocidade e memória suficientes para o estudo de sistemas complexos (DUARTE, 2006).

A partir do grande crescimento da capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores, um grande avanço tem sido obtido na geração de *softwares* de fluidodinâmica computacional (CFD). A Fluidodinâmica Computacional consiste na solução das equações gerais de transporte empregando métodos numéricos, visando obter campos de velocidades, temperatura etc. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da Engenharia, devido a forte influência da fluidodinâmica na eficiência e desempenho dos equipamentos utilizados em muitos processos, sendo que os modelos mais simples, geralmente não são capazes de fornecer o grau de detalhamento necessário. Associar técnicas de CFD ao estudo fluidodinâmico do leito de jorro pode contribuir de maneira significativa na superação de algumas limitações desse equipamento, encontrando a configuração e as condições adequadas para uma aplicação específica, como é o caso da extração mecânica da bixina (DUARTE, 2006).

Uma vez que a realidade dos pequenos produtores é da venda das sementes; a oportunidade de agregar valor a este produto, utilizando processos de extração que sejam factíveis à sua realidade sócio-econômica, seria com certeza de grande valia para a mudança da difícil realidade que enfrentam, principalmente em regiões pobres dos país, como é o caso do norte de Minas. No caso dessa mudança de paradigma, conseqüências naturais seriam o desenvolvimento regional e a geração de empregos.

Tendo em vista os aspectos supramencionados, este projeto tem como objetivo estudar a viabilidade de utilização de uma pequena unidade para extração mecânica de bixina das sementes de urucum utilizando-se um leito de jorro cilíndrico como equipamento extrator.

Um estudo fluidodinâmico foi conduzido para escolha da configuração e geometria mais adequadas para realização da extração mecânica em leito de jorro. Escolhida esta configuração e as condições operacionais, foi também objetivo deste trabalho realizar experimentos de extração mecânica da bixina em leito de jorro e avaliar os efeitos das variáveis: a utilização ou não do tubo *draft*, a carga de sementes alimentadas no leito de jorro e a velocidade do ar no processo de extração.

A técnica da fluidodinâmica computacional (CFD) foi utilizada para simular a fluidodinâmica do escoamento das sementes de urucum e do ar no leito de jorro. Por meio dos resultados obtidos foi possível obter as condições operacionais que maximizam a eficiência de remoção e permitem a obtenção de um produto com teor de bixina adequado.

Os resultados obtidos por simulação foram confrontados com os experimentais, obtidos no laboratório de sistemas particulados da FEQUI/UFU, bem como por outros da literatura, visando a validação das simulações realizadas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Corantes

2.1.1 - História dos Corantes na Produção de Alimentos

Os corantes são substâncias que têm a finalidade de conferir, intensificar ou padronizar a coloração dos produtos alimentícios, proporcionando as mesmas características de um produto natural. Eles são usados para restaurar possíveis perdas de coloração que ocorrem durante a produção e armazenamento, para manter a uniformidade do produto e atender as expectativas dos consumidores.

Até 1850 todos os corantes alimentícios provinham de três fontes: vegetais comestíveis (cenoura para laranja, beterraba para vermelho, pele de uva escura para preta, etc.); extratos de origem animal ou vegetal normalmente não consumidos como tais (ácido carmínico para vermelho, estigma de açafrão para laranja, etc.); e resultados da transformação de substâncias naturais (caramelo para marrom), (SOUZA, 2000).

Em 1856, William Henry Perkin sintetizou o primeiro corante, a malva ou malveína. Em 1865, Friedrich Engelhorn fundou a BASF (Badische Anilin - & Soda - Fabrik A G), para produzir corantes derivados do alcatrão de hulha. Em 1906, apareceu nos EUA a primeira legislação relativa à utilização de corantes na indústria alimentícia. No final do século XIX mais de 90 corantes eram utilizados pela indústria alimentícia. Desde essa época, pesquisas comprovaram que muitos corantes sintéticos são tóxicos e podem causar anomalias em recém nascidos, distúrbios cardíacos ou cânceres (TEIXEIRA, 1969).

De um ponto de vista nutricional, o uso de corantes alimentícios não é necessário, a sua função é apenas colorir os alimentos fazendo com que os produtos industrializados tenham uma aparência mais parecida com a dos produtos naturais, sendo, portanto, mais agradável aos olhos do consumidor. Eles são extremamente comuns, já que a cor e a aparência têm um papel importantíssimo na aceitação dos produtos pelo consumidor. Uma gelatina de morango, por exemplo, que fosse transparente não faria sucesso. Um refrigerante sabor laranja sem corantes ficaria com a aparência de água pura com gás, o que faria que parecesse mais artificial, dificultando sua aceitação.

Existem, entretanto, razões de ordem técnica para se colorir os alimentos, destacando-se as seguintes:

- Restaurar a cor dos produtos cuja coloração natural foi afetada ou destruída durante o processamento;
- Uniformizar a cor dos alimentos produzidos a partir de matérias-primas de origem diversa;
- Conferir cor a alimentos incolores.

2.1.2 - Corantes Naturais *versus* Corantes Artificiais

A notória simpatia dos consumidores pelos ingredientes de origem natural fez nos últimos anos um conjunto de indústrias de formulação de aditivos alimentícios prosperar e investir em pesquisa e desenvolvimento. Os mais beneficiados são os fornecedores de corantes naturais, insumos com função estética e de grande importância para a indústria de alimentos, onde são utilizados para deixar os produtos com cores mais sedutoras para o consumo.

A crescente preferência pelos corantes naturais é mais forte no exterior, mas aos poucos tem tomado corpo no Brasil. Este fato fez com que as principais empresas e centros de pesquisa do ramo desenvolverem estudos para deixar os corantes naturais mais estáveis à luz e ao calor, para desenvolver novas aplicações e superar problemas de fornecimento. Este esforço foi induzido pela cautela mundial com os corantes sintéticos, contra os quais vários estudos ao longo dos anos vêm apontando problemas de malefícios à saúde.

A literatura científica é farta em apontar cuidados com a ingestão dos sintéticos, a despeito do ainda grande uso deles pelos produtores de alimentos e bebidas processadas. Esses corantes são pigmentos ou tintas sintéticas do grupo azóico, sendo a maior parte delas sintetizada a partir do alcatrão do carvão mineral.

A publicação de estudos do Codex Alimentarius, órgão ligado à Organização Mundial da Saúde (OMS), já fundamentou a proibição de alguns corantes por ministérios da saúde de todo o mundo, inclusive o brasileiro. Foram proibidos, por exemplo, o amarelo sólido, até então muito empregado em gelatinas; o laranja GGN, usado em pós para sorvetes; o vermelho sólido, para recheios e revestimentos de biscoitos; o azul de alizarina,

corante em óleos emulsionados e gelatinas; e o escarlate GN, com uso em recheios de confeitarias (FARIA E COSTA, 1998).

No momento, a legislação brasileira, atualizada com boa parte das leis internacionais e seguindo as recomendações multilaterais da FAO (Food and Agriculture Organization), permite apenas oito sintéticos e mais cinco sintéticos idênticos aos naturais. A permissão é condicionada à indicação nos rótulos sobre a sua condição sintética e sobre a ingestão diária aceitável.

O fato destes corantes sintéticos serem permitidos, porém, não anula seus efeitos adversos, que embora não sejam divulgados na embalagem estão disponíveis em artigos científicos. Pode ser citado como exemplo a eritrosina, corante sintético vermelho, que consta como causadora de hipertireoidismo quando consumida em excesso. Também o vermelho Ponceau pode causar anemia e uma doença renal (glomerulonefrite), enquanto o amarelo tartrazina recentemente foi associado como causa de insônia em crianças (TEIXEIRA, 1969).

Como resposta aos riscos e tirando o proveito da crescente má fama dos sintéticos, os corantes naturais ganham espaço. Trata-se de uma conquista gradual, não maior por causa das vantagens competitivas dos sintéticos. Além da estabilidade bastante superior aos naturais, esses corantes artificiais possuem maior capacidade tintorial, traduzida por um poder de melhor fixação nos alimentos, com cores mais intensas e menor custo, tanto por necessitar de dosagens menores como por seu preço direto inferior.

Mas foi justamente para diminuir essa diferença na disputa que os interessados na comercialização dos aditivos naturais procuraram, em conjunto com alguns clientes, melhorar o desempenho dos corantes naturais. As iniciativas tomaram as mais variadas formas, desde as tecnológicas, até as de garantia de fornecimento constante de matérias-primas, no passado muito sujeitas à sazonalidade da atividade agrícola.

Os desenvolvimentos englobaram as principais famílias cromáticas dos corantes naturais: o amarelo (curcumina, luteína, carotena); a laranja (urucum e páprica); o vermelho (carmim, licopena, betanina e antociana) e o verde (clorofila). De forma específica, prevaleceram nos cinco corantes naturais considerados de maior importância no mercado mundial: o urucum, a páprica, a cúrcuma, as antocianinas e o carmim de cochonilha (FARIA E COSTA, 1998).

O movimento de adesão ao uso de corantes naturais, embora não ocorra na velocidade esperada pelos fornecedores, justifica um crescimento médio anual no consumo entre 5% e 9%. De forma geral, além das aplicações já tradicionais e antigas dos corantes, como por exemplo, o urucum e o carmin em embutidos e salsichas, novos usos surgem, motivados por desenvolvimentos dos próprios clientes e para os quais é possível agregar valor um pouco maior oriundo dos ingredientes naturais.

Muitos dos aditivos naturais possuem também características funcionais e não só estéticas. Os carotenos naturais, como os extraídos de cenouras e palma, são agentes antioxidantes, assim como as antocianinas. A luteína evita a chamada mácula da retina dos olhos e o licopeno, caroteno presente em produtos de tomate, previne o desenvolvimento de arteriosclerose e doenças coronárias e pode reduzir o risco de câncer de próstata. Segundo pesquisa da Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais, o urucum tem demonstrado eficácia no combate a diabetes e colesterol alto. Mais um ponto a favor dos corantes naturais na disputa com os sintéticos (FARIA e COSTA, 1998).

2.1.3 - Legislação No Brasil

Considera-se corante a substância ou a mistura de substâncias que possuem a propriedade de conferir ou intensificar a coloração de alimento e bebida. Excluem-se desta definição, os sucos ou extratos de vegetais e outros ingredientes utilizados na elaboração de alimentos e bebidas que possuem coloração própria, salvo se adicionados apenas com a finalidade de conferir ou intensificar a coloração própria do produto.

De acordo com a resolução nº 44/77 da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA), do Ministério da Saúde, os corantes permitidos para uso em alimentos e bebidas são classificados da seguinte forma:

- Corante orgânico natural: é aquele obtido a partir de vegetal ou, eventualmente, de animal, cujo princípio do corante tenha sido isolado com emprego de processos tecnológicos adequados, que evitem a sua contaminação com outros produtos químicos.
- Corante orgânico artificial: é aquele obtido por síntese orgânica e não encontrado em produtos naturais.

- Corante sintético idêntico natural: é o corante cuja estrutura química é semelhante a do princípio isolado do corante orgânico natural.
- Corante inorgânico ou pigmento: é aquele obtido a partir de substâncias minerais e submetido a processos de elaboração e purificação adequados ao seu emprego em alimentos.
- Caramelo: o corante natural obtido pelo aquecimento de açúcares a temperaturas superiores aos dos pontos de fusão.

As razões consideradas como tecnicamente válidas para o uso de corantes (GAVA, 1998), são as seguintes:

- Restabelecer o aspecto inicial dos gêneros alimentícios cuja cor foi alterada pelos processos de transformação, estocagem, embalagem e/ou distribuição e cujo aspecto visual encontra-se prejudicado.
- Dar aparência mais atrativa.
- Dar uma cor a alguns gêneros alimentícios que sem eles, não teria nenhuma.
- Manter e reforçar a cor dos alimentos durante armazenamento.
- Padronizar a cor dos alimentos, evitando a sua variação. Porém não deve ser utilizado para induzir o consumidor ao erro, engano ou confusão.

Segundo a legislação vigente, em produtos que contenham corantes estes devem estar descritos em seu rótulo a classe do aditivo (corante) e o nome por extenso. Além disso, os corantes artificiais devem apresentar no rótulo a indicação "colorido artificialmente".

Atualmente, a consciência e a preocupação sobre a "segurança" dos corantes em alimentos têm direcionado o interesse dos pesquisadores e das indústrias para a identificação e uso dos corantes orgânicos (AGARWAL et al., 1994).

Os corantes naturais podem ser derivados de plantas, animais (podendo-se citar o exemplo da cochonilha que é obtida a partir de corpos dessecados de insetos e da hemoglobina do sangue animal), ou mesmo minérios (tal com o óxido de titânio, TiO_2). A grande maioria é derivada de extratos de plantas; estes, entretanto, apresentam algumas desvantagens: instabilidade quando expostos à luz e ao calor, insolubilidade em água, a

falta de fornecedores, reatividade com outros componentes da comida, e presença de aromas ou odores indesejado (OLIVEIRA, 2005).

2.1.4 - O Urucum

Dentre os corantes naturais, o Urucum (*Bixa orellana*) tem maior importância econômico-social, visto que de suas sementes podem ser obtidos corantes naturais de diversas tonalidades, que vão do amarelo ao castanho, passando pelo vermelho. Destaca-se também dentre os demais pigmentos naturais utilizados, por sua maior estabilidade e coloração atrativa.

Quando os conquistadores espanhóis chegaram ao Novo Mundo conheceram muitas plantas cujos extratos eram empregados pelos Maias e Aztecas. Uma destas plantas, o urucum, existente ao longo da América tropical era usado como extrato para tingir tecidos e pintar o corpo, além de ser utilizada junto à vanilina na formulação de uma bebida a base de cacau. O nome científico do urucum, *Bixa orellana* foi dado por Francisco Orellana, após uma expedição na região na Amazônia Setentrional (CORRÊA, 1978). A planta, da família das Bixaceae, recebe diferentes denominações populares ao redor do mundo: Urucu, urucum (Brasil), atole, achiote e bija (Peru, Colômbia e Cuba), achiote, bija, onoto (Venezuela), urukú (Paraguai), rocou e rocoyer (República Dominicana e Guiana francesa), rocuyer (França), changuaricá, pumacuá e K'u-zub, (México). Outras denominações encontradas na literatura são: uñañé, eroyá, chagerica, orellana, ranota, annatto (BALIANE, 1982).

O urucum é o único corante natural que tem sua origem em solo brasileiro. Atualmente, cerca de 70% da produção brasileira é cultivada, com utilização de técnicas de manejo e tratamentos culturais adequados e beneficiamento em máquinas. O outra parcela da produção ainda é silvestre ou utiliza métodos tradicionais de manejo (CARVALHO, 1990).

A planta do urucum é um arbusto com altura entre 2,0 a 4,0 m, podendo atingir até 6,0 m dependendo das condições de clima e idade da planta. Cresce em altitudes de até 1000m, contudo, desenvolve-se melhor em zonas relativamente baixas, de 100 a 500m, suportando temperaturas de 24 a 35° C. O urucuzeiro (ver Figura 2.1) é uma planta perene, não sendo muito exigente quanto a solos, clima e tratamentos culturais e sobrevive em locais onde a pluviosidade varia entre 800 a 2000 mm anuais. Oriundo da América Tropical

acredita-se que tenha sido uma das primeiras plantas “domesticadas” pelos índios da região, provavelmente para fins cerimoniais, a partir da *Bixa excelsa*, árvore silvestre da família das *Bixáceae* (GOMES, 1967).



Figura 2.1: Vista parcial de uma planta de Urucuzeiro.

Os frutos do urucuzeiro (ver Figura 2.2) são do tipo cápsula ou cachopa, ovóide ou globosa, com 2 a 3 carpelos que variam de 3 a 4 cm de comprimento e 3 a 5 cm de diâmetro. Externamente, são revestidos por espinhos moles e possuem coloração variável entre o verde, vermelho-pálido e roxo. No seu interior são encontradas em média 40 sementes, grosseiramente arredondadas, revestidas por uma polpa mole de coloração avermelhada, as quais tornam-se secas, duras e de coloração escura com o amadurecimento; apresentam comprimento e diâmetro médios de 0,3 e 0,55 cm, respectivamente (BOREM, 1997).



Figura 2.2: (a) Floração e frutificação de Urucuzeiro, (b) Frutos (cachopas) de Urucuzeiro, (c) Sementes de Urucuzeiro, (d) Sementes em maturação plena.

A identificação dos tipos ou variedades dos urucuzeiros é feita pelas cápsulas. Elas podem ter dois, três ou mesmo quatro carpelos; forma ovóide, alongada, bico de calango, bico de pato ou achatada; com pouco, médio ou muito pêlos; coloração verde, vermelha, amarela, carmim e verde-amarelada, além de outros matizes (CORRÊA, 1978). A coloração das sementes varia desde o vermelho intenso (maior teor de corante) até róseo-claro (menor teor de corante).

A fenologia do urucuzeiro durante o ciclo vegetativo é, excepcionalmente, caracterizada por ser uma planta que floresce, frutifica e matura durante praticamente, todo o ano. Em condições normais de clima, a primeira floração é mais intensa entre os meses de fevereiro/março, cuja colheita principal ocorre de junho e julho. A segunda floração ocorre nos meses de julho e agosto com colheita em novembro e dezembro, sendo ambas as colheitas executadas de modo rudimentar, mediante a quebra dos cachos (panículas) não havendo, portanto, o emprego da tesoura de poda.

Nas condições do nordeste e do centro sul do Brasil, a colheita do urucuzeiro é realizada aproximadamente aos 130 dias após a abertura da flor, quando se obtém $\frac{3}{4}$ das cápsulas secas. No Norte, esse período é reduzido para 60 a 80 dias. A maturação das cápsulas é dada pela mudança de cor quando passa do verde, amarelo ou vermelho para castanho ou marrom (OLIVEIRA, 1990).

As práticas de pós-colheita apresentam expressiva importância no processo agroindustrial do urucuzeiro devido à influência direta na qualidade do produto final. A pós-colheita tem início no momento seguinte à colheita propriamente dita, sendo constituída das seguintes etapas: recolhimento dos frutos no campo, pré-secagem dos frutos, descachopamento, peneiramento, secagem das sementes ensacamento, classificação e comercialização (FALESI, 1987).

O recolhimento dos frutos no campo é uma tarefa que tem estreita relação com a quantidade do produto colhido, com o clima, da localidade na época e, essencialmente, com exigência do comprador. Dependendo do nível técnico do produtor, os frutos colhidos podem permanecer por um curto período de dias nas entrelinhas das plantas, isto dependendo das condições pluviais locais. Outra opção é colher direto em balaies ou sacos e armazená-los em local adequado.

A pré-secagem dos frutos consiste no recolhimento dos frutos sobre lonas, em terreiros ou em secadores de alvenaria. Em algumas regiões do país, os frutos são secados em secadores solares, bem como em secadores artificiais. A redução da umidade dos frutos (cachopas) e das sementes, sem perda de qualidade do produto, tem como objetivo principal para facilitar o descachopamento.

O descachopamento pode ser efetuado pelos métodos manual e mecânico. Normalmente, quando se procede ao descachopamento manual, as perdas de bixina são significativas, pela maneira incorreta de se utilizar a vara no batimento às sementes. A perda de bixina é diretamente proporcional ao teor de umidade das sementes. O método mecânico, apesar de apresentar perdas de bixina de 1,5 a 2,0%, é o mais indicado.

O peneiramento do material colhido pode ser feito tanto de forma manual como mecânica. O método manual é realizado após a bateção dos frutos, enquanto que o mecânico é feito após a descachopagem em máquinas. Um fator importante a considerar é que pelo atrito, perde-se bixina nesta operação, devido ao maior teor de umidade das sementes ou regulagem do equipamento podem haver perdas de qualidade de sementes.

Há dois métodos utilizados para a operação da secagem (veja Figura 2.3). O natural no qual as sementes são colocadas em terreiros ou sobre lonas ao sol e o método artificial cuja perda de umidade ocorre em secadores com calor e ventilação forçadas. No processo de secagem, recomenda-se mexer as sementes o mínimo possível, visando evitar perdas significativas da qualidade das mesmas pela sua exposição ao calor (sol e oxidação). A perda por atrito é função da falta de controle no carregamento e no descarregamento das sementes, no local da secagem.



Figura 2.3: (a) Secador natural para sementes de Urucuzeiro, (b) Secador artificial para sementes de Urucuzeiro.

O processo de ensacamento deve ser procedido em saco de polipropileno de 50 kg devidamente limpo ou em outro tipo de recipiente, conforme as exigências pré-estabelecidas pelo comprador.

O consumo de urucum tem aumentado muito nas últimas décadas. Excluídas as demandas internas, o comércio internacional médio anual de urucum é estimado em cerca de 10000 toneladas, sendo dois terços desta produção na forma de semente bruta e o restante como extrato. A América Latina produz 60 % de todo o urucum consumido no mundo, seguido pela África com 27% e a Ásia 12%. Os preços da semente dependendo da produção e da variedade oscilaram de US\$ 2000 a US\$660 por tonelada entre 1985 a 1995. Estes preços também são proporcionais ao conteúdo de bixina, o qual em alguns casos deve ser maior que 2,7 % (MELO, 2000). Só o Peru, maior produtor mundial, exportou em 1990, cerca 2000 toneladas, equivalente à demanda mundial em 1970. Sua produção em 2000 subiu para 4482 toneladas. Outros grandes exportadores são a Bolívia, Brasil, Equador, México, República Dominicana, Colômbia, Kenia, Sri Lanka, Senegal, Costa do Marfim e Índia. Em menores quantidades também é produzido: na Nicarágua, Jamaica, Paquistão, Malásia, Filipinas, Tanzânia e Angola.

MELO (2000) afirmou que havia uma expectativa do Brasil destacar-se no cenário mundial como maior exportador de urucum. O urucuzeiro, cultivado por muitos anos, é encontrado nos estados do Acre, Amazonas, Pará e também nos estados da Bahia, Ceará, Paraíba e Piauí. Atualmente, outros estados, como Rio de Janeiro e São Paulo têm se dedicado no cultivo deste vegetal. Contudo, apesar da expectativa, o produto brasileiro apresenta, em sua maioria, teores reduzidos de bixina. Apesar de ser amplamente cultivado existem poucas pesquisas, particularmente referentes ao melhoramento genético, que levem ao aumento da produtividade por área de cultivo ou que conduza a uma maior produção de sementes por fruto, como também a um aumento no teor de bixina das sementes.

O urucum é importado em grande quantidade pelos Estados Unidos, maior importador mundial, seguido pela Inglaterra, maior importador europeu, pela China, França, Alemanha, Japão e Argentina. Destaca-se a Dinamarca no cenário mundial como o maior processador do pigmento, (EMATER-PB, 2001).

O mercado do urucum no Brasil tem sofrido algumas importantes oscilações. Ora são praticados preços elevados, ora os preços são baixos. Essas alterações no mercado ocorrem em função da lei da oferta e procura. Quando ocorre escassez de matéria prima (grãos de urucuzeiro), observa-se elevação de preços sempre seguidos por estímulos para expansão da área cultivada. O contrário também é verdadeiro, preços baixos estimulam abandono de algumas áreas cultivadas, ou pelo menos, uma acentuada redução nos tratos culturais, levando a uma menor produtividade e, conseqüentemente, a uma menor oferta de grãos (OLIVEIRA, 1990).

Nos anos de 1990, 1991 e 1992, os preços pagos aos produtores variaram de US\$ 0,70 a 1,00/kg de grãos. Na entressafra (novembro /93 a maio/94), elevaram-se a patamares superiores a US\$ 3,00/kg. Esses preços, certamente, foram os maiores praticados na história da cultura. Vários fatores contribuíram para a significativa elevação desses valores, podendo-se destacar a seca na região Nordeste do país, que afetou drasticamente a produção da safrinha em fevereiro a abril de 1994 a escassez de grãos no país fez com que algumas indústrias brasileiras importassem do Peru quantidades significativas. Já nas safras de 1995, os grãos de urucum foram comercializados a preços que variaram de US\$ 1,00 a 1,80/kg de grãos. Essa variação ocorreu em função da época e da região produtora. Em 1996 a 1998 os preços caíram vertiginosamente, chegando a preços abaixo do custo de produção, em algumas zonas produtoras (BOREM, 1997).

A partir de 1999 os preços voltaram a subir pelo desestímulo de alguns produtores que nos anos anteriores tiveram preços baixos e dificuldades na comercialização. Alguns produtores abandonaram suas áreas ou dispensaram menores investimentos no cultivo, afetando a produtividade. Esse aumento nos preços por conseqüência da menor oferta do produto e, em parte, também pelo aumento do consumo na indústria de corantes e agroindústria de corante e colorífico, estimado em cerca de 5% ao ano. Nas safras de 1999, 2000 e 2001 os preços voltaram a estimular os produtores (EMATER-PB, 2001.).

Muitas indústrias que processam o urucum atuam no país, destacando-se Christian Hansen, IFF, Firace, Quest, Baculê Agroindustrial, Biocon, Kienast & Kratschmer, Adicon, Liotécnica, Refinações de Milho Brasil (São Braz), Penina dentre outras. Existem 35 indústrias produtoras de corantes no território brasileiro; desse total,

54,17% são produtoras de corantes naturais e 12,5% produzem corantes artificiais. Dentre os corantes naturais, o urucum é o mais produzido e utilizado.

Nos últimos anos o potencial do mercado internacional do urucum teve um grande impulso. Como o produto natural é substituto para corantes sintéticos, considerados cancerígenos, a proibição ao uso destes aditivos nos Estados Unidos, Japão e alguns países da Europa, fez com que o urucuzeiro ganhasse importância nas regiões produtoras (LINGERFELT, 1984).

2.1.5 - O Corante Bixina

O corante presente no urucum em maior concentração é a bixina, que compreende mais de 80% dos carotenóides totais, sendo o restante um pigmento ainda não caracterizado, de cor amarela e com pequenas quantidades de substâncias cujas estruturas estão relacionadas com a bixina, incluindo a norbixina. Sua concentração varia com o tipo de cultivo, solo, clima, tratamentos culturais e com as operações de pós-colheita, secagem e beneficiamento.

A camada que recobre a semente de urucum representa cerca de 6% do peso total da semente; dos quais pouco mais de 2% do peso da mesma é devido à bixina (CARVALHO, 1990), podendo chegar no máximo a 4,5 % em massa, nas sementes de boa procedência.

A bixina foi citada pela primeira vez em 1825 por Boussingault. Sua cristalização foi obtida com sucesso em 1878 por Etti. A análise elementar e determinação de sua fórmula empírica foram realizadas em 1917 por Heiduschka e Panzer e em 1928–1933 Kuhn e colaboradores propuseram a fórmula estrutural a qual foi confirmada posteriormente por Karrer e colaboradores através da síntese total da per-hidronorbixina (FARIA, 1998). Segundo Carvalho (1990), a bixina foi o primeiro cis-carotenóide isolado a partir de fontes naturais.

A coloração vermelha da semente está diretamente relacionada ao percentual de bixina. Quanto maior a concentração de norbixina, maior a tendência para o vermelho. Tanto as sementes, quanto os extratos processados são comercializados com base no teor de bixina ou norbixina. As sementes da Jamaica, por exemplo, apresentam teores normalmente mais elevados de bixina, 3% em média, contra menos de 2% daquelas

produzidas na Índia. As sementes provenientes do Caribe são intensamente vermelhas, o que eleva o seu valor no mercado. A composição do extrato varia segundo o método empregado no processo de extração e concentração, visto que a bixina isomeriza com o calor, aumentando o percentual de trans-bixina, como também, é hidrolisa em meio alcalino, perdendo uma molécula de metanol e produzindo a norbixina, pigmento de cor laranja intensa.

A cis-bixina (monometiléster do diácido carboxílico, norbixina) é o constituinte que ocorre em maior concentração no arilo da semente do urucum (*Bixa orellana* L.), representando cerca de 80% da bixina presente. Nos extratos em condições normais predominam os isômeros cis-bixina ou cis-norbixina, mais instável. A cis-bixina ou cis-norbixina em solução sob aquecimento são parcialmente transformadas para a configuração trans, mais estável, conhecidas como isobixina e isonorbixina. (FARIA, 1998).

Na Figura 2.4 são apresentadas as estruturas moleculares da cis e trans bixina e da cis e trans norbixina.

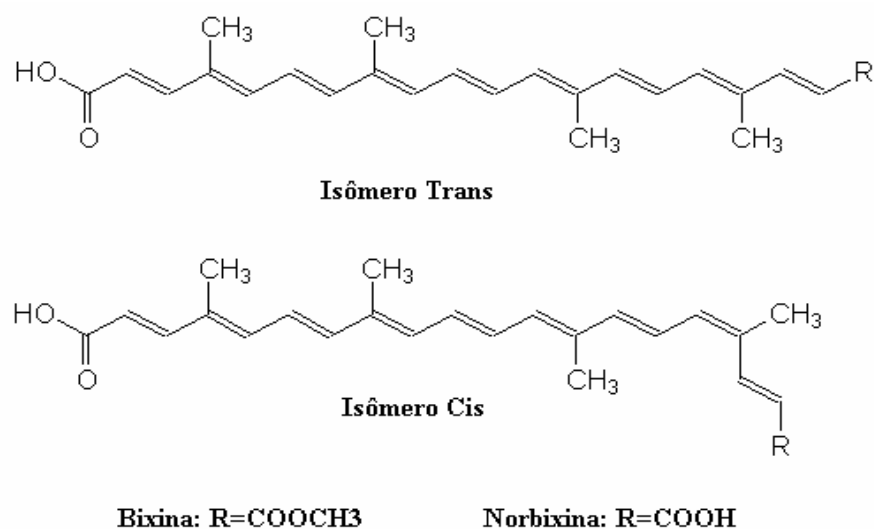


Figura 2.4: Estrutura dos carotenóides bixina e norbixina, cis e trans (Fonte: Oliveira, 2005).

O maior segmento consumidor dos corantes extraídos do urucum é a indústria de derivados lácteos, sendo empregado para colorir queijos, manteigas, iogurtes e margarinas. Tem aplicação também em produtos derivados de carne como: salsichas, salames e

defumados; derivados de pescados; molhos de salada; cereais matinais, caramelos, sorvetes, como também em achocolatados, refrigerantes e licores (REVISTA ADITIVOS INGREDIENTES, 2000).

Em cosmética, o pigmento encontra aplicação na formulação de bronzeadores, na forma de extrato oleoso; produtos de maquilagem como batons e pós-faciais; em produtos para cabelos como tinturas e xampus, como também em sabonetes. Na indústria têxtil é empregado para tingir algodão, lã e especialmente a seda, conferindo a esta um efeito especial difuso, amarelo-laranja. Também é empregado como pigmento na indústria de couro bem como na fabricação de tintas e vernizes, graxas para sapato e ceras para pisos (CARVALHO, 1990).

Algumas aplicações do corante na indústria alimentícia estão sumarizadas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1: Usos de corantes de urucum em alimentos.

Princípio Ativo	Apresentação	Principais Aplicações
0,35 - 1,12% Norbixina	Líquido hidrossolúvel	Salsichas, queijos, iogurtes, sorvetes, extrusados.
0,23% Bixina	Líquido oleossolúvel (solução)	Manteigas, extrusados, recheios de biscoitos.
3,0 a 10% Bixina	Líquido oleossolúvel (suspensão)	Margarinas, coloríficos, extrusados.
1,0% Norbixina	Pó hidrossolúvel (maltodextrina)	Sobremesas em pó, bebidas lácteas em pó, produtos de panificação.
20% Bixina	Pó microemcapsulado	Bebidas, misturas em pó, confeitos, extrusados.

Fonte: CHR Hansen Ind. E Com. Ltda. Valinhos - SP.

Tabela 2.2: Usos do Extrato de urucum em alimentos.

Extrato	Forma	Pigmento	Concentração*	Tonalidade de cor	Aplicações
Lipossolúvel	Líquido	Bixina	Baixa	Amarelo	Massas, recheios e coberturas de doces e molhos.
	Líquido	Bixina	Baixa	Amarelo-alaranjado	Margarinas, cremes vegetais, queijos recheios e coberturas.
	Líquido	Bixina	Alta	Laranja-avermelhado	Sopas, molhos temperos e coloríficos.
Solúveis em água e emulsões	Líquido	Norbixina	Baixa	Amarelo-alaranjado	Massas, sorvetes, bebidas, iogurtes e queijos.
	Líquido	Norbixina	Moderada	Laranja	Margarinas, cremes vegetais, queijos, bebidas e sorvetes.
	Líquido	Norbixina	Baixa	Amarelo claro	Massas, sorvetes, bebidas, iogurtes e doces.
Hidrossolúvel	Líquido	Norbixina	Moderada	Laranja-amarelado	Salsichas e embutidos, cereais, biscoitos e queijos.
	Líquido	Norbixina	Alta	Laranja	Iogurtes, sorvetes, bebidas, doces, misturas para bolos.
	Pó	Norbixina	Alta	Laranja	Massas, sopas e temperos.
	Pó	Norbixina	Alta	Laranja	Sorvetes, misturas secas e cereais.
Colorífico	Pó	Bixina	Baixa	Laranja	Uso doméstico.
	Pó	Bixina	Moderada	Laranja-avermelhado	Temperos e sopas.

Fonte: Liotécnica Indústria e Comércio Ltda. São Paulo - SP

* Baixa: 0,1% a 0,5%; Moderada: 0,6% a 2,4%; Alta: 2,5% a 6,0%

Encontram-se na literatura informações relacionadas ao emprego do urucum na medicina, como composto adstringente, bactericida, como poderoso agente antioxidante, eficaz no combate aos radicais livres, ou ainda para controle de taxas de colesterol e redução dos níveis de triglicerídios no sangue (OLIVEIRA, 2005).

Estudos homeopáticos indicam que o urucum pode ser usado o tratamento de cardite e endocardite. Outras qualidades medicinais atribuídas referem-se ao emprego no tratamento de hemorragias, dispepsias e queimaduras da pele (RAMALHO, 1987).

Várias são as propriedades atribuídas ao urucum que são exploradas pela medicina tradicional, das quais são mencionadas serem efetivas contra diarreia, amidalite, no tratamento de doenças peitorais, também como estimulante, diurético, febrífugo, expectorante, cicatrizante, afrodisíaco e laxante (RAMALHO, 1987).

2.1.6 - Tecnologias de Obtenção de Corantes do Urucum

Economicamente é aconselhável a exportação de produtos industrializados ao invés da matéria-prima *in natura* (sementes). São muitas as vantagens econômicas na comercialização do corante processado ou semi-processado, principalmente na forma de pó, como facilidade de manuseio, transporte, estocagem e versatilidade de produtos em que pode ser aplicável, como em alimentos líquidos ou em pó e em produtos que requerem maior concentração do pigmento.

Como mencionado anteriormente, o uso de corantes naturais é uma tendência atual que dificilmente será revertida. Mas a sua tecnificação ainda necessita de pesquisas para que se possa atender às exigências em qualidade e quantidade dos mercados interno e externo. Portanto, o incremento de tecnologias de processamento mais eficazes poderá contribuir significativamente para a qualidade do produto final (corante), bem como para o uso mais racional da matéria-prima (sementes).

Ao mesmo tempo, o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para a extração dos pigmentos do urucum terá, seguramente, reflexos socioeconômicos nas regiões onde se pode produzir semente com teores de bixina em níveis bem mais elevados.

As características finais do pigmento dependem não só das condições de conservação dos produtos, mas principalmente do processo de extração, o que reflete na

qualidade final do produto. Desta forma muitos países importam as sementes in natura. Tendo em vista que o mercado importador exige um percentual mínimo de 2,5 % de bixina, a existência de variedades cultivadas com somente 1,6 a 2,1 % de bixina leva muitos países a mudarem sua estratégia de mercado (RAMALHO, 1987). A Índia, por exemplo, ampliou a exportação de pigmento processado de forma a aumentar o valor agregado (CARVALHO, 1990).

As populações nativas tradicionalmente extraem os pigmentos por meio da maceração dos grãos em água, tendo como resultado uma massa corante. Esse processo artesanal predomina até hoje em algumas comunidades indígenas. A massa corante comercializada envolta em folhas de bananeira; a imersão dos grãos, triturados ou não, é realizada em água quente, seguida de evaporação.

O fato do pigmento corante estar localizado na superfície das sementes, facilita o processo de extração ao permitir que se opere com os grãos inteiros, sem necessidade de trituração, o que favorece as etapas posteriores do processo em que é feita a separação entre grãos e extratos.

PRESTON e RICKARD (1980) descreveram os principais métodos de extração; a extração em óleo, a extração em solventes orgânicos e a extração em meio aquoso alcalino, como também variantes destes processos. Em um dos processos as sementes são tratadas com solução alcalina, a frio ou a sob leve aquecimento. Soluções alcalinas como hidróxido de sódio ou de potássio transformam a bixina em um sal, que, nesta forma, é comercializado. Isso permite a utilização em alimentos contendo baixos teores de óleo, ampliando o espectro da utilização dos corantes de urucum. A solução alcalina obtida contendo o corante solúvel é acidificada o que leva a precipitação de um pigmento rico em norbixina. Desta forma é obtido um concentrado vermelho com elevado teor daquele componente.

A extração com solventes orgânicos é também uma alternativa para a obtenção de produto com elevada concentração bixina. Destacam-se entre os solventes empregados a acetona, o álcool etílico, o propilenoglicol e também o clorofórmio. Este processo, apesar de conduzir a um produto com elevado rendimento, apresenta alguns problemas, devido ao elevado custo para recuperação dos solventes, e à possibilidade de deixar resíduos tóxicos que pode inviabilizar seu emprego como corantes para alimentos.

Extrações com fluido supercrítico, particularmente empregando o dióxido de carbono são reportadas na literatura, contudo esta técnica extrativa continua restrita a escala laboratorial.

Algumas tecnologias existentes para a produção de corantes de urucum estão sumarizadas na Tabela 2.3 .

Tabela 2.3: Processos de extração de corante de urucum.

Processo	Descrição	Produto obtido
Recristalização	Extração mecânica a quente. Centrifugação do pigmento após filtragem. Secagem e recristalização com ácido acético.	Bixina cristalizada
Químico	Extração direta com óleos vegetais.	Bixina lipossolúvel
Químico	Extração exaustiva com solvente: acetona e álcool etílico.	Pigmentos totais
Químico	Extração com carbonato de sódio.	Pigmentos totais
Químico	Extração com hidróxido de sódio ou potássio.	Norbixinato de sódio ou potássio
Físico	Lixiviação das sementes com água e agitação, a 60°C. Centrifugação da suspensão obtida. Secagem da pasta.	Pigmentos totais
Químico	Extração com fluidos pressurizados (CO ₂ supercrítico)	Bixina

Além dos processos de extração por solvente, a bixina também pode ser extraída por processos puramente mecânicos que consistem, gealmente, de técnicas físicas simples que promovem a raspagem entre os grãos visando a separação de sua camada externa que contém o corante, o qual é obtido na forma predominante de bixina.

Processos alternativos, como operações mecânicas envolvendo moinhos de bolas ou leito de jorro, nos quais as sementes de urucum sofrem atrição e impacto umas com as outras conduzem a um pigmento em forma de pó ultrafino são também estudados.

ALVES (2001) estudou a extração de bixina das sementes de urucum empregando moinho de bolas. Observou que o aumento de duas para quatro horas no tempo de processo, aumentou o rendimento de extração de em 14,83 % e que a fração granulométrica de 100 a 250 mesh apresentava os maiores teores de bixina.

Alguns autores (TAVARES et al. 1999; MASSARANI et al. 1992; PASSOS et al. 1998; dentre outros) estudaram a extração mecânica da bixina em leito de jorro encontrando resultados promissores, mostrando que esta técnica pode ser interessante principalmente para o pequeno e médio produtor rural, pois o equipamento é barato, de operação simples e também apresenta baixos custos de manutenção.

2.2 - O Leito de Jorro

A extração mecânica da bixina em leito de jorro pode ser uma alternativa viável para obtenção do corante. Esta técnica tem algumas vantagens sobre a extração por solventes, que pode apresentar algumas limitações devido ao elevado custo para recuperação dos solventes e a possibilidade de deixar resíduos tóxicos que pode inviabilizar seu emprego como corantes para alimentos.

Sendo assim, nos tópicos a seguir será apresentado um histórico, com características importantes deste equipamento, bem como uma breve revisão sobre a fluidodinâmica do escoamento fluido-partícula.

2.2.1 - Histórico e Características

O leito de jorro é um equipamento que promove o contato sólido-fluido, inventado em 1955 por Mathur e Gishler, quando trabalhavam na otimização de um secador de leito fluidizado para grãos de trigo. Este equipamento foi empregado inicialmente na secagem de materiais granulados termos sensíveis, com diâmetros de partículas maiores que 1 mm e atualmente é utilizado em outros processos que requerem um contato eficiente entre as partículas e o fluido, como por exemplo, a secagem de pastas

e suspensões (PASSOS et al., 1998). Ele foi originalmente concebido e considerado como uma versão modificada do leito fluidizado. Entretanto esta visão foi descartada uma vez que estudos posteriores demonstraram que o leito de jorro apresenta características especiais, sendo a principal delas a execução de operações cíclicas em partículas sólidas que não poderiam se realizadas em um leito fluidizado devido ao movimento randômico de partículas em seu interior durante sua operação.

O leito de jorro é formado por um vaso, aberto no topo, no qual são colocadas partículas sólidas. Possui uma pequena abertura centralizada em sua base através da qual a injeção do fluido ocorre. Se a taxa de injeção de fluido for alta o bastante, uma corrente de partículas começa a se mover verticalmente acompanhando o escoamento do fluido através de uma cavidade formada no centro do leito de sólidos denominada jorro. O jorro, desenvolvido na parte central do leito de partículas, é uma região de baixa concentração de sólidos. Nesta região, as partículas são arrastadas pelo fluído, ascendendo rapidamente até atingirem o topo do leito. As partículas então invertem o sentido do seu movimento, caindo em forma de fonte na região anular, que fica entre a cavidade por onde o fluido e as partículas sólidas estão ascendendo e a parede da coluna que constitui o leito. Esta região caracteriza-se por uma alta concentração de sólidos, comportando-se como um leito deslizante. Desta forma as partículas movimentam-se lenta e descendente, em contracorrente com o fluido, até retornarem ao jorro.

O leito de jorro (Figura 2.5) pode então ser dividido em duas fases distintas; uma de baixa concentração onde os sólidos possuem movimento ascendente (região de jorro), acompanhando o fluxo do fluido, e uma de baixa porosidade, localizada na região anular onde as partículas apresentam movimento contracorrente ao fluido (região anular).

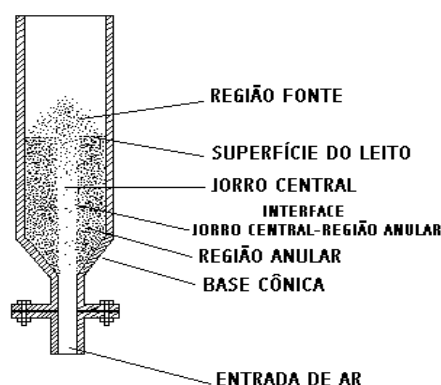


Figura 2.5: Representação do leito de jorro cilíndrico (LOURENÇO, 2006).

2.2.2 - Tipos de leito de jorro

Na literatura são encontradas diversas alterações do modelo convencional do leito de jorro, dentre as quais destacam-se:

- *Leito de jorro cônico:* Constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a maior carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, no qual o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico (LOURENÇO, 2006).
- *Leito de jorro aerado:* A porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, promovendo um aumento da porosidade nesta região, melhorando com isso as taxas de transferência de calor e massa (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).
- *Leito de seção retangular:* Leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis de processo de recobrimento (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).
- *Leito vibro-jorrado:* A movimentação das partículas é aumentada pela agitação oriunda de um sistema de vibração localizado na base do leito (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).
- *Leito de jorro com tubo interno* (LOURENÇO, 2006): A interação em leito de jorro foi provado ser um método eficaz de contato gás-sólido. Contudo, ela possui uma desvantagem se as partículas puderem passar da região anular para a região de jorro em qualquer nível do leito, resultando assim em um comportamento randômico dessas partículas. A inserção axial de um tubo *draft* não-poroso, no leito de jorro convencional apresenta vantagens relacionadas à estabilidade e flexibilidade na operação; mas possui limitações em operações onde o gás é o agente principal da operação, tal como na secagem e meios reacionais. O motivo desta limitação é o fato de o tubo não-poroso impedir a percolação do gás do jorro para a região anular. Isso poderia reduzir a taxa de contato gás-sólido e o coeficiente de transferência de calor tanto no jorro quanto na região anular. Um tubo *draft* poroso pode ser usado para reduzir esse problema, provendo um meio de controle do movimento das partículas e um bom contato gás-sólido na operação (ISHIKURA et al, 2002). A Figura 2.7 mostra as três configurações.

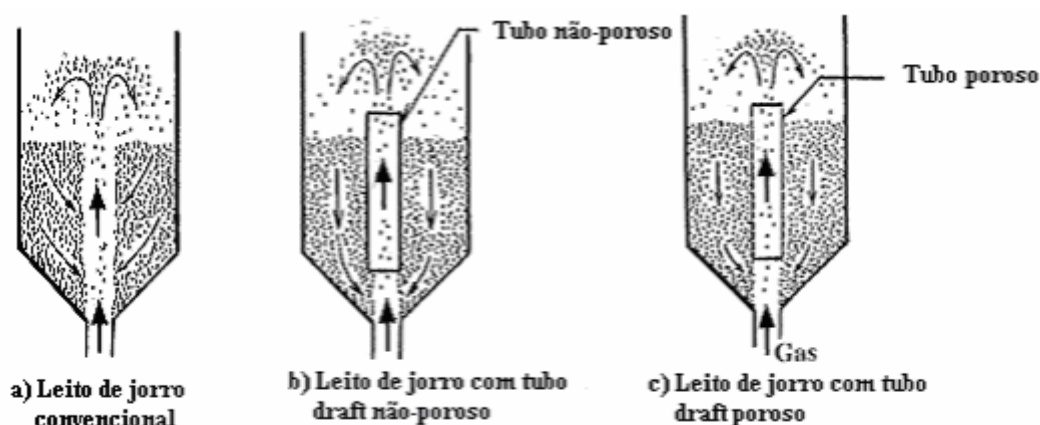


Figura 2.6: Diagramas esquemáticos do leito de jorro convencional e dos leitos com o tubo draft poroso e não poroso (ISHIKURA et al, 2002).

2.2.3 - Fluidodinâmica do Leito de jorro

O jorro, que é um fenômeno visualmente observável, ocorre em uma faixa definida de velocidades do gás. Para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração de vaso, existe uma altura máxima do leito H_m , acima da qual o jorro não ocorre, sendo substituído por uma fluidização de baixa qualidade.

O mecanismo de transição de um leito estático para o estado de jorro pode ser descrito a partir de um gráfico de queda de pressão do leito *versus* velocidade superficial do fluido (Figura 2.7). A seguinte sequência de eventos é observada à medida que a vazão de gás é aumentada (MATHUR e EPSTEIN, 1974):

- A baixas vazões o gás simplesmente atravessa o leito, percolando pelos espaços vazios em seu interior, sem perturbar o arranjo de partículas. A queda de pressão aumenta linearmente com o acréscimo da vazão, segmento A-B da Figura 2.7, como no caso de um leito estático.
- Em uma vazão característica, a velocidade do fluido se torna alta o suficiente para empurrar as partículas que se encontram nas proximidades do bocal de injeção, formando uma cavidade no leito acima do bocal. As partículas que se encontram ao redor dessa cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compacto que oferece uma menor resistência ao fluxo. A queda de pressão no leito

continua a crescer com o aumento da vazão do fluido, mas deixa de apresentar o comportamento linear, segmento B-C da Figura 2.7.

- Com um acréscimo na vazão do fluido, a cavidade se alonga iniciando a formação de um jorro em seu interior. O arco de sólidos compactados localizados acima desse jorro faz com que a queda de pressão no leito aumente ainda mais e atinja seu valor crítico; ponto C da Figura 2.7.
- Um novo aumento da vazão além deste ponto alonga ainda mais o orifício formado pelo jorro interno em comparação com os sólidos compactados acima dessa região. O jorro interno passa a oferecer uma menor resistência ao escoamento do fluido no interior da coluna e a queda de pressão no leito passa a cair a medida que a vazão de entrada do fluido é aumentada; segmento C-D da Figura 2.7.
- No ponto D, denominado jorro incipiente, muitas partículas são deslocadas do núcleo central causando uma expansão considerável no leito, podendo ocorrer oscilações acentuadas de pressão nesta região da curva, devido ao surgimento ocasional do jorro no topo do leito.
- Com apenas um pequeno acréscimo na vazão além do ponto D, o jorro interno rompe a superfície do leito. Quando isso ocorre, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma drástica redução na queda de pressão para o ponto D', no qual o leito todo se torna móvel e o jorro continuo é estabelecido.
- A partir desse ponto, um novo aumento da vazão do fluido não acarreta mudanças na queda de pressão, uma vez que a quantidade adicional de fluido injetado na coluna tem seu caminho de escoamento na região de jorro, onde é oferecida a menor resistência ao escoamento. A fonte se desenvolve e a circulação de partículas é uniforme, caracterizando o regime de jorro estável.

Como a condição experimental característica do jorro depende do estado inicial de compactação do leito, o valor da vazão de jorro mínimo (Q_{jm}) é obtido nesta curva de queda de pressão pelo decréscimo gradual de vazão do fluido até o ponto de colapso do jorro. A vazão de mínimo jorro é definida como a vazão mínima do fluido capaz de romper a estrutura do leito de partículas na região central e formar o jorro, a uma pressão considerada constante. Esta pressão constante no interior do leito é definida como a queda

de pressão de jorro mínimo (ΔP_{jm}). Uma pequena redução da velocidade do gás nesta condição causa o colapso do jorro e um aumento repentino na queda de pressão para o ponto E. Com a diminuição da vazão a queda de pressão decresce continuamente ao longo de E-A. Contudo, a curva principal agora se situa numa posição mais baixa que aquela que representa o acréscimo de vazão uma vez que a energia requerida pelo jato de gás para penetrar nos sólidos não é mais despendida durante o colapso do jorro.

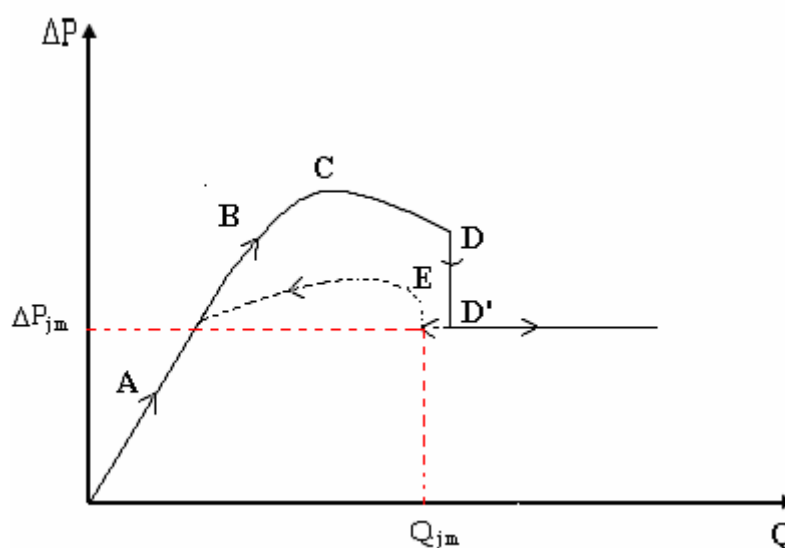


Figura 2.7: Curva típica de queda de pressão em função da vazão de fluido (Curva característica).

O conhecimento do comportamento dos sólidos no leito de jorro é de grande interesse para o projeto deste equipamento, pois a trajetória dos sólidos deve satisfazer às exigências do processo durante a operação. A modelagem do escoamento de sólidos é realizada baseando-se em estudos experimentais sobre velocidade do sólido em diferentes alturas do leito (OLAZAR et al 2001).

De acordo com ROY et al. (1994) as partículas na região de jorro movem-se praticamente em *plug flow* e têm uma componente horizontal muito pequena e a velocidade máxima é alcançada perto da base. Os perfis radiais do componente axial da velocidade do gás na região de jorro são parabólicos e se achatam à medida que a superfície do leito é atingida, GORSHTAIN e MUKHLENOV (1967).

No perfil radial observado por HE et al. (1994), a velocidade máxima do gás não está localizada exatamente no eixo axial do jorro, mas a uma certa distância afastada dele, diminuindo com o aumento da velocidade do gás. Este deslocamento, que é atribuído às colisões das partículas no jorro, foi previsto por KRZYWANSKI, EPSTEIN e BOWEN (1992).

O movimento das partículas na região anular é descrito por meio de uma trajetória parabólica descendente em direção ao bocal de injeção de ar (MATHUR e EPSTEIN, 1974). De acordo com EPSTEIN e GRACE (1984) as trajetórias são similares às aquelas para o gás subindo nesta região. ROY et al. (1994) observaram que o componente horizontal da velocidade é insignificante na seção cilíndrica.

De acordo com diversos autores (MATHUR e GISHLER, 1955; THORLEY et al., 1959; VAN VELZEN ETAL., 1974; BECKER, 1961; SUCIU e PATRASCU, 1978; ROVERO, PICCININI, e LUPO, 1985) a componente vertical da velocidade descendente na zona anular diminui linearmente a medida que as partículas aproximam-se do bocal de injeção. VAN VELZEN et al. (1974) e posteriormente ROY et al. (1994) determinaram que um valor mínimo da velocidade é alcançado enquanto as partículas aproximam-se da seção cônica. Com a continuação da descida a velocidade aumenta em direção a base do leito, como observado por ROVERO et al. (1985). Este aumento pode ser explicado pela redução na seção transversal da região anular. ROY et al. (1994) determinaram que a diminuição na velocidade na coluna cilíndrica do leito não é linear mas é proporcional a $z^{0,65}$, o que pode ser atribuído a um aumento da porosidade com a altura na zona anular.

HE et al. (1992) observaram que a componente vertical da velocidade do sólido no núcleo da fonte diminui com altura, sendo zero no topo da fonte.

Uma peculiaridade dos resultados de velocidade obtidos na fonte é a importância da componente horizontal (LIM, 1975), que é devida ao fato de que parte do momento vertical dos sólidos que entram na fonte é transformada em momento horizontal. KUTLUOGLU et al. (1983) observaram que o componente horizontal da velocidade para as partículas que saem do jorro está ao redor de 15% do componente vertical máximo no eixo. A componente horizontal máxima corresponde às partículas que sobem ao longo da superfície exterior do jorro. ROY et al. (1994) encontraram que perto do topo da fonte o componente horizontal aumenta de zero no eixo para um valor máximo em uma posição

intermediária entre o eixo e a parede da coluna, mais próximo a parede do que do eixo, e então diminui em direção a parede.

OLAZAR et al. (2001) estudaram o efeito das condições de operação e da geometria na velocidade das partículas na região anular, fonte e jorro com a utilização de uma sonda de fibra ótica. Seus resultados para as três regiões estão resumidos abaixo:

Região de jorro:

A componente vertical da partícula em toda a altura do leito decresce de um valor máximo no eixo para zero na interface da região anular com o jorro e o perfil é achatado perto da superfície do leito.

Perto da base do leito as componentes horizontais no eixo são nulas, aumentando então seguindo um perfil parabólico para um valor máximo em uma posição radial intermediária, entre o eixo e a interface jorro-anulo. O valor máximo do componente horizontal é mais elevado em níveis mais baixos do leito.

Perto da superfície do leito o componente horizontal de velocidade muda de direção e as partículas se movem em direção à interface.

Região anular:

O componente vertical da velocidade das partículas aumenta inicialmente de zero na interface para um valor máximo em uma dada posição radial e diminui a partir deste ponto. O pico correspondente ao valor máximo de velocidade aparece em todas as posições longitudinais do leito.

Os perfis radiais do componente horizontal da velocidade na região anular são da mesma ordem de magnitude que aqueles que correspondem ao componente vertical. Os maiores valores são encontrados na interface, na seção cônica do leito. Na seção cilíndrica o componente horizontal diminui e quase na superfície do leito o componente horizontal tende a zero.

Fonte:

OLAZAR et al. (2001) estudaram a região de fonte, dividindo-a em duas regiões: o núcleo (ascensão) e a periferia (queda das partículas). Seus resultados mostraram que o componente vertical da velocidade diminui no sentido do topo da fonte e aumenta no

sentido radial e que a velocidade tem um componente horizontal no núcleo da fonte, exceto no eixo. O módulo da componente horizontal no núcleo aumenta ao longo do raio, partindo do zero no eixo e atingindo seu valor máximo perto da interface núcleo-periferia. A componente horizontal da velocidade na periferia aumenta na direção da superfície externa da fonte e também aumenta com ao longo da altura da fonte.

2.2.4 - Quedas de Pressão

Os valores de queda de pressão de interesse no projeto e operação de uma unidade de leito de jorro são aqueles correspondentes aos pontos C e D`da Figura 2.6, vista anteriormente. Esses são, respectivamente, a queda de pressão máxima ($-\Delta P_M$), atingida antes do jorro incipiente e a Queda Pressão no jorro estabelecido

A queda de pressão máxima é um parâmetro importante para o projeto de leitos de jorro, pois pode ser usada, por exemplo, no cálculo da potência do soprador necessária para atingir o regime de jorro estabelecido.

A ocorrência do pico de queda de pressão máxima, na curva característica do leito, antecede o início do jorro, podendo, entretanto, ser atribuído como a energia requerida pelo fluxo gás para romper a estrutura do leito compactado, formando um jorro interno.

MANURUNG (1964) realizou uma quantidade considerável de experimentos com diversos materiais diferentes. Dos resultados experimentais ele formulou uma relação empírica para dois componentes de queda de pressão, separadamente, e então a combinação dos termos gerou a seguinte Equação:

$$\frac{-\Delta P_M}{H\rho_b g} = \left[\frac{6,8}{\tan \gamma} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) + 0,80 \right] - 34,4 \frac{d_p}{H} \quad (2.1)$$

O coeficiente de fricção interna, $\tan \gamma$, introduzido para permitir a variação das características superficiais de diferentes materiais sólidos, foi medido de acordo com o método de ZENZ e OTHMER (1960), e os valores variaram de 1,25 para sementes de colza a 3,2 para carvão. Para partículas de diferentes tamanhos, o diâmetro da partícula (d_p) foi obtido através de uma análise de dados do diâmetro médio recíproco ($\sum x_i / d_{pi}$).

Para vasos de geometria cônica, GALPERIN et al (1974) obtiveram a seguinte correlação empírica.

$$\frac{-\Delta P_M}{H\rho_b g} = 1 + 0,062 \left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{2,54} \left(\frac{D_b}{D_i} - 1 \right) (\tan \theta / 2)^{-0,18} \quad (2.2)$$

Em que:

- θ = Ângulo do cone ($10^\circ - 15^\circ$);
- ρ_b = Massa específica aparente do sólido ;
- D_b = Diâmetro da superfície superior do leito;
- H = Altura do leito (10 – 25 cm).

O diâmetro do orifício de alimentação de ar (D_i) foi de 5cm e o material sólido utilizado foi o quartzo fino de 0,16mm e 0,28mm de tamanho. O termo D_b está relacionado geometricamente às outras dimensões do leito cônico pela Equação a seguir:

$$D_b = D_i + 2H \tan \theta / 2 \quad (2.3)$$

Outro parâmetro considerado importante no projeto de leitos de jorro é a queda de pressão de jorro estável, que juntamente com a velocidade de jorro mínimo determinam a potência e operação do leito.

MAMURO e HATTORI (1968), após algumas considerações chegaram a uma Equação para a queda de pressão no jorro estável, como segue:

$$-\Delta P_s = (\rho_s - \rho_f) (1 - \xi_{mf}) g \left(\frac{3}{4} H_M \right) \quad (2.4)$$

Uma correlação que se aplica satisfatoriamente a leitos de jorro convencional, é a correlação proposta por NASCIMENTO et al (1976), mostrada a seguir.

$$\Delta P_{ms} = \frac{2}{3} (1 - \xi_{mf}) H \cdot \rho_s \cdot g \quad (2.5)$$

Para vasos cônicos, MUKHLENOV e GORSHTAIN (1965) propuseram a seguinte correlação empírica de queda de pressão na condição de jorro estável:

$$\frac{-\Delta P_s}{H \cdot \rho_b \cdot g} = \frac{7,68 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{0,2}}{Re_i^{0,2} \cdot \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0,33}} \quad (2.6)$$

Em que Re_i é o número de Reynolds baseado no diâmetro da partícula e na velocidade do gás através do orifício de entrada de ar, θ é o ângulo do cone, D_i é o diâmetro do orifício de entrada de ar e H altura do leito.

2.2.5 - Velocidade de Jorro Mínimo

A velocidade de jorro mínimo depende tanto das propriedades do sólido e do fluido quanto da geometria do leito. Num leito de jorro convencional, a velocidade de jorro mínimo (v_{jm}), para um dado material, aumenta com o aumento da altura do leito de sólidos e com a diminuição do diâmetro da coluna.

Muitos pesquisadores propuseram correlações empíricas para velocidade de jorro mínimo em vasos cilíndricos de base tronco-cônica. Uma das mais usadas foi proposta por MATHUR e GISHLER (1954):

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \cdot \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Em que d_p é o diâmetro da partícula, D_c o diâmetro da coluna, D_i o diâmetro do orifício de entrada do ar e ρ_f a massa específica do fluido.

Para vasos com geometria cônica são propostas, também, várias correlações da velocidade mínima do fluido no jorro estável. Dentre elas podemos citar a correlação de MUKHLENOV e GORSHTAIN (1965), que trabalhando com partículas de quartzo, areia e silicato de alumínio com d_p entre 0,5 e 2,5mm; ρ_s entre 0,98 e 2,36 g/cm³ e D_i entre 1,0 e 1,3 cm; H entre 3,0 e 15,0 cm; θ entre 120° e 60°, chegaram à seguinte Equação:

$$(\text{Re}_i)_{ms} = 0,174 \cdot \frac{(Ar)^{0,50}}{(\tan(\theta/2))^{2,5}} \cdot \left(\frac{D_b}{D_i}\right)^{0,85} \quad (2.8)$$

Em que:

$$\text{Re}_i = \frac{d_p \cdot U \cdot \rho_f}{\mu_f}$$

2.2.6 - Extração Mecânica da Bixina em Leito de Jorro

MASSARANI et al. (1992) determinaram experimentalmente a taxa de produção de bixina no leito de jorro com tubo interno e a qualidade do pó produzido, com o objetivo de analisar a viabilidade técnica de produção do concentrado de bixina neste equipamento. A qualidade do pó produzido foi analisada em função do teor de umidade, faixa granulométrica e teor de bixina. O teor de bixina foi analisado por técnicas de espectrofotometria.

MASSARANI et al. (1992) consideraram o leito de jorro com tubo interno um equipamento promissor na extração mecânica de bixina. Seus resultados confirmam que a presença do tubo interno no interior do leito governa a cinética de atrição.

EZEQUIAS et al. (1994), otimizaram os parâmetros geométricos do tubo interno em função da produção de pó. Estes autores trabalharam com seis arranjos diferentes para as dimensões geométricas do tubo interno. A massa de sementes processadas ($M_s = 6 \text{ Kg}$), a vazão de entrada de ar ($Q/Q_{mj} = 1,1$) e o tempo de processamento ($t = 3\text{h}$) foram considerados constantes. O melhor arranjo para a inserção do tubo interno na unidade de leito de jorro encontrado foi $L_t = 0,5\text{m}$ (comprimento do tubo *draft*), $d_t = 0,0524\text{m}$ (diâmetro do tubo) e $h_t = 0,04\text{m}$ (distância do tubo à base).

VILELA et al. (1996) estudaram o processamento de 5 kg de sementes em leito de jorro, com condições diversas para a vazão de entrada de fluido Q , sendo $1,2Q_{jm} \leq Q \leq 1,8Q_{jm}$. Seus resultados demonstraram que a massa do pó produzido aumenta com a vazão de ar e que a taxa de produção de pó é inicialmente alta, tendendo a cair com o tempo de processamento.

MENDONÇA (1999) realizou um estudo do processo de produção de extrato natural de urucum por extração mecânica em um leito de jorro com tubo interno. Os

resultados obtidos demonstraram que a melhor condição operacional deste equipamento é alcançada quando a massa de sementes processadas é igual a 5kg, o tempo de processamento de cinco horas e a vazão de ar equivalente à máxima fornecida pelo sistema de sopradores. Testes de produção de pó foram realizados; utilizando sementes de procedências diversas. Destes testes concluiu-se que a procedência das sementes de urucum exerce influencia significativa na quantidade e qualidade do pó produzido. Curvas características de operação, Q versus ΔP , para cada tipo de semente foram obtidas, comprovando que as propriedades da partícula influenciam a dinâmica do leito de jorro durante o processamento. Observou-se que para um mesmo tempo de operação o pó obtido a vazões de ar menores é mais fino. Foi observado que à medida que se aumenta o tempo de processamento, o pó extraído tende a ser mais grosso independente da vazão de entrada de ar. Desta forma, os resultados indicaram que a camada externa das sementes de urucum não é homogênea na sua constituição.

TAVARES et al (1999) realizaram um estudo de extração mecânica da bixina da semente de urucum utilizando um leito de jorro cone-cilindro e seus resultados mostraram que as variáveis que mais influenciaram a produtividade foram a presença do “*draft*” e a velocidade do ar. A presença do “*draft*” e a velocidade do ar também foram as variáveis que mais influenciaram o teor de bixina no pó extraído mecanicamente em leito de jorro.

2.3 - A Técnica de Fluidodinâmica Computacional

O conhecimento da fluidodinâmica do leito de jorro é de fundamental importância para a eficiência do processo de extração mecânica. Neste trabalho, além da análise experimental da fluidodinâmica do leito de jorro, foi desenvolvido também um estudo baseado na técnica da fluidodinâmica computacional (CFD). Sendo assim, neste tópico será realizada uma breve revisão deste assunto, tendo como base os trabalhos anteriores desenvolvidos no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da UFU (DUARTE, 2006; LOURENÇO, 2006 e VIEIRA NETO, 2007).

As soluções de problemas práticos em dinâmica dos fluidos eram, antes do surgimento dos computadores, de exclusividade da pesquisa experimental, que através de observações em laboratórios estudavam situações próximas da realidade. Por outro lado, os pesquisadores teóricos, se restringiam à resolução de problemas bem formulados e bastante

simplificados, geralmente fazendo uso de soluções analíticas. Com o advento dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que atualmente é conhecida como Dinâmica de Fluido Computacional, ou CFD (Computational Fluid Dynamics). A simulação de escoamentos em torno de perfis aerodinâmicos, a simulação de escoamento com reações químicas, ou, ainda, a simulações de sistemas multifásicos, são algumas das importantes aplicações da análise numérica computacional (DUARTE, 2006).

A indústria aerodinâmica foi a principal impulsionadora dos estudos e do avanço da fluidodinâmica computacional e, por exemplo, a solução do escoamento turbulento supersônico sobre um aerofólio que na década de 60 consumiria um tempo de computação de aproximadamente 30 anos a um custo de 10 milhões de dólares, usando computadores do tipo IBM 704, nos dias de hoje, utilizando os computadores atuais, não iriam requerer mais do que minutos de CPU com custo de centenas de dólares (MALISKA, 1995).

O avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores proporcionou um grande avanço na geração de “softwares” de CFD comerciais.

Mais que simples resolvidores de sistemas de equações, os pacotes de CFD comerciais são códigos que permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento da solução ao longo das iterações, além de disponibilizarem um *display* de resultados com alta capacidade gráfica para geração dos resultados, tendo como uma de suas principais vantagens, a rápida geração de resultados para sistemas simples, i.e., geometria simples, uma única fase e bidimensional (DUARTE, 2006).

A maior parte dos códigos CFD comerciais usam a metodologia de volumes finitos, na qual equações governantes são discretizadas na forma de um volume integral. Estes códigos possuem diferentes esquemas de interpolação e métodos de discretização que podem ser adotados conforme exigência de estabilidade ou outros critérios que o usuário julgue importantes (DUARTE, 2006).

A simulação em CFD é uma importante ferramenta capaz de fornecer detalhes sobre fenômenos de turbulência e a cerca do escoamento no interior de leitos. Logo, esta ferramenta tem sido cada vez mais adotada no estudo de perfis de escoamentos bifásicos gás-partícula. No entanto, a aplicação a sistemas mais concentrados, como o leito de jorro, tem sido pouco explorada (DUARTE, 2006).

2.3.1 - Revisão do Modelo Utilizado Nas Simulações (CFD)

DUARTE (2006) propõe um tratamento Euleriano para cada fase, onde as fases estudadas foram: gasosa e sólida. O modelo Euleriano multifásico, descrito a seguir, permite a modelagem de diversas fases levando em consideração a interação entre as mesmas.

O desenvolvimento das Equações de conservação pode ser feito utilizando um balanço médio local instantâneo para cada fase. A fração de volume para a fase q ($q = g, s$) é calculada a partir da Equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (2.9)$$

O balanço de Momento para as fases contínua e granular é definido pelas Equações (10) e (11), respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \vec{R}_{gs} + (\vec{F}_g + \vec{F}_{lift,g} + \vec{F}_{vm,g}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \vec{R}_{sg} + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) \quad (2.11)$$

Em que:

$$\vec{R}_{sg} = \vec{R}_{gs} = \sum_{p=1}^n \left(K_{sg} (\vec{v}_s - \vec{v}_g) + \dot{m}_{sg} \vec{v}_{sg} - \dot{m}_{gs} \vec{v}_{gs} \right) \quad (2.12)$$

O tensor tensão de Reynolds ($q = g, s$) é dado por:

$$\overline{\overline{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (2.13)$$

Sendo, μ_q a viscosidade cisalhante e λ_q a viscosidade bulk da fase q ($q = g, s$). $\vec{F}_q$ é a força de corpo externa, $\vec{F}_{lift,g}$ e $\vec{F}_{lift,s}$ são as força de massa virtual referente às

fases gás e sólida, $\vec{R}_{sg}$ é a força de interação entre as fases, e p a pressão compartilhada pelas fases.

A força de arraste é a força de interação entre as fases mais atuante e significativa e está presente no coeficiente de troca de momento entre as fases, K_{sg} :

$$K_{sg} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (2.14)$$

$$f = \frac{C_D \text{Re}_s \alpha_g}{24 v_{r,s}^2} \quad (2.15)$$

em que: f_d é a força de arraste, $v_{r,s}$ é a velocidade relativa fluido-partícula e τ_s é o tempo de relaxação da partícula, o qual é definido por:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu} \quad (2.16)$$

na qual: d_s é o diâmetro das partículas e μ é a viscosidade da fase fluida.

A definição de f inclui o coeficiente de arraste (C_D) que é baseado no número de Reynolds relativo (Re_s). O Modelo de Arraste de GIDASPOW et al. (1992) é formado pela Equação de ERGUN, para o cálculo da fase densa, e pela Equação de WEN e YU, para o cálculo da fase diluída:

Para $\alpha_g > 0,8$, (WEN e YU, 1966):

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} \quad (2.17)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g \text{Re}_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_g \text{Re}_s)^{0.687} \right] \quad (2.18)$$

Para $\alpha_g \leq 0,8$, (ERGUN, 1952):

$$K_{sg} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_l \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (2.19)$$

Os modelos constitutivos para as viscosidades cisalhante e bulk da fase granular são definidos pela teoria cinética granular (LUN et al., 1984), bem como pelo conceito da temperatura granular, que incorpora o termo de pressão de sólidos. A viscosidade cisalhante dos sólidos é dada pela soma dos termos relativos às colisões, cinética da partícula e friccional, sendo este opcional.

Termo colisional (LUN et al., 1984):

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Termo cinético (SYAMLAL et al. 1989):

$$\mu_{s,cin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (2.21)$$

Termo Friccional (desprezado): Os resultados obtidos por Du et al. (2006-a) revelaram pouca influência da inclusão de um Modelo Friccional na fluidodinâmica do leito.

A viscosidade bulk dos sólidos tem a seguinte forma (LUN et al., 1984):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

Por analogia com o escoamento dos gases ideais, surge o conceito da temperatura granular, que é proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas, como mostra a Equação (2.23). A equação de conservação da temperatura granular está apresentado na Equação (2.24):

$$\theta = \langle v_p^2 \rangle / 3 \quad (2.23)$$

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \left(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{ls} \quad (2.24)$$

na qual, k_{θ_s} é o coeficiente de difusão expresso pelo Modelo de GIDASPOW et al. (1992), $-\gamma_{\theta_s}$ dissipação de energia devido a colisões definido por LUN et al. (1984) e ϕ_{gs} representa a troca de energia entre as fases granular e gasosa. A pressão de sólidos é expressa pela Equação 16, (LUN et al. 1984):

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (2.25)$$

onde $g_{0,ss}$ é a função distribuição radial, dada pelo Modelo de Ogawa (1980).

As condições de contorno foram definidas da seguinte forma: na entrada do leito, a injeção de ar é somente na direção axial e tem perfil parabólico e a velocidade de sólidos é nula; na saída do leito, os gradientes axiais de velocidade para as duas fases são nulos e a pressão é atmosférica ($\partial \psi / \partial x = 0, \psi = u, v, \theta_s, \alpha_s, \alpha_g$); no eixo do jorro, os gradientes radiais de velocidade para as duas fases e para a temperatura granular são nulos ($\partial \psi / \partial y = 0, \partial \psi / \partial z = 0; \psi = u, v, \theta_s, \alpha_s, \alpha_g$); nas paredes admitiu-se uma condição de não escorregamento ($u = v = \theta_s = \alpha_s = \alpha_g = 0$).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - A Caracterização das Sementes de Urucum

Os experimentos de extração de bixina em leite de jorro foram realizados utilizando sementes de urucum provenientes da cidade de Rio Vermelho (MG), localizada no Vale do Jequitinhonha.

Análises das sementes de urucum foram realizadas no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LSP/FEQUI/UFU), para se estudar as seguintes propriedades: densidade, diâmetro da esfera de mesmo volume e o teor de bixina do pó extraído. Os procedimentos experimentais de caracterização das sementes são descritos a seguir, sendo os seus resultados experimentais mostrados no Apêndice C.

3.1.1 - A Determinação da Densidade das Sementes

A determinação da densidade das sementes de urucum, provenientes de Rio Vermelho (MG), foi feita através do Método Picnométrico. Esta análise foi realizada em 10 amostras de sementes, cada qual com um número pré-definido de partículas, utilizando-se para isto picnômetros de 50 mL, uma balança analítica (Marca GEHAKA, Modelo AG 200), uma estufa (Marca FANEM, Modelo 315 SE) e n-hexano como fluido de análise.

A escolha do n-hexano foi baseada nos seguintes fatores:

- baixa densidade relativa em relação à densidade da semente.
- baixa solubilidade do corante em pó existente na camada superficial das sementes
- baixa absorção do solvente pelas sementes.

3.1.2 - A Determinação do Diâmetro da Esfera de Mesmo Volume que a Partícula (d_p)

Para a determinação do d_p , foi também utilizado o método picnométrico. A partir dos resultados coletados durante o método para se obter a densidade das sementes de urucum, é possível encontrar o volume de sementes contido no picnômetro. Como o

número total de sementes em cada picnômetro é conhecido, o volume médio da semente de urucum pode ser obtido.

O diâmetro médio da esfera de volume igual ao volume da semente pode ser calculado, igualando o volume individual de cada partícula ao volume de uma esfera, resultando na Equação (3.1) apresentada a seguir:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{(6 \times V_p)}{\pi}} \quad (3.1)$$

em que: V_p é o volume da semente de urucum

3.2 - A Determinação da Concentração de Bixina no Pó Extraído

A técnica de espectrofotometria foi utilizada na determinação da concentração de bixina no pó extraído. O procedimento detalhado dessa análise quantitativa é descrito a seguir.

A amostra é diluída em acetona a uma concentração adequada para análise. O teor de pigmento é determinado medindo-se o valor da DO (densidade óptica) no pico em aproximadamente 485 nm. O coeficiente de extinção E (1%, 1 cm) para bixina em acetona, a 485 nm, é 3140. Foi utilizado para esta medida um espectrofotômetro (Marca PRO-ANALISE, Modelo V-1200)

Alguns cuidados devem ser tomados para que esta medida alcance uma precisão adequada. É preciso se certificar de que a amostra esteja bem misturada. Nestas medidas foram pesadas alíquotas entre 0,1 - 0,50 g do pó extraído em balança de precisão 0,1 mg. O material foi dissolvido em acetona em balão de 50 mL. Dessa solução foi retirado 0,2 mL (em micropipeta) para nova diluição (em balão de 25mL). Esta solução foi então utilizada para a medida no espectrofotômetro. Foi medida a absorbância em 485 nm, usando acetona como branco. A densidade óptica deveria estar no intervalo $0,2 < OD < 0,8$, caso contrário, diluições adequadas deveriam ser preparadas

A concentração do pigmento, porcentagem em peso de bixina, era calculada conforme a seguinte equação:

$$C_b = \frac{OD_{485nm} \times D}{3140} \quad (\% \text{ m / m}) \quad (3.2)$$

$$D = \frac{\text{vol do 1}^{\circ} \text{ bal\~{a}o} \times \text{vol 2}^{\circ} \text{ bal\~{a}o}}{\text{massa da amostra} \times \text{vol da al\~{i}quota da 1}^{\circ} \text{ dilui\~{c}\~{a}o}} \quad (3.3)$$

em que: $OD_{485 \text{ nm}}$ é a densidade ótica (absorbância) da diluição em 485 nm.

3.3 - A Unidade Experimental

A unidade experimental de extração mecânica da bixina em leite de jorro utilizada neste trabalho é mostrada na Figura 3.1.

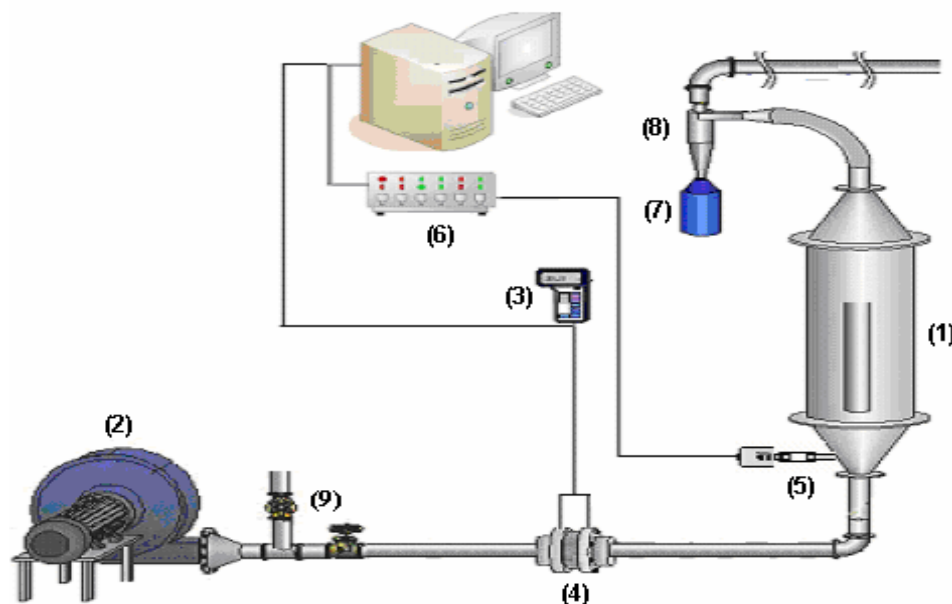


Figura 3.1: A Unidade Experimental.

As dimensões do leito de jorro utilizado na unidade de extração de bixina são apresentadas na Tabela 3.1. Foi utilizado também em alguns ensaios um tubo interno (tubo *draft*) com 3,5 cm de diâmetro e com diferentes comprimentos, para ajustar-se à altura da carga de sólidos no leito.

Tabela 3.1: As Dimensões do Leito de Jorro.

Altura da parte cônica	15 cm
Altura total da parte cilíndrica	70 cm
Diâmetro da parte cilíndrica	21 cm
Diâmetro da entrada do leito	3,5 cm
Ângulo de inclinação da base	60°

O fluxo de ar era proporcionado por um soprador de 7,5 Cv (2), sendo controlado por duas válvulas do tipo gaveta (9). Uma válvula primária foi instalada após a saída do compressor em um sistema de *bypass* para regular a vazão de ar e outra, secundária, instalada na linha de admissão de ar ao leito, para um maior controle sobre a vazão do fluido. A vazão do ar foi medida por uma placa de orifício (4) conectada a um transdutor de pressão diferencial (3) e calibrada previamente com o auxílio de um termo-anemômetro de fio quente (Marca VelociCalc TSI, Modelo 8357 com faixa de operação de 0 à 30 m/s, ver detalhes no Apêndice A). A tubulação utilizada foi feita de aço galvanizado com 50,8 mm de diâmetro e aproximadamente 3 m de comprimento. A queda de pressão no leito foi medida na parede do leito, a 0,5 cm de distância do bocal de entrada do gás, usando um transdutor de pressão do tipo sonda (5). O sinal era transmitido para um computador por uma placa de aquisição de dados A/D (6). Uma tela de 8 mesh foi fixada entre a parte cilíndrica e a parte cônica superior do equipamento para evitar o arraste de sementes do leito. O concentrado do pó de bixina extraído foi recolhido em um recipiente (7) conectado ao *underflow* de um ciclone do tipo STAIRMAND (8) de 10 cm de diâmetro da parte cilíndrica.

O Sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho era composto por:

- Um transdutor de pressão da marca GEMS SENSORS – Modelo K053266, com faixa de escala de 0 a 7,5 psig, instalado na base cônica do leito, logo acima da entrada de ar;
- Um transdutor de pressão diferencial da marca COLE PARMER – Modelo PTX500, com de escala 25 inH₂O, instalado na placa de orifício, na região horizontal da tubulação. Um bloco conector marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – CB-68LP, faz a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor de pressão e a placa de aquisição de dados A/D (analógico-digital).
- Uma placa de aquisição de dados marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – PCI-6021E com 16 entradas analógicas, que converte os sinais analógicos do transdutor de pressão para a forma digital.

Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador, com o auxílio do *software* LabVIEWTM, versão 8.2.1. A calibração desses instrumentos é mostrada no Apêndice B.

3.3.1 - O Procedimento Experimental

O seguinte procedimento foi utilizado na realização dos ensaios de extração mecânica da bixina em leito de jorro. Inicialmente foi medida a massa de sólidos, de acordo com o planejamento experimental utilizado (veja próximo tópico), e o leito alimentado. Em seguida o soprador era acionado e a vazão de ar a ser utilizada no respectivo ensaio era rapidamente ajustada. As medidas de massa de pó extraída (coletadas no underflow do ciclone) foram feitas a cada 10 min durante as duas primeiras horas, e a cada 20 min na terceira hora e a cada 30 minutos na quarta e última hora de experimento. Essas medidas foram realizadas em balança analítica de precisão 0,1 mg. Ao final de cada experimento as concentrações de bixina no pó extraído eram medidas, conforme procedimento descrito anteriormente.

Nas diversas condições do planejamento experimental utilizado nesta dissertação foram obtidas também curvas características, visando à identificação e melhor compreensão dos parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro. Conforme mencionado anteriormente, os resultados de velocidade e de pressão foram obtidos com o auxílio de um sistema de aquisição de dados experimentais. Os resultados eram coletados no transdutor de pressão em vazões crescentes e decrescentes de ar, a uma taxa de coleta de cerca de 100 pontos por segundo e um número de pontos igual a 512 pontos por amostra, num intervalo de tempo de aproximadamente 5 segundos, para cada ponto da curva característica. O *software LabVIEW*, versão 8.2.1, permitiu a leitura e interpretação de todos os sinais recebidos pela placa de aquisição de dados, permitindo, ainda, um gerenciamento desses dados pelos tratamentos matemáticos e estatísticos e agrupamento de resultados em arquivos.

3.4 - O Planejamento de Experimentos

A metodologia do planejamento fatorial de experimentos foi aplicada nesse trabalho com objetivo de avaliar, dentre as condições propostas, as melhores condições para realizar a operação de extração de corante bixina de sementes de urucum no leito de jorro estudado, de forma a maximizar a extração do corante em pó.

As variáveis estudadas foram a carga de sementes (M_S), presença ou não do tubo *draft* e a vazão volumétrica do ar na alimentação (Q) e as respostas analisadas foram a

massa de corante em pó extraída (M_p), a concentração de bixina nesse pó (C_b) e a produtividade do processo (P_r), calculada pela relação entre a massa de pó extraída pela carga de sementes e pelo tempo de processamento, sendo então definida pela seguinte equação:

$$P_r = \frac{M_p}{M_s \cdot t} \quad (3.4)$$

Para a análise da influência dessas três variáveis do processo na massa de corante extraída e na qualidade do produto foi elaborado um planejamento fatorial em dois níveis. A Tabela 3.2 apresenta as variáveis e seus respectivos níveis e a Tabela 3.3 apresenta a matriz do planejamento em níveis codificados com as respectivas condições operacionais.

Tabela 3.2: Variáveis e seus repetíveis níveis.

Variável	Nível = 1	Nível = -1
X_1 : Massa de sementes	2,5 Kg	2,0 Kg
X_2 : Presença do tudo <i>draft</i>	Com Draft	Sem Draft
X_3 : Adimensional, Q/Q_{jm}	1,20	1,10

Tabela 3.3: Condições operacionais para análise da influência de três variáveis na extração mecânica da bixina em leito de jorro.

Ensaio	M_s (kg)	Presença do <i>draft</i>	Q/Q_{jm}
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	-1

Com os valores de t de Student obtidos da análise de variância da regressão, as variáveis cujos parâmetros relacionados possuíam nível de significância superior a 10% foram consideradas não significativas.

3.5 - A Influência da Distância do Tubo Draft à Base

Um segundo conjunto de experimentos foi realizado para avaliar a influência da distância do tubo draft à base (h_t) no processo de extração mecânica da bixina em leito de jorro. Nestes experimentos foram utilizados diversos valores de h_t (3, 4, 5, 6 e 7cm), mantendo-se constante a carga de semente no leito ($M_S = 2,5$ Kg), a vazão de ar ($Q = 99,74$ m³/h) e o tempo de processamento de 4 horas.

3.6 - A Execução Numérica

As simulações foram realizadas através do *software* comercial CFD Fluent 6.3.26; o qual a Faculdade de Engenharia Química da UFU possui a licença.

3.6.1 - A Malha Computacional

O aspecto típico da malha adotada neste estudo pode ser visto na Figura 3.2. Na parte cônica e no início da parte cilíndrica até atingir altura de 19 cm foi adotada uma malha não estruturada com células triangulares e no restante da parte cilíndrica utilizou-se uma malha estruturada com células retangulares. As malhas utilizadas neste estudo possuíam em média 5600 células.

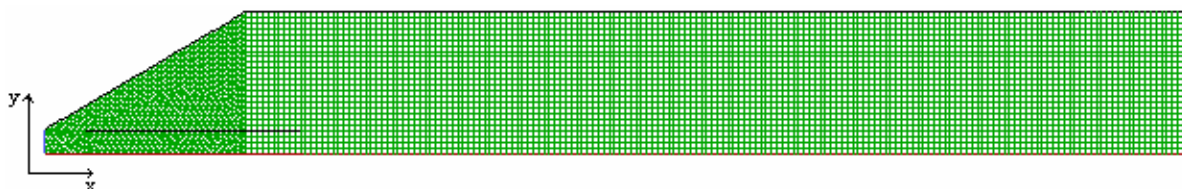


Figura 3.2: Malha adotada

3.6.2 - O Modelo Matemático

Conforme mencionado no Capítulo 2, neste trabalho foi usado o Modelo Multifásico Euleriano para as simulações da fluidodinâmica do escoamento das sementes

de urucum em leito de jorro, por meio da técnica de CFD. Este permite modelar múltiplas fases separadas, ou ainda, interagentes. As fases consideradas são a gasosa e sólida. A aproximação Euleriana é usada para cada fase, levando em conta todas as possíveis combinações intra e inter-fásicas. As frações volumétricas foram assumidas como sendo funções contínuas do espaço e tempo e sua soma igual a um. O desenvolvimento das equações de conservação pode ser feito utilizando um balanço médio local instantâneo para cada fase. A fração de volume para a fase sólida é calculada a partir da equação da continuidade. A modelagem foi realizada baseada em trabalhos anteriores (DUARTE, 2006; LOURENÇO, 2006 e VIEIRA NETO 2007) e foi descrita na Seção 2.3.1 desta dissertação.

Devido ao comportamento relativamente simétrico do leito de jorro quando operado de forma estável este, foi modelado assumindo um eixo de simetria, uma vez que o esforço computacional é reduzido quando se trabalha com perfis simétricos nas equações básicas do escoamento.

3.6.3 - O Procedimento de Resolução

O conjunto das equações de balanço e equações constitutivas foi resolvido utilizando a técnica de volumes finitos, empregada pelo *software* de CFD Fluent 6.3.26. Adotou-se o algoritmo SIMPLE para estabelecer o acoplamento velocidade-pressão. São necessários simular 3 segundos em tempo real para o jorro atingir o estado estacionário. O passo temporal máximo foi de 1×10^{-4} s e o critério de convergência estabelecido foi da ordem de 1×10^{-3} para a Equação da Continuidade, frações volumétricas, velocidade do ar e velocidade das sementes de urucum.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a caracterização física das sementes de urucum utilizadas nos experimentos; parâmetros importantes que serão utilizados no estudo de simulação computacional em CFD.

Serão mostrados também os resultados do estudo fluidodinâmico do leito de jorro na operação de extração mecânica, realizado com o intuito de se obter as vazões e as quedas de pressões de jorro mínimo para diversas configurações do leito e para duas massas distintas de carregamento de sementes, de onde foi possível estabelecer as faixas de vazões de ar que iriam ser utilizadas nos experimentos.

A partir daí, serão apresentados os estudos para se determinar o tempo de extração, bem como a configuração e a condição operação do leito de jorro que maximize a extração do corante bixina da superfície das sementes de urucum.

Por fim, serão comparados alguns resultados experimentais com as simulações realizadas pela técnica da fluidodinâmica computacional. As simulações fluidodinâmicas por CFD foram utilizadas também com o propósito de ajudar a explicar a razão das maiores produtividades em algumas condições operacionais.

4.1 - Resultados Experimentais

4.1.1 - A Caracterização Física das Sementes

Os valores experimentais encontrados na caracterização física das sementes de urucum provenientes da cidade de Rio Vermelho (MG) se encontram na Tabela 4.1. Esses valores foram obtidos seguindo as metodologias descritas no Capítulo 3, nas quais foram analisadas dez amostras de sementes e cujos dados experimentais dessas análises são mostrados no Apêndice C.

Tabela 4.1: Propriedades físicas da semente de urucum.

Propriedade Física	Valor Experimental e o Desvio Padrão (DP)*
Densidade da semente - ρ_s (kg/m ³)	1270,00 DP = 95,00
Diâmetro da esfera de mesmo volume que o da semente - d_p (mm)	3,57 DP = 0,095

*DP é o desvio padrão das medidas

É possível verificar que estes valores obtidos para a caracterização das sementes de urucum estão coerentes em relação àqueles observados em publicações de trabalhos anteriores sobre o assunto.

4.1.2 - As Curvas Características

As curvas características construídas a partir dos resultados de queda de pressão no leito e vazão de alimentação de ar, coletados diretamente pelo sistema de aquisição durante o decorrer da operação de extração mecânica para diversas configurações do leito de jorro e cargas de sementes, são mostradas a seguir. A partir destas curvas foi possível a determinação das condições de jorro mínimo apresentadas na Tabela 4.2.

Observações detalhadas destas curvas permitem identificar as diversas transformações sofridas pelo leito de partículas, da condição de leito estático até o aparecimento do regime de jorro estabelecido, bem como a obtenção das condições de vazões e pressões de jorro mínimo.

As Figuras 4.1 e 4.2 representam os experimentos realizados com o leito de jorro com configuração tradicional (sem a presença de tubo *draft*) e carregado com 2,5 Kg e 2,0 Kg de sementes respectivamente. É possível verificar nestas figuras que, com pequenas vazões de ar o fluido apenas percola entre as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. O aumento gradativo da vazão de ar produz uma agitação maior das partículas na base do leito, ocasionando a formação de uma cavidade interna devido à ação do jato de ar. Esta cavidade aumenta gradualmente dando origem a um canal preferencial central, conhecido como jorro interno, que se estende com o aumento da vazão até o ponto de jorro

incipiente, onde a perda de carga do sistema é máxima, ficando na iminência de romper a superfície do leito de partículas. Essas perdas máximas observadas nas condições estudadas em vazões crescentes foram de 37,52cmH₂O para o carregamento de 2,0 Kg, que fornece uma altura de leito estático de 17cm, e de 32,47cmH₂O para o carregamento de 2,5 Kg de sementes, que fornece uma altura de leito estático de 19cm.

A partir deste máximo, inicia-se a fase de expansão do leito, onde ocorre um decréscimo da perda de carga, indicando que o fluxo de ar começa a vencer a força resistiva do arco de partículas, formado logo acima da entrada de ar do equipamento. Um pequeno incremento na vazão de ar alimentado propicia a formação do jorro na superfície do leito, dando origem à região de fonte e a uma abrupta queda na perda de carga do sistema. Desse ponto em diante, um novo aumento na vazão de fluido não acarreta mudanças na queda de pressão, uma vez que a quantidade adicional de gás injetado passa quase que inteiramente pela região de jorro, que oferece menos resistência ao escoamento.

Nos processos inversos, ou seja, decréscimo da vazão de gás, vistos também nas Figuras 4.1 e 4.2, é possível notar que com a redução da vazão, a condição de jorro foi mantida até um valor específico de vazão, onde é observada a menor vazão de ar, com a qual se pôde verificar um jorro estável, denominada vazão de jorro mínimo (Q_{jm}).

Nos experimentos realizados com o leito de jorro convencional, foi encontrada uma vazão de jorro mínimo da ordem 73,74 m³/h, para $M_s = 2,0$ Kg e 83,07 m³/h, para $M_s = 2,5$ Kg. As quedas de pressão de jorro mínimo observadas nestes casos foram 3,68 e 4,41 cmH₂O, respectivamente.

A diminuição continua do fornecimento de ar para o leito ocasiona o aparecimento de um valor mais elevado de queda de pressão, onde o regime de jorro estabelecido deixa de existir. Este valor ainda é menor que aquele encontrado durante o acréscimo da vazão; pois a vazão decrescente de ar não precisa despendar tanta energia para romper um leito compactado de partículas.

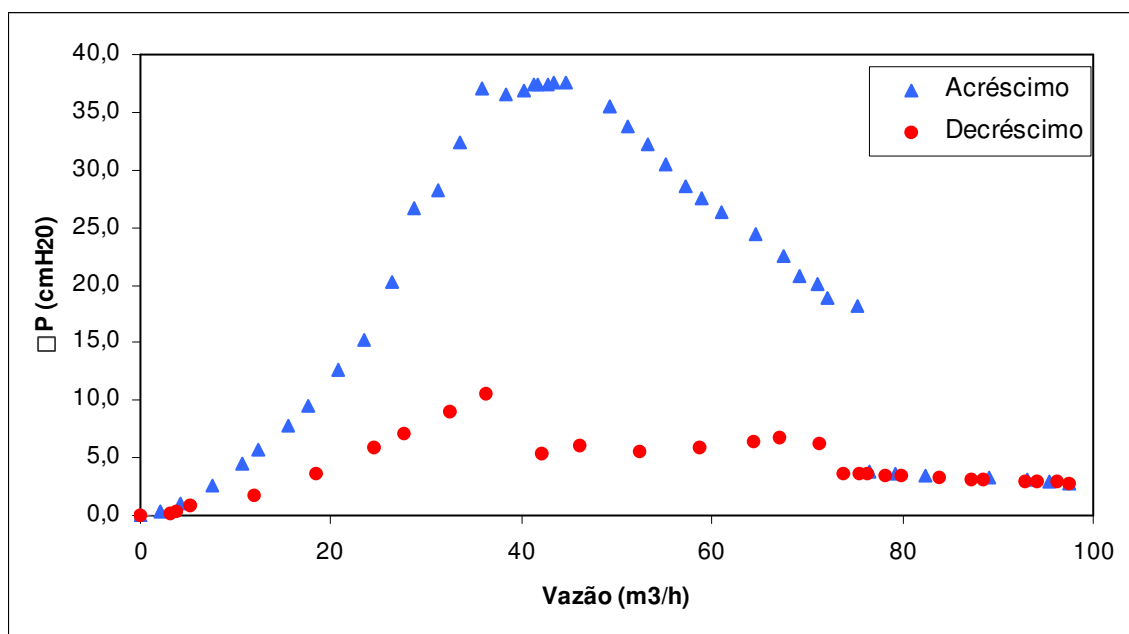


Figura. 4.1: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com configuração convencional, $M_S = 2$ Kg e $H_0 = 17$ cm).

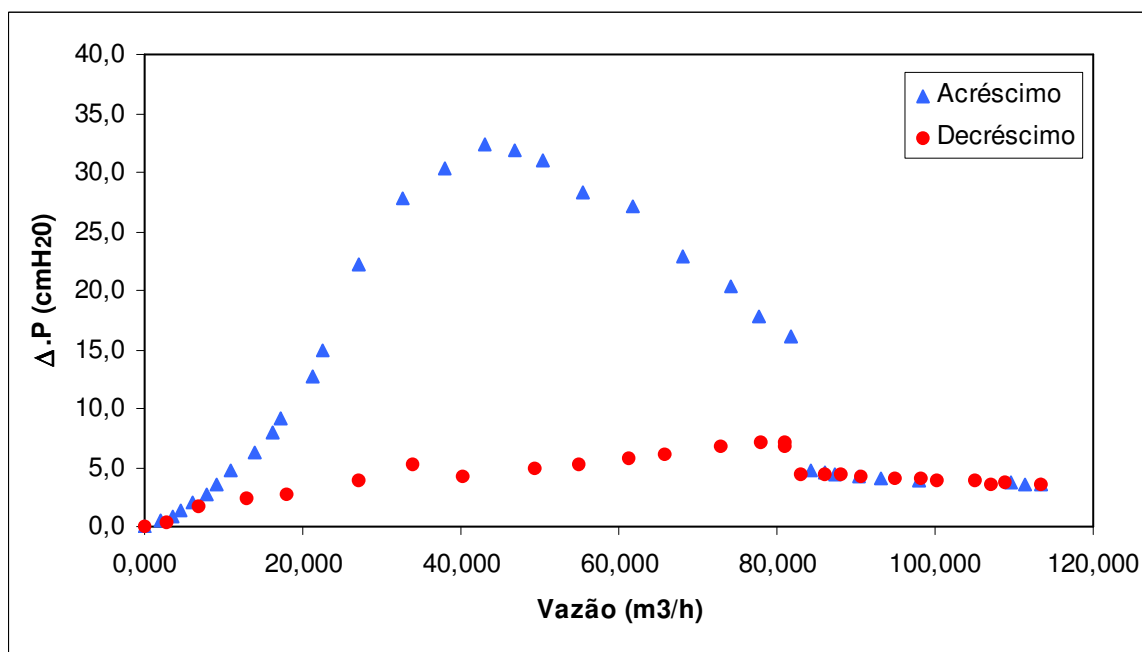


Figura. 4.2: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com configuração convencional, $M_S = 2,5$ Kg e $H_0 = 19$ cm).

Ns Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, são apresentadas as curvas características, obtidas utilizando o leito de jorro com as seguintes configurações de tubo *draft*: $h_t = 4$ cm e $h_t = 7$ cm; e carregamentos de 2,5 Kg e 2,0 Kg de sementes.

É possível verificar que, apesar de ainda existir um ponto máximo de queda de pressão no interior do leito, as curvas características, para o leito de jorro com tubo *draft*, obtidas durante o acréscimo da vazão apresentam comportamento diferente daquelas encontradas para o leito de jorro com a configuração tradicional.

A inserção do tubo interno logo acima do bocal de injeção do gás no equipamento modifica a fluidodinâmica do leito.

Observa-se nos resultados um valor de queda de pressão crescente com comportamento muito próximo do linear durante o aumento da vazão do gás até um certo ponto no qual a energia acumulada pelo leito é suficientemente grande para que ocorra a ruptura do leito de partículas e o aparecimento do regime de jorro estabelecido, caracterizado por uma queda brusca de pressão no interior do equipamento. Desse ponto em diante, qualquer incremento na vazão de ar provoca a elevação da fonte e uma pequena alteração da perda de carga.

No processo inverso, diminuição da vazão, as curvas características de queda de pressão versus vazão de ar para as duas configurações de leito de jorro, tradicional e sem tubo *draft*, apresentam o mesmo comportamento qualitativo sendo possível obter valores de vazão e quedas de pressão na condição de jorro mínimo (inferiores aos obtidos para a configuração convencional).

A fluidodinâmica do leito de jorro foi também estudada por simulação, pela técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), sendo que os resultados obtidos e as respectivas discussões serão apresentados na Seção 4.2.

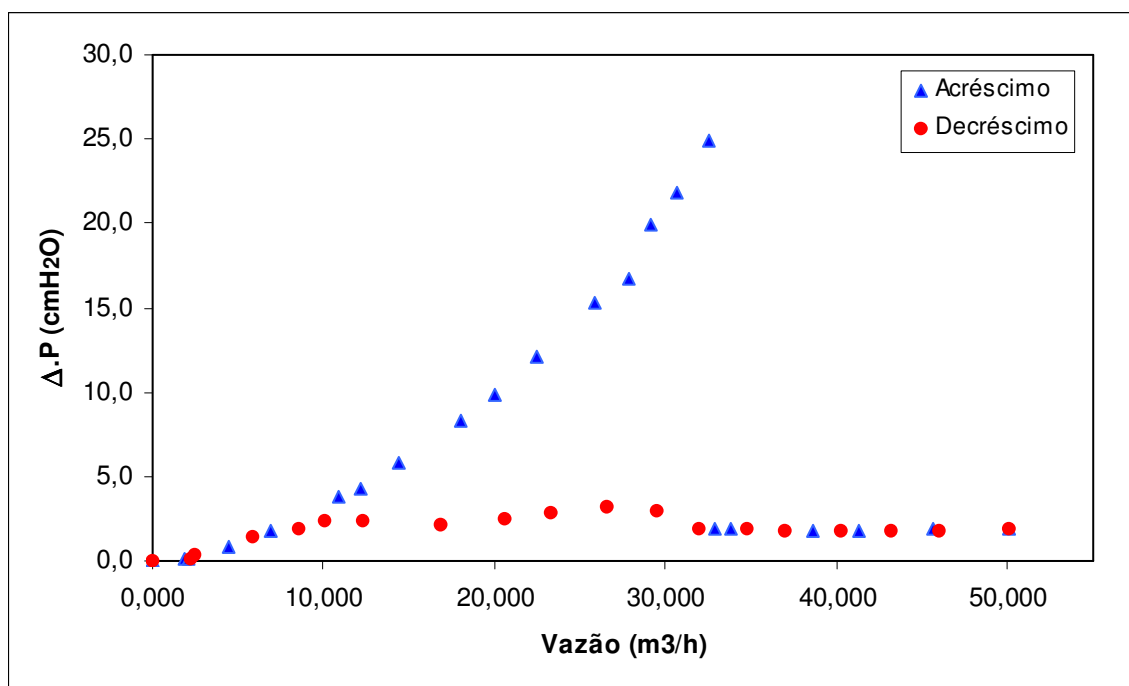


Figura. 4.3: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo *draft*, $h_t = 4\text{cm}$, $M_S = 2\text{Kg}$ e $H_0 = 17\text{cm}$).

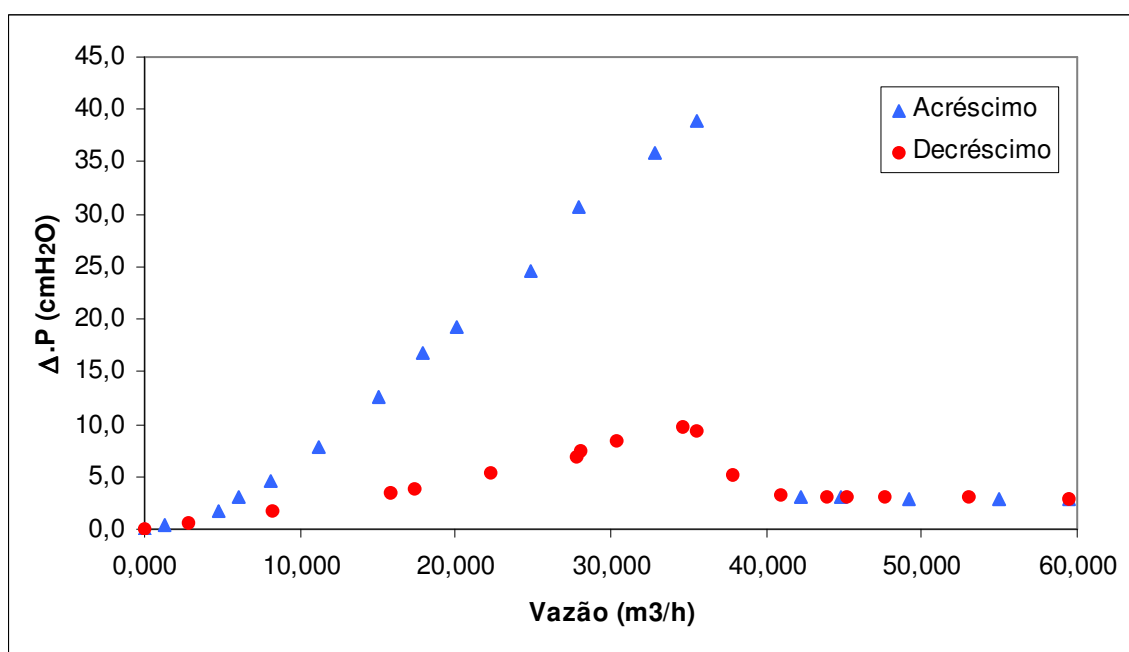


Figura. 4.4: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo *draft*, $h_t = 7\text{cm}$, $M_S = 2\text{Kg}$ e $H_0 = 17\text{cm}$).

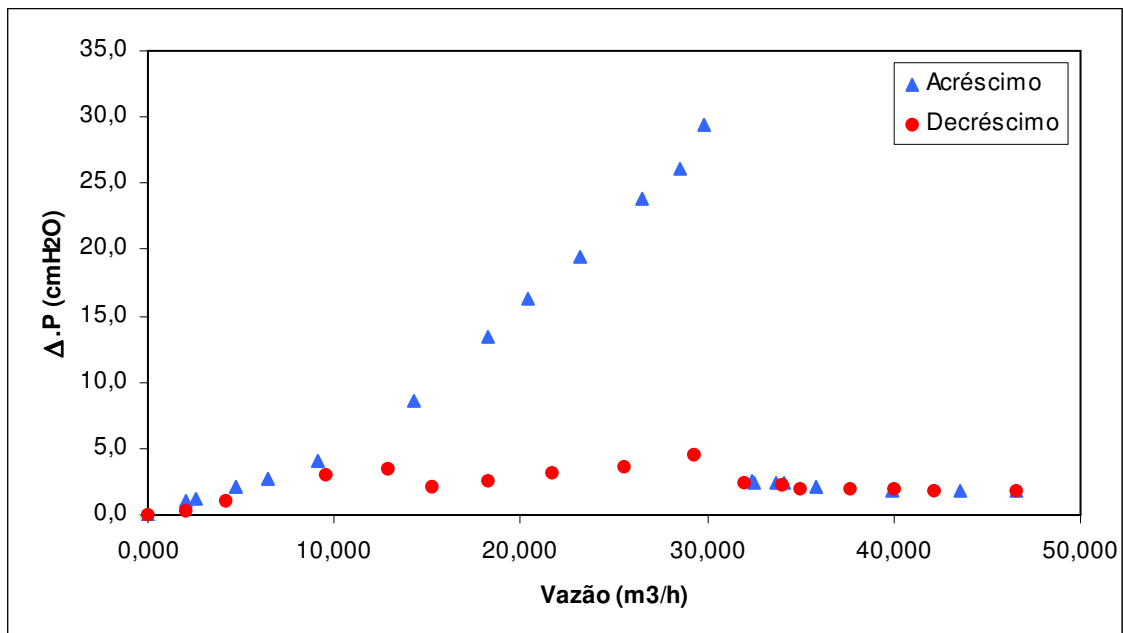


Figura. 4.5: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo *draft*, $h_t = 4\text{cm}$, $M_S = 2,5\text{Kg}$ e $H_0 = 19\text{cm}$).

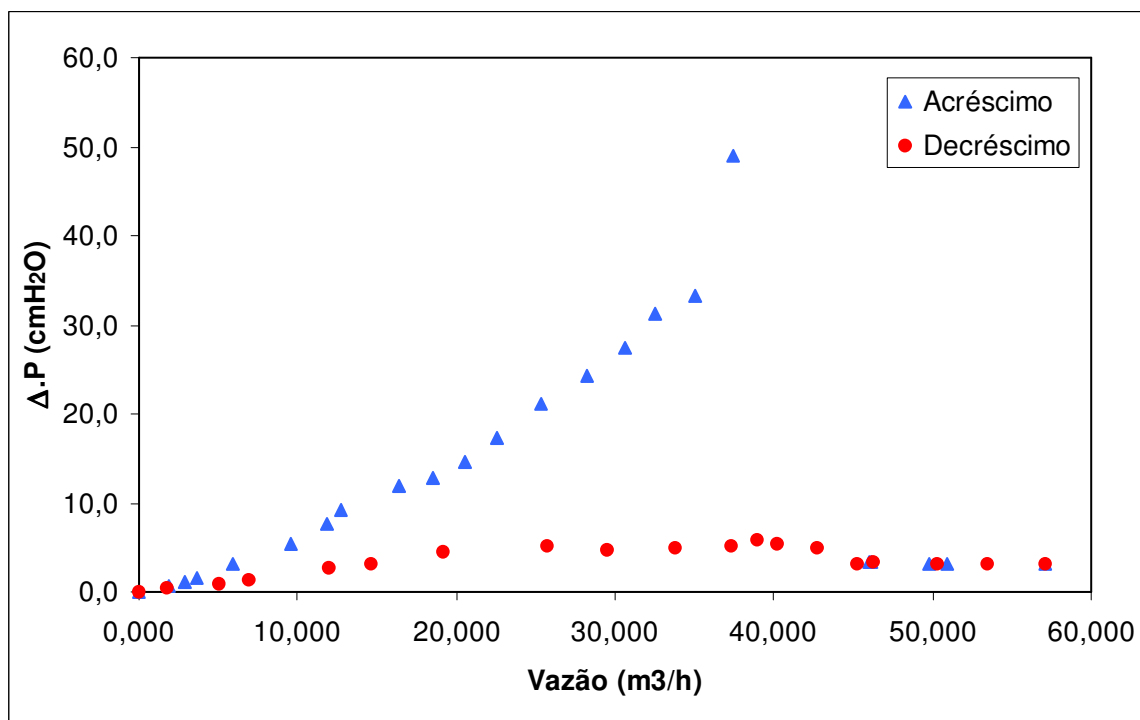


Figura. 4.6: Curva Característica de queda de pressão versus vazão de ar (Leito de jorro com tubo *draft*, $h_t = 7\text{cm}$, $M_S = 2,5\text{Kg}$ e $H_0 = 19\text{cm}$).

4.1.3 - Condições de Jorro Mínimo

As condições de jorro mínimo, determinadas a partir das curvas características de queda de pressão *versus* vazão de ar para diversas condições de operação do leito de jorro no processo de extração mecânica da bixina, são mostradas na Tabela 4.2. Através de sua observação é possível perceber como as condições de jorro mínimo podem ser afetadas pelas variáveis analisadas neste trabalho.

Tabela 4.2: Condições de jorro mínimo.

Condição de operação	Uso do <i>draft</i>	Q_{jm} (m ³ /h)	$\Delta.P_{jm}$ (cmH ₂ O)
$M_S = 2,0\text{Kg}$	Não	73,74	3,68
$M_S = 2,5\text{Kg}$	Não	83,07	4,41
$M_S = 2,0\text{Kg} - h_t = 4\text{cm}$	Sim	31,95	1,93
$M_S = 2,0\text{Kg} - h_t = 7\text{cm}$	Sim	43,85	3,11
$M_S = 2,5\text{Kg} - h_t = 4\text{cm}$	Sim	31,99	2,39
$M_S = 2,5\text{Kg} - h_t = 7\text{cm}$	Sim	45,27	3,20

Com o aumento da massa de carga de sementes, ocorre uma elevação tanto na vazão quanto na queda de pressão de jorro mínimo, e este aumento é mais intenso na configuração convencional. Este fato pode ser explicado pela maior quantidade de energia requerida para a ruptura do leito de partículas e formação do jorro no interior do equipamento para maiores massas.

A inserção do tubo *draft* no interior do leito de jorro modifica as condições de escoamento, sendo encontrados menores valores de vazão e queda de pressão na condição de mínimo jorro, que aqueles obtidos em experimentos realizados utilizando-se o leito de jorro com configuração tradicional. Com a introdução do tubo interno o fluido é canalizado para a região de jorro, restringindo a passagem deste fluido para a região anular. A restrição da passagem do gás para a região anular, região de menor porosidade, causa uma maior canalização do ar para a região de jorro, sendo então necessárias menores vazões de ar que devem ser fornecidas ao equipamento para se atingir o regime de jorro estabelecido.

A variação da distância entre o tubo e a base do leito (h_t), também possui influência nas condições de jorro mínimo, pois através da sua variação é possível se ter certo controle da quantidade de fluxo de ar direcionado para região de jorro ou anular, seu valor mínimo é limitado pelo tamanho das partículas que irão ser processadas. Quanto maior o valor de h_t maior será a quantidade de ar que escoar pela região anular, aumentando assim os valores de velocidade e queda de pressão de jorro mínimo.

A tabela a seguir mostra uma comparação entre vazões de jorro mínimo, obtidas experimentalmente e aquelas calculadas a partir da Equação (2.7) de MATHUR e GISHLER (1954), que é a equação mais usada para previsão destes parâmetros na literatura para o leito de jorro cilíndrico com configuração tradicional.

Tabela 4.3: Comparação das vazões de jorro mínimo experimentais com as vazões obtidas usando a Equação de MATHUR e GISHLER (1955) para o leito de jorro convencional.

Condição de operação	Vazão de jorro mínimo - Q_{jm} (m^3/h)		
	Experimental	MATHUR e GISHLER (1954)	Desvio relativo (%)
$M_S = 2,0Kg$	73,74	76,62	3,90
$M_S = 2,5Kg$	83,07	81,01	2,48
Desvio Médio (%)			3,19

A proximidade entre os resultados experimentais e a correlação empírica, para as duas alturas, pode ser devido à proximidade das condições em relação às utilizadas pelo autor da referida equação.

Os desvios relativos entre os dados experimentais e a correlação empírica foram bastante próximos aos obtidos por LOURENÇO (2006) e por DUARTE (2006). Estes autores trabalharam com sementes de soja, material mais liso e com esfericidade muito maior que as sementes de urucum.

4.1.4 - Tempo de Processamento das Sementes

O tempo de duração dos experimentos de extração mecânica de bixina foi determinado através de um experimento simples, utilizando o leito de jorro com configuração tradicional, sem a inserção do tubo *draft*, com carregamento de 2,5 Kg de sementes de urucum (M_S), vazão de operação estipulada como a máxima fornecida pelo soprador e conduzido até o instante onde a quantidade do corante em pó coletado foi muito pequena, ou seja, o tempo necessário para o quase esgotamento da camada de corante da superfície das sementes pela operação de extração mecânica em leito de jorro.

As variáveis analisadas para a escolha do tempo de processamento das sementes foram a massa acumulada de corante em pó extraído (M_p), e a produtividade do processo, cujo procedimento experimental foi descrito no Capítulo 3. A Figura 4.7 mostra o comportamento dessas duas variáveis no decorrer do experimento.

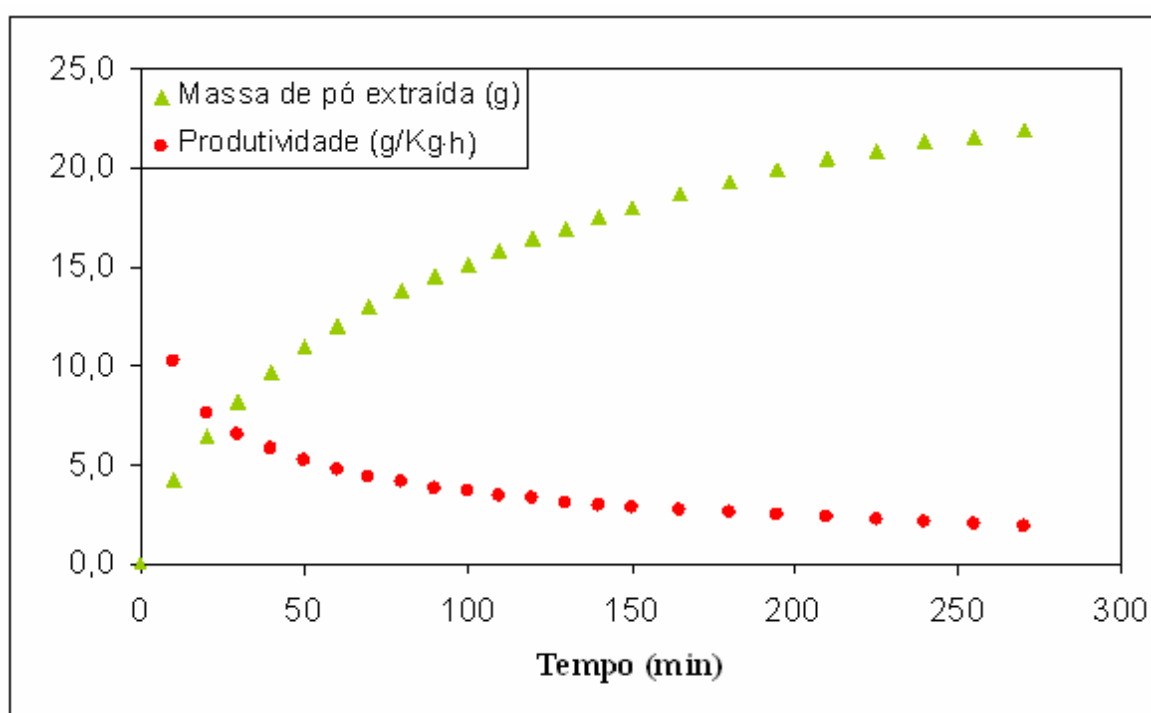


Figura. 4.7: Variação da massa de pó extraída e da produtividade do processo em função do tempo de processamento ($M_S = 2,5\text{kg}$, sem a presença do tubo *draft*).

Verifica-se que a taxa de produção de pó é inicialmente alta, tendendo a cair com o tempo de processamento. No que se refere à produtividade; ocorre um decréscimo de seu valor com o tempo de processamento das sementes, o que era esperado uma vez que ela é

obtida a partir da massa de pó extraída e principalmente ao fato de a quantidade de corante disponível para extração na superfície das sementes de urucum ser limitada.

Foi estabelecido um tempo de processamento (t) de 4 horas para a realização de todos os experimentos deste trabalho, pois foi observado experimentalmente que a partir desse tempo a quantidade de pó coletado no ciclone era muito pequena, ou seja, ocorria uma redução acentuada da taxa de massa de pó extraída e também da produtividade do processo.

Outro fator decisivo para definição desse tempo foi a diminuição da qualidade do pó coletado pelo ciclone após 4 horas de experimento, onde se verificou o aparecimento de pequenos corpos pretos que podem ser vestígios de cascas de sementes produzidos pelo impacto e também pelo atrito das mesmas no interior do equipamento; não sendo por isso viável a continuação do experimento deste ponto em diante.

4.1. 5 - Resultados do Planejamento Experimental

Foi elaborado um planejamento fatorial de dois níveis, descrito no Capítulo 3, com o propósito de analisar a influência de três variáveis: carga de sementes (M_s), presença do tubo draft ($h_t = 7\text{cm}$) e a relação entre a vazão volumétrica do ar na alimentação e a vazão de ar de jorro mínimo (Q/Q_{jm}), no processo de extração mecânica de bixina em leito de jorro.

É importante ressaltar que o valor utilizado como referência para o Q_{jm} para todos os casos foi o da configuração sem o tubo draft. Sendo assim, para a carga de 2,5kg, $Q_{jm} = 83,07 \text{ m}^3/\text{h}$ e para a carga de 2,0Kg, $Q_{jm} = 73,74 \text{ m}^3/\text{h}$. Ressalta-se também que nos ensaios com tubo *draft* foi utilizada uma distância do tubo à base (h_t) de 7 cm.

As condições experimentais utilizadas nestes experimentos, bem como os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4.4. As respostas analisadas foram a massa de corante em pó extraído (M_p), a produtividade final do processo (P_r), bem como a qualidade do corante obtido, em termos da concentração de bixina.

Tabela 4.4: Condições operacionais para análise da influência de três variáveis na extração mecânica da bixina em leito de jorro.

Ensaio	Presença do <i>draft</i>	Q/Q_{jm}	Ms (kg)	Massa de pó extraída M_P (g)	Produtividade P_r (g/Kg.h)	Concentração de Bixina C_b (%)
1	Sim	1,2	2,5	67,58	6,76	33,1
2	sim	1,2	2,0	69,52	8,69	44,3
3	não	1,2	2,5	24,28	2,43	23,4
4	não	1,2	2,0	21,67	2,71	24,5
5	sim	1,1	2,5	69,56	6,96	35,5
6	sim	1,1	2,0	44,32	5,54	48,0
7	não	1,1	2,5	22,78	2,78	23,5
8	não	1,1	2,0	13,97	1,75	25,6

A diferença significativa entre os valores das variáveis respostas, mostrados na Tabela 4.4, indica que elas são influenciadas pelas variáveis independentes estudadas. Para a análise estatística desses resultados foram calculados os efeitos de cada variável independente, bem como das possíveis interações entre as mesmas, nas respostas analisadas.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados dos cálculos dos efeitos estatísticos. São apresentados nesta tabela apenas os efeitos que foram significativos em um teste de hipótese utilizando uma estatística t de Student, com nível de significância de 0,01, ou seja com probabilidade máxima de erro do teste de 10%.

Observa-se nos resultados dos cálculos dos efeitos estatísticos apresentados na Tabela 4.5, que a presença do “*draft*” foi a variável que teve o maior efeito em todas as três respostas estudadas. Este maior efeito é devido as significativas mudanças fluidodinâmicas que ocorre no leito com a introdução do tubo interno, conforme mencionado na Seção 4.1.3.

Tabela 4.5: Efeitos Estatísticos significativos.

	Efeitos Estatísticos		
	Massa	Produtividade	Concentração
Média	41,71	4,63	32,26
X₁ (Carga)	8,68	-	-6,71
X₂ (Draft)	42,07	4,70	15,94
X₃ (Vazão)	8,11	1,02	-1,83
X₁X₂	-	-	-5,12
X₁X₃	-8,35	-1,04	-
X₂X₃	-	-	-1,24
R²	0,976	0,974	0,999

O efeito da presença do *draft* foi sempre positivo indicando que quando se passa da configuração sem *draft* para a configuração com *draft* ocorre sempre um incremento nas respostas. A massa extraída aumentou em média 42g, a produtividade foi elevada em 4,7g/Kgh e a concentração de bixina foi incrementada em 15,94 pontos percentuais.

Conforme discutido anteriormente, a presença do tubo *draft* causa uma canalização do ar para a região de jorro, aumentando a velocidade do ar e das sementes nesta região. Como a região de jorro é onde ocorre a maior atrição devido a mais elevada velocidade das partículas, um incremento dessa velocidade, devido à presença do *draft*, favorece ainda mais a extração mecânica da bixina.

A concentração de bixina do pó extraído é afetada positivamente pela presença do *draft* devido às altas taxas de produção encontradas nesses experimentos. Uma extração mais rápida evita que o corante presente na camada superficial das sementes de urucum fique exposto durante um período maior às altas temperaturas presentes no interior do leito de jorro, o que evita a sua degradação térmica.

A existência de uma maior carga das sementes aumenta a massa de corante extraído, como era esperado, entretanto, esta maior carga não influencia significativamente a produtividade. Nas maiores cargas a concentração de bixina produzida foi inferior.

Como esperado, os maiores níveis de vazão do ar promovem uma elevação na massa de pó extraído e na produtividade. Entretanto, ocorreu uma pequena redução no teor de bixina nas condições em que a maior vazão de ar foi utilizada, o que pode ser devido a resíduos de casca de sementes produzidos pelo impacto e também pelo atrito das mesmas no interior do equipamento nos instantes finais do experimento, quando a camada superficial de corante já tinha sido quase totalmente extraída.

As Figuras 4.8 e 4.9, apresentadas a seguir, são relativas aos experimentos deste planejamento fatorial. Verifica-se na Figura 4.8 que a massa do pó produzido aumenta devido à presença do tubo *draft* (experimentos 1, 2, 5 e 6), e que a taxa de produção de pó nesses experimentos é inicialmente mais alta que aquelas observadas em experimentos sem a presença do *draft*, tendendo a cair com o tempo de processamento em todos os experimentos.

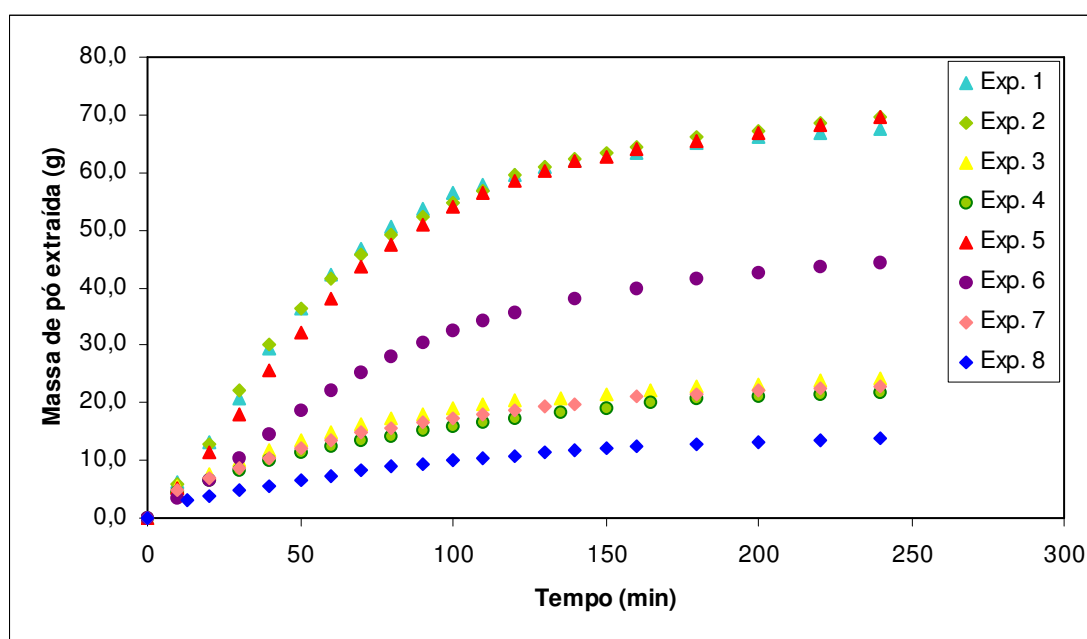


Figura 4.8: Resultados experimentais de variação da massa de pó extraída (M_p) com o tempo para diferentes configurações do leito de jorro.

No que se refere à produtividade, observa-se na Figura 4.9 que ocorre um decréscimo do valor desta resposta com o tempo de processamento das sementes, o que era esperado em função da análise feita anteriormente para a massa. No caso da configuração com tubo *draft* (experimentos 1, 2, 5 e 6) ocorre uma elevação na produtividade nos primeiros instantes dos ensaios, passando a decrescer a partir de um determinado tempo de

processamento. Esta diminuição na produtividade é devido a maior quantidade do corante nas camadas mais externas e também a maior facilidade na extração nesta região.

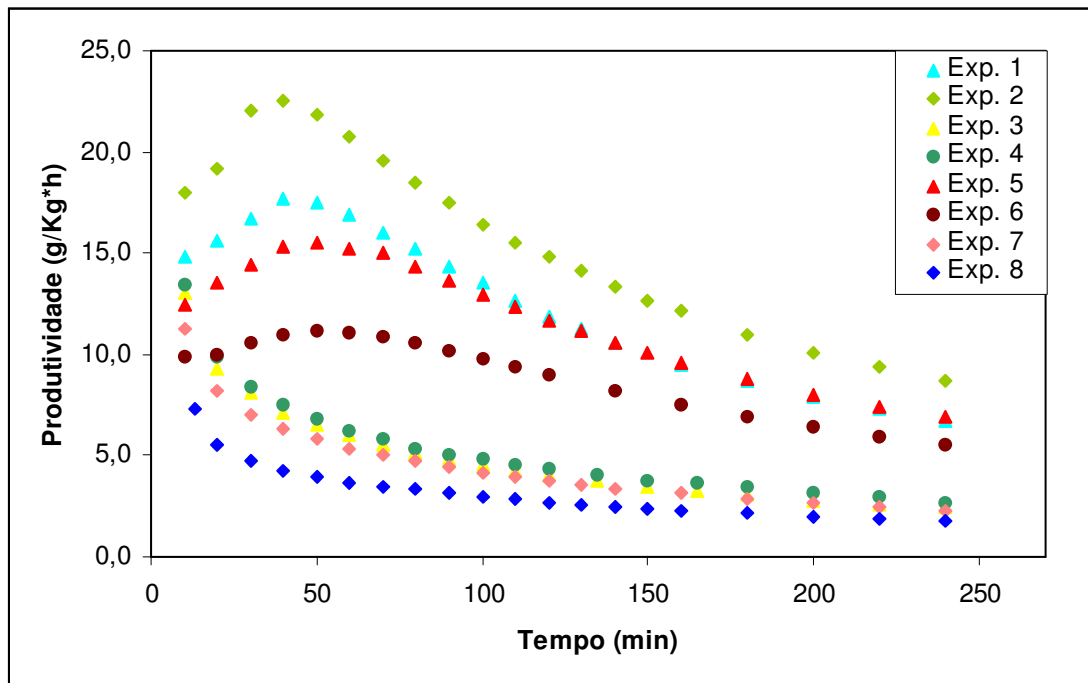


Figura 4.9: Resultados experimentais de variação produtividade (P_T) com o tempo para diferentes configurações do leito de jorro.

4.1.6 - Estudo da Influência da Altura do Tubo *Draft* à Base (h_t) no Processo de Extração Mecânica

Uma vez que a presença do tubo interno no interior do leito mostrou ser a variável que governa a cinética de atrição, aumentando significativamente a extração mecânica da bixina; foram realizados novos experimentos para se determinar a distância ideal do tubo à base do leito (h_t), tendo em vista a maximização da produção do corante. Foram utilizados nos experimentos diferentes valores de h_t (3cm, 4cm, 5cm, 6cm e 7cm) mantendo-se constantes a carga de semente no leito ($M_S = 2,5$ Kg), a vazão de ar ($Q = 99,74$ m³/h) e o tempo de processamento de 4 horas.

A Figura 4.10 mostra os resultados da variação da massa de pó extraído em função do tempo para os diferentes valores de h_t estudados. A Figura 4.11 mostra a variação da massa total de pó produzida (M_T) ao final de cada experimento com a distância do tubo draft à base (h_t).

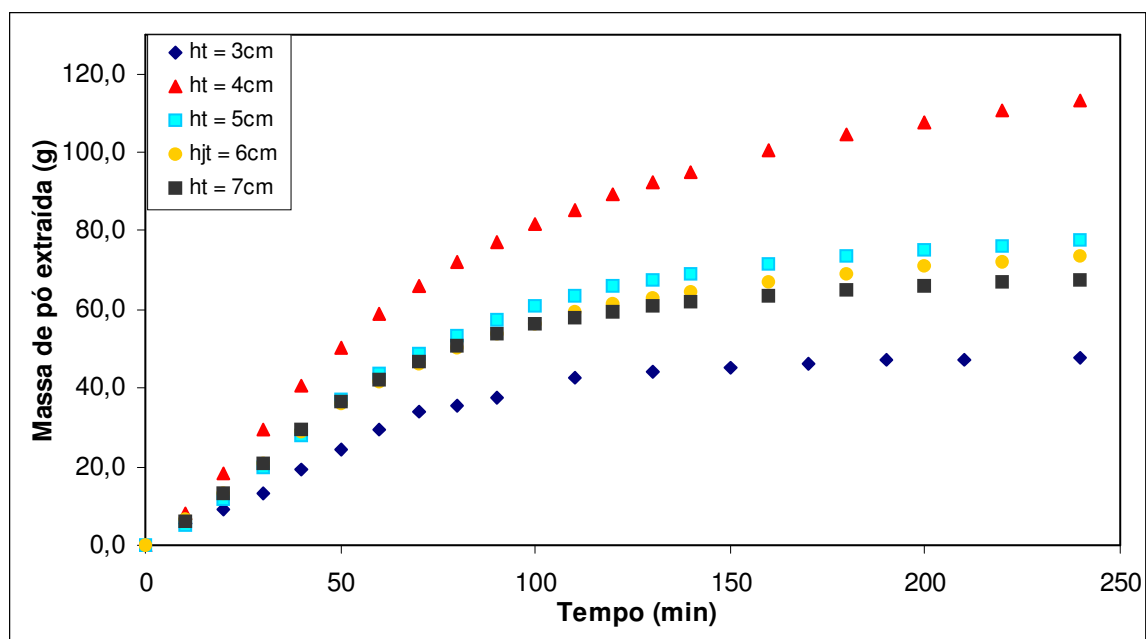


Figura 4.10: Variação da massa de pó extraída (M_P) com o tempo para diferentes alturas de tubo *draft* (h_t).

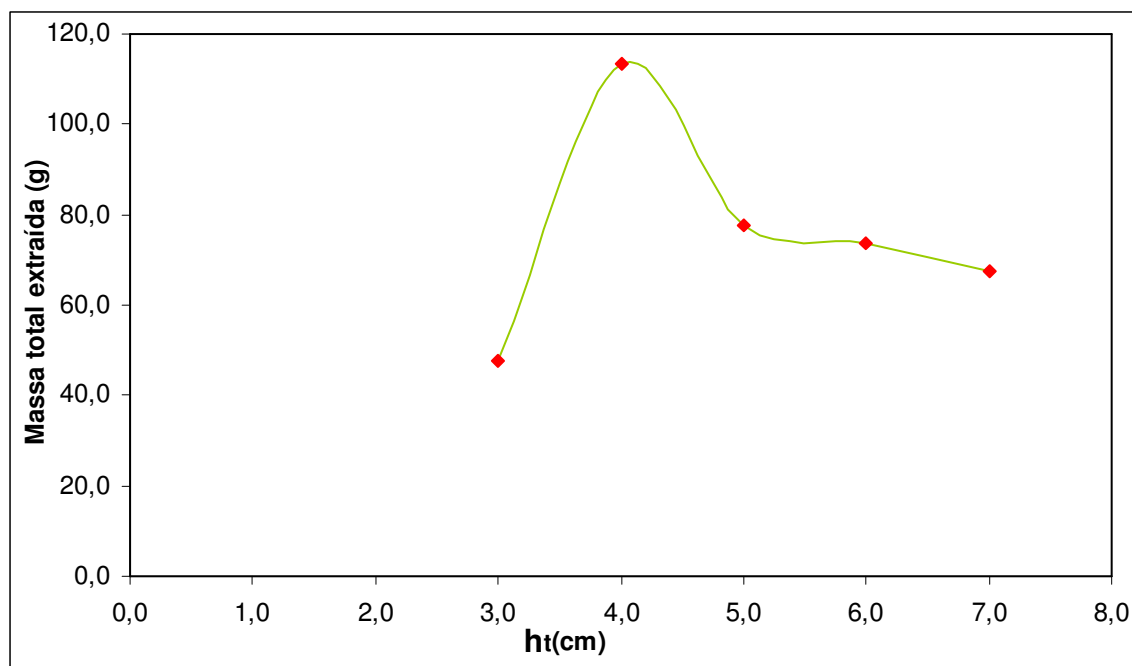


Figura 4.11: Massa total produzida (M_T) em 4 horas de ensaio para diferentes alturas de tubo *draft* (h_t).

Os resultados das Figuras 4.10 e 4.11 mostram que a distância do *draft* à base (h_t) que mais favorece a extração mecânica da bixina em leito de jorro é de 4cm. Em distâncias menores que esta, a circulação das partículas na base do leito é prejudicada, diminuindo assim a quantidade de partículas na região de jorro, fato este que reduz a extração da bixina. Para distâncias (h_t) maiores que esta (4cm), a quantidade de ar canalizada na região de jorro é diminuída, reduzindo assim a velocidade das partículas e conseqüentemente também a quantidade de corante extraído.

4.1.7 - Cinética de Concentração

A Figura 4.12 apresenta o comportamento da variação da concentração de bixina no pó extraído (C_b) no intervalo de tempo entre duas amostragens consecutivas; trabalhando-se na vazão de 99,74 m³/h em duas configurações de leito diferentes: $h_t = 4$ e 7cm.

As curvas apresentadas na Figura 4.12 podem ser tratadas como uma variação espacial de concentração de bixina na camada superficial de corante em pó que recobre as sementes; uma vez que a extração mecânica dessa camada superficial ocorre gradualmente e as amostradas do pó extraído em intervalos consecutivos durante o experimento são analisadas separadamente, como se as subcamadas que recobrem a semente de urucum estivessem sendo analisadas individualmente.

Nota-se então, que as subcamadas externas de corante são pobres em bixina e que a concentração dessa substância tende a aumentar até atingir um valor máximo nas subcamadas mais internas. Essa distribuição de concentração existe porque nas subcamadas externas a bixina é degradada por fatores externos como a luz, temperatura, e microorganismos, já as demais subcamadas ficam protegidas desses fatores pelas subcamadas exteriores, evitando então a degradação do corante. Cabe também ressaltar que as impurezas das sementes estão também presentes na superfície das mesmas, o que também reforça a análise que acaba de ser realizada.

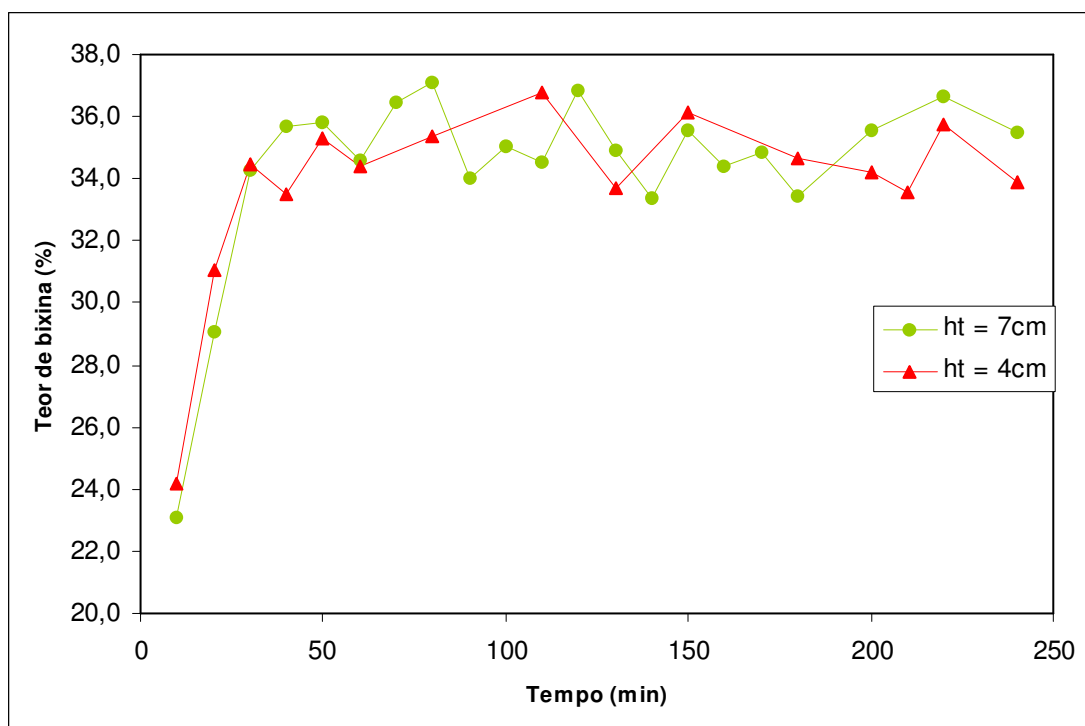


Figura 4.12: Variação da concentração do pó extraído com o tempo para: $h_t = 4$ cm e $h_t = 7$ cm.

4.2 - Resultados Simulados em CFD

4.2.1 - Velocidades de Jorro Mínimo Simuladas, Perfis de Concentração e Vetor Velocidade das Partículas

Simulações da fluidodinâmica do leito por meio de CFD foram realizadas com o propósito de verificar a influência da inserção do tubo *draft* na trajetória das partículas e na distribuição de porosidade no leito, para as duas massas utilizadas no planejamento experimental (2 e 2,5 kg), que correspondem a 17 e 19 cm de altura de leito estático respectivamente.

As simulações foram realizadas na condição de jorro mínimo e com uma velocidade de entrada de ar (v) maior que a velocidade de jorro mínimo (v_{jm}) da configuração sem *draft*.

A Figura 4.13 mostra a distribuição de fração volumétrica de sólidos para um leito com 2 kg de sementes de urucum, em que se pode ver a condição de jorro mínimo

para a configuração sem o tubo *draft* (caso a), uma condição de velocidade maior que o jorro mínimo ($U = 1,18 U_{jm}$), ainda na configuração sem o *draft* (caso b) e por fim a configuração com o *draft* (caso c) na mesma velocidade do caso anterior (b), ou seja $U = 1,18 U_{jm}$, sendo que o valor U_{jm} adotado foi do caso (a) sem o *draft*.

A Figura 4.14 mostra a distribuição de fração volumétrica de sólidos para um leite com 2,5 kg de sementes de urucum, em que se pode ver a condição de jorro mínimo para a configuração sem o tubo *draft* (caso a), uma condição de velocidade maior que o jorro mínimo ($U = 1,11 U_{jm}$), ainda na configuração sem o *draft* (caso b) e por fim a configuração com o *draft* (caso c) na mesma velocidade do caso anterior (b), ou seja $U = 1,11 U_{jm}$, sendo que o valor U_{jm} adotado foi do caso (a) sem o *draft*.

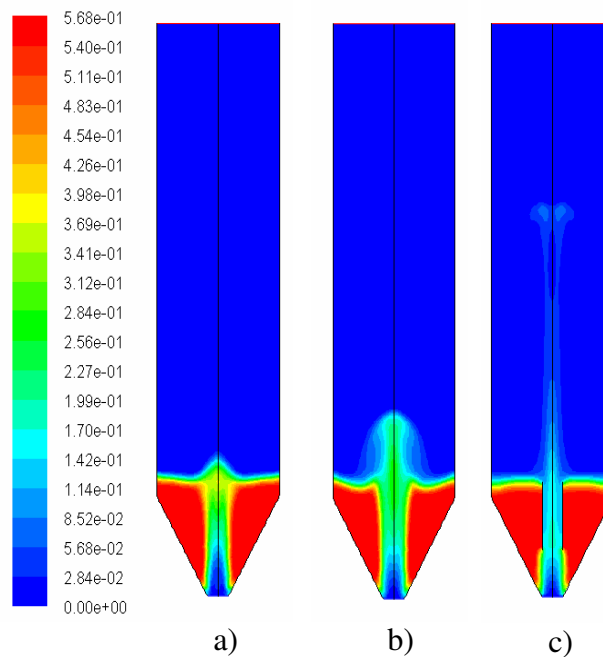


Figura 4.13: Distribuição de fração volumétrica de sólidos para $M_s = 2$ kg, a) U_{jm} ; b) $U = 1,18 U_{jm}$ sem tubo *draft*; c) com tubo *draft*, $h_t = 7$ cm, na mesma velocidade do caso b.

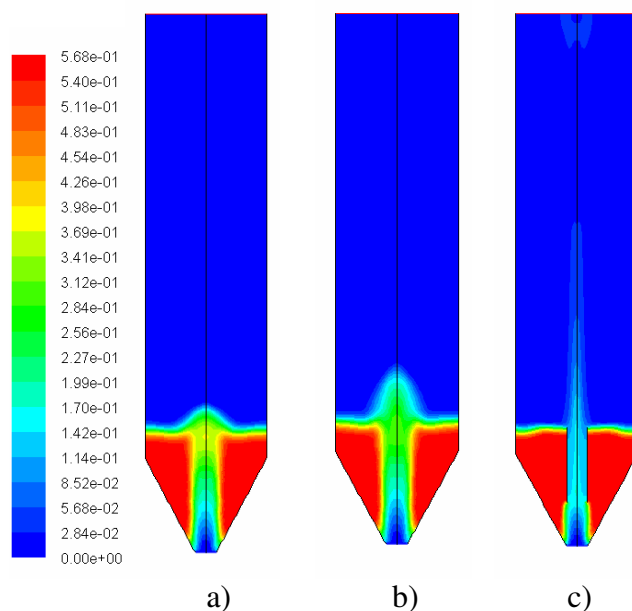


Figura 4.14: Distribuição de fração volumétrica de sólidos para o leito com $M_S = 2,5$ kg, a) U_{jm} ; b) $U = 1,11 U_{jm}$ sem tubo *draft*; c) com tubo *draft*, $h_t=7$ cm, na mesma velocidade do caso b.

Os resultados das figuras 4.13 e 4.14 mostram que a distribuição de concentrações de sólidos foi significativamente influenciada pela presença do tubo *draft* e que, como esperado, para uma mesma velocidade do ar obtém-se uma maior altura de fonte na configuração com o *draft*.

A trajetória simulada das partículas indicada pelo vetor velocidade de sólidos, para o carregamento de 2kg, pode ser vista na Figura 4.15, para as configurações sem *draft* (a) e com tubo *draft* (b). Nestas simulações a velocidade de alimentação do ar foi equivalente à $U = 1,18 U_{jm}$, sendo que o valor usado para o U_{jm} foi o da configuração sem o *draft*. Observa-se nos resultados simulados por CFD (Figura 4.15) que a configuração com tubo *draft* possibilita a obtenção de maiores níveis de velocidade das sementes, favorecendo assim a extração mecânica da bixina, conforme constatado anteriormente.

O mesmo comportamento pode ser observado para o carregamento de 2,5 kg, disposto na Figura 4.16. Nestas simulações a velocidade de alimentação do ar foi equivalente à $U = 1,11 U_{jm}$, sendo que o valor usado para o U_{jm} foi o da configuração sem o *draft*. Para o carregamento de 2,5 kg, o efeito da inserção do tubo *draft* é mais acentuado e podemos perceber que a partícula é lançada sobre a seção de saída onde existe a tela, favorecendo ainda mais a extração mecânica da bixina.

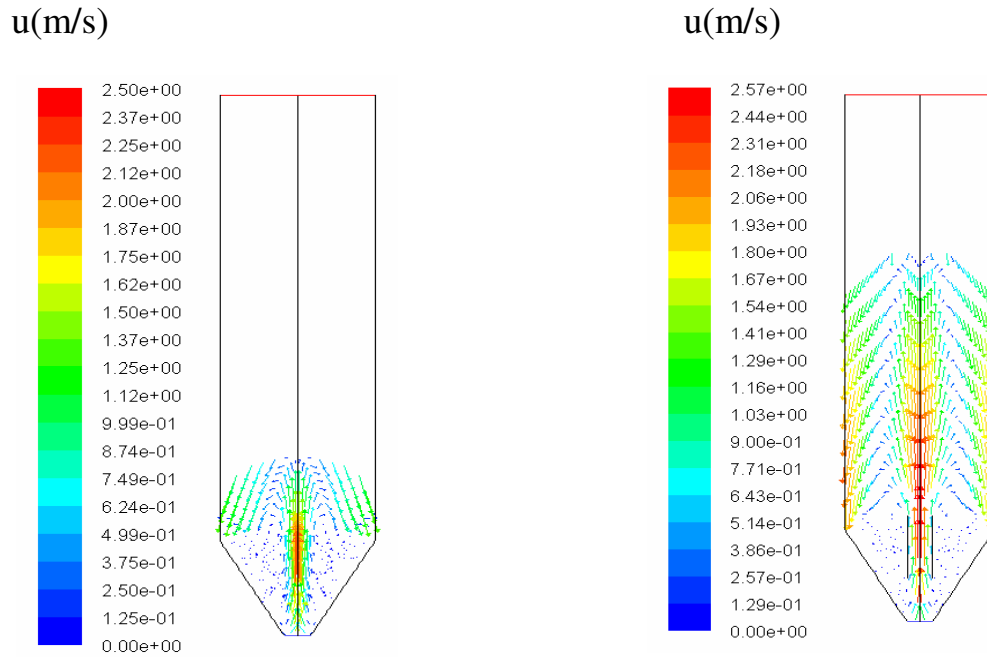


Figura 4.15: Vetor de velocidade das partículas ($M_S = 2$ kg): a) leito de jorro convencional; b) leito de jorro com tubo *draft* ($h_t = 7$ cm).

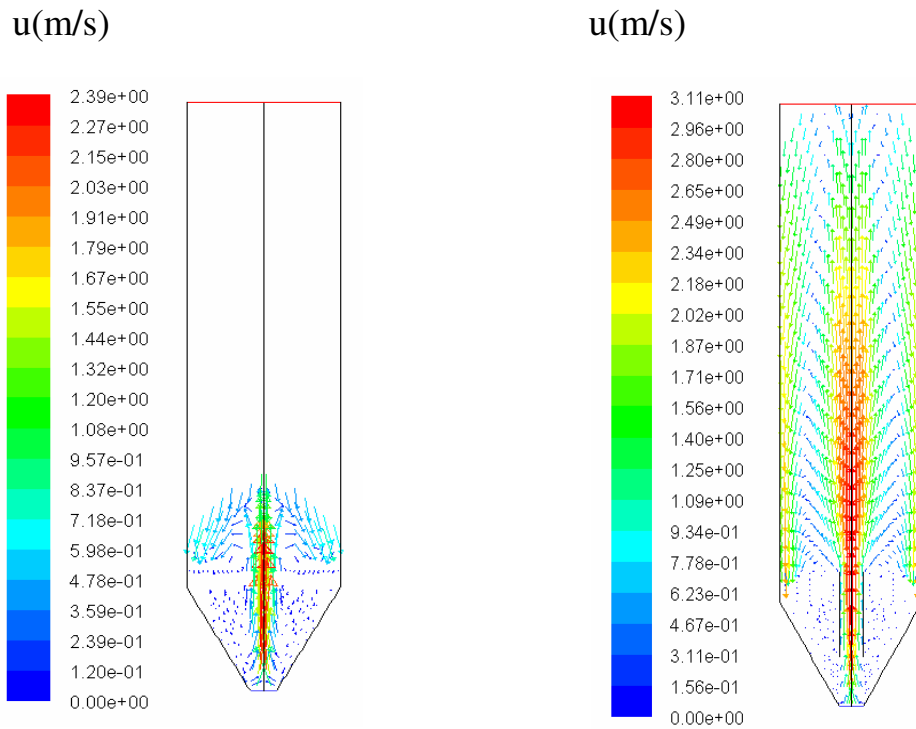


Figura 4.16: Vetor de velocidade das partículas ($M_S = 2,5$ kg): a) leito de jorro convencional, b) leito de jorro com tubo *draft* ($h_t = 7$ cm).

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre a velocidade de ar para a condição de jorro mínimo obtida por simulação e medida experimentalmente na entrada de ar do leito de jorro ($D_i = 3,5\text{cm}$), para as duas cargas de sementes de urucum utilizadas. Nas simulações em CFD foram obtidos valores de velocidade para a condição de jorro mínimo próximo dos valores experimentais, com erros relativos na ordem de 4%, resultados pouco piores que aqueles obtidos com a equação de MATHUR E GISHELER (ver Tabela 4.3).

Tabela 4.6: Velocidade de jorro mínimo simulada (CFD) e experimental para a configuração sem draft.

	Experimental (m/s)	Simulada (m/s)	Desvio (%)
2 kg de sementes	22,90	21,97	4,1
2,5 kg de sementes	24,84	26,00	4,7

4.2.2 - Estudo da Influência da Distância do Tubo *Draft* à Base Via CFD

Foram realizadas simulações em CFD com objetivo de simular o leito de jorro com o tubo *draft* para as diferentes distâncias do *draft* à base ($h_t = 3, 4, 5, 6$ e 7cm) dos experimentos da Seção 4.1.6, nos quais foram adotados: $M_S = 2,5\text{ Kg}$, ou seja, $H_0 = 19\text{cm}$ e $Q = 99.74\text{ m}^3/\text{h}$. Estas simulações visaram compreender porque a distância $h_t = 4\text{cm}$ conduziu aos melhores resultados na extração da bixina, conforme constatado nos resultados da Figura 4.11, apresentada na Seção 4.1.6.

A malha mostrada na Figura 3.2 foi utilizada em todas as simulações e para cada h_t foi gerado um determinado numero de células, faces e de nós, mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Número de células, faces e nós gerados em cada configuração do leito de jorro.

h_t (cm)	Células	Faces	Nós
3	5683	10982	5299
4	5810	11257	5447
5	5808	11251	5443
6	5818	11264	5446
7	5816	11258	5442

A distribuição da fração volumétrica de urucum para todas as condições simuladas pode ser vista na figura a seguir.

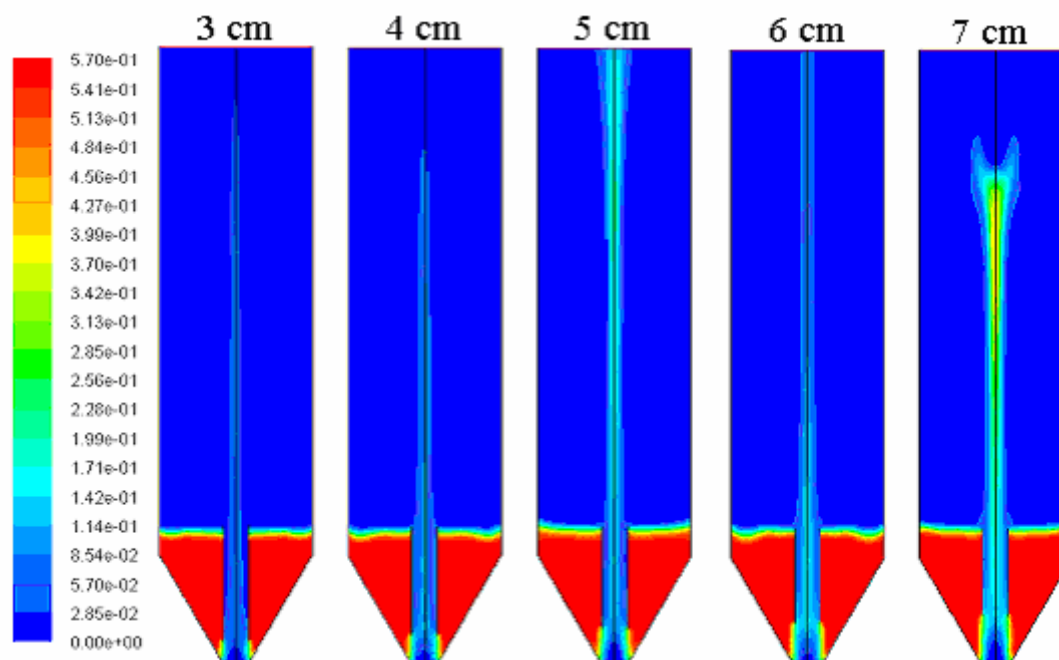


Figura 4.17: Distribuição de fração volumétrica de sólidos para o leito de jorro com o tubo *draft* para as diferentes distâncias do draft à base ($h_t = 3, 4, 5, 6$ e 7 cm).

Os resultados simulados da Figura 4.17 mostram a diferença da distribuição de concentração na região abaixo do tubo *draft* para as cinco distâncias (h_t) utilizadas. Destaca-se também o fato de que para a maior distância ($h_t = 7$ cm) os sólidos não atingem o topo da coluna, onde existe a tela, não colidindo com a mesma. Este fato explica a menor extração da distância $h_t = 7$ cm em comparação com $h_t = 3, 4, 5$ ou 6 cm.

A velocidade do ar ao longo do leito de jorro para as quatro distâncias do tubo *draft* à base ($h_t = 4, 5, 6$ e 7 cm) pode ser vista na Figura 4.18. Através de uma análise qualitativa não é possível perceber uma grande diferença entre as cinco distâncias simuladas; contudo, a velocidade do ar foi ligeiramente maior em toda a região central do leito para $h_t = 4$ cm, tendendo a decrescer nessa região com o aumento de h_t .

A velocidade das sementes de urucum para as cinco distâncias do tubo draft à base ($h_t = 3, 4, 5, 6$ e 7 cm) é apresentada na Figura 4.19.

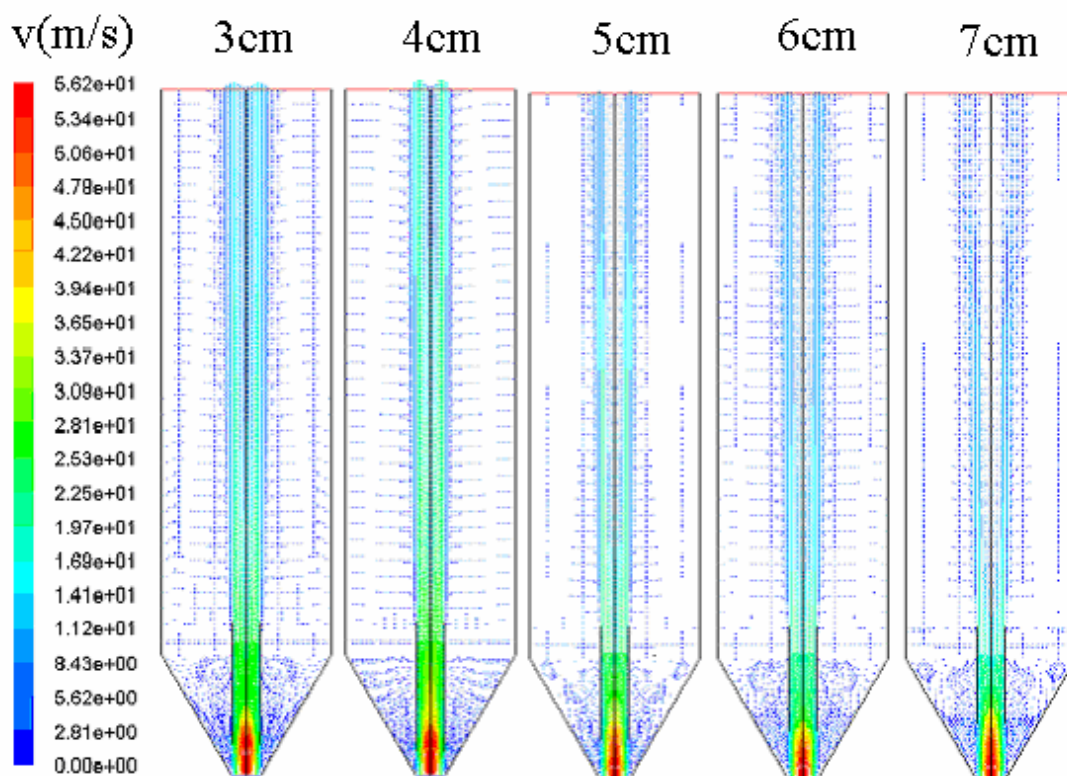


Figura 4.18: Velocidade do ar ao longo do leito de jorro para $h_t = 4, 5, 6$ e 7 cm.

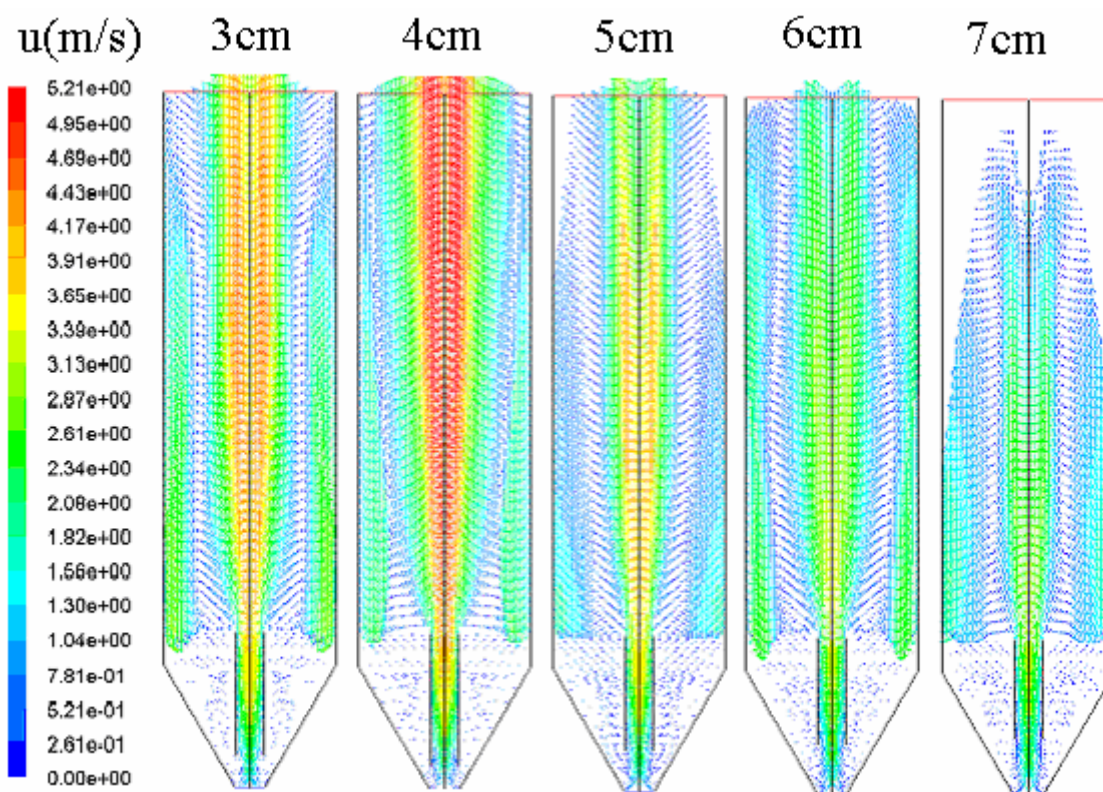


Figura 4.19: Velocidade do urucum ao longo do leito de jorro para $h_t = 3, 4, 5, 6$ e 7 cm.

Os resultados simulados da Figura 4.19 mostram que a configuração com a distância do tubo à base (h_t) igual a 4cm foi aquela que apresentou os maiores níveis de velocidades das partículas, principalmente na região central do leito, sendo as menores velocidades obtidas para a configuração com $h_t = 7$ cm. Altas velocidades no topo da coluna do leito favorecem muito mais a extração devido ao impacto das sementes com a tela, posicionada entre a coluna e o cone superior do leito de jorro; fixada com o propósito de impedir o arraste das sementes para o ciclone coletor de pó, mas que também possui um papel importante na extração do pó.

Estes resultados das simulações em CFD explicam os resultados experimentais apresentados nas Figura 4.11, onde a configuração com $h_t = 4$ cm foi aquela que apresentou a maior massa de corante extraído.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Conforme relatado na literatura e observado neste trabalho, a variação da distância entre o tudo *draft* e a base do leito (h_t), possui forte influência nas condições do escoamento do fluido e da partícula. Quanto maior o valor de h_t maior será a quantidade de ar que escoar pela região anular, aumentando assim os valores de velocidade e queda de pressão de jorro mínimo.

A taxa de corante extraído é inicialmente alta, tendendo a cair com o tempo de processamento. No que se refere à produtividade; ocorre um decréscimo de seu valor com o tempo.

A partir do planejamento experimental realizado para estudar o efeito da carga de sementes, da vazão do ar e da presença do tubo *draft* na extração mecânica da bixina foi possível concluir que a presença do “*draft*” foi a variável que teve o maior efeito em todas as respostas estudadas (massa de pó extraído, produtividade e concentração de bixina). A presença do tudo *draft* causa uma canalização do ar para a região de jorro, aumentando a velocidade do ar e das sementes nesta região. Como essa região é onde ocorre a maior atrição devido a mais elevada velocidade das partículas, um incremento dessa velocidade, devido à presença do *draft*, favorece ainda mais a extração mecânica da bixina.

Os resultados experimentais mostraram que a distância do *draft* à base (h_t) que mais favorece a extração mecânica da bixina em leito de jorro foi de 4cm.

Os resultados da simulação por CFD confirmaram o melhor desempenho para a configuração do leito de jorro com tubo *draft* e $h_t = 4$ cm, demonstrando que nessa condições as sementes de urucum possuem maiores velocidades.

Os resultados do comportamento da variação da concentração de bixina no pó extraído em função do tempo mostraram que a concentração aumentou nos primeiros instantes da extração, atingindo em seguida um patamar constante. Isso pode ser explicado devido ao fato de que as subcamadas externas de corante são pobres em bixina e que a concentração dessa substância tende a aumentar até atingir um valor máximo nas subcamadas mais internas. Nas subcamadas externas a bixina é degradada por fatores

externos como a luz, temperatura, e microorganismos, além de conter impurezas, já as demais subcamadas ficam protegidas desses fatores.

Sugestões de Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Utilizar um leito de altura menor aumentando a intensidade do impacto das sementes na tela na parte superior do leito.
- Comparar a extração mecânica da bixina em leito de jorro, com outras técnicas de extração, tais como extração por solventes e extração supercrítica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, K., MUKHERJEE, A., CHAKRABARTI, J. In Vivo Cytogenetic Studies On Mice Exposed To Natural Food Colourings. *Food And Chemical Toxicology*, Oxford, V.32, N.9, P.837-838, 1994.
- ALVES, R. W. Extração e Purificação de Compostos de Urucum. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Engenharia Química / UFSC, Florianópolis, 2001.
- BALIANE, A. A cultura do urucueiro. Niterói: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio de Janeiro. 1982. 16p.
- BECKER, H. A. (1961). An investigation of laws governing the spouting of coarse particles. *Chemical Engineering Science*, 13, 245–262.
- BOREM, A. Sistemas reprodutivos das espécies cultivadas. In: Borém, A. Melhoria de Plantas. Viçosa, UFV, 1997. p. 31-39.
- CARVALHO, P. R. N. Extração e utilização do corante de urucum, In: SÃO JOSÉ, A. R., REBOUÇAS, T. N. H. A cultura do urucum no Brasil. Vitória da Conquista-Ba, UESB, 1990. p. 69-76.
- CONCEIÇÃO FILHO, R. S. Recobrimento de Sementes de Soja com Fertilizantes em Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Uberlândia, UFU. 1997.
- Corantes Naturais: Várias Tonalidades, Várias Aplicações. Equipe Técnica Chr. Hansen. *Revista Engenharia De Alimentos*. Julho, 1997 – N. 14. Editora Rpa. São Paulo, Sp.
- Corantes: Tendência Acentuada A Favor Dos Naturais. *Revista Aditivos Ingredientes*. Novembro/Dezembro, 2000 – N.11. Editora Insumos. São Paulo, Sp.
- CORREIA, M.P. Dicionário das Plantas Úteis do Brasil e das Exóticas Cultivadas. Rio de Janeiro: MA/IBDF, 1978. v.4, p.358-359.
- CUNHA, L. G. C., FREIRE, J. M., FARIAS, E. Diagnóstico da Cultura do Urucum Bixa Orellana L. Na Ibiapaba. Fortaleza-CE: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Ceará, 1973, 37 p.
- DING, J. e GIDASPOW D., A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. *AIChE Journal*, 36, p. 523-538.1990.
- DU, W., BAO, X., XU, J. e WEI, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, p. 1401-1420, 2006-a.
- DU, W., BAO, X., XU, J. e WEI, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of

- restitution of particles”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, p. 4558-4570, 2006-b.
- DUARTE, C. R., SANTANA, R. C., NETO, J. L. V., BORGES, J. E., MURATA, V.V. e BARROZO, M.A.S. Estudo Experimental e de Simulação Sobre a Movimentação das Partículas em Um Leito De Jorro. XXXI – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2004.
- DUARTE, C. R., NETO, J. L. V., SANTANA, R. C., BORGES, J. E., MURATA, V.V. e BARROZO, M.A.S. Experimental and Numerical Study of the Spouted Bed Fluid-Dynamics. 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. 2005.
- DUARTE, C.R., Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 220 p., 2006.
- EMATER-PB. Dados Pluviométricos das Microrregiões de Guarabira e Brejo Paraibano. João Pessoa: EMATER-PB, 2001.
- EPSTEIN, N., & GRACE, J. R. (1984). Spouting of Particulate Solids. In L. Otten, & M. E. Fayed (Eds.), *Handbook of Powder Science and Technology*. New York: Van Nostrand Reinhold (Chapter 11).
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, 48(2), p. 89-94. 1952.
- EZEQUIAS FILHO, P.S., SOUZA, G.M., PEREIRA, G.G E SOUZA, J.O., 1994, Extração Mecânica da Bixina em Leito de Jorro Cônico; Relatório Interno. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. MG.
- FALESI, I. C.. URUCUZEIRO: Recomendações básicas para o seu cultivo Belém: 1987. 27 p
- FARIA, LÊNIO JOSÉ GUERREIRO DE, COSTA,CRISTIANE MARIA LEAL, (COODS).Tópicos Especiais Em Tecnologia De Produtos Naturais. Belém UFPA, NUMA, POEMA, 1998. 302P. , IL. (Série Poema; N.7).
- GAVA A. J. Alguns Aspectos Da Controvérsia Sobre Aditivos Para Alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Alimentacao Numero 86, Julho/Agosto-88. P.14-16
- GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., and DING, J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach. *Proc. of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization* , 75-82. .1992.
- GOMES, P. A Cultura do Urucuum em Sítios e Fazenda, São Paulo-SP, v.33, n.11, p.27-28, 1967

- GORSHTEN, A. E., & MUKHLENOV, I. P. (1967). The Movement of Solid Material in the Spouting Bed. *Zhurnal Prikladnoi Khimii* (Leningrad), 40, 2469–2475.
- HE, Y. L., LIM, C. J., GRACE, J. R., ZHU, J. X., & QIN, S. Z. (1994a). Measurements of Voidage Profiles in Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72, 229–234.
- HE, Y. L., QIN, S. Z., LIM, C. J., & GRACE, J. R. (1994b). Particle Velocity Profiles and Solid Flow Patterns in Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72, 561–568.
- HE, Y. L., LIM, C. J., & GRACE, J. R. (1992). Spouted Bed and Spout Fluid Bed Behaviour in a Column Diameter of 0.91m. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70, 848–857.
- ISHIKURA T., H. NAGASHIMA, M. IDE.(2002) Hydrodynamics of a Spouted Bed With a Porous Draft Tube Containing a Small Amount of Finer Particles. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University, Fukuoka 814-0180, Japan
- KRZYWANSKI, R. S., EPSTEIN, N., & BOWEN, B. D. (1992). Multi-Dimensional Model of a Spouted Bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70, 858–872.
- LIM, C. J., & MATHUR, K. B. (1978). Modelling of Particle Movement in Spouted Beds. In J. F. Davidson, & D. L. Keairns (Eds.), Press.
- LINGERFELT, C.W.(1984), O Urucum Como Alternativa. *Informativo Rural*, Rio de Janeiro, v. 163, p.20-4.
- LOURENÇO, R.O., Identificação e Monitoramento de Regimes em Leito de Jorro Convencional, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 125 p., 2006.
- LUN, C. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J. e CHEPURNIY, N., Kinetic Theories of granular flow: inelastic particles in a Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field, *J. Fluid Mech.*, VoL.140, p.223-256, 1984
- MALISKA, C. R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas, ed. LTC, Rio de Janeiro, 1995.
- MASSARANI, G., PASSOS, M.L., BARRETO, D.W., (1992), Production of Annatto Concentrates in Spouted Beds, *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, Vol. 70, PP. 954-959.
- MATHUR, K.B. & EPSTEIN, N., Spouted Bed, New York, Academic Press, 304 P. 1974

- MATHUR, K.B. AND GISHLER, P.E., A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles, *AIChE Journal*, Vol. 1, pp. 157-164 (1955).
- MELO, A.M.L. Mercado de colorífico In: Congresso Brasileiro De Corantes Naturais, 4., 2000. João Pessoa. Resumo. João Pessoa: SBCN, 2000. p.33.
- MENDONÇA, J.C.F (1999), Estudo da Produção de Bixina Por Extração Mecânica. Dissertação De Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia Química. Belo Horizonte, MG.
- MUNUERA, M. Aplicação de Corantes Naturais em Alimentos. In: Congresso Brasileiro De Corantes Naturais, 4., 2000. João Pessoa. Resumo. João Pessoa: SBCN, 2000. p.32.
- OGAWA, S., UMEMURA, A., and OSHIMA, N., J. (1980). On the Equations of Fully Fluidized Granular Materials. *Appl. Math. Phys.*, 31, 483.
- OLAZAR MARTIN, MARIA J. SAN JOSE, MIGUEL A. IZQUIERDO, ALVARO ORTIZ DE SALAZAR, JAVIER BILBAO (2001). Effect of Operating Conditions on Solid Velocity in The Spout, Annulus and Fountain of Spouted Beds. Departamento de Ingenieria Química, Universidad del País Vasco, Apartado 644, E-48080, Bilbao, Spain
- OLIVEIRA. J.S. (2005) Caracterização, Extração e Purificação Por Cromatografia de Compostos de Urucum (*Bixa Orellana* L.). Dissertação de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos
- OLIVEIRA, V. P. (1990), Tratos Culturais Do Urucum. In: São José, A. R.; Rebouças, T. N. H. A Cultura Do Urucum No Brasil. Vitória Da Conquista, BA: UESB,. P.46-49.
- PASSOS, M. L., OLIVEIRA, L. S., FRANÇA, A. S., FREITAS, M. E. A. E MASSARANI, G., (1998), Bixin Powder Production in Conical Spouted Bed Unit.; *Drying Technology Journal - Special Issue*, 16 (9&10): 1855 - 1870
- PRESTON, H.D. E RICKARD, M.D., (1980), Extraction and Chemistry of Anatto. *Food Chemistry*, 5(1): 47-56.
- RAMALHO, R. S.; PINHEIRO, A. L.; DINIZ, S. D. (1987). Informações Básicas Sobre a Cultura e Utilização do Urucum *Bixa Orellana* L. Viçosa, UFV. 22 p. (Boletim Técnico, 59).
- ROY, D., LARACHI, F., LEGROS, R. AND CHAOUKI, J., (1994), A Study of Solid Behavior in Spouted Beds using 3D Particle Tracking, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 72, pp. 945-952.

- ROY, D., LARACHI, F., LEGROS, R. AND CHAOUKI, J. (1994), A Study of Solid Behavior in Spouted Beds Using 3D Particle Tracking, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 72, pp. 945-952.
- ROVERO, G., PICCININI, N., & LUPO, A. (1985). Solid Velocities In Full And Half-Sectional Spouted Beds. *Entropie*, 124, 43–49.
- SOUZA C. F.; Aditivos: Aplicações e Aspectos Toxicológicos em Produtos de Confeitaria, Particulamente em Glacê e Coberturas Para Bolos. 2000. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia de Alimentos, Instituto de Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000, Porto Alegre, Br.
- SUCIU, G. C., & PATRASCU, M. (1978). Particle Circulation in a Spouted Bed. *Powder Technology*, 19, 109–114.
- SYAMLAL, M. and O'BRIEN, T. J., Computer simulation of bubbles in a fluidized bed, *AIChE Symposim Series*, Vol. 85, p. 22-31, 1989.
- TAVARES, L.E., DIAS, A R., ATAÍDE, C. H. E BARROZO, M. A. S.(1999), Extração Mecânica da Bixina em Leito de Jorro: Influência do “Draft”, da Carga do Material e da Vazão de Ar. Congresso De Engenharia de Processos do Mercosul, Empromer’ 99 – Florianópolis- Santa Catarina Brasil.
- TEIXEIRA C. G., Aditivos Em Alimentos. Boletim Do Centro Tropical De Pesquisas E Tecnologia De Alimentos. N18 – Junho De 1969. P.1-22.
- THORLEY, B., SAUNBY, J. B., MATHUR, K. B., & OSBERG, G. L. (1959). An Analysis of Air and Solids Flow in a Spouted Wheat Bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 37, 184–192.
- VAN VELZEN, D., FLAMN, H. J., LANGENKAMP, H., & CASILE, A. (1974). Motion of Solids in Spouted Beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52, 156–161.
- VIEIRA NETO, J.L. (2007); Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica de Um Leito De Jorro Com Tubo *Draft*. Dissertação De Mestrado Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 92 p..
- VILELA, A.O., BARONCELLI, F., QUEIROZ, F.M., MENDONÇA, J.C.F., CAPANEMA, L.X.L. E RESENDE, M.S., (1996), Extração Mecânica de Bixina da Semente de Urucum em Leito de Jorro Cônico; Relatório Interno DEQ/UFGM, Belo Horizonte, MG, 69p.
- WEN, C. Y. and YU, Y. H (1966), Mechanics of Fluidization. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 62, p.100-111.

APÊNDICE A

Placa de Orifício: Calibração

A placa foi calibrada com o auxílio de um termo-anemômetro de fio quente (Marca VelociCalc TSI, Modelo 8357) com faixa de operação de 0 à 25 m/s e um manômetro de tubo em U, utilizando-se água como líquido manométrico.

O perfil da velocidade do ar no interior da tubulação para uma determinada vazão foi obtido em um trecho reto da tubulação com diâmetro interno de 3in de onde foram coletados com o auxílio do anemômetro cinco pontos de velocidade ao longo do interior da tubulação. A queda de pressão fornecida pela placa de orifício foi obtida em um manômetro de tubo em U, acoplado nas tomadas de pressão dos flanges da placa. Os perfis de velocidade, junto com a perda de carga fornecida pela placa, levantados para diversas vazões de ar são mostrados na Tabela A1.

Tabela A1: Perfis de velocidade e queda de pressão fornecida pela placa de orifício.

PONTO	Velocidade (m/s)					ΔP (cmH ₂ O)
	7 cm	5,3 cm	3,9 cm	2,1 cm	0,7 cm	
1	7,05	6,65	6,10	4,55	4,08	25,80
2	6,95	6,50	5,85	4,35	3,80	24,10
3	6,30	6,20	5,65	4,05	3,61	22,60
4	6,55	5,95	5,50	3,90	3,65	21,80
5	6,05	5,70	5,15	4,35	3,60	19,80
6	5,75	5,50	5,15	4,13	3,67	18,10
7	5,30	5,25	4,70	3,35	3,08	16,40
8	5,13	5,06	4,39	3,55	2,95	14,60
9	5,04	4,65	4,18	2,77	3,05	13,30
10	4,76	4,49	3,99	2,80	2,82	12,00
11	4,45	4,07	3,68	2,67	2,57	10,20
12	3,60	3,40	3,15	2,60	2,05	7,60
13	2,08	2,13	2,08	1,71	1,68	2,80
14	1,13	1,07	1,08	1,27	1,43	1,00

Com os valores de velocidade pontuais e suas posições ao longo da tubulação de coletas da Tabela A1, foi realizada um ajuste para se obter o perfil ou função velocidade. A partir da função velocidade e da área interna do tubo, foi possível obter a vazão de ar fornecida pelo soprador utilizando-se a Equação 1.

$$Q = \int V(x) dA(x) \quad (1)$$

As funções velocidade ajustadas e os valores de vazões obtidos pela integração da Equação (1) são mostrados na Tabela A2.

Tabela A2: Funções velocidade ajustadas e vazão de ar fornecida pelo soprador

PONTO	Ajuste da função velocidade: $v = Ax+B$			Vazão Q (m3/h)
	A	B	R ²	
1	0,5104	5,7880	0,9765	95,67
2	0,5360	5,5972	0,9827	92,37
3	0,4779	5,2575	0,9554	86,85
4	0,3948	5,0489	0,9879	85,98
5	0,3506	4,9101	0,9751	83,62
6	0,4625	4,4164	0,9542	81,43
7	0,3706	4,2901	0,9733	72,95
8	0,3742	4,0128	0,9436	70,93
9	0,3545	3,8429	0,9628	66,26
10	0,3282	3,5536	0,9786	63,46
11	0,2464	3,0090	0,9748	58,69
12	0,0776	1,9515	0,8700	49,80
13	-0,0505	1,1808	0,8200	32,57
14	-0,0307	0,9870	0,7950	20,12

O coeficiente “K” da placa de orifício foi obtido através da Equação (2), que é uma simplificação da Equação de Bernoulli, pelo ajuste dos valores experimentais de vazão de ar fornecida pelo soprador e de queda de pressão produzida pela placa de orifício à essa equação, Figura A3.

$$Q = K\sqrt{\Delta P} \quad (2)$$

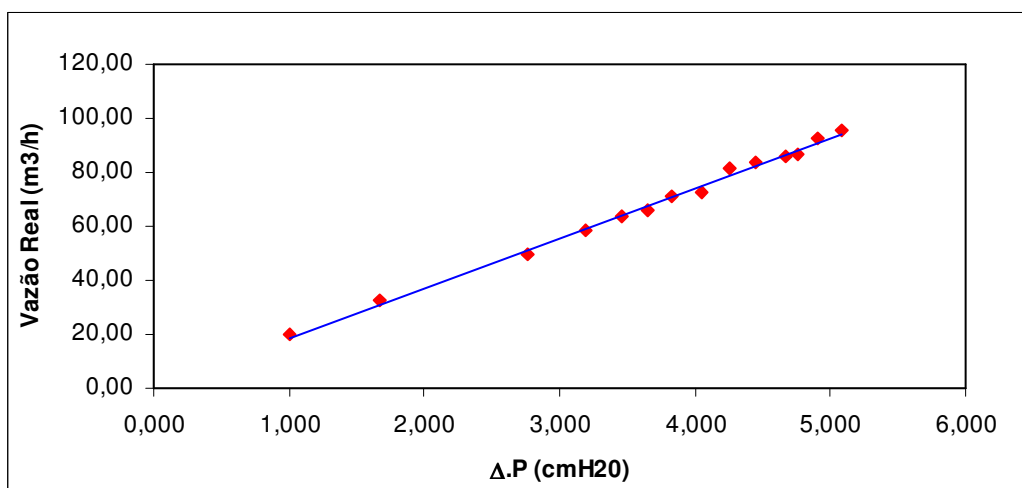


Figura A3: Ajuste dos valores de vazão de ar e queda de pressão fornecida pela placa a à Equação 2.

O valor para o coeficiente “K” da placa de orifício utilizada na unidade experimental encontrado pelo procedimento descrito acima foi de $K = 18,56(m^3 / cmH_2O^{1/2} \cdot h)$, com $R^2 = 0,9975$.

APÊNDICE B

Calibração da Instrumentação de Aquisição de Dados

A instrumentação de aquisição de dados, composta por um transdutor de pressão do tipo sonda (Marca GEMS SENSORS – Modelo K053266) e um transdutor de pressão diferencial com de escala 25 inH₂O (Marca COLE PARMER – Modelo PTX500), foi calibrada utilizando-se dois manômetros de tubo em U; um acoplado à base do leito de jorro com umas das extremidades aberta o e outro acoplado aos flanges da placa de orifício para medidas de queda de pressão na placa e para a obtenção da vazão de ar na tubulação pela Equação (2). Os sinais dos transdutores de pressão foram convertidos para a forma digital em termos de voltagem pela placa de aquisição de dados da unidade experimental (Marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – PCI-6021E), e processados com o auxílio do *software* LabVIEWTM, versão 8.2.1.

Para a calibração dos instrumentos foram realizadas medidas de forma simultânea de queda de pressão na placa de orifício e na base do leito de jorro para várias vazões de ar, coletando-se dados de pressão nos manômetros e lendo-se ao mesmo tempo os valores das respectivas voltagens dos instrumentos no *software* LabVIEWTM, como mostra a Tabela B1 a seguir.

Tabela B1: Dados experimentais da calibração da instrumentação de aquisição de dados.

Vazão (m³/h)	Transdutor Diferencial (Placa de Orifício)		Transdutor Tipo Sonda (Leito)	
	Voltagem (Volts)	Pressão (cmH₂O)	Voltagem (Volts)	Pressão (cmH₂O)
0,00	1,91	0,00	1,85	0,00
15,53	2,00	0,70	1,91	4,10
24,90	2,10	1,80	1,96	7,50
34,22	2,30	3,40	2,09	17,00
42,32	2,51	5,20	2,17	23,10
56,90	3,02	9,40	2,30	32,00
70,19	3,61	14,30	2,35	35,50
78,96	4,08	18,10	2,40	39,10
90,55	4,67	23,80	2,44	41,20
94,82	4,97	26,10	2,47	43,70
96,97	5,10	27,30	2,47	44,00
97,68	5,16	27,70	2,48	44,30

A partir dos valores mostrados na Tabela B1, foi feito um ajuste linear dos dados, Figuras B1 e B2, encontrando-se uma função que converte os sinais de voltagem lidos pelos transdutores em termos de pressão, sendo possível então, obter a queda de pressão na

placa e no leito de jorro digitalmente no *software* LabVIEW™, sem a necessidade do uso de manômetros.

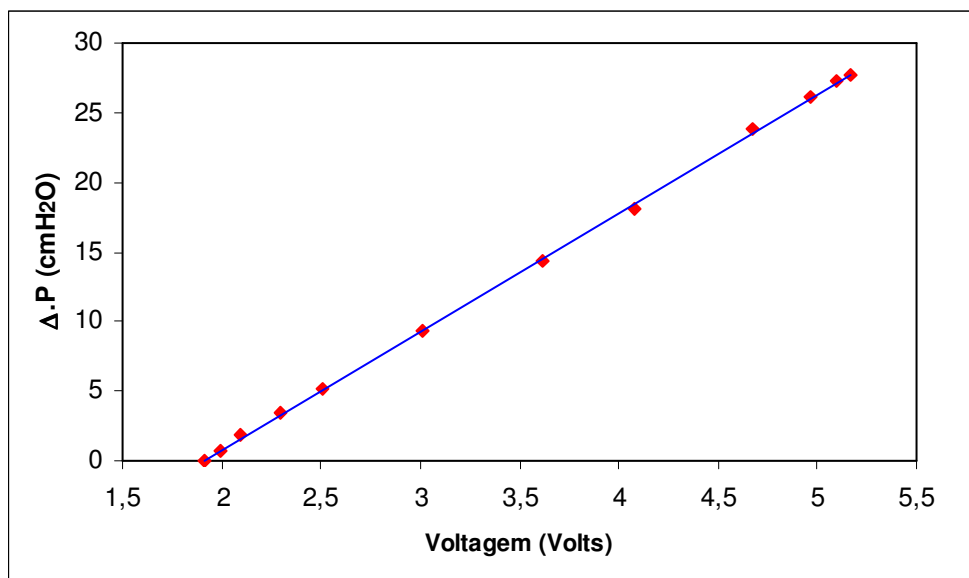


Figura B1: Ajuste linear dos valores de queda de pressão fornecida pelo manômetro e da voltagem fornecida pelo transdutor diferencial.

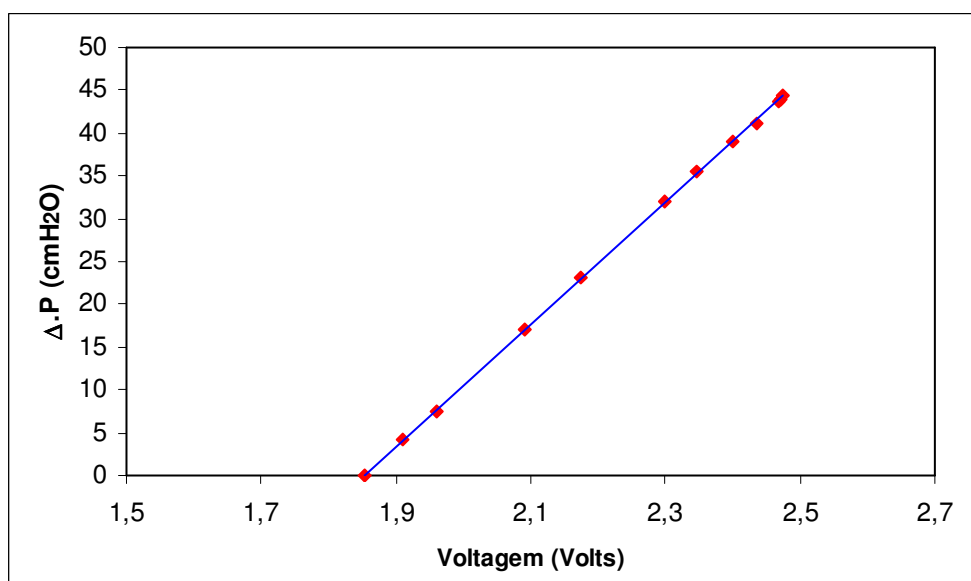


Figura B2: Ajuste linear dos valores de queda de pressão fornecida pelo manômetro e da voltagem fornecida pelo transdutor do tipo sonda.

As funções encontradas pelo procedimento descrito acima para o transdutor diferencial, acoplado à placa de orifício e para o transdutor do tipo sonda, acoplado à base do leito de jorro, foram respectivamente:

$$\Delta P = 8,5115 \cdot V - 16,231 \quad (3)$$

$$\Delta P = 71,204 \cdot V - 131,9 \quad (4)$$

com valores de coeficientes de correlação linear ao quadrado do ajuste dados experimentais da ordem de $R^2 = 0,9997$ e $R^2 = 0,9999$.

A Equação (3) deve ser inserida na Equação (2), uma vez que a finalidade da placa de orifício e a obtenção da vazão de ar na unidade, obtendo-se então a Equação 5.

$$Q = 18,56 \sqrt{8,5115 \cdot V - 16,231} \quad (5)$$

A implementação da Equação (5) no *software* LabVIEW™ permite a leitura digital da vazão de ar fornecida pelo soprador.

APÊNDICE C

Resultados Experimentais da Caracterização Física das **Sementes**

Tabela C1: Resultados experimentais da caracterização física das sementes

Amostra	Número de sementes	Massa do Picnômetro (g)	Massa total do Picnômetro + Hexano	V inicial Hexano (ml)	Massa de sementes (g)	Massa total do Pcinometro + Hexano + sementes	Volume final Hexano (ml)	Volume das sementes (ml)	Densidade das sementes (g/ml)	Volume médio das sementes (ml)	Diâmetro da esfera de mesmo Vol. (mm)
1	40	37,671	73,448	54,290	1,212	73,977	53,253	1,036	1,169	0,0259	3,6713
2	41	38,400	81,500	65,402	1,285	82,130	64,408	0,994	1,293	0,0242	3,5908
3	42	37,671	73,501	54,370	1,248	74,014	53,255	1,115	1,119	0,0266	3,7016
4	43	38,400	81,501	65,404	1,252	82,118	64,440	0,964	1,299	0,0224	3,4979
5	44	37,671	73,395	54,209	1,356	73,998	53,067	1,143	1,187	0,0260	3,6741
6	45	38,400	81,497	65,398	1,358	82,143	64,317	1,080	1,257	0,0240	3,5793
7	46	37,671	73,343	54,131	1,412	74,032	53,033	1,097	1,287	0,0239	3,5713
8	47	38,400	81,480	65,372	1,465	82,245	64,310	1,062	1,379	0,0226	3,5078
9	48	37,671	73,366	54,165	1,374	74,030	53,088	1,077	1,275	0,0224	3,4998
10	49	38,400	81,500	65,402	1,449	82,284	64,393	1,009	1,436	0,0206	3,4008
								Média da densidade	1,270	Média do diâmetro	3,5695
								DP	0,095	DP	0,0952