

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS NO
DESEMPENHO DO PROCESSO DE SECAGEM DE POLPAS
DE FRUTAS EM LEITO DE JORRO**

Autora: Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Orientadora: Prof^ª D^{ra} Sandra Cristina dos Santos Rocha

Co-orientadora: Prof^ª D^{ra} Odelsia Leonor Sanches de Alsina

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Outubro de 2001

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	UNICAMP
	M467i
V	EX
	48084
	16-837/02
C	D
PREÇO	R 11,00
DATA	11/09/02
Nº CPD	

CM00165787-7

BIB ID 235720

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M467i

Medeiros, Maria de Fátima Dantas de

Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro / Maria de Fátima Dantas de Medeiros. -- Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadora: Sandra Cristina dos Santos Rocha.

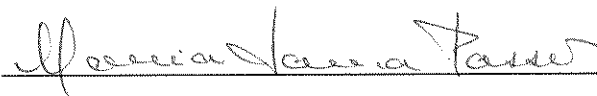
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Secagem. 2. Frutas tropicais. 3. Processo de leito de jorro - Dinâmica dos fluidos. 4. Polpa de frutas - Composição. I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

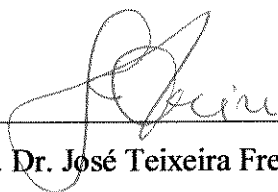
Tese de Doutorado defendida por Maria de Fátima Dantas de Medeiros e aprovada em 30 outubro de 2001 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



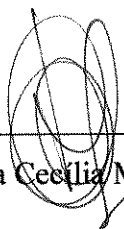
Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha - Orientadora



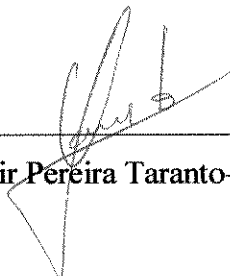
Profª. Dra Maria Laura de Azevedo Passos - UFMG



Prof. Dr. José Teixeira Freire- UFSCAR



Profª. Dra. Florência Cecília Menegalli- FEA/UNICAMP



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto- FEQ/UNICAMP

00244221

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química.

A handwritten signature in black ink, reading "S. Rocha", is positioned above a horizontal line.

Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha - Orientadora

A Luiza

Por ser a razão maior de minha vida.

Ao meu “velho” pai(in memorium) e a minha querida mãe

Por todos os exemplos de vida.

A minha irmã Alice

Por tanto carinho que a tantos tem para dar.

Se não houve frutos

Valeu pela beleza das flores

Se não houve flores

Valeu pela sombra das folhas

Se não houve folhas

Valeu pela intenção das sementes

Henfil

AGRADECIMENTOS

Às Professoras Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha e Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, agradeço a competente orientação e constante dedicação, enfatizando a confiança com que me incentivaram a desenvolver este trabalho. Pelo estímulo, solidariedade, paciência e amizade, todo o meu reconhecimento e mais sinceros agradecimentos.

A todos os anjos, arcanjos, querubins e serafins que formaram o exército de salvação de uma tese constantemente ameaçada pelo colapso definitivo do Leito de Jorro e da autora da tese.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência da composição química, correlacionada com propriedades físicas das suspensões, na secagem de polpas de frutas tropicais em leito de jorro. Como polpa padrão foi utilizada a polpa natural de manga espada, cuja composição foi modificada pela adição de açúcar, gordura, fibras, amido e pectina. Utilizou-se um secador de leito de jorro de configuração cônica-cilíndrica, construído em aço inoxidável com base cônica de 60° , diâmetro da coluna cilíndrica de 0,18m, altura de 0,9 m e diâmetro de entrada do ar de $2,5 \times 10^{-2}$ m. Trabalhou-se com uma carga de inertes de 2,5 kg, formada por partículas de polietileno de alta densidade com $3,9 \times 10^{-3}$ m de diâmetro. A temperatura do ar na entrada do secador foi fixada em 70°C . As polpas foram alimentadas através de seringas veterinárias, em bateladas de 50g.

Foram fixados limites máximos e mínimos de concentração dos constituintes cujos efeitos seriam estudados no presente trabalho e elaborado um planejamento experimental do tipo fatorial fracionário 2^{5-1} , com três repetições no ponto central. Com base no planejamento experimental e de acordo com os balanços materiais efetuados, as polpas modificadas foram preparadas, e caracterizadas, determinando-se a densidade e tensão superficial, e obtendo-se o reograma das mesmas. Os resultados mostraram que as polpas comportam-se como fluidos não newtonianos com características pseudo-plásticas.

Inicialmente foram obtidas as curvas de secagem e realizada uma série de ensaios fluidodinâmicos com alimentação de polpas. Foi constatado que a evaporação ocorre praticamente nos instantes iniciais da secagem, sendo identificada uma importante interferência das polpas modificadas nos parâmetros fluidodinâmicos do leito. Foi proposto um modelo simplificado para o cálculo do grau de saturação de polpa no leito no início da secagem. A composição das polpas não interferiu nas taxas de evaporação nem no grau de saturação, observando-se entretanto a influência da mesma no grau de saturação máximo, atingido em alguns ensaios onde foram verificados problemas de instabilidade.

Foi realizada uma segunda série de experimentos de secagem, para se avaliar a eficiência de produção de pó, a retenção de material no leito, as perdas de sólidos e o

ângulo de repouso do leito após a secagem. De acordo com os resultados obtidos, a eficiência de produção de pó foi muito baixa, verificando-se elevada retenção de sólidos e grande quantidade de material disperso ou aderido às paredes do equipamento. Com respeito ao ângulo de repouso, tanto o filme líquido como seco provocam o aumento do ângulo de repouso, diminuindo a escoabilidade do leito.

A análise estatística dos resultados de acordo com o planejamento fatorial fracionário mostrou que a concentração de fibras não interferia em qualquer das variáveis respostas analisadas no presente trabalho: vazão de jorro mínimo, queda de pressão de jorro estável, ângulos de repouso do leito úmido e seco, eficiência, retenção e perdas de sólidos. Não foi identificado efeito significativo das variáveis de composição sobre a vazão de jorro mínimo. Eliminada a concentração de fibras da análise estatística, o planejamento fatorial foi rearranjado para um fatorial completo. Os efeitos principais das variáveis de composição que se mostraram significativos, de acordo com o planejamento fatorial fracionário foram os mesmos identificados no fatorial completo, que identificou ainda os efeitos das interações entre as variáveis de composição sobre as variáveis respostas. De uma forma geral, foi constatada a importante interferência negativa dos açúcares redutores tanto na fluidodinâmica do leito como no desempenho do processo no que se refere a produção de pó. A gordura, o amido e a pectina interferiram favoravelmente na fluidodinâmica do leito e na produção de pó, mas contribuíram para aumentar as perdas de material acumulado sobre as paredes do equipamento.

Foi possível se obter modelos estatisticamente significativos e preditivos ajustados aos dados de queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó. Os modelos foram validados com os resultados obtidos na secagem de polpas de frutas naturais, reproduzindo satisfatoriamente os valores da queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó.

Através de métodos simplificados de otimização, determinou-se a composição que forneceria a máxima eficiência de produção de pó, extrapolando-se os limites de aplicabilidade do modelo para a faixa de concentração mínima e máxima de açúcares redutores, gordura amido e pectina, referente às polpas de frutas tropicais. O ensaio de secagem com a polpa otimizada apresentou eficiência de produção de pó na faixa de 70%.

ABSTRACT

The objective of this work was the study of the influence of the chemical composition, correlated with the physical properties of the suspensions, on the drying of pulps of tropical fruits in spouted bed. The natural mango pulp was established as standard pulp and its chemical composition was modified by the addition of sugar, lipids, fibers, starch and pectin. A cone-cylindrical spouted bed dryer was used to develop the experiments. The dryer was constructed in stainless steel, having a conical base of 60° , a diameter of 0.18 m, 0.9 m of height and 2.5×10^{-2} m of inlet diameter. High density polyethylene, 3.9×10^{-3} m of diameter, was chosen as inert particles. The load of inert was 2.5 kg and the air inlet temperature was fixed at 70°C in all the experiments. The pulps were fed in batches of 50 g using veterinary syringes.

Maximum and minimum limits were fixed for the concentrations of the components, which effects were studied in this work through a fractional factorial design of experiments of the type 2^{5-1} , with three repetitions at the central point. The modified pulps were prepared based on the experimental design and on material balances. The pulps were physically characterized by the determination of their density, surface tension and rheology. The results indicated that the pulps behave as non Newtonian fluids and present pseudo-plastic characteristics.

Initially, a series of experiments of drying and of fluid-dynamic, with the pulps feeding, was carried out. The drying curves were obtained and it was verified that the evaporation occurred in the first minutes after the pulp feeding to the bed. An important influence of the pulps on the fluid-dynamic parameters was identified. A simplified model was proposed to evaluate the bed saturation degree at the beginning of the drying process. The composition of the pulps did not influence the evaporation rates nor the bed saturation degree. However, the influence of the composition of the pulps on the maximum saturation degree was observed, which was attained in some experiments where problems of instability were verified.

A second series of drying experiments were performed to evaluate the efficiency of powder production, the material retention in the bed, the lost of solids and the repose angle after the drying process. The results showed low values of efficiency of powder

production, with high retention of solids and a large amount of material dispersed or adhered to the equipment walls for the majority of the experiments. The results also showed that both the wet and dry film covering the inert particles provoked an increase of the repose angle, thus decreasing the bed flow ability.

The statistic analysis of the results for the fractional factorial design showed that the fibers concentration did not influence any of the response variables analyzed: minimum spouting flow rate, stable spout pressure drop, repose angles for the wet and dry bed, efficiency of powder production, solids retention and lost. The analysis did not find any significant effect of the concentrations of the components on the minimum spouting flow rate. The fibers concentration was eliminated from the statistical analysis and the factorial design was re-arranged to a complete factorial design of the type 2^4 . A negative significant effect was obtained for the concentration of reducer sugars, both on the fluid-dynamic and on the drying performance, referring to the efficiency of powder production. The lipids, starch and pectin influenced positively the bed fluid-dynamic and the powder production, but contributed to increase the lost of material accumulated on the walls of the equipment.

The statistical models obtained were significant and can be used to predict stable spout pressure drop and efficiency of powder production as a function of the concentrations of reducer sugar, lipids, starch and pectin in the pulps. The results on drying of natural fruit pulps were used to validate the models, which reproduced well the values of stable spout pressure drop and efficiency of powder production.

A simple optimization method was applied to determine the composition of the pulp that would lead to the maximum efficiency of powder production, expanding the range of the concentrations of the components to the limits found for the natural tropical fruits. An experiment of drying of the optimized pulp was carried out and the efficiency of powder production obtained was about 70%.

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Frutas Tropicais.....	4
2.1.1	Cultura da Manga.....	5
2.1.2	Cultura do Cajá.....	5
2.1.3	Cultura do Cajá-Manga.....	6
2.1.4	Cultura da Seriguela.....	6
2.1.5	Cultura do Pinha.....	6
2.1.6	Cultura da Umbu.....	7
2.1.7	Cultura da Acerola.....	8
2.1.8	Cultura do Abacate.....	8
2.2	Propriedades Físicas.....	9
2.2.1	Reologia.....	9
2.2.2	Tensão Superficial.....	14
2.3	Considerações Gerais sobre o Leito de Jorro.....	16
2.4	Curvas Características do Leito de Jorro.....	20
2.5	Taxa de Circulação de Sólidos e Diâmetro do Jorro.....	24
2.6	Secagem de Pastas e Suspensões.....	27
2.6.1	Mecanismo.....	27
2.6.2	Estado da Arte.....	28
2.7	Influências das Propriedades dos Materiais na Secagem de Pastas e Suspensões.....	39
3	Materiais e Métodos Experimentais.....	43
3.1	Ensaio Preliminares.....	43
3.1.1	Definição das Variáveis de Composição.....	43
3.1.2	Definição na Solução Padrão.....	44
3.1.3	Seleção do Material Inerte.....	44
3.2	Materiais.....	45
3.2.1	Polpa Natural de Manga.....	45

3.2.2	Materiais Utilizados na Formulação das Polpas Modificadas.....	46
3.2.3	Material Inerte.....	47
3.3	Equipamentos.....	47
3.3.1	Leito de Jorro.....	47
3.3.2	Equipamentos para Determinação das Propriedades Físicas, Análises Físico-químicas e Acompanhamento da Secagem.....	49
3.4	Procedimento Experimental.....	49
3.4.1	Caracterização Físico-Química da Polpa Natural.....	51
3.4.1.1	Lipídios.....	51
3.4.1.2	Fibras.....	52
3.4.1.3	Amido.....	52
3.4.1.4	Pectina.....	52
3.4.1.5	Brix (sólidos solúveis por refratometria).....	53
3.4.1.6	pH.....	53
3.4.1.7	Cinzas (resíduo por incineração).....	53
3.4.1.8	Acidez Titulável.....	53
3.4.1.9	Umidade.....	53
3.4.1.10	Açúcares Redutores e Redutores Totais.....	54
3.4.2	Preparação das Polpas Modificadas.....	54
3.4.3	Extração das Fibras.....	55
3.4.4	Determinação das Propriedades Físicas.....	56
3.4.4.1	Medidas da Tensão Superficial.....	56
3.4.4.2	Medidas da Densidade.....	57
3.4.4.3	Ensaio Reológico.....	57
3.4.5	Condições Operacionais.....	58
3.4.6	Ensaio Fluidodinâmico.....	59
3.4.7	Ensaio de Secagem.....	61
3.4.8	Medidas do Ângulo de Repouso.....	62
3.4.9	Determinação de Material Retido no Leito.....	63
3.4.10	Cinética de Produção de Pó.....	64
3.4.11	Cinética de Retenção.....	64
3.4.12	Curvas de Secagem.....	64

4	Resultados e Discussões.....	68
4.1	Caracterização Físico-Química da Polpa de Manga e do Material Fibroso Empregado no Ajuste da Concentração de Fibras.....	68
4.2	Propriedades Físicas das Polpas Natural e Modificada.....	71
4.3	Curvas de Secagem.....	82
4.4	Ensaio Fluidodinâmico.....	86
4.4.1	Ensaio Fluidodinâmico Preliminares.....	87
4.4.2	Curvas Características com as Polpas Modificadas.....	93
4.4.3	Resultados dos Parâmetros Fluidodinâmicos.....	111
4.4.4	Grau de Saturação e Estabilidade do Leito.....	116
4.5	Ensaio de Secagem.....	124
4.5.1	Resultados dos Ensaio de Secagem.....	124
4.5.2	Resultados dos Ensaio de Secagem com Polpas de Frutas.....	127
4.5.3	Influência da Composição das Polpas Modificadas na Eficiência de Produção de Pó, na Retenção de Sólidos, nas Perdas e no Ângulo de Repouso do Leito após a Secagem.....	131
4.6	Resultados do Planejamento Fatorial Fracionário 2^{5-1}	138
4.6.1	Análise dos Resultados dos Ensaio Fluidodinâmico Através do Planejamento Experimental 2^{5-1}	138
4.6.2	Análise dos Resultados dos Ensaio de Secagem Através do Planejamento Experimental 2^{5-1}	141
4.7	Resultados do Planejamento Fatorial Completo 2^4	146
4.7.1	Análise dos Efeitos.....	148
4.7.2	Análise de Regressão dos Modelos Estatísticos.....	150
4.7.3	Análise das Superfícies de Resposta.....	164
4.7.3.1	Análise das Superfícies de Resposta para a Queda de Pressão de Jorro Estável.....	165
4.7.3.2	Análise das Superfícies de Resposta para a Eficiência de Produção de Pó...	173
4.7.4	Validação dos Modelos Estatísticos.....	181
4.8	Cinética de Produção de Pó e de Retenção de Sólidos no Leito.....	186

4.8.1	Cinética de Produção de Pó – Ensaios com Polpas Modificadas e com Polpas de Frutas.....	186
4.8.2	Cinética de Retenção de Sólidos.....	195
4.9	Ensaios de Secagem com a Polpa de Composição Otimizada.....	197
5	Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos.....	201
5.1	Conclusões.....	201
5.2	Sugestões Trabalhos Futuros.....	205
	Referências Bibliográficas	207
	Apêndice I – Formulação das Polpas Modificadas	219
	Apêndice II – Propriedades Físicas das Polpas Modificadas	224
	Apêndice III– Ensaios Fluidodinâmicos	227
	Apêndice IV – Ensaios de Secagem	228
	Apêndice V – Tabelas Estatísticas.....	230
	Apêndice VI – Dados das Polpas de Frutas.....	239
	Apêndice VII – Cálculo do Valor Ótimo da Eficiência.....	243

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas.....	10
Figura 2.2	Comportamento reológico de diversos tipos de fluidos.....	11
Figura 2.3	Fluido com comportamento intermediário (entre Bingham e pseudoplástico).....	14
Figura 2.4	Forças de atração intermolecular no líquido.....	15
Figura 2.5	Comportamento de uma gota de líquido (B) sobre a superfície de um sólido (A).....	15
Figura 2.6	Curva característica da queda de pressão. MADONNA et al. (1961). Trigo, $d_p=0,36\text{cm}$, $D_c=0,152\text{ m}$, $D_i=1,27 \times 10^{-2}\text{ m}$, base cônica de 60°	21
Figura 3.1	Diagrama esquemático do secador.....	48
Figura 3.2	Célula de medidas do ângulo de repouso.....	63
Figura 3.3	Fluxograma simplificado do procedimento experimental.....	67
Figura 4.1	Umidade do ar em função do tempo – ensaios 16,18 e 19.....	82
Figura 4.2	Taxas de evaporação em função do tempo – ensaios 16,18,19.....	84
Figura 4.3	Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo.....	85
Figura 4.4	Influência da alimentação de água nas variáveis fluidodinâmicas do leito....	87
Figura 4.5	Curvas características do leito de partículas inertes com e sem adição de água.....	89
Figura 4.6	Influência da alimentação de polpa de manga natural nas variáveis fluidodinâmicas do leito.....	90
Figura 4.7	Curvas características do leito de partículas inertes (In) com e sem adição de polpa de manga natural (pm).....	91
Figura 4.8	Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na queda de pressão no leito (ΔP).....	94
Figura 4.9	Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na velocidade superficial do ar (v).....	95

Figura 4.10	Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na altura da fonte.	97
Figura 4.11	Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na altura do anel..	98
Figura 4.12	Influência da concentração de pectina no comportamento fluidodinâmico do leito (1-polpa 1, In-inerte, pm-polpa de manga).....	99
Figura 4.13	Influência da concentração de açúcares redutores no comportamento fluidodinâmico do leito (2-polpa 2, In-inerte, pm-polpa de manga).....	100
Figura 4.14	Influência da concentração de gorduras no comportamento fluidodinâmico do leito (3-polpa 3, In-inerte, pm-polpa de manga).....	101
Figura 4.15	Influência da concentração de fibras no comportamento fluidodinâmico do leito (5-polpa 5, In-inerte, pm-polpa de manga).....	102
Figura 4.16	Influência da concentração de amido no comportamento fluidodinâmico do leito (9-polpa 9, In-inerte, pm-polpa de manga).....	103
Figura 4.17	Influência da composição no comportamento fluidodinâmico do leito, quando todas as concentrações encontram-se combinadas nos níveis máximos (ensaio 16), médios (ensaio 17) e mínimos (ensaio com a polpa natural) (16 e 17-polpas 16 e 17, In-inerte, pm-polpa de manga).....	105
Figura 4.18	Influência da composição no comportamento fluidodinâmico do leito, quando uma das concentrações é mantida no mínimo e as demais encontram-se combinadas nos níveis máximos; mínimo de açúcares redutores (ensaio 11); mínimo de gordura (ensaio 10); mínimo de pectina, (ensaio 12); mínimo de amido (ensaio 4).....	106
Figura 4.19	Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leito; Ensaio 7 (teores máximos de gordura e pectina e mínimos de açúcares redutores e amido); Ensaio 14 (teores máximos de açúcares redutores e amido e mínimos de gordura e pectina).....	107
Figura 4.20	Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leito; Ensaio 8 (teores máximos de açúcares redutores e gordura e mínimos de amido e pectina); Ensaio 13 (teores máximos de amido e pectina e mínimos de açúcares redutores e gordura).....	108

Figura 4.21	Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leito; Ensaio 6 (teores máximos de açúcares redutores e pectina e mínimos de gordura e amido); Ensaio 15 (teores máximos de amido e gordura e mínimos de açúcares redutores e pectina).....	109
Figura 4.22	Reprodutibilidade dos Ensaios 17, 18 e 19 (concentrações no ponto central).....	110
Figura 4.23	Vazões de jorro mínimo.....	112
Figura 4.24	Queda de Pressão no leito durante a secagem, para $t=1\text{min}$ e nas condições de jorro mínimo. Ensaios com as polpas modificadas (1 a 19), com a água (20) e com a polpa de manga (21).....	115
Figura 4.25	Dados relativos a ϕ/ϕ_o , $U_{\text{filme}}/U_{\text{polpa}}$ e $\Delta P/\Delta P_o$ para $t=1\text{ min}$	118
Figura 4.26	Ângulos de repouso do leitos com adição de polpas.....	122
Figura 4.27	Ângulo de repouso após a secagem e ângulo de repouso com adição de polpas modificadas.....	137
Figura 4.28	Valores observados versus valores preditos - ΔP_{jes} (Pa).....	152
Figura 4.29	Distribuição dos resíduos - ΔP_{jes} (Pa).....	153
Figura 4.30	Valores observados versus valores preditos - θ_m	154
Figura 4.31	Distribuição dos resíduos - θ_m	154
Figura 4.32	Valores observados versus valores preditos - Efic (%).....	155
Figura 4.33	Distribuição dos resíduos - Efic (%).....	156
Figura 4.34	Valores observados versus valores preditos - Rets (%).....	157
Figura 4.35	Distribuição dos resíduos - Rets (%).....	157
Figura 4.36	Valores observado versus valores preditos - Perdas (%).....	158
Figura 4.37	Distribuição dos resíduos - Perdas (%).....	159
Figura 4.38	Valores observados versus valores preditos - θ_s	160
Figura 4.39	Distribuição dos resíduos - θ_s	161
Figura 4.40	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{\text{açu}}$ e X_{gor} para $X_{\text{ami}}=2,59\%$ e $X_{\text{pec}}=1,25\%$	165
Figura 4.41	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{\text{açu}}$ e X_{ami} para $X_{\text{gor}}=3,81\%$ e $X_{\text{pec}}=1,25\%$	167
Figura 4.42	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{\text{açu}}$ e X_{pec} para $X_{\text{gor}}=3,81\%$ e $X_{\text{ami}}=2,59\%$	168

Figura 4.43	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,25\%$	169
Figura 4.44	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{pec} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$	170
Figura 4.45	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{pec} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81$ e $X_{gor}=3,81$	171
Figura 4.46	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=0,67\%$	171
Figura 4.47	Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,82\%$	172
Figura 4.48	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{gor} para $X_{ami}=2,59\%$ e $X_{pec}=1,25\%$	174
Figura 4.49	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=3,8$ e $X_{pec}=1,25$	175
Figura 4.50	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{pec} para $X_{gor}=3,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$	176
Figura 4.51	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,25\%$	177
Figura 4.52	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{gor} e X_{pec} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$	178
Figura 4.53	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{ami} e X_{pec} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{gor}=3,81\%$	179
Figura 4.54	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=6,84\%$ e $X_{pec}=1,82\%$	180
Figura 4.55	Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=0,77\%$ e $X_{pec}=0,67\%$	180
Figura 4.56	Queda de pressão de jorro estável - Ensaios com polpas naturais e modificadas – Valores observados versus valores preditos.....	182
Figura 4.57	Eficiência de produção de pó – Ensaios com polpas de frutas naturais e modificadas – Valores observados versus valores preditos.....	183
Figura 4.58	Massa de pó coletado em função do tempo – Ensaios 1*, 15 [#] e com polpas de frutas.....	190

Figura 4.59	Eficiência de produção de pó em função do tempo – Ensaios 1*, 15 [#] e com polpas de frutas.....	191
Figura 4.60	θ_s / θ_o em função da relação MR/MI.....	193
Figura 4.61	θ_s / θ_m em função da massa retida no leito.....	194
Figura 4.62	Cinética de produção, retenção e perdas de sólidos e do ângulo de repouso – Ensaios com a polpa 18 (composição no ponto central).....	196
Figura 4.63	Cinética de produção de pó – Massa acumulativa ao longo do ensaio e massa de pó obtida em cada intervalo de alimentação. Ensaio com a polpa otimizada.....	198
Figura 4.64	Eficiência de produção de pó – Ensaio com a polpa otimizada.....	198
Figura 4.65	Cinética de produção de pó referente a primeira alimentação. Ensaio com a polpa otimizada.....	199
Figura 4.66	Eficiência de produção de pó Ensaio com a polpa otimizada incluindo os dados referentes a eficiência de produção inicial.....	200
Figura VII.1	Otimização – Gráfico referente aos dados da Tabela VII.1.....	247

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Materiais usados na formulação das polpas modificadas.....	46
Tabela 3.2	Matriz experimental.....	51
Tabela 3.3	Condições operacionais.....	58
Tabela 4.1	Caracterização físico-química da polpa de manga espada padrão.....	68
Tabela 4.2	Caracterização físico-química da polpa de manga espada.....	69
Tabela 4.3	Caracterização físico-química do material fibroso empregado no ajuste da concentração de fibras.....	70
Tabela 4.4	Propriedades físicas da polpa de manga padrão e das polpas modificadas para $T=25\pm 2^{\circ}\text{C}$	73
Tabela 4.5	Propriedades físicas de polpas de frutas tropicais para $T=25\pm 2^{\circ}\text{C}$	74
Tabela 4.6	Composição de polpas de frutas tropicais.....	75
Tabela 4.7	Influência das composições nas propriedades físicas das polpas modificadas.....	76
Tabela 4.8	Frações de água evaporada nos dois minutos iniciais da secagem.....	85
Tabela 4.9	Influência do material inerte nos parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro - Dados referentes à secagem de polpas de frutas tropicais.....	92
Tabela 4.10	Resultados dos ensaios fluidodinâmicos de acordo com o planejamento experimental.....	111
Tabela 4.11	Comparação entre os ângulos de repouso do leito de inertes e do leito acrescido de diferentes materiais (água, polpa de manga e polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9).....	121
Tabela 4.12	Resultados dos ensaios de secagem de acordo com o planejamento experimental.....	124
Tabela 4.13	Secagem de polpas de frutas - eficiência de produção e umidade do pó.....	128
Tabela 4.14	Influência do material inerte na secagem de polpa de manga.....	130
Tabela 4.15	Resultados dos ensaios de secagem de polpa de manga e das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9.....	132

Tabela 4.16	Ângulo de repouso após a secagem e ângulo de repouso com adição de polpas de manga e modificadas, parametrizados em relação ao ângulo de repouso do leito de inertes (θ_o).....	135
Tabela 4.17	Planejamento fatorial 2^{5-1} – Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios fluidodinâmicos.....	138
Tabela 4.18	Estimativa dos efeitos para a queda de pressão de jorro estável.....	140
Tabela 4.19	Estimativa dos efeitos para o ângulo de repouso do leito com adição de polpas.....	141
Tabela 4.20	Planejamento fatorial 2^{5-1} - Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios de secagem.....	142
Tabela 4.21	Estimativa dos efeitos para a eficiência de produção de pó.....	143
Tabela 4.22	Estimativa dos efeitos para a retenção de sólidos no leito.....	144
Tabela 4.23	Estimativa dos efeitos para as perdas de sólidos no equipamento.....	145
Tabela 4.24	Estimativa dos efeitos para o ângulo de repouso do leito após a secagem....	145
Tabela 4.25	Planejamento fatorial 2^4 – Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios fluidodinâmicos e de secagem.....	147
Tabela 4.26	Estimativa dos efeitos para ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s	148
Tabela 4.27	Resultados da análise de regressão - ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s	151
Tabela 4.28	Variáveis de composição codificadas e respostas relativas aos ensaios de secagem de polpas de frutas.....	181
Tabela 4.29	Resultados dos ensaios de secagem com alimentações intermitentes de polpa – Polpas naturais e modificadas.....	187
Tabela 4.30	Resultados dos ensaios de secagem com 1 alimentação de 50 g de polpa e $Q/Q_{jm}=1,25\pm0,05$	188
Tabela 4.31	Resultados da regressão linear.....	191
Tabela I.1	Composições originais.....	219
Tabela I.2	Composições originais parametrizadas em relação à composição da água....	220
Tabela I.3	Matriz experimental com composições parametrizadas em relação à composição da água – Planejamento Fatorial.....	221
Tabela I.4	Matriz experimental com composições expressas em frações mássicas.....	222
Tabela I.5	Formulação das polpas modificadas.....	223
Tabela II.1	Medidas da densidade das polpas modificadas.....	224

Tabela II.2	Medidas da tensão superficial das polpas modificadas.....	225
Tabela II.3	Dados reológicos das polpas modificadas - medidas da viscosidade aparente e torque para $\omega = 60$ rpm.....	226
Tabela III.1	Medidas do ângulo de repouso das partículas molhadas e após a secagem...	227
Tabela IV.1	Medidas das umidade dos pós obtidos nos ensaios de secagem com polpas modificadas.....	228
Tabela IV.2	Medidas do material retido no leito nos ensaios de secagem.....	229
Tabela V.1	Estimativa dos efeitos para ΔP_{jes} - Planejamento fatorial 2^4	230
Tabela V.2	Estimativa dos efeitos para θ_m - Planejamento fatorial 2^4	231
Tabela V.3	Estimativa dos efeitos para E_{fic} - Planejamento Fatorial 2^4	232
Tabela V.4	Estimativa dos efeitos para R_{ets} - Planejamento fatorial 2^4	233
Tabela V.5	Estimativa dos efeitos para as Perdas - Planejamento fatorial 2^4	234
Tabela V.6	Estimativa dos efeitos para θ_s - Planejamento fatorial 2^4	235
Tabela V.7	Análise de variância - Queda de pressão de jorro estável.....	236
Tabela V.8	Análise de variância - θ_M	236
Tabela V.9	Análise de variância - Eficiência de produção de pó.....	237
Tabela V.10	Análise de variância - Retenção de sólidos.....	237
Tabela V.11	Análise de variância - Perdas de sólidos no equipamento.....	238
Tabela V.12	Análise de variância - θ_s	238
Tabela VI.1	Medidas da densidade das polpas de frutas tropicais.....	239
Tabela VI.2	Reologia das polpas de frutas tropicais.....	239
Tabela VI.3	Medidas da tensão superficial das polpas de frutas tropicais.....	240
Tabela VI.4	Caracterização físico-química da polpa de manga - Reprodutibilidade das análises.....	240
Tabela VI.5	Medidas das umidades dos pós - Ensaios de secagem de polpas de frutas utilizando polietileno de alta densidade como material inerte.....	241
Tabela VI.6	Medidas do ângulo de repouso do leito de polietileno de alta densidade com adição de polpas de frutas (2%).....	241
Tabela VI.7	Medidas do ângulo de repouso após secagem e do material retido no leito - Ensaios com polpas de frutas.....	242
Tabela VI.8	Ensaios fluidodinâmicos com polpas de frutas.....	242

Tabela VII.1	Valores ordenados da eficiência, calculadas para valores discretizados de X1, X2, X3 e X4, para a função objetivo Efic.....	246
--------------	--	-----

NOMENCLATURA

Letras Latinas

- D_c – diâmetro da coluna, m
 D_i – diâmetro do orifício de entrada do ar, m
 D_j – diâmetro do jorro, m
 d_p – diâmetro da partícula, m
 E_{fic} – eficiência de produção de pó (base seca), %
 h_a – altura do anel, m
 h_{a0} – altura do anel relativa ao leito de inertes, m
 h_f – altura da fonte, m
 h_{f0} – altura da fonte relativa ao leito de inertes, m
 H_{max} – altura máxima do leito, m
 M_{ev} – massa de água evaporada, kg
 M_I – massa de inerte, kg
 M_{polpa} – massa de polpa, kg
 $M_{pó}$ – massa de pó coletado no ciclone, kg
 M_R – massa de material retido no leito, kg
 MQ_{faj} – média quadrática devida à falta de ajuste
 MQ_{ep} – média quadrática devida ao erro puro
 MQ_R – média quadrática devido à regressão
 MQ_r – média quadrática residual
 M_{sr} – massa de sólidos retida no leito, kg
 N – número de bateladas
 n – índice de fluxo do fluido
 $Perdas$ – perdas de sólidos no equipamento, %
 Q – vazão de ar de jorro, m^3/s
 Q_{jm} – vazão de jorro mínimo, m^3/s
 Q_{jmo} – vazão de jorro mínimo relativa ao leito de inertes, m^3/s
 $Rets$ – retenção de sólidos, %
 $RetT$ – retenção total, %

SQ_{ep} – soma quadrática devida ao erro puro
 SQ_{fa} – soma quadrática devida à falta de ajuste
 SQ_T – soma quadrática em torno da média
 SQ_r - soma quadrática residual (desvio)
 T – temperatura, °C
 t – tempo, s
 T_{ge} – temperatura de entrada do ar, °C
 U_f – umidade do filme (base úmida), %
 U_{ge} – umidade do ar na entrada do leito (base seca), kg/kg
 U_{gs} – umidade do ar na saída do leito (base seca), kg/kg
 U_{polpa} – umidade da polpa (base úmida), %
 $U_{pó}$ – umidade do pó (base úmida), %
 v – velocidade superficial do ar, m/s
 v_{mf} - velocidade na mínima fluidização, m/s
 V_l – volume de líquido adicionado ao leito, m³
 V_b – volume do leito, m³
 V_{polpa} – volume de polpa adicionado ao leito, m³
 V_{poros} – volume de poros no leito, m³
 W_{ev} – taxa de evaporação, kg/s
 W_s – vazão de ar isento de umidade, kg/s
 W_p – taxa de circulação de sólidos, kg/s
 X – concentração expressa em kg/kg de água, %
 x – concentração expressa em fração mássica, %
 Y – variáveis de composição codificadas
 Y^* - váriáveis de composição codificadas otimizadas

Letras Gregas

φ – esfericidade
 ϕ – grau de saturação
 ε - porosidade do leito de inerte estático
 σ - tensão superficial das polpas, dyn/cm

μ – viscosidade das polpas , cp

ρ - densidade das polpas, g/cm³

ρ_p – densidade do material inerte, kg/m³

ρ_{ge} - densidade do ar na entrada do secador, kg/m³

ρ_{gs} - densidade do ar na saída do secador, kg/m³

θ – ângulo de repouso

θ_m – ângulo de repouso do leito acrescido de polpa

θ_o – ângulo de repouso do leito de partículas inerte

θ_s – ângulo de repouso do leito após secagem

τ – torque, dyn.cm

ΔP – queda de pressão no leito, Pa

ΔP_{in} – queda de pressão relativa ao leito de partículas inertes, Pa

ΔP_{jes} – queda de pressão de jorro estável, Pa

ΔP_{jeso} – queda de pressão de jorro estável no leito de inerte, Pa

ΔP_n – queda de pressão no leito em cada ensaio, Pa

ΔP_o – queda de pressão no leito de inerte, Pa

ΔP_{pm} – queda de pressão no leito com adição de polpa de manga, Pa

Subscritos

açu – açúcar

gor – gordura

ami – amido

pec – pectina

fib – fibras

g – gás

Sobrescritos

* - adimensionalizado em relação aos ensaios com a polpa de manga

o – relativo ao leito de partículas inertes, ou condição do leito antes da alimentação de polpas

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A grande produção de frutas tropicais de reconhecido sabor e valor nutricional, constitui-se uma das grandes potencialidades da Região Nordeste. Entretanto, por se tratarem de frutas comumente sazonais, a comercialização se verifica apenas no período das safras e na forma “in natura”, o que provoca um grande desperdício da produção. O aproveitamento e industrialização de culturas agrícolas próprias da região nordestina, cujo cultivo estaria adaptado às condições de seu clima e solo, é apontado como uma alternativa viável, para a melhoria das condições sociais e econômicas desta região. A maioria destas culturas agrícolas sobrevivem aos longos períodos de estiagem que caracterizam a tão propalada Seca do Nordeste.

A maior parte da população nordestina sofre as conseqüências da seca, entre as mais drásticas, a fome. Enquanto isso, toneladas de frutas ricas em nutrientes são desperdiçadas nos períodos das safras, por falta de um processamento adequado e de baixo custo que viabilize a industrialização e comercialização destas frutas, na maioria, bastante perecíveis. Um programa de incentivo à exploração destas culturas, conjuntamente com pesquisas sobre tecnologias de baixo custo que promovam o aproveitamento da produção, seria uma das formas de se encontrar soluções para os graves problemas sociais e econômicos da população nordestina.

A secagem de pastas e suspensões em leito de jorro tem se mostrado uma alternativa à secagem em spray, fornecendo produtos de alta qualidade e baixo custo, segundo citações de diversos autores, BARRET e FANE (1989), MUJUMDAR (1989), PHAM e POOLEY (1981), entre outros.

Numa visão política de contribuir para a solução dos problemas do Nordeste, pesquisadores nordestinos têm se dedicado ao estudo sobre a secagem de polpas de frutas em leito de jorro. Os primeiros estudos, realizados na UFPB em Campina Grande com a polpa de umbu, mostraram-se bastante promissores, de acordo com ALMEIDA (1991), SOUZA (1992), LIMA (1992) e LIMA (1993).

Estimulados pelos resultados obtidos com a polpa de umbu, pesquisadores da UFPB e UFRN passaram a estudar a secagem de polpas de outras frutas tropicais (cajá, seriguela, manga, cajá-manga, acerola e pinha) ampliando os estudos para outras variedades agrícolas, tais como pastas de alho, cebola, beterraba e jerimum. Alguns resultados são encontrados em LIMA et al. (1995, 1996, 1998), RAMOS (1997), DA MATA et al. (1996) e ALSINA et al. (1995, 1996, 1997). No que concerne à qualidade dos produtos, os resultados encontrados por estes autores foram bastante satisfatórios. Entretanto, com exceção das polpas de manga e umbu e pastas de jerimum, beterraba e cebola, cujas secagens chegaram a atingir níveis de eficiência da coleta do pó superiores à 60%, os demais materiais processados provocaram sérios problemas de acumulação e instabilidade fluidodinâmica do leito, com baixíssima produção de pó. Em alguns casos, houve comprometimento completo do processo de secagem e colapso do jorro (pinha, cajá-manga, acerola e alho). Estudos iniciais sobre a interferência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas no leito de jorro, mostraram que elevadas concentrações de gordura favoreciam o processo, enquanto, para o teor de açúcares, a tendência seria inversa. Entretanto, a influência da composição química ocorria de forma combinada e a interferência de elevadas taxas de açúcares poderia ser anulada por altos teores de gordura. Este comportamento foi observado na secagem de polpa de manga, que apresentou excelentes resultados, apesar do elevado teor de açúcar presente nesta fruta. Com relação às outras variedades agrícolas, esta tendência de comportamento não foi observada; a pasta de beterraba, apesar de conter muito açúcar e pouca gordura, foi um dos materiais cuja secagem em leito de jorro apresentou os melhores resultados, conforme mostra LIMA et al. (1998).

Considerando então a significativa interferência destes fatores no processo de secagem em leito de jorro, necessário se faz aprofundar os estudos sobre a influência destas propriedades, de forma a se otimizar as condições operacionais do equipamento, de acordo com as propriedades do material processado.

A presente proposta de trabalho tem como objetivo estudar a influência da composição química, correlacionada com propriedades físicas das suspensões, na secagem de polpas de frutas tropicais em leito de jorro. Como polpa padrão será utilizada a polpa natural de manga espada, cuja composição será modificada pela adição de açúcar, gordura, fibras amido e pectina, de acordo com a metodologia experimental descrita no Capítulo 3.

Serão analisados os efeitos da composição e das propriedades físicas sobre as variáveis fluidodinâmicas do leito e sobre o desempenho do processo.

A escolha da manga (*Mangifera indica* L) deve-se à elevada produção desta fruta na região Nordeste, que corresponde, segundo o IBGE (1996), à 67,1% do total da produção brasileira de 1996, e ao seu valor nutritivo. Segundo dados de ITAL (1981), a manga é, provavelmente, a fonte natural mais rica em caroteno precursor de vitamina A. Os pigmentos carotenóides desenvolvem-se durante a maturação e atingem o teor máximo nas frutas completamente maduras. Contém, ainda, quantidade apreciável de ácido ascórbico, sendo uma fonte aceitável de tiamina e niacina. As cinzas contém cálcio e ferro, porém, em geral, é pobre como fonte de minerais. O conteúdo de proteína é um pouco mais alto do que o encontrado noutras frutas. A variedade espada, por ser a mais abundante na Região Nordeste, foi a escolhida para ser estudada no presente trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Frutas Tropicais

A baixa umidade, o calor constante e a elevada luminosidade do sertão nordestino são condições que beneficiam o cultivo de frutas. O clima semi-árido cria um ambiente pouco propício à incidência de fungos e a luminosidade contribui com o processo de fotossíntese das plantas, ampliando o período de produção para mais de duas safras anuais.

Segundo ITAL (1980), as frutas destacam-se pelo grande número de espécies e variedades. O Brasil é o país que possui o maior número de espécies, muitas oriundas de outras regiões e de clima frio e temperado, sendo às de clima quente aquelas que constituem o maior número. Existentes principalmente no Norte e no Nordeste, muitas frutas são nativas, apresentam nomes indígenas e são produzidas por meio de um sistema extrativista, sem práticas de cultura agrícola. Devido ao mecanismo praticamente amador de produção e comercialização, não existem estimativas seguras de área e produção de frutas tradicionais e típicas do Nordeste, tais como caju, cajá, mangaba, seriguela, umbu e jaca, entre outras. Tanto no que se refere às características destas culturas agrícolas, como em relação às propriedades, composição e valor nutricional das frutas produzidas, os dados encontrados na literatura são bastante escassos.

Segundo ITAL (1980), as frutas, enquanto permanecem na árvore, são materiais vivos, cujas paredes celulares estão em equilíbrio dinâmico com o citoplasma. A pectina, a hemicelulose e a celulose são degradadas e sintetizadas durante as mudanças fisiológicas que ocorrem na maturação. Essas mudanças são controladas pelas enzimas presentes, podendo-se dizer que a fruta na árvore é um sistema bioquímico.

Durante o processamento os fatores importantes que interferem na qualidade das frutas, se relacionam com as mudanças bioquímicas que ocorrem após colheita. Apresentando composição química variável quanto ao teor de hidratos de carbono e de gorduras, as frutas são classificadas em aquosas, sumarentas ou carnudas, quando produzem suco, amidonadas quando ricas em hidratos de carbono como a pinha e

oleaginosas, quando contém elevado teor de gordura, como o abacate de acordo com ITAL (1980).

2.1.1 - Cultura da Manga

Nativa da Ásia tropical, a manga ou *Mangífera indica*, única espécie do gênero bem conhecida horticulturalmente, é extensivamente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e das Américas, segundo ITAL(1981). Segundo CASCUDO (1968), há cerca de 500 variedades de manga no Brasil. De acordo com ITAL (1981) e conforme dados do IBGE (1996), o Nordeste é o maior produtor de manga, sendo a variedade Espada, a mais abundante. Sua produção nesta região, de acordo com ITAL (1981), pode ocorrer em todos os meses do ano, atingindo picos nos meses de janeiro e fevereiro.

Pertencente a família das *Anacardiáceas*, que consiste de 64 gêneros e compreende muitas espécies de importância hortícola, tais como caju, umbu, cajá, seriguela e cajá-manga, as mangas de origem indiana têm casca com coloração amarelada ou esverdeada e polpa, quando madura, bem amarela. As variedades americanas, também chamadas de coloridas, têm a casca e a polpa avermelhadas.(ITAL, 1981).

A manga possui ação protetora na pele e nas mucosas, tem papel essencial na função da retina, nos resfriados e em pacientes com tumores cancerígenos. Contém vitaminas A, B e C, cálcio e fósforo.

2.1.2 - Cultura do Cajá

Fruto da cajazeira, o cajá, *Spondia lutea*, é uma fruta de casca lisa e fina, de cor alaranjada, muito aromático, de polpa succulenta e agri-doce, apropriada para preparação de sucos, geléias, sorvetes, licores e compotas (GOMES, 1983). É rico em sais minerais como cálcio, fósforo e ferro. Contém vitamina A e tal como a manga também pode ser essencial em ações protetoras da retina e da pele.

A colheita ocorre com maior incidência entre fevereiro e julho, mas o cajá pode ser encontrado o ano todo, segundo GOMES (1983). Cresce na maior parte do

Brasil, prefere solos profundos, permeáveis e suficientemente úmidos, embora suporte solos sujeitos a longos períodos de seca.

2.1.3 - Cultura do Cajá-Manga

O cajá-manga, *Spondias dulcis*, é uma *anacardiácea*, também chamada taperebá-do-sertão, oriunda das ilhas da Sociedade, na Oceania. É uma árvore de rápido crescimento, cujos frutos se apresentam em cachos, são carnosos, medem de 4 a 8 cm. A semente espinhosa é envolta por uma polpa agridoce, de cor amarela, refrescante e apropriada para a fabricação de geléias, compotas, refrescos e sorvetes. Atribui-se à casca e às raízes das cajazeiras-manga propriedades medicinais, no combate à diarreia e hemorragia, (GOMES, 1983).

A cajazeira-manga floresce e frutifica com maior incidência no período de janeiro a junho, preferem solos profundos, sílico-argilosos, e climas quentes e úmidos.

2.1.4 - Cultura da Seriguela

A seriguela, *Spondia purpurea*, é uma fruta de formato ovalado, medindo de 2 a 5cm, podendo apresentar coloração amarela ou vermelha. É comestível ao natural e muito utilizada na produção de polpas, compotas e geléias. Através da fermentação e infusão da seriguela, são obtidas bebidas alcoólicas, vinhos e licores.

A árvore apresenta, normalmente, copa baixa, esparramada e rastejante pelo chão. Esta espécie, muito cultivada no sertão do Cariri e sul do Ceará, é uma frutífera de enorme potencial econômico para a região. Segundo GOMES (1983), a seriguela é explorada em propriedades com áreas de até 5 hectares, onde os agricultores fazem, geralmente, o consórcio com milho, arroz e feijão.

2.1.5 - Cultura da Pinha

A árvore da fruta do conde ou pinha (*Annona squamosa*), pertence a família das *Anonáceas*, originária das Antilhas, GOMES(1983). É uma árvore pequena com muitos galhos que atinge, aproximadamente, 5 m de altura. Seus frutos têm polpa macia, de cor

branca ou creme, desprovida de acidez, muito doce e nutritiva, envolvendo múltiplas sementes. É uma boa fonte de vitaminas C e do complexo B, além de rica em sais minerais. A pinha contém muito açúcar, sendo consumida ao natural ou na forma de sucos, doces e sorvetes.

A pinha chegou ao Brasil em 1636, trazida pelo conde de Miranda, que a introduziu na Bahia, o que a tornou conhecida em grande parte do país como fruta-do-conde. A pinha se adapta muito bem aos climas quentes, com pouca chuva e estação seca bem definida. É cultivada do extremo Norte às regiões altas do estado de São Paulo, apresentando uma boa produção nas regiões semi-úmidas, sub-úmidas e semi-áridas do Nordeste.

A pinha começa a produzir três anos depois do plantio. Entre os seis e sete anos, pode chegar a produzir cerca de 1000 frutas/árvore, se cultivada em área irrigada. As frutas são colhidas em duas safras anuais, uma de verão e outra de inverno.

2.1.6 - Cultura do Umbu

O umbuzeiro ou imbuzeiro (*Spondias tuberosa*) já foi chamado por Euclides da Cunha de "árvore sagrada do sertão". Esta planta tem capacidade de armazenar água, porque suas raízes são verdadeiros reservatórios, servindo também para comer. É muito resistente a seca e conforme cita LISBOA (1932), foi comparado por Rui Barbosa ao sertanejo do Nordeste conforme se percebe na citação, "gigante da flora nordestina, fiel alegoria de seu povo".

O umbuzeiro é uma planta frutífera da família das *Anacardiáceas*, nativa dos chapadões semi-áridos da Serra da Borborema, muito abundante no Cariri Velho (Paraíba), no Curimataú (Paraíba), e nos seus prolongamentos em Pernambuco e Rio Grande do Norte, segundo GOMES (1965). É disseminado por toda a caatinga do Nordeste, podendo ser encontrado ainda no Piauí, Ceará, sul da Bahia e nos sertões de Minas Gerais, (LISBOA, 1932).

As folhas do umbuzeiro são apreciadas como alimento pelo gado. O fruto possui cerca de 3,5 a 4,0 cm de comprimento, sendo revestido por uma casca de coloração amarelo esverdeada, semelhante à da ameixa. A polpa é succulenta e agri-doce, de sabor muito

agradável e rica em vitamina C, riboflavina, ácido nicotínico, proteínas e sais minerais, SOUZA (1970).

Segundo GOMES (1965), o umbuzeiro, com no máximo 6 m de altura e até 10 m de diâmetro de copa, chega a produzir 300 kg/ano de frutos. Perde todas as folhas na longa estação seca e, com as primeiras chuvas, se enche de folhas e flores. Entre os três e seis anos de idade começa a produzir e segundo TIGRE(1978), pode atingir até um século de vida.

2.1.7 - Cultura da Acerola

A acerola, *Malpighia puniceifolia*, é uma planta *Dicotyledonea*, pertencente a família das *Malpighiaceas*. Segundo CARVALHO e MANICA(1993), em virtude de sua origem tropical, nativa da América Central, norte e noroeste da América do sul e Antilhas, a planta se adaptou muito bem às condições climáticas do Norte e Nordeste do Brasil.

Principalmente devido a elevada concentração de vitamina C, cerca de 80 vezes maior do que a encontrada nas frutas conhecidas, a acerola despertou o grande interesse da fruticultura nacional e internacional. Já em 1993, segundo CARVALHO e MANICA (1993) o Brasil ocupava o primeiro lugar no mundo em área plantada e na produção desta fruta.

O conteúdo de ácido ascórbico na acerola depende das chuvas durante o ciclo da planta, do tipo de solo, fertilidade do local de plantio, variação de temperatura, intensidade e duração da insolação, mas principalmente do ponto de colheita ou estágio de maturação dos frutos. Quanto maior é a incidência da radiação solar durante todo o ciclo, maior é o conteúdo de vitamina C dos frutos. O ponto de colheita determina o conteúdo em vitamina C, frutos verdes apresentam teor mais elevado que vai diminuindo à medida que amadurecem, CARVALHO e MANICA (1993)

2.1.8 - Cultura do Abacate

O fruto do abacateiro, o abacate, *Persea americana*, tem forma semelhante a da pêra, casca áspera de cor verde ou violeta, polpa macia comestível e caroço grande e liso. Segundo ITAL (1980), o alto valor nutritivo e a extraordinária composição do abacate

permitem classificá-lo como uma das frutas mais ricas. O seu valor calórico é três vezes maior do que o da banana. Contém elevado teor de proteína, e dentre os aminoácidos livres presentes em sua polpa, destacam-se a asparagina, o ácido aspártico, a glutamina e o ácido glutâmico. Em comparação com outras frutas é considerado pobre em vitamina A, C e K., porém muito rico em matéria graxa e vitaminas do complexo B, segundo ITAL (1980).

Existem mais de quinhentas variedades de abacateiros, o que explica os muitos tipos de abacate, diferentes na forma, tamanho, cor e no conteúdo de matéria graxa. Ainda, segundo ITAL (1980), numerosas tentativas tem sido feitas no sentido de se conservar a polpa de abacate para fins comerciais, pois a estabilização pelo calor e pela desidratação provocam o surgimento de sabores amargos, que inviabilizam a comercialização do produto.

2.2 - Propriedades Físicas

2.2.1 - Reologia

Reologia pode ser genericamente definida como o estudo da deformação e do escoamento da matéria ou ainda, o estudo da mobilidade dos fluidos.

Seja uma película delgada de fluido entre duas placas planas separadas por uma distância dy , conforme mostra a Figura 2.1. Supondo que a placa inferior permanece fixa e que uma força de intensidade constante é aplicada sobre a placa superior, esta passa a se movimentar a uma velocidade dv . Ocorre então transferência de quantidade de movimento na direção y , da placa superior para a camada ou lâmina de fluido adjacente e assim consecutivamente para as demais camadas, estabelecendo-se em condições de estado estacionário, um perfil de velocidade entre as duas placas.

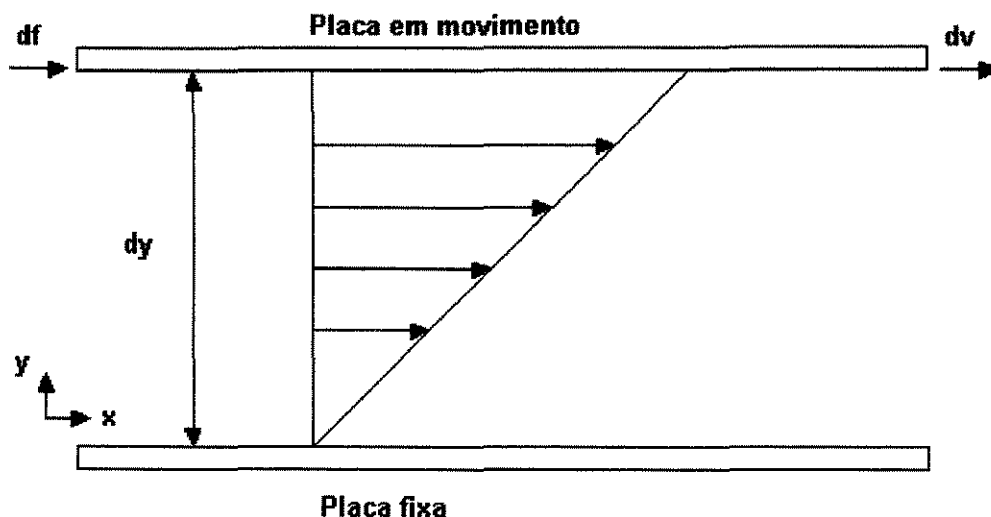


Figura 2.1 – Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas

A força de fricção que se opõe ao escoamento de uma camada em relação a camada adjacente segundo CHEFTTEL e CHEFTTEL (1983), é proporcional a superfície da zona interfacial e ao gradiente de velocidade dv/dy entre as camadas. Sob condições de escoamento laminar a tensão de cisalhamento, τ , definida como a razão entre a força aplicada e a área da placa, dada pela equação:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

A constante de proporcionalidade μ é a viscosidade do fluido, que representa a quantidade de movimento transferida de camada a camada do fluido quando o mesmo se encontra em movimento. Esta equação representa a lei de escoamento viscoso estabelecida por Newton. Todos os fluidos que, em escoamento laminar, apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, são denominados fluidos Newtonianos. A viscosidade do fluido Newtoniano é independente do gradiente de velocidade, variando com a temperatura e a pressão exercida sobre o fluido; para líquidos decresce exponencialmente com a temperatura e aumenta com a pressão (CHEFTTEL e CHEFTTEL, (1983)).

Segundo BOBBIO e BOBBIO (1992), nos fluidos Newtonianos, não há qualquer interação entre seus componentes, ocorrendo apenas efeitos de atrito mecânico cujos níveis energéticos aproximam-se do nível energético para ruptura e formação de pontes de

hidrogênio num líquido. Não existem, naturalmente, fluidos ideais, mas tão somente fluidos cujo comportamento se aproxima do ideal, como é o caso de líquidos puros, soluções verdadeiramente diluídas e poucos sistemas coloidais. Entre os alimentos que possuem comportamento de fluidos Newtonianos destaca-se: bebidas destiladas, refrigerantes artificiais, leite, soluções de sacarose e de vários sais e óleos.

Quando há interação entre os componentes de um fluido e essas interações dependem e afetam a velocidade de deformação causada por forças externas, o fluido é chamado não Newtoniano. Estes fluidos não seguem a Lei de Newton, e a relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade não é linear. A classificação dos diversos fluidos não Newtonianos depende da natureza da relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. O comportamento de diversos tipos de fluido é ilustrado na Figura 2.2 através das curvas de tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade.

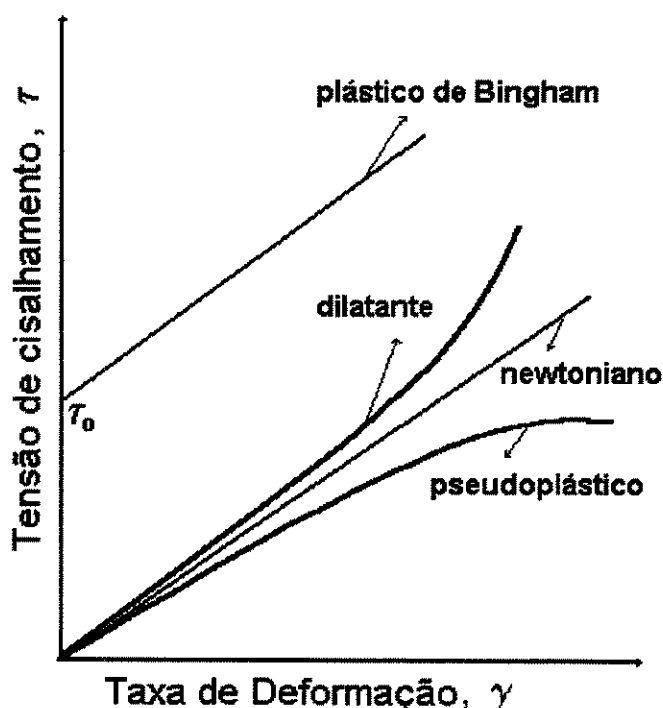


Figura 2.2 - Comportamento reológico de diversos tipos de fluidos

A maioria dos fluidos podem ter seu comportamento representado pela lei da potência, dada pela equação:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (2.2)$$

onde k é o índice de consistência do fluido e n o índice de comportamento de escoamento do fluido. Quando $n=1$, o fluido é Newtoniano e o índice de consistência corresponde a viscosidade do fluido, enquanto $n>1$ caracteriza o fluido dilatante. Para a maioria dos fluidos não Newtonianos $n<1$ e estes fluidos são caracterizados como pseudo plásticos.

Para fluidos não Newtonianos, a viscosidade chamada viscosidade aparente (μ_{ap}), é definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. Para fluidos que seguem o modelo da potência, tem-se :

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\gamma} = k \cdot \gamma^{(n-1)} \quad (2.3)$$

onde $\gamma = \frac{dv}{dy}$ (gradiente de velocidade)

Quando a força aplicada aumenta a fluidez do sistema, ou seja a viscosidade diminui independentemente do tempo de aplicação da força, o fluido é do tipo pseudoplástico ($n<1$). Após cessado o efeito da força aplicada, o fluido passa a ter a mesma viscosidade aparente inicial. Segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983) o comportamento dos fluidos pseudoplásticos pode ser explicado:

- a) por presença , nas suspensões ou emulsões , de macro moléculas ou de partículas não esféricas, assimétricas, que se orientam na direção do fluxo a partir de uma certa velocidade (caso de colóides hidrofílicos que formem ou não géis);
- b) por presença de partículas hidratadas, cuja interação com a fase dispersante aquosa e a forma possam se modificar com a velocidade;
- c) pela deformação progressiva de macromoléculas;
- d) pela ruptura de agregados de partículas, correspondente a ruptura de ligações de hidrogênio ou de ligações de Wan der Waals; esta ruptura pode provocar a liberação do solvente absorvido sobre as partículas.

De uma forma geral, conforme cita CHEFTEL e CHEFTEL (1983), as distintas razões que motivam a diminuição de viscosidade aparente, apresentadas anteriormente, se relacionam com a diminuição do diâmetro aparente das partículas em suspensão.

Quando a fluidez diminui, ou seja, a viscosidade aparente aumenta sob efeito de uma força uniforme aplicada, o fluido é do tipo dilatante. Neste caso, o fluido ao ser submetido a ação da força, aumenta sua resistência ao movimento, aumentando consequentemente a viscosidade aparente. Independentemente do tempo de aplicação da força, o fluido retorna a estrutura inicial, quando cessa a ação da força aplicada.

Há casos entretanto, em que os efeitos descritos e produzidos pela aplicação da força externa perduram parcialmente. Tais fluidos são denominados tixotrópicos e reopéticos. Nos fluidos tixotrópicos a viscosidade aparente diminui com o tempo de exposição, para um dado gradiente de velocidade fixo. Já os fluidos reopéticos apresentam comportamento inverso, para um gradiente de velocidade constante, a viscosidade aparente aumenta com o tempo. Esses fluidos exibem histerese, isto é, quando sujeitos a uma força por um determinado tempo t , sua viscosidade não é a mesma, quando medida no mesmo t , após cessada a ação da força, segundo BOBBIO e BOBBIO (1992). Entre os alimentos que apresentam comportamento tixotrópico estão os géis de pectina com baixo teor de metilação e certos tipos de mel. O tixotropismo pode ser atribuído à presença de ligações de hidrogênio entre as micelas coloidais que, rompidas pela agitação, voltam a se formar no sistema fluido à medida que se diminui esta agitação.

Em certos casos, conforme cita CHEFTEL e CHEFTEL (1983), a agitação pode originar uma redução progressiva e reversível do tamanho das partículas em suspensão, originando uma diminuição irreversível da viscosidade, como acontece por exemplo, com o suco de laranja concentrado.

Para um fluido com características plásticas o movimento só principia quando a tensão inicial aplicada excede um valor mínimo (τ_{B0}), tensão inicial de cisalhamento de Bingham. Os fluidos não Newtonianos que apresentam este comportamento são conhecidos como fluidos de Bingham. O modelo reológico que caracteriza esses fluidos é dado por:

$$\tau = \pm \tau_{B0} + \mu_p \cdot \gamma \quad \text{para} \quad \tau \geq \tau_{B0} \quad (2.4)$$

onde μ_p é o coeficiente de rigidez ou viscosidade plástica.

Quando estão sujeitos a tensões menores que τ_{B0} , estes fluidos comportam-se como sólidos. Atingida a tensão mínima, os fluidos de Bingham escoam de forma similar aos fluidos Newtonianos, apresentando uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, conforme cita CUNHA (1999) e de acordo com as curvas ilustradas na Figura 2.2.

CHEFTEL e CHEFTEL (1983) citam ainda os fluidos com comportamento intermediário entre os fluidos de Bingham e os fluidos pseudoplásticos, ilustrado na Figura 2.3. Segundo esses autores pertencem a esta categoria de fluidos as pastas concentradas de tomate e alguns cremes.

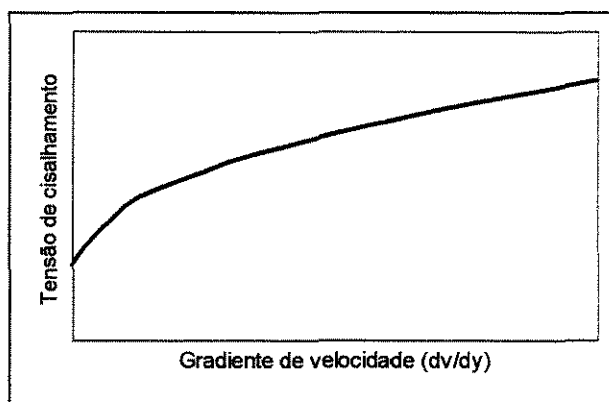


Figura 2.3 - Fluido com comportamento intermediário (entre Bingham e pseudoplástico)

2.2.2 - Tensão Superficial

A tensão superficial σ de um líquido se define, termodinamicamente, como o trabalho reversível por unidade de área, necessário para aumentar, em condições de temperatura e pressão constantes, a área ou extensão da superfície de um líquido. Nestas condições o trabalho reversível pode ser definido como:

$$\sigma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (2.5)$$

Assim, a tensão superficial é definida como a derivada parcial da energia livre de Gibbs com relação à área da superfície, à temperatura e pressão constantes.

Considerando as forças a que estão submetidas as moléculas de um líquido, ilustradas na Figura 2.4, observa-se que as moléculas situadas na superfície são atraídas para o interior, enquanto nas moléculas internas, as forças de atração intermolecular se equilibram. Consequentemente, há de ser realizado um trabalho para que as moléculas sejam mantidas na superfície, já que os líquidos tendem a diminuir, na medida do possível, a extensão de sua superfície, para o valor mínimo de equilíbrio representado pela forma esférica (relação superfície/volume mínima), (CHEFTEL e CHEFTEL (1983)).

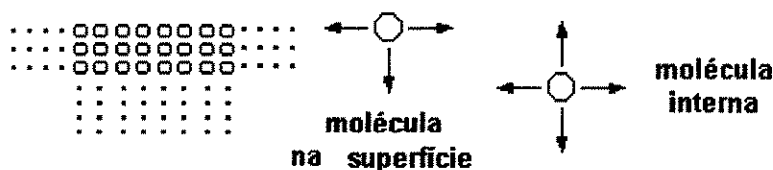


Figura 2.4 - Forças de atração intermolecular no líquido

A tensão superficial varia de acordo com a natureza dos líquidos e se refere, geralmente, a tensão dos líquidos em contato com o ar ou com outra fase gasosa. Para líquidos imiscíveis, tem-se a tensão interfacial, que depende da natureza do segundo constituinte da interface.

Quando se trata do contato entre um líquido e um sólido (Figura 2.5), deve ser considerado o ângulo de contato θ_c ; quando $\theta_c=0^\circ$ a extensão da gota é total e para $\theta_c=180^\circ$ a superfície não é molhada pelo líquido. Em condições intermediárias ($0^\circ < \theta_c < 180^\circ$), considera-se o equilíbrio entre as três tensões superficiais, podendo-se escrever:

$$\sigma_{A/ar} = \sigma_{A/B} - \sigma_{B/ar} \cdot \cos \theta_c \quad (2.6)$$

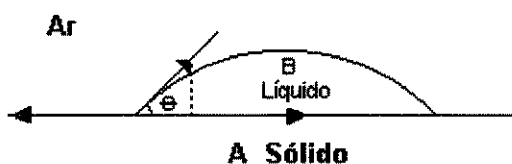


Figura 2.5 - Comportamento de uma gota de líquido (B) sobre a superfície de um sólido (A)

Segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), a diminuição da tensão superficial pode ser decorrente da presença de impurezas no líquido. Com efeito, a presença de substâncias chamadas tensoativas provocam a diminuição da tensão superficial do líquido, modificando a sua estrutura na superfície devido, geralmente, à formação de uma camada monomolecular absorvida e orientada. Estas substâncias também provocam a diminuição da energia interfacial entre líquidos e superfícies sólidas e entre líquidos imiscíveis; no primeiro caso provocam a extensão da superfície do líquido (efeito molhante) e no segundo, a emulsificação ou dissolução (poder dispersante ou solubilizante).

É importante registrar que acima de uma certa concentração de agente tensoativo (concentração micelar crítica), a tensão superficial do líquido não é influenciada pela presença deste agente tensoativo, o mesmo ocorrendo com as demais propriedades, tais como a pressão osmótica e o poder detergente.

Alguns agentes tensoativos estão presentes de forma natural nos alimentos, podendo ser iônicos (sais biliares, fosfolipídios etc) ou não iônicos (colesterol, saponinas); as propriedades superficiais das moléculas iônicas, dependem sobretudo de interações eletrostáticas e podem ser modificadas consideravelmente por eletrólitos e pH, (CHEFTEL e CHEFTEL (1983))

2.3 - Considerações Gerais Sobre o Leito de Jorro

Entre as diversas operações unitárias que envolvem partículas sólidas e fluidos, destaca-se o leito de jorro. Tendo por finalidade promover íntimo contato entre um fluido e partículas, relativamente grandes ($d_p > 1\text{mm}$), que apresentam fluidização de baixa qualidade, esta técnica é aplicada com eficiência à secagem de materiais granulares, pastas e suspensões, à granulação e ao recobrimento de partículas.

Desenvolvido inicialmente por MATHUR e GISHLER (1955), o leito de jorro mostrou-se de tal forma promissor que, já em 1963, foram implantadas no Canadá unidades industriais para secagem de ervilha, lentilha e fibras de linho. MATHUR e EPSTEIN (1974) citam ainda, unidades para resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização, ativação de carvão e estudos em escala piloto para aplicação da

técnica na redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação do carvão, moagem e mistura de sólidos, pirólise de xisto e produção de clínquer de cimento.

Segundo SCHNEIDER e BRIDGWATER (1990), os primeiros estudos sobre secagem de pastas e suspensões em Leito de Jorro foram realizados na União Soviética por REGER et al. (1967) e partiram da secagem de lacas e tintas. A técnica tem se estendido a diferentes tipos de materiais como leite, sangue animal, frutas cítricas, tomate, leite de soja e leveduras, segundo MUJUMDAR (1989), além de produtos químicos e farmacêuticos, segundo SCHNEIDER e BRIDGWATER (1990). BERRUTI et al. (1988) citam a ultrapirólise em reatores de leito de jorro como exemplo de aplicação desta técnica a diferentes processos.

O leito de jorro na forma como foi concebido, conhecido hoje como leito de jorro convencional, consta basicamente de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica, onde um jato de fluido, usualmente o ar, é injetado por um orifício de entrada, localizado na sua extremidade inferior. O leito é formado pela penetração desta corrente de gás através das partículas sólidas, cuja circulação principia quando a vazão do gás é suficiente para provocar o movimento ascendente destas partículas a níveis acima do leito. Forma-se, então, uma região central de alta porosidade, denominada jorro, onde as partículas são arrastadas pneumáticamente, formando no topo uma fonte de sólidos que se espalham radialmente, e descem pelo espaço anular que envolve o jorro, em contra-corrente com o fluido. Esta região anular é caracterizada pela baixa porosidade e pelo movimento descendente dos sólidos, cujo comportamento assemelha-se ao de um leito deslizante. Embora as partículas possam voltar ao jorro ao longo da interface jorro-anel, a maior parte retorna pela região inferior da base tronco-cônica, onde inverte o sentido do movimento, deslocando-se ascendentemente, caracterizando assim o movimento cíclico dos sólidos.

É importante registrar as limitações na utilização do leito de jorro convencional citadas por MUJUMDAR (1989):

- (1) elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- (2) limites sobre as dimensões geométricas do leito de jorro para operar com eficiência;
- (3) fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa;

(4) faixa de operação limitada;

(5) capacidade limitada por unidade de espaço (devido aos limites sobre as dimensões do secador e a altura máxima de carga capaz de manter o jorro estável); e

(6) dificuldades na mudança de escala.

Visando superar parte dessas limitações, o sistema convencional passou a sofrer modificações, surgindo, então, diversos tipos de leitos de jorro, dentre os quais o leito de jorro cônico, largamente utilizados nos países do leste europeu.

Nos últimos anos, pesquisadores têm desenvolvido inúmeros trabalhos referentes ao leito cônico, podendo-se citar entre outros, REYES e MASSARANI (1991, 1992, 1993), POVRENOVIC et al. (1992), SOUZA et al. (1994), REYES et al. (1996, 1997) e OLIVEIRA e PASSOS (1993, 1997).

MUJUMDAR (1989) faz uma síntese dos mais diversos tipos de leito de jorro quanto à geometria, ao mecanismo que promove o jorro, à entrada do ar, às modificações internas, ao leito de partículas, à área da seção transversal do leito, ao tipo de operação e às possíveis variações no modo de promover o contato entre o fluido e as partículas.

Em relação à geometria, além do convencional e cônico, tem sido estudado o leito bidimensional ou retangular que surgiu como forma de contornar algumas das principais limitações da configuração convencional. O leito de jorro com alta porosidade conhecido como “Jet Spouted Bed” foi bastante evidenciado nos últimos anos em trabalhos apresentados por MARKOWSKI e KAMINSKI (1983), MARKOWSKI (1992, 1993) e TIA et al. (1995).

Quanto ao mecanismo que promove o jorro, pode-se citar o pneumático, comumente utilizado nos leitos convencionais; o mecânico, onde o deslocamento das partículas é realizado por um transportador mecânico tipo parafuso; e o vibratório, cuja base cônica é flexível e vibra provocando o movimento do leito. Referindo-se à entrada do gás (mecanismo pneumático), que tanto pode ser o ar como outro gás ou vapor superaquecido, esta se processa na forma convencional através de um simples orifício de entrada na base, com aeração complementar na região anular, com múltiplas entradas (diversos arranjos), ou combinadas com outros mecanismos tipo mecânico e vibro-jorrado. Nos processos de secagem à vácuo, usa-se comumente os jorros vibratórios.

A primeira modificação interna sofrida pelo leito de jorro, com o intuito de superar parte das limitações já citadas em parágrafo anterior, consiste na introdução de um tubo central (tubo “draft”), separando a região do jorro da região anular e evitando o contínuo curto circuito que ocorre entre as partículas descendentes do espaço anular e o jorro. Uma separação entre o tubo e a entrada do ar possibilita o deslocamento de partículas da região anular para o jorro. Dentre as vantagens da utilização desta configuração não convencional MUJUMDAR (1989) destaca:

- (1) pode ser aplicado para qualquer sólido que possa ser arrastado pneumaticamente, numa larga faixa de tamanho e uniformidade de partículas;
- (2) a recirculação de sólidos inicia-se a menores quedas de pressão;
- (3) a altura e o diâmetro do leito podem ser alterados substancialmente;
- (4) menores vazões de ar são requeridas para uma dada circulação de sólidos; e
- (5) a taxa de recirculação de sólidos pode ser variada independentemente do diâmetro da coluna, da altura do leito e tamanho da partícula.

No mesmo artigo, o autor cita algumas das desvantagens quanto ao uso desta técnica:

- (1) a mistura entre as partículas é reduzida;
- (2) projeto mais complexo;
- (3) tendência de entupimento quando se inicia ou se encerra o movimento; e
- (4) menores taxas de transferência de calor e massa, devido à maior regularidade no movimento das partículas.

CLAFIN e FANE (1984) estudaram o leito de jorro com tubo central na secagem e desinfecção térmica de trigo, respectivamente, constatando um melhor controle do tempo de residência das partículas e maior economia térmica. A utilização desta técnica, entretanto, limita necessariamente o fluxo de gás no anel. Segundo BERRUTI et al. (1988), as informações disponíveis sobre a hidrodinâmica do leito de jorro com tubo central são bastante limitadas.

Outras variações, citadas na literatura, referem-se ao leito de jorro múltiplo, ao tridimensional (seção transversal triangular), ao de base plana com tubo central e ao dividido internamente por pratos ou bandejas.

Podendo operar de forma contínua, intermitente ou em batelada, o leito pode ser constituído por partículas ativas, cuja troca de calor e massa com o fluido é simultânea, e por partículas inertes no caso da secagem de pastas e suspensões.

2.4 - Curvas Características do Leito de Jorro

O mecanismo de transição do leito fixo para o jorro pode ser mostrado na curva característica da queda de pressão em função da vazão do ar, ilustrada na figura 2.6. Inicialmente, para pequenas vazões, o gás apenas circula, sem perturbar as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento da vazão, as partículas próximas ao orifício de entrada do gás se deslocam, surgindo então uma cavidade circundada por uma camada sólida compacta, ainda mais resistente à passagem do gás, que acarretará uma maior queda de pressão no leito. À medida que a vazão cresce, a cavidade vai se alongando, havendo formação de um jorro interno. A queda de pressão continua a aumentar até atingir o valor máximo ($\Delta P_{\text{máx}}$), no ponto B. A partir deste ponto, o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade, e a queda de pressão, conseqüentemente, passa a diminuir. No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas do núcleo central já é suficiente para provocar uma expansão do leito. Esta expansão pode ser acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno, resultando em instabilidade e flutuações na queda de pressão, formação de bolhas e, no caso de cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno. Um pequeno incremento na vazão do gás além do ponto C, correspondente ao jorro incipiente, faz com que a queda de pressão caia até o ponto D, no qual o jorro aflora na superfície. Neste ponto, a queda de pressão (ΔP_{jes}) torna-se constante e um aumento na vazão do gás provoca somente a elevação da fonte. Devido à instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito, os pontos C e D, que correspondem respectivamente às vazões de jorro incipiente e de início de jorro estável, não são reprodutíveis, sendo preferível se trabalhar

com o processo inverso, diminuindo-se lentamente a vazão de gás até o ponto E, onde se tem a menor vazão do gás (Q_{jm}) com a qual se pode obter o jorro estável. Prosseguindo a redução na vazão, a queda de pressão aumenta, atingindo o máximo em F, localizado bem abaixo do ponto B, já que no processo inverso, a perda de carga acontece devido apenas à interação gás-sólido. A partir de F, a queda de pressão decresce com a vazão.

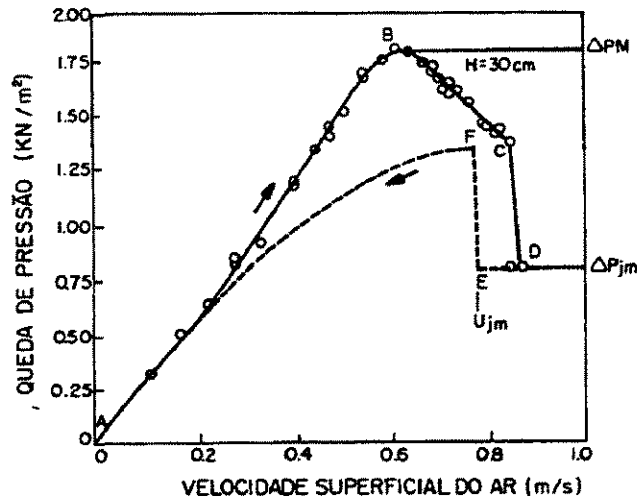


Figura 2.6 - Curva característica da queda de pressão. MADONNA et al. (1961). Trigo, $d_p=0,36\text{cm}$, $D_c=0,152\text{ m}$, $D_i=1,27 \times 10^{-2}\text{ m}$, base cônica de 60° .

A obtenção do jorro estável em leitos de jorro convencionais está relacionada com a altura máxima do leito ($H_{\text{máx}}$), onde ainda é possível se obter um sistema estável, sem que ocorra a fluidização heterogênea na superfície do jorro ou o movimento empistonado. Desta forma, pode-se observar que o sistema é limitado pela altura da carga de sólidos, sofrendo ainda a influência dos parâmetros geométricos da coluna (ângulo do cone e relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada do gás) e das propriedades e dimensões das partículas envolvidas.

Embora os estudos fluidodinâmicos do leito de jorro convencional partam da obtenção experimental das curvas características de queda de pressão, e subsequente determinação da queda de pressão máxima ($\Delta P_{\text{máx}}$), queda de pressão no jorro estável (ΔP_{jes}), vazão do jorro mínimo (Q_{jm}), além da altura máxima ($H_{\text{máx}}$), uma previsão destas

variáveis é de fundamental importância quando se projeta o equipamento, principalmente no que concerne ao dimensionamento do soprador. A literatura propõe diversas correlações, na sua maioria empíricas, que, embora muitas vezes possam apresentar resultados contraditórios e estejam limitadas às faixas de condições operacionais bastante restritas, fornecem, principalmente para o jorro convencional, uma previsão das variáveis hidrodinâmicas já citadas, possibilitando assim uma estimativa razoável dos parâmetros de projeto do equipamento.

O efeito da suspensão sobre os parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro, começaram a ser estudados nos últimos anos. Os primeiros resultados são encontrados em PATEL et al. (1986), que em ensaios realizados com água e glicerol, observou uma diminuição de Q_{jm} da ordem de 10%, o que foi atribuído à diminuição da quantidade de partículas que ingressavam no jorro. Posteriormente LIMA et al. (1992), analisaram a influência da polpa de umbu sobre a vazão de jorro mínimo (Q_{jm}), queda de pressão de jorro estável (ΔP_{jes}), queda máxima de pressão ($\Delta P_{máx}$). Os resultados mostraram um aumento substancial de $\Delta P_{máx}$, provocado pela polpa de umbu. Entretanto, a influência sobre ΔP_{jes} foi pouco relevante, principalmente para alturas de leitos correspondentes à sessão cilíndrica da coluna. Com relação a vazão de jorro mínimo (Q_{jm}), as curvas características mostraram uma diminuição significativa desse parâmetro nos ensaios realizados com polpa, para todas as cargas de inerte estudadas.

Os resultados aparentemente contraditórios da vazão de jorro mínimo e queda de pressão máxima foram explicados pelos efeitos contrários que a polpa de umbu poderia exercer sobre a dinâmica do leito. A elevação da queda de pressão máxima seria decorrente da maior energia requisitada pelo jato de ar para romper a estrutura mais aderida da camada de sólidos, devido à aglomeração das partículas. Após o rompimento da camada, o efeito lubrificante atribuído à polpa de umbu e constatado em RAMOS (1997) facilitaria o escoamento do gás, e o jorro estável seria alcançado em vazões mais baixas.

REYES e MASSARANI (1992) estudaram a influência da suspensão de alumina e da água pura na vazão de jorro mínimo e na queda de pressão de jorro estável. Foi verificado que a alimentação de qualquer um dos fluidos provocava um aumento de Q_{jm} , principalmente para alimentações próximas da capacidade máxima do secador, quando Q_{jm} chegou a aumentar cerca de 20%. O efeito da suspensão na vazão de jorro mínimo foi mais

acentuado do que o da água pura. Posteriormente, REYES et al. (1996), avaliaram o efeito da água sobre os parâmetros característicos do leito e propuseram correlações similares às de TSVIK et al. (1967) e MUKHLENOV e GORSHTEN (1965) para Q_{jm} e ΔP_{jes} , respectivamente, as quais foi agregado um parâmetro que incluía o volume de água injetado no leito. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que tanto ΔP_{jes} como Q_{jm} diminuíam com o volume de água ingressado no leito. Importante se faz observar que, de acordo com os autores, nestes ensaios a alimentação de água foi efetuada em batelada. Os resultados encontrados em relação a Q_{jm} e ΔP_{jes} não concordaram com os apresentados por REYES e MASSARANI (1992), que conduziram seus ensaios com alimentação contínua de água, concordando, entretanto, com os resultados de PATEL et al. (1986) e LIMA et al. (1992), cujas alimentações de glicerol e polpas de umbu foram conduzidas de forma intermitente. Existe, portanto, uma tendência de que a forma de alimentação do fluido (contínua e descontínua), tenha sido um dos fatores que interferiram no comportamento de Q_{jm} e ΔP_{jes} relatados pelos autores.

Nos ensaios fluidodinâmicos do leito de jorro em presença da polpa de acerola, ALSINA et al. (1996) observaram que o aumento da percentagem de polpa (definida como a relação entre a massa de polpa alimentada e a massa de inerte, M_{polpa}/M_I), provocava a elevação de ΔP_{jes} e $\Delta P_{máx}$ e diminuição de Q_{jm} , sendo esta em proporção pouco significativa, para a faixa de proporção de polpa utilizada pelos autores. Os resultados foram similares aos encontrados por LIMA et al. (1992) para a polpa de umbu.

SPITZNER NETO e FREIRE (1997), também estudaram a variação no comportamento do leito de jorro, ocasionada pela introdução da pasta no processo. Os autores realizaram ensaios hidrodinâmicos com alimentação contínua de água, considerada “pasta padrão”. Eles encontraram que a vazão de jorro mínimo e a queda de pressão em jorro estável, alteravam-se na presença da água. Para vazões de água inferiores à capacidade do equipamento, Q_{jm} aumentou em até 20% em relação ao seu valor sem a presença da água. Nestas condições a queda de pressão de jorro estável diminuiu em até 10% na configuração cônica e em até 20% na configuração cônica cilíndrica, ambas em relação ao seu valor sem a presença da água, conforme citada no trabalho. Estes resultados, de acordo com SPITZNER NETO e FREIRE (1997) não foram suficientes para explicar de forma conclusiva o comportamento complexo tanto da variação de Q_{jm} como de ΔP_{jes} , em

função da alimentação da pasta. Os autores formularam, entretanto, algumas hipóteses para a variação desses parâmetros baseados, principalmente, no aumento das forças de adesão interparticulares provocado pela presença da água no leito de partículas, e nas forças de tensão causada pela viscosidade da água.

PASSOS et al. (1997), aprofundaram os estudos sobre a influência da pasta na fluidodinâmica do leito, analisando os dados de SANTANA (1996) relativos à adição de glicerol, de REYES (1993) e LIMA (1992). As principais conclusões apresentadas pelos autores foram as seguintes:

- existe uma vazão de alimentação crítica, acima da qual as forças de coesão interpartículas causadas pelas pontes de líquido são significativas;
- estas forças de coesão dependem das propriedades da pasta e das partículas inertes. Diminuindo o diâmetro da partícula e/ou a esfericidade, a força é aumentada;
- se este tipo de força de interação é importante, Q_{jm} aumentará com a vazão de suspensão alimentada até o colapso do jorro ser atingido;
- se este tipo de força pode ser negligenciado, Q_{jm} diminui com a alimentação da suspensão. Neste caso, finas camadas da suspensão sobre a superfície do inerte promovem o deslizamento entre as partículas.

Importante se faz evidenciar a facilidade com que as partículas de inerte deslizavam nos ensaios de secagem de polpas de umbu, manga e abacate relatados tanto por RAMOS (1997) como por LIMA et al. (1992).

2.5 - Taxa de Circulação de Sólidos e Diâmetro do Jorro

A taxa de circulação de sólidos ou vazão de partículas do jorro, (W_p) pode ser determinada diretamente por técnicas experimentais, como as utilizadas por BERRUTI et al. (1988), e LIMA et al. (1992), ou de forma indireta, como por exemplo através de medidas de velocidade das partículas na parede plana de colunas semicirculares

transparentes, THORLEY et al. (1955). Outras técnicas de medidas de W_p são encontradas na literatura, como a desenvolvida por CHATTERJEE (1970), que determinou a taxa de circulação de sólidos segundo um modelo de mistura de partículas coloridas usadas como traçador. REYES et al. (1994) e ALSINA et al. (1995) utilizaram uma célula de medidas que forneciam os valores locais da circulação de sólidos. Com respeito ao efeito das variáveis operacionais, BERRUTI et al. (1989) encontraram que W_p crescia com a vazão do gás, atingindo um valor máximo numa dada vazão, passando então a decrescer. LIMA (1992) observou que W_p aumentava com a vazão do gás com tendência a se tornar constante em níveis de vazão mais elevadas. Limitações do soprador, segundo os autores, impediram que conclusões mais precisas fossem apresentadas com relação a este comportamento. LIMA (1992) constatou ainda, que a taxa de circulação de sólidos crescia com a carga de inerte quando o leito de partículas ocupava apenas a sessão cônica da coluna. Quando o leito correspondia à região cônica-cilíndrica, a circulação de sólidos permanecia praticamente constante com o aumento da carga de inerte. ALSINA et al. (1995) observaram comportamento similar ao relatado por BERRUTI et al. (1989) com respeito ao efeito da vazão do ar sobre a circulação de sólidos. A diminuição de W_p em níveis elevados de vazão do ar ($Q/Q_{jm} > 1,4$) foi atribuída ao choque das partículas contra a placa defletora, devido a elevada altura da fonte, o que provocaria a desaceleração das partículas, diminuindo consequentemente a taxa de circulação de sólidos na fonte.

As medidas de circulação de sólidos de ALSINA et al. (1995) e LIMA (1992), foram efetuadas na região da fonte. Em relação ao efeito da carga inerte, os resultados apresentados por ALSINA et al. (1996) não concordaram com os de LIMA (1992). Entretanto, os resultados referentes a influência da presença da polpa sobre W_s , foram coincidentes. Tanto LIMA (1992), como ALSINA et al. (1995) e REYES et al. (1994) encontraram que a presença da polpa diminui a taxa de circulação de sólidos.

Usualmente, as medidas experimentais do diâmetro do jorro (D_j) são feitas sobre a face plana de colunas semicirculares transparentes. Segundo MATHUR e EPSTEIN (1974), o jorro assume uma forma estável quando há equilíbrio dinâmico entre as forças que atuam na interface jorro-anel, oriundas do movimento do gás e do sólido. Deste modo, a forma assumida pelo jorro deve receber considerável atenção, já que facilita o entendimento da dinâmica do leito. Uma grande variedade de formas observadas em diferentes condições experimentais é ilustrada na literatura, e mostram que D_j varia com o nível do leito,

principalmente nas proximidades do orifício de entrada do gás, quando pode ocorrer expansão ou contração repentina do diâmetro do jorro. Esta variação afeta diretamente o perfil longitudinal de velocidade do gás, influenciando consequentemente a velocidade das partículas e o perfil de porosidade. Entretanto, a maioria dos modelos teóricos relacionados com a fluidodinâmica do leito negligencia a variação axial sofrida pelo diâmetro do jorro. Diversas correlações para estimativa de D_j , geralmente empíricas, são encontradas na literatura e se referem a valores médios de D_j , medidos ao longo do leito, MALEK et al. (1963), ABDERAZEK (1969) e LEFROY e DAVIDSON (1969), entre outros.

LIMA (1992) determinou o diâmetro do jorro a partir dos perfis radiais de temperatura, medidas na superfície do leito. Nestes perfis a região do jorro ficou caracterizada pela diminuição radial da temperatura. Na região anular a temperatura mantinha-se constante, passando a diminuir nas proximidades da parede da coluna, em decorrência das perdas de calor para o ambiente. O raio do jorro foi considerado como a medida que caracterizava a interface jorro-anel.

Em relação à dependência com a carga de inerte e vazão do ar, LIMA (1992), observou que o diâmetro do jorro crescia com Q e diminuía com a altura do leito.

Analisando o comportamento do diâmetro do jorro em presença da polpa de umbu, o autor observou que não houve influência desta nos experimentos realizados com uma carga de inerte correspondente a uma altura de leito $H = 0,253$ m, o mesmo não ocorrendo para $H = 0,316$ m, quando foi verificada substancial diminuição do diâmetro do jorro à baixas vazões de ar. O autor esclarece, entretanto, que os perfis radiais de temperatura medidos na superfície do leito, tendem a tornarem-se planos para elevadas cargas de inerte, o que implicaria em erros na determinação do diâmetro do jorro, segundo o método apresentado. Esta pode ter sido a causa da mudança de comportamento do diâmetro do jorro em presença da suspensão, observada com a maior carga de inerte.

Estudos sobre o diâmetro do jorro são essenciais para a modelagem do leito de jorro, principalmente quando são propostos modelos que analisam as regiões do jorro e do anel separadamente.

2.6 - Secagem de Pastas e Suspensões

2.6.1 – Mecanismo

Segundo BARRET e FANE (1990), para se compreender o potencial de secagem de pastas e suspensões em leito de jorro, é necessário que se entenda o mecanismo que ocorre dentro do leito.

A atomização da suspensão sobre o leito reveste as partículas com uma fina camada do material. À medida que seca, a película torna-se frágil devido ao efeito das colisões interpartículas no jorro, sendo então fraturada e arrastada para fora pela corrente de ar. O pó é coletado num ciclone localizado na parte superior do secador.

Segundo MATHUR e EPSTEIN (1974), o processo cíclico de deposição, secagem e demolição da película procede continuamente, sempre que a temperatura do leito para uma dada vazão de alimentação da suspensão for mantida a um nível suficientemente alto, tal que a proporção de partículas molhadas, sob condições de estado estacionário, permaneça pequena, e o movimento do jorro não seja comprometido pela aglomeração destas partículas.

BARRET e FANE (1990) afirmam que, na prática, a taxa de remoção da película deve ser sempre maior ou igual a taxa de alimentação da suspensão, e que películas finas fornecem taxas de secagem substancialmente constantes, não afetadas pelo movimento da umidade dentro do material.

Desta forma, observa-se que dois fatores governam a performance do secador: as taxas de transferência de calor e massa envolvidas na secagem e a friabilidade da película aderida à superfície das partículas. Um desses fatores pode ser a etapa limitante, no que se refere à estabilidade do processo, uma vez que esta depende não somente da taxa de secagem, como também das propriedades mecânicas da película, que, se estiver fortemente aderida, pode simplesmente continuar a crescer como num processo de granulação.

A acumulação do material dentro do leito é um indicador de regime transiente e, segundo MUJUMDAR (1989), depende de uma série de fatores, tais como: vazões de suspensão e de ar, propriedades do material, localização da alimentação, características da atomização, etc.

Nos experimentos realizados e relatados por BARRET e FANE (1990), foi observado que:

- (1) a acumulação no leito aumenta com a vazão da suspensão;
- (2) a acumulação diminui com o aumento da vazão do ar. Para baixas vazões de ar, nenhum estado estacionário foi observado após 3 horas de operação;
- (3) a taxa de acumulação diminui com o aumento da temperatura de secagem. Entretanto, a eficiência térmica decresce e as perdas de calor aumentam com a temperatura;
- (4) propriedades da superfície e massa das partículas também afetam a taxa de acumulação. Uma textura rugosa provoca a formação de uma película irregular com secagem não uniforme. A massa das partículas influencia o nível de energia de colisão requerida para quebrar a película. Partículas de alta densidade promovem a taxa de acumulação do estado estacionário a níveis mais baixos e tempos mais curtos; e
- (5) o tipo de alimentação pode afetar a acumulação de forma imprevisível.

BARRET e FANE (1990) observaram ainda, que o uso de uma placa defletora acima do jorro central afeta a cinética de atrição da película favorecendo a remoção do material acumulado no leito e, conseqüentemente, a secagem da suspensão.

O leito de jorro utilizado na secagem de pastas e suspensões está, portanto, sujeito a diversas implicações de ordem técnica, que podem vir a ser controladas por uma seleção cuidadosa de condições operacionais que se adequem ao tipo de material manipulado. Soluções viscosas ou grudentas podem provocar aglomeração das partículas inertes, causando sérios problemas operacionais e comprometendo a performance do jorro, MUJUMDAR (1989).

2.6.2 - Estado da Arte

O método para secagem de pastas e suspensões (cristalização evaporativa), num leito de jorro com partículas inertes, foi desenvolvido inicialmente por um grupo de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Leningrado, para aplicações onde os sólidos secos são requeridos na forma de pós finos, ao invés de grãos. A técnica foi utilizada na

secagem de diversos tipos de materiais, incluindo tintas orgânicas, lacas, soluções de sal e açúcar e vários reagentes químicos, com resultados bastante promissores.

Avaliações econômicas preliminares foram feitas, segundo MATHUR e EPSTEIN (1974) por ROMANKOV e RASHKAVSKAYA (1968) a partir da comparação do custo da secagem de tintas na União Soviética, usando diferentes tipos de secadores numa planta industrial com capacidade de produção de 6.000 kg/dia. O custo total de produção de 1.000 kg de tinta com 5% de umidade foi cotado em 24,3 rublos para o secador de leito de jorro, contra cerca de 46 a 48 rublos para o secador em tambor com igual capacidade.

PHAM e HAUGHEY (1978) desenvolveram um secador de leito fluidizado de baixo custo para produzir sangue seco solúvel, fazendo uma comparação econômica da sua planta piloto (160kg/h de água evaporada) com uma planta utilizando secagem em spray, e comprovaram o custo bastante inferior do secador de leito fluidizado. Posteriormente, fizeram alguns testes com o secador de leito de jorro e observaram um melhoramento, tanto na operação de secagem, como na solubilidade do produto. A partir desses resultados, PHAM e POOLEY (1981) construíram um leito de jorro com o objetivo de desenvolver um secador de baixo custo que produzisse um produto de alta qualidade, similar ao sangue seco obtido no secador spray. Testaram a eficiência do equipamento na secagem de sangue, plasma, concentrado de hemáceas, caseinado de sódio e uma mistura de proteína e gordura em água, dentre outros. Eles concluíram que o leito de jorro é uma alternativa barata ao secador spray em certas aplicações (soluções pouco viscosas e pegajosas com baixo teor de gordura), principalmente quando a escala de operação não é grande (até 1.000 l/h). Em relação ao secador de leito fluidizado, verificaram que o jorro apresentava uma maior capacidade de alimentação e um produto de melhor qualidade.

Considerando estes resultados, PHAM (1983) utilizou o mesmo equipamento para estudar o comportamento do jorro e a performance da secagem de sangue animal, apresentando um modelo matemático para prever o efeito de variações nas condições operacionais em alguns parâmetros do processo.

Estudos sobre secagem de sangue animal em leito de jorro foram realizados no Brasil por RÉ e FREIRE (1986). Eles estudaram o efeito da temperatura na umidade e solubilidade do pó, além da influência de outras variáveis operacionais como carga de inerte e circulação de sólidos na vazão máxima de sangue admissível no leito, com o

objetivo de reunir as condições de operação que favorecessem a capacidade máxima de produção na qualidade desejada. Uma análise preliminar de ampliação de escala revelou dificuldades no processo, para uma ampliação de apenas de 4,6 vezes, o que levou estes pesquisadores a sugerirem que o projeto de secadores em leito de jorro deveria incluir várias escalas intermediárias entre bancada e industrial.

BARRET e FANE (1990) estudaram o leito de jorro convencional para secar materiais líquidos, usando leite de soja à diferentes concentrações de sólidos. Eles compararam vários tipos de secadores que podem ser usados com pastas e suspensões sensíveis ao calor e demonstraram as vantagens do leito de jorro com partículas inertes.

Trabalhos similares são encontrados na literatura, quanto à utilização desta técnica na secagem de sangue bovino com anticoagulante e extratos vegetais (alcachofra, guaraná, cáscara sagrada, arnica do Brasil e pteridium), RÉ e FREIRE (1986,1989), de soluções de NaCl e suspensões de alumina, SCHNEIDER e BRIDGWATER (1990), de pasta de alumina, REYES e MASSARANI (1991, 1992, 1993), sangue bovino e água, OLIVEIRA (1994), glicerol e soluções de alumina, SCHNEIDER (1993) e leite desnatado não homogeneizado, MARTINEZ et al. (1993). Os trabalhos mais recentes referem-se a misturas de carboidratos e CMC em água, simulando a composição de polpas de frutas, REYES et al. (1996, 1997), leite desnatado e integral, sucos de laranja e cenoura e café, MARTINEZ et al. (1995).

Quanto à secagem de polpa de frutas, HUFENUSSLER e KACHAN (1985) estudaram a desidratação de purê de banana, analisando a umidade do pó em relação ao obtido em secadores spray e a vácuo, promovendo também uma avaliação sensorial, onde o sabor do purê reconstituído foi comparado com o do purê original e com o produzido em secadores de tambores rotativos. Os resultados destes testes mostraram que o pó obtido no secador de leito de jorro, atendia aos padrões de conservação exigidos (abaixo de 3% de umidade), e que o sabor do purê reconstituído não diferia do original a um nível de 5% de significância, nível não atingido pelo purê reconstituído com o pó do secador rotativo.

Em trabalho posterior, KACHAN e CHIAPPETTA (1988) apresentaram os resultados obtidos na desidratação de pasta de tomate em leito de jorro, com ênfase aos dados fluidodinâmicos do equipamento, às variáveis operacionais envolvidas e à seleção das condições propícias à secagem. A caracterização do pó de tomate obtido e da pasta

reconstituída foi objeto de um segundo trabalho desenvolvido por KACHAN et al. (1988), cujos resultados referem-se ao conteúdo de umidade do pó, à umidade de equilíbrio e de aglomeração, ao tempo de reconstituição da pasta e algumas propriedades desta, tais como: acidez, pH, açúcares redutores, viscosidade e cor. Com relação à umidade do pó, apenas o obtido em ensaios a 80°C (teor de umidade de 3,11 a 4,49%) foi considerado viável para utilização comercial. Quanto às outras propriedades, os resultados das análises de acidez total, pH e açúcares redutores mostraram que a pasta atendia aos padrões de qualidade exigidos. Os testes de cor e viscosidade, entretanto, apontaram para uma diminuição da viscosidade e mudança de cor da pasta reconstituída em comparação com a pasta original.

Os primeiros resultados dos estudos sobre a secagem de polpa de umbu em leito de jorro foram apresentados por ALMEIDA (1991) e referem-se aos testes hidrodinâmicos preliminares do equipamento e a influência da temperatura de operação e vazão do ar, sobre a umidade do produto, eficiência térmica e rendimento do processo.

Os testes hidrodinâmicos preliminares, efetuados com cargas limitadas à região cônica da coluna, mostraram uma diminuição na vazão de jorro mínimo (Q_{jm}), nos experimentos realizados com a polpa de umbu.

Com relação à influência da temperatura e à vazão do gás, sobre a umidade do produto, os resultados apresentados por ALMEIDA (1991) se restringiram a uma altura de inerte (H) de 0,133 m (correspondente à região cônica), vazões do ar (Q) de 25,4 a 29,8 l/s, taxa de alimentação da polpa em torno de 100 a 350 g/h e cinco níveis de temperatura numa faixa de 55° C a 80° C. Foi observado que a umidade crescia com a temperatura até um valor máximo, passando então a decrescer, e que elevadas vazões de ar provocavam um maior teor de umidade no produto.

A eficiência térmica foi maior para temperaturas e vazões baixas, enquanto o rendimento do processo aumentou em temperaturas e vazões mais elevadas. Uma análise destes resultados levou ALMEIDA (1991) a sugerir que as temperaturas de 55°C e 80°C e vazões de 29,4 l/s e 35,8 l/s, respectivamente, favoreciam o processo no que se referia à obtenção do pó com baixo teor de umidade (menor que 4%), embora estas condições não fossem as mais satisfatórias com relação ao rendimento e eficiência térmica, respectivamente.

Note-se que o teor de umidade abaixo de 4% é considerado viável para utilização comercial, segundo KACHAN e CHIAPPETTA (1988).

MOREIRA (1991) estudou os efeitos da temperatura de operação sobre o teor de vitamina C do pó de umbu, obtido mediante a secagem em leito de jorro, concluindo que faixas de temperatura entre 70°C e 80°C favoreciam a preservação da vitamina C, fato este atribuído à secagem mais rápida, que evita a degradação do produto. O efeito da carga de inerte no desempenho do secador foi estudado por SOUZA (1992). Seus resultados mostraram que, na faixa de condições operacionais trabalhada, maiores cargas de inerte favoreciam a vazão máxima de polpa admissível no secador. As conclusões apresentadas por ALMEIDA (1991), MOREIRA (1991) e SOUZA (1992) demonstraram que a secagem da polpa de umbu em leito de jorro poderia ser viável, desde que se fizesse um estudo primoroso das condições operacionais e ampliação de escala que otimizassem o processo.

Estudando a cinética de secagem de polpa de umbu, LIMA (1995) constatou que esta ocorria à taxa constante. Suas curvas de secagem mostraram que o tempo para atingir o estado estacionário era de 15 a 20 minutos, dependendo das condições operacionais. O colapso do jorro, verificado na maioria dos ensaios, todavia, era acompanhado de acentuada mudança de regime. Uma vez suspensa a alimentação da polpa, o estado estacionário era recuperado e a secagem prosseguia em novo período de taxa constante. Ainda com relação à secagem, da polpa de umbu, estudos fluidodinâmicos e térmicos desenvolvidos por LIMA (1992) mostraram a significativa influência da polpa sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, conforme já citado nos itens 2.2 e 2.3 da presente revisão bibliográfica. Com respeito aos estudos térmicos, foram enfatizados os balanços de energia no leito, as taxas de evaporação e a eficiência térmica do equipamento. Foi proposto um modelo para o cálculo da área efetiva de troca térmica baseado na determinação dos coeficientes globais de transferência de calor na região anular do leito. Os principais resultados deste estudo, encontrados em LIMA (1992), mostraram que:

- a eficiência térmica diminuía com o aumento da temperatura e da vazão do gás, e crescia com a vazão de polpa alimentada;

- a área efetiva de troca térmica não correspondia à área total disponível das partículas inertes;

- a fração de partículas molhadas (definida como a relação entre a área efetiva de troca térmica e a área total das partículas inertes) era uma função direta da relação entre a vazão de polpa alimentada e o volume total de partículas;

- o modelo proposto para o cálculo da área efetiva de troca térmica foi consistente com os dados experimentais.

Os estudos com a polpa de umbu foram ampliados para outras variedades de frutas tropicais. LIMA et al. (1995), estudaram a influência da temperatura sobre o teor de umidade dos pós obtidos na secagem em leito de jorro de polpas de cajá, seriguela e acerola. Os resultados mostraram que os pós obtidos em todos os ensaios apresentavam menor teor de umidade quando a secagem era efetuada em temperaturas mais elevadas. Constataram, entretanto, que o aumento da temperatura provocava escurecimento do pó e formação de aglomerados. Este efeito foi observado no pó de acerola para temperaturas superiores a 50°C e nos pós de cajá e seriguela processados em temperaturas próximas a 80°C. Segundo os autores, os ensaios com a polpa de acerola apresentaram sérios problemas de instabilidade, com acentuada retenção de material no leito e baixíssima produção de pó. Resultado semelhante foi relatado por ALSINA et al. (1995), que também estudaram a secagem de polpa de acerola no leito de jorro.

Com base nestes resultados, estudos posteriores com a polpa de seriguela foram realizados por LIMA et al. (1995) à temperatura de 70°C, objetivando avaliar os efeitos da carga de inerte e da vazão do ar sobre o desempenho do processo. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que a umidade do pó frente à relação Q/Q_{jm} apresentava um comportamento bastante complexo. Para relações de Q/Q_{jm} entre 1,0 e 1,25, a umidade crescia, passando a decrescer em níveis de Q/Q_{jm} mais elevados. Eles justificaram este comportamento considerando as influências contrárias de dois fatores: com uma maior vazão do ar, as eficiências de trocas térmica e de massa aumentavam, porém, simultaneamente, o tempo de residência do pó na coluna era menor, o que implicava em maiores níveis de umidade. Na secagem da polpa de seriguela, o primeiro efeito mostrou-se predominante para níveis mais elevados de vazão do ar, quando as eficiências de trocas térmica e de massa foram tão elevadas que superaram o efeito do curto tempo de residência do pó na coluna. Com relação à produção do pó, os autores observaram que esta crescia com a relação Q/Q_{jm} . A influência da carga de inerte sobre a umidade e sobre a produção do pó, segundo os autores, mostrou-se significativamente favorável

quando a carga foi aumentada de 1,2 kg até 2,2 kg. A partir deste valor, tanto a umidade, como a fração de pó coletado no ciclone, não sofreram modificações relevantes com o aumento da carga de inerte. REYES e MASSARANI (1991) também observaram, na faixa de operação em que trabalharam, que não havia influência significativa da carga de inerte sobre o conteúdo de umidade do pó obtido na secagem do pasta de alumina no leito de jorro.

De um modo geral, LIMA et al. (1995) concluíram que os resultados encontrados na secagem de polpa de seriguela eram promissores, uma vez que o pó apresentava baixo teor de umidade, compatível com os níveis exigidos para conservação, embora a acumulação de material no leito fosse bastante elevada.

ALSINA et al. (1996) estudou a performance do leito de jorro na secagem de polpa de acerola. Os autores calcularam a área efetiva de troca térmica usando a metodologia empregada por LIMA (1992). Os resultados mostraram que a área efetiva de troca térmica correspondia apenas a uma fração da área total das partículas inertes, o que estava de acordo tanto com os resultados de LIMA e ALSINA (1994), como com os de MARTINEZ et al. (1993) na secagem de leite em leito de jorro, e com os de REYES et al. (1995), que estudaram as taxas de evaporação de água em leito fluidizado.

A performance da secagem de polpa de acerola no leito de jorro, segundo ALSINA et al. (1996), foi afetada, principalmente, pela estabilidade do jorro, que limitou a taxa de alimentação da polpa e, conseqüentemente, a capacidade do secador. Entretanto, ainda segundo estes autores, o produto obtido apresentou ótima qualidade, com conteúdo de umidade na faixa de 4%, quando a taxa de alimentação da polpa e temperatura do ar, foram mantidas nos níveis adequados.

Na secagem da polpa de cajá, LIMA et al. (1996) levaram em consideração os resultados da secagem de seriguela e as observações de ALSINA et al. (1996), com respeito à vazão de polpa alimentada. A secagem foi processada na faixa de condições operacionais mais propícias encontradas por LIMA et al. (1995), com respeito à carga de inerte e vazão do ar. A alimentação da polpa foi feita de forma semi-contínua, de acordo com ALSINA et al. (1996), sendo avaliada a influência da quantidade e concentração da polpa alimentada sobre o desempenho do processo.

As conclusões apresentadas por LIMA et al. (1996), nas condições operacionais em que trabalharam, foram as seguintes:

- maiores vazões de ar favoreciam o processo, fornecendo pós mais secos e em maior quantidade;

- aumentando-se a vazão de alimentação da polpa, mantendo-se constante as demais condições operacionais, a umidade do pó crescia e a fração de pó coletada tendia a diminuir;

- polpas mais concentradas prejudicaram a dinâmica do leito e, conseqüentemente, o arraste do pó. A reumidificação das partículas inertes, já revestidas pela película do material, concorreu para a produção de pós bastante úmidos e em pequenas quantidades, com relação à quantidade de sólidos presentes na polpa alimentada;

- não foi observada interferência relevante da carga de inerte na umidade do pó coletado. Com relação à fração de sólidos recuperados, não houve dependência da carga de inerte a partir de 2,75 kg para $Q/Q_{jm} = 1,1$ e a partir de 2,50 kg para $Q/Q_{jm} = 1,2$;

- a desidratação da polpa de cajá em leito de jorro apresentou problemas operacionais que comprometeram a eficiência do processo, tanto no que se referiu à qualidade, como a produção do pó. O pó do cajá apresentou, em média, teores de umidade da ordem de 10%, enquanto o da seriguela, segundo LIMA et al. (1995), nas mesmas condições operacionais, ficou em torno de 4%. Com a polpa de umbu, LIMA (1992) obteve pós com umidade média de 5%.

Os autores não conseguiram justificar o comportamento adverso da polpa de cajá em relação às polpas de umbu e seriguela, pelas propriedades físicas e reológicas destas polpas. Sugeriram, então, um estudo posterior sobre a influência da composição química, do tamanho e dispersão das partículas nas suspensões, no desempenho da secagem de polpas de frutas no leito de jorro.

REYES et al. (1996) analisaram e compararam as características de um secador de leito de jorro cônico e de um secador de leito fluidizado com dimensões similares, na secagem de suspensões “simuladas” de polpas de frutas, constituídas de carboidratos (amido, carboximetilcelulose e maltodextrina) e água, com concentrações de sólidos de 10% e 20% em peso. Foi determinada, experimentalmente, a capacidade máxima de

evaporação da água nos dois equipamentos, utilizando inicialmente, água pura e, posteriormente, a suspensão. Foi ajustada uma equação para a capacidade máxima de evaporação de água no leito de jorro ($C_{w_{máx}}$) em função da temperatura e do fluxo adimensional de ar (Q/Q_{jm}), válida para uma carga de inerte de 5 kg.

Nas mesmas condições operacionais, as capacidades máximas para a secagem das suspensões ($Q_{w_{máx}}$), resultaram inferiores aos valores correspondentes às capacidades máximas de evaporação de água, para o leito de jorro e, especialmente, para o fluidizado. Para ambos os secadores, tanto nos experimentos de evaporação de água, como na secagem das suspensões, $C_{w_{máx}}$ e $Q_{w_{máx}}$ aumentaram significativamente com a vazão e a temperatura do ar. O aumento da carga de inerte, entretanto, aumentava apenas ligeiramente a capacidade de evaporação da água no leito de jorro, diferentemente do significativo efeito observado no leito fluidizado.

Dados relativos à umidade do produto mostraram que, no leito de jorro, a umidade em função da vazão da suspensão permanecia aproximadamente constante, aumentando nas proximidades da capacidade máxima. No leito fluidizado, o crescimento da umidade com o fluxo da suspensão, mostrou-se pouco acentuado. A umidade diminuiu com o aumento da temperatura e com a concentração de sólidos na suspensão para os dois secadores. Os autores observaram ainda, que os pós obtidos no leito fluidizado, mesmo em níveis de vazão do ar mais elevados, apresentavam conteúdos de umidade significativamente superiores aos dos pós obtidos no leito de jorro. O mesmo comportamento foi observado com respeito às taxas de retenção do produto. Cálculos efetuados, com os dados apresentados no trabalho, apontaram para percentuais de retenção da ordem de 60%, atingindo 90% para relações de $v/v_{mf} = 3,0$ (relação entre a velocidade do gás e a velocidade de mínima fluidização). Não foram apresentados os resultados referentes à retenção do produto no leito do jorro; os autores afirmaram apenas que esta aumentava gradualmente com o tempo de operação e que, para ambos os secadores, a retenção era elevado, principalmente nas proximidades da capacidade máxima, provocando, inclusive, o “término da fluidização” ou colapso do jorro. Foi observado também que a retenção do produto, no interior do leito, se apresentava, tanto aderida às partículas, como na forma de grânulos do material.

MARTINEZ et al. (1995) estudaram a secagem de alimentos líquidos, tais como leite, à diferentes concentrações de gordura, leite desnatado, sucos de laranja, cenoura e

café, no leito de jorro com partículas inertes de polipropileno. Os principais resultados deste trabalho referem-se à influência da composição química das pastas e suspensões no desempenho do processo e serão apresentadas no item 2.5 da presente revisão bibliográfica. Tanto a secagem do suco de cenoura, como a do suco de laranja, apresentaram sérios problemas de retenção do pó, que ficou aderido às partículas inertes.

RAMOS (1997) estudou a secagem em leito de jorro de polpas de cajá, cajá-manga, umbu, seriguela, manga e pinha no leito de jorro, mantendo fixas todas as condições operacionais, com o objetivo de avaliar a influência da composição química das polpas no desempenho do processo. Foi avaliada a qualidade dos produtos obtidos e apresentada a cinética de produção de pó, mediante análise do teor de umidade e pesagem da massa de pó coletada em intervalos regulares de tempo, durante o processamento de cada polpa. Os resultados das análises físico-químicas realizadas tanto nos pós, como nas polpas, mostraram que em relação à matéria prima original, ocorreram perdas de vitamina C, acidez e açúcares no produto final desidratado. Em relação ao pH, as alterações foram insignificantes. Com exceção do pó de cajá, os pós das demais frutas apresentaram baixos teores de umidade (abaixo de 6%). De acordo com estes resultados, RAMOS (1997) concluiu que:

- o baixo teor de umidade dos produtos em pó, resultantes da secagem das polpas de frutas em leito de jorro, é fator primordial para a conservação desses produtos e atende aos níveis necessários à conservação;
- as perdas em acidez e açúcares nos pós são inerentes aos processos que envolvem tratamento térmico, e não chegam a comprometer a qualidade dos mesmos;
- com relação à acidez, os pós que tiveram seus teores reduzidos, apresentaram melhor palatibilidade;
- as perdas de vitamina C foram elevadas, principalmente nos pós oriundos de frutas mais ácidas, que atingiram percentuais de 56%, 51% e 40% em relação às polpas de umbu, cajá-manga e seriguela, respectivamente. Entretanto, a obtenção dos produtos com elevado valor agregado, mediante secagem em leito de jorro, justifica as perdas ocorridas em decorrência do processamento.

Em relação à produção de pó, RAMOS (1997) verificou que nas condições operacionais em que se conduziram os ensaios de secagem, os melhores resultados foram

obtidos com as polpas de umbu e de manga, cuja eficiência da coleta do pó, definida como a relação entre a massa de sólidos alimentada e a massa de sólidos coletado no ciclone (expressas em base seca) foram de 60% e 47%, respectivamente. As maiores perdas foram observadas no material agregado às paredes da coluna e à placa defletora. No processamento destas polpas, não houve acumulação de material no leito, que operou de forma estável, com produção uniforme de pó e elevada concentração de partículas na fonte. No processamento das polpas de pinha e de cajá-manga, as condições fluidodinâmicas do leito foram comprometidas, culminando no colapso do jorro. Com as polpas de cajá e seriguela, o leito apresentou problemas de acumulação de material, constatada tanto pela não uniformidade de produção e umidade do pó ao longo do ensaio, como pela instabilidade fluidodinâmica observada durante a secagem destas polpas. Elevadas variações, tanto nas medidas de pressão, como na temperatura do ar na saída do secador, são relatadas pelos autores. Mesmo operando de forma instável e com pequena concentração de partículas na fonte, não houve colapso do jorro na secagem das polpas de cajá e seriguela, cujas eficiências de coleta do pó apresentaram valores praticamente iguais, em torno de 18%.

Os resultados encontrados por RAMOS (1997) estão de acordo com as observações de MUJUMDAR (1989), quando afirma que o surgimento do regime transiente no leito de jorro é um dos graves problemas deste equipamento, sendo resultado da acumulação de material no leito.

Os resultados satisfatórios obtidos na secagem de polpa de manga levaram os autores a estudarem com maior profundidade a secagem desta polpa. JERÔNIMO (1998) realizou estudos preliminares sobre a influência da vazão do ar, vazão de alimentação e tipo de inerte na secagem de polpa de manga em leito de jorro, tanto no que se referia à eficiência da produção do pó, como à umidade do produto obtido. Os resultados encontrados pelos autores apontaram para as seguintes conclusões:

- a massa de polpa alimentada foi o fator que mais influenciou o processo, provocando acumulação de material no leito e comprometendo sua fluidodinâmica e conseqüente colapso do jorro;

- a produção do pó de manga no leito de jorro foi elevada, chegando a atingir percentuais em torno de 60%, quando o poliestireno foi utilizado como material inerte;

- a baixa retenção do pó no inerte mostrou que as maiores perdas ocorriam devido ao material agregado às paredes da coluna;

- o comportamento linear da coleta do pó em função do tempo, comprovou a constância na taxa de produção de pó e que, em condições de operação apropriadas, o processo ocorria em estado estacionário, com total estabilidade do leito, produzindo pós com teores de umidade baixos e uniformes ao longo do tempo;

- Os resultados obtidos na secagem com o polipropileno usado como inerte não foram satisfatórios, principalmente em relação à baixa produção de pó. Houve indícios de que o polipropileno tivesse absorvido parte do material a ser desidratado, ou ainda, que tivesse ocorrido revestimento das partículas com a polpa de manga.

Vale enfatizar que os resultados referentes à eficiência de produção do pó, ainda segundo JERÔNIMO (1998), poderão vir a serem melhorados, mediante otimização da coleta no ciclone e implementação de um sistema vibratório que propicie o desprendimento do material aderido às paredes da coluna.

Secagens de pastas oriundas de produtos agrícolas, tais como cebola e jerimum, alho e beterraba, também foram estudadas pelo grupo de pesquisadores da base de pesquisa, e os resultados encontrados por DA MATA et al. (1996), LIMA et al. (1996) e LIMA et al. (1998) foram bastante satisfatórios.

2.7 – Influências das Propriedades dos Materiais na Secagem de Pastas e Suspensões

Embora as características dos materiais tenham sido apontadas por diversos autores, PHAM e POOLEY (1981) e MUJUMDAR (1989) entre outros, como um dos fatores que mais influenciam a secagem de pastas e suspensões no leito de jorro, dados referentes à este tema ainda são bastante escassos na literatura. Além do mais, a diversidade de materiais usados no estudo da secagem nos últimos anos, inviabiliza estudos mais gerais com respeito à influência das propriedades de suspensões de natureza totalmente diferentes, tais como alimentos de origem animal ou vegetal, produtos químicos orgânicos e inorgânicos, bioprodutos, medicamentos e etc. Nesta revisão bibliográfica serão

apresentadas apenas os dados encontrados na literatura com respeito à influência da composição e das propriedades físicas na secagem de produtos de origem vegetal e animal.

RÉ e FREIRE (1989) ao estudarem a secagem de materiais pastosos, sangue e extratos vegetais, no leito de jorro, observaram que havia influência das propriedades físicas do material pastoso no tamanho da partícula do produto em pó. O sangue em pó apresentou distribuição de tamanho mais uniforme do que os extratos secos, o que foi atribuído ao elevado conteúdo de resina presente nos materiais de origem vegetal. Para os extratos vegetais, os autores identificaram uma relação entre a viscosidade do material e o diâmetro médio das partículas do produto desidratado.

MARTINEZ et al. (1995) estudaram a secagem de uma série de alimentos líquidos à diferentes concentrações de gordura (leite integral, homogeneizado e não homogeneizado, sucos de laranja e de cenoura e café), avaliando a influência do teor de gordura, pH, adição de cálcio e presença de açúcares, na recuperação do produto em pó. A discussão apresentada pelos autores com respeito aos resultados obtidos é relatada a seguir:

a) experimentos com leite à diferentes concentrações de gordura – Nos experimentos com leite integral, os autores constataram que não houve acumulação do produto sobre as partículas, diferentemente do observado na secagem de leite desnatado, cuja acumulação foi elevada, segundo MARTINEZ et al. (1993). Este resultado foi considerado surpreendente, uma vez que em processos convencionais a desidratação do leite desnatado ocorre com maior facilidade, enquanto o leite integral apresenta maiores dificuldades em virtude do elevado conteúdo de gordura. No entanto, no leito de jorro, a presença da gordura facilitou a obtenção do produto desidratado, o que foi atribuído à formação de regiões de baixo impacto mecânico, devido à presença de glóbulos de gordura, que reduzem a dureza do depósito de material sobre as partículas, facilitando a quebra da película aderida e conseqüente arraste do pó. No trabalho, são apresentados os conteúdos mínimos de gordura necessários para liberação do pó, 6,15% para o leite homogeneizado e 8,65% para o não homogeneizado. Abaixo destes percentuais, houve acumulação do pó, formando um depósito compacto de material a secar. O fato do leite não homogeneizado apresentar conteúdo mínimo de gordura, que permite a liberação do pó, maior que a do leite homogeneizado foi associado ao efeito da homogeneização sobre os glóbulos de gordura;

b) efeito do pH e da adição de CaCl_2 – considerando que no processamento térmico do leite ocorre formação de depósitos de sólidos sobre as superfícies aquecidas, os autores investigaram a possibilidade de ocorrer fenômeno semelhante sobre a superfície das partículas de polipropileno utilizado como material inerte, nos ensaios de secagem no leito de jorro. De acordo com os pesquisadores a acumulação de sólidos é afetada pelo pH, temperatura e concentração de sais. MARTINEZ et al. (1995) conduziram ensaios de secagem com leite desnatado, variando o pH e adicionando CaCl_2 com a finalidade de observarem se estes fatores afetariam de alguma forma a adesão do produto sobre as partículas de polipropileno. Quando o pH do leite foi aumentado para 6,65 o pó foi liberado das partículas, o que levaram os autores a concluir que em níveis mais elevados de pH o depósito formado sobre as partículas é menos espesso e compacto do que em pH mais baixo (6,35). Ainda, segundo os autores, estes resultados são observados no tratamento térmico do leite nos trocadores de calor. Os depósitos de material sobre o aço inoxidável eram menos compactos e espessos quando o pH do leite era aumentado. Nos ensaios realizados com o leite desnatado com pH corrigido para 6,65 e adição de CaCl_2 , o pó se mostrou aderido às partículas;

c) experimentos com suco de laranja, cenoura e café - Segundo os autores, nos ensaios de secagem dos sucos de laranja e cenoura, não houve liberação de pó e as partículas inertes aderiram-se umas às outras, provocando a interrupção do jorro. O comportamento da secagem do café foi semelhante ao observado no leite desnatado; houve aderência do material às partículas. Todavia, como o produto aderido não era pegajoso, as partículas continuaram soltas, não havendo interrupção do movimento, apesar do volume do leito ter aumentado em decorrência da acumulação do produto. MARTINEZ et al. (1995) apresentaram uma discussão detalhada sobre o comportamento do leito de jorro na secagem de produtos vegetais, relacionando os problemas de aderência das partículas e interrupção do jorro com as características pegajosas dos sucos de frutas e vegetais provocadas pelos elevados conteúdos de açúcares (glicose, frutose e sacarose). De acordo com o mecanismo discutido pelos autores, o efeito pegajoso acontece quando as partículas secas absorvem umidade na superfície, formando pontes de líquidos suficientemente fortes para resistir à deformação mecânica. Durante a secagem no leito de jorro, pode suceder que uma nova camada de líquido seja depositada sobre a anterior antes desta ser liberada, consequentemente, a temperatura diminui e a película torna-se pegajosa. Os autores

concluíram, então, que o diferente comportamento observado nas secagens de café e leite desnatado frente às frutas e vegetais poderia ser explicado com base na natureza dos açúcares presentes em cada produto. A higroscopocidade extrema dos açúcares presentes nos sucos de laranja e de cenoura pode ser o principal fator que determina a tendência das partículas inertes a aderirem-se umas às outras, provocando, assim, a interrupção do movimento destas e, conseqüentemente, o colapso do jorro. Na conclusão do trabalho, MARTINEZ et al. (1995) enfatizaram a necessidade de se aprofundar os estudos sobre os processos físico-químicos que ocorrem durante o processamento no secador de leite de jorro, com a finalidade de se esclarecer as razões pelas quais ocorre a adesão do produto sobre as partículas inertes.

RAMOS (1997) estudou o efeito do conteúdo de açúcar, teor de gordura, acidez e pH de polpas de frutas no desempenho da secagem em leito de jorro de polpas de cajá, seriguela, cajá-manga, pinha, umbu e abacate. Entre os fatores analisados, apenas os referentes aos teores de açúcar e de gordura influenciaram o processo. Altos teores de gordura promoveram maiores eficiências de coleta do pó, enquanto que para a concentração de açúcar a tendência foi inversa. Os autores observaram ainda que a influência da composição química ocorria de forma combinada. Para a manga, apesar da elevada concentração de açúcar, o comportamento fluidodinâmico do leito não foi comprometido. Este resultado, segundo os autores, sugere que a influência negativa da alta concentração de açúcar foi anulada pelo elevado teor de gordura presente na manga. Com relação à influência dos demais fatores, os autores discutiram a possibilidade de atuarem de forma combinada sobre o comportamento das polpas, a exemplo do observado com a polpa de manga, anulando efeitos isolados. De um modo geral, eles concluíram que altos teores de açúcar, na ausência de gordura, tendem a prejudicar a performance do leito de jorro na secagem de polpas de frutas.

Os resultados apresentados por RAMOS (1997) concordaram com os de MARTINEZ (1995) no que diz respeito à influência dos teores de gordura e açúcares dos materiais no desempenho da secagem de pastas e suspensões em leito de jorro.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os dados relativos ao estudo sobre a influência da composição química das suspensões na secagem de polpas de frutas em leito de jorro foram obtidos em uma série de experimentos envolvendo análises físico-químicas, determinações das propriedades físicas dos materiais, ensaios fluidodinâmicos e de secagem.

3.1 – Ensaios Preliminares

3.1.1 – *Definição das Variáveis de Composição*

Para definição das variáveis de composição a serem estudadas, dados de RAMOS (1997) foram detalhadamente analisados e complementados através de ensaios de secagem com polpas de abacate e de acerola, de determinações das propriedades físicas e análises físico-químicas de outros constituintes presentes nas polpas de frutas, tais como as fibras. Realizou-se ainda uma série de ensaios fluidodinâmicos no leito de jorro com partículas de poliestireno de baixa densidade em presença das polpas. Foram confirmadas, importantes interferências dos açúcares redutores, gorduras e fibras no desempenho do processo, no que se refere à eficiência de produção de pó, sendo obtidas correlações bem ajustadas aos dados de eficiência de produção de pó em função de fatores expressos pela combinação destas composições, LIMA et al. (2000).

Dados sobre composição de frutas tropicais, principalmente no que concerne aos teores de amido e pectina, são escassos na literatura. Considerando a importante influência do amido e da pectina nas propriedades físicas dos alimentos fluidos, foram realizados ainda, testes qualitativos para identificar a presença destes constituintes nas polpas de frutas desidratadas por RAMOS (1997) (umbu, cajá, cajá-manga, pinha, seriguela e manga espada), estendendo-se estas análises para as polpas de abacate e acerola. Identificou-se a

presença tanto de amido como de pectina em quase todas as polpas. Os ensaios apontaram para concentrações mais elevadas de amido nas polpas de pinha, seriguela e manga espada, enquanto, na polpa de acerola, a presença deste era quase imperceptível. Com base na análise dos dados de RAMOS (1997) e nos resultados destes testes, foram definidas como variáveis de composição, a serem analisadas no presente trabalho, os teores de açúcares redutores, lipídios, fibras, amido e pectina.

3.1.2 – Definição da Solução Padrão

Inicialmente foram realizados alguns ensaios de secagem e determinações de propriedades físicas de polpas sintéticas formuladas com composições similares às polpas de frutas. Para controle das propriedades físicas, principalmente reológicas, as polpas sintéticas eram preparadas com adição de CMC (carboximetilcelulose). Com estas polpas não se conseguiu reproduzir o comportamento observado com as polpas de frutas naturais, tanto em relação às propriedades físicas, como no que diz respeito aos ensaios de secagem no leito de jorro. Não houve produção de pó nestes ensaios, sendo claramente identificado um processo de recobrimento das partículas inertes, atribuído a presença do CMC na composição das polpas sintéticas.

Optou-se, então, pela definição de uma polpa padrão, cuja composição fosse variada segundo diferentes níveis de concentração, pela adição de glicose, frutose, gordura, ácido cítrico, fibras, amido, pectina e água. A polpa de manga espada foi escolhida por se tratar de uma fruta, cuja produção no Nordeste, ocorre, praticamente, o ano todo, conforme já citado no capítulo anterior.

3.1.3 – Seleção do Material Inerte

Visto que o poliestireno de baixa densidade, comumente empregado na secagem de polpas de frutas, apresentou problemas de fadiga precoce em presença de materiais gordurosos, de acordo com os testes preliminares e segundo RAMOS (1997), necessário se fez realizar alguns ensaios com outros materiais para se definir o inerte que seria empregado na secagem das polpas com composição modificada. Testou-se o polietileno de alta densidade, polipropileno e SANGEL[®] na secagem de polpa de manga natural. Os testes apontaram para a utilização do polietileno de alta densidade.

Visando-se testar a metodologia a ser empregada nos ensaios com as polpas modificadas, foram realizados ensaios de secagem de polpas de cajá, umbu, acerola, e seriguela com o polietileno de alta densidade, obtendo-se os dados relativos à fluidodinâmica e ao desempenho do processo. Os resultados foram satisfatórios.

A metodologia empregada nos ensaios de secagem e testes fluidodinâmicos das polpas com composição modificada foi praticamente a mesma dos experimentos realizados com as polpas naturais, sofrendo apenas os ajustes necessários para aprimoramento das medidas.

Neste trabalho o enfoque será dado aos ensaios com as polpas modificadas. Inicialmente, serão descritos os procedimentos experimentais referentes à caracterização físico-química da polpa de manga natural, preparação e determinação das propriedades físicas das polpas modificadas e em seguida às metodologias empregadas nos ensaios fluidodinâmicos e de secagem.

Para uma análise mais precisa sobre a influência das polpas, testes fluidodinâmicos foram realizados com o leito constituído apenas pelas partículas inertes e depois acrescido de água, na mesma proporção utilizada com as polpas

Para cada polpa modificada, realizava-se, inicialmente, o ensaio fluidodinâmico com obtenção da curva característica e determinação dos parâmetros fluidodinâmicos, vazão de jorro mínimo (Q_{jm}) e queda de pressão de jorro estável (ΔP_{jes}). Eram fixadas a carga de inerte (MI), a temperatura de entrada do ar (T_{ge}) e a alimentação da polpa (M_{polpa}). Nos ensaios de secagem avaliou-se o desempenho do processo, sendo obtidos dados de eficiência de produção de pó, retenção no leito, umidade do pó, curvas de secagem e ângulo de repouso do leito após a secagem.

3.2 - Materiais

3.2.1 - Polpa Natural de Manga

A polpa de manga espada foi fornecida pela indústria MIL FRUTAS, sendo processada sem adição de conservantes, aditivos químicos ou água. As mangas foram

despolpadas em despolpadeira industrial e, posteriormente, refinadas para redução do tamanho das partículas em suspensão. A polpa foi distribuída em sacos plásticos de 500 ml de capacidade e congelada na câmara frigorífica da fábrica à temperatura de -18°C . Permaneceu armazenada na câmara frigorífica por um período de três dias, tempo suficiente para garantir congelamento completo do material. No laboratório, permaneceu estocada em freezer doméstico vertical à -20°C , especificamente destinado ao armazenamento de polpas de frutas.

A polpa foi caracterizada, determinando-se pelos métodos físico-químicos descritos no item 3.3.1, os teores de açúcares redutores e não redutores, fibras, amido, pectina, sólidos totais, água, sólidos solúveis e lipídios, além do pH e da acidez expressa em percentagem de ácido cítrico.

Ensaio reológicos e medidas de densidade e de tensão superficial foram efetuados empregando-se o mesmo procedimento experimental aplicado às polpas modificadas, detalhado no item 3.3.4.

3.2.2 - Materiais Utilizados na Formulação das Polpas Modificadas

Para formulação e ajuste das composições das polpas modificadas foram utilizados os produtos químicos e demais materiais listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Materiais usados na formulação das polpas modificadas

Composição Ajustada	Material	Especificação
Açúcares Redutores	Glicose e Frutose	PA – MERCK
Amido	Amido solúvel	PA – MERCK
Pectina	Pectina cítrica	PA – MERCK
Acidez	Ácido cítrico	PA – MERCK
Lipídios	Azeite de oliva	Comercial - Beira Alta
Fibras	Fibras de manga	Extraídas da polpa natural
Umidade	Água destilada	_____

3.2.3 - Material Inerte

Utilizou-se como material inerte partículas de polietileno de alta densidade, com $3,9 \times 10^{-3}$ m de diâmetro, densidade de 950 kg/m^3 e fator de forma 0,76 (esfericidade). A porosidade do leito estático composto destas partículas é 0,29 com densidade aparente de 679 kg/m^3 .

O fator de forma foi obtido por projeção das partículas e calculado pela relação entre os diâmetros inscrito e circunscrito das superfícies projetadas. A densidade das partículas foi determinada por picnometria líquida (álcool etílico), utilizando-se picnômetros previamente calibrados. As determinações foram feitas em quintuplicatas. Para o diâmetro das partículas, foi empregado o método do volume de líquido deslocado (éter etílico). A densidade aparente foi calculada como a relação entre a massa e o volume ocupado pelo leito (estático) de partículas no secador. Com a densidade das partículas e a do leito, calculou-se a porosidade do leito estático.

Em todos os ensaios de caracterização foram empregadas as técnicas usuais de amostragem, garantindo-se a representabilidade das amostras. Os ensaios para medidas do diâmetro e fator de forma das partículas foram efetuados com 20 e 10 amostras, respectivamente, cujos tamanhos ficavam compreendidos numa faixa de 20 a 100 partículas.

3.3 - Equipamentos

3.3.1 - Leito de Jorro

O secador consiste de um leito de jorro cônico-cilíndrico, construído em aço inoxidável com visores em acrílico, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 3.1. O leito consiste de uma base cônica, com ângulo incluído de 60° , altura de 13 cm e diâmetro de entrada de 3 cm. A coluna cilíndrica tem 18 cm de diâmetro e altura de 72 cm.

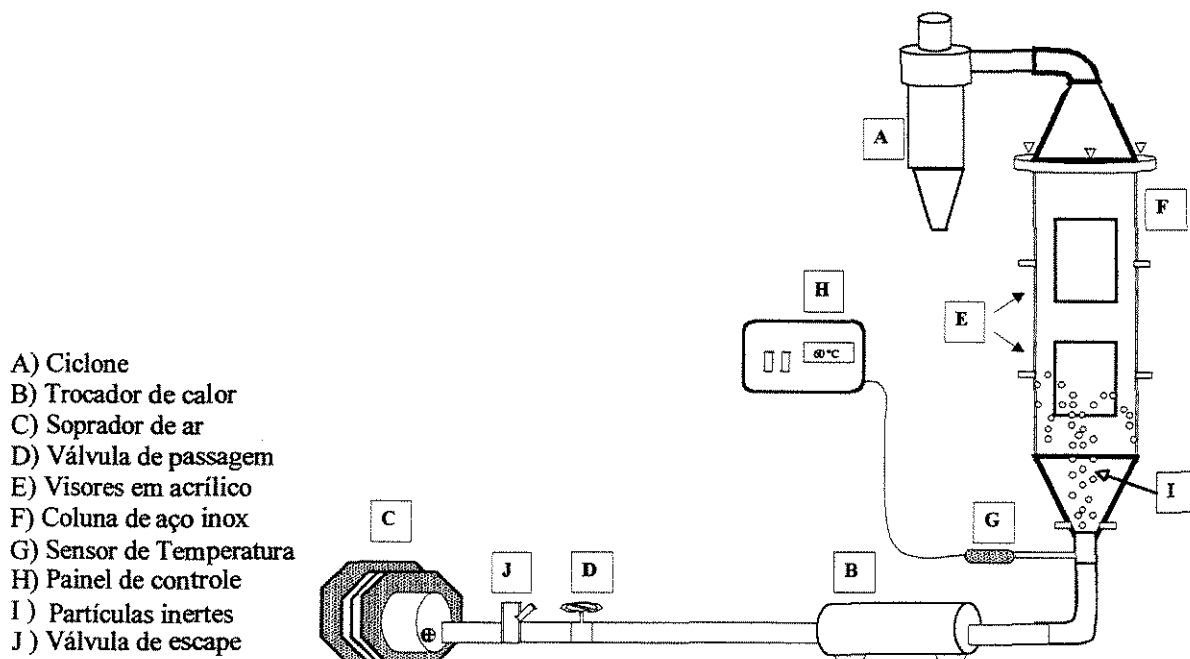


Figura 3.1 - Diagrama esquemático do secador

As polpas eram injetadas no leito através de seringas veterinárias de 25 ml de capacidade, na região da fonte. O ciclone, do tipo Lapple com 10 cm de diâmetro de coluna, construído em PVC e vidro, promovia a separação e recolhimento do produto sólido.

Equipamentos Periféricos e Instrumentação:

- Soprador marca IBRAM-Weq modelo CR-6 com 4 cv de potência.
- Controlador de temperatura marca OMRON, modelo E5AW com precisão de 0,1°C e controle de temperatura na faixa de $\pm 1^\circ\text{C}$
- Termopares do tipo K (chromel-alumel) ligados a um indicador digital de temperatura, marca Lutron, TM-906 A, com precisão de 0,1°C.
- Termohigrômetro digital para medida da umidade relativa e temperatura do ar na saída do ciclone, marca Cole-Parmer, nº 37950-10, com precisão de 0,1% e 0,1°C, respectivamente.
- Aquecedor elétrico composto de um conjunto de duas resistências, com potência total de 2.000 W.

- Anemômetro digital para medida de velocidade do ar na saída do ciclone, marca Lutron, AM-4201, com precisão de 0,1 m/s.
- Manômetro diferencial de vidro tipo tubo em U, para medidas da queda de pressão do leito.

3.3.2 - Equipamentos para Determinação das Propriedades Físicas, Análises Físico-químicas e Acompanhamento da Secagem

- Tensiômetro CSC DuNOY, modelo nº 70535.
- Reômetro SHANNON, modelo R1:2:M-H, operação manual.
- Potenciômetro DIGIMED, modelo DMPH-2.
- Refratômetro marca PZO WARSZAWA , modelo RL-2, NR 2720.
- Balança analítica AND, modelo HR-200, precisão de 0,0001 g.
- Balança semi-analítica com capacidade de 2 kg e precisão de 0,1 g.
- Estufa de secagem e esterilização marca Cole-Parmer, modelo 52100-00.
- Agitadores magnéticos.
- Espectrofotômetro VARIAN, tipo Star 3400 CX.

3.4 - Procedimento Experimental

De acordo com um planejamento estatístico fatorial fracionário do tipo 2^{5-1} foram realizados 16 ensaios fluidodinâmicos com três repetições no ponto central. Os ensaios de secagem também foram conduzidos de acordo com este planejamento.

Foram consideradas as composições de açúcares redutores, lipídios, fibras, amido e pectina em dois níveis de concentração, segundo as 16 combinações previstas pelo planejamento fracionário, e no nível correspondente ao valor médio das concentrações

(ponto central). Os níveis de concentração inferior referem-se à composição da manga natural. Os níveis de concentração superior foram escolhidos tomando como base dados de composição de frutas tropicais encontrados na literatura e obtidos experimentalmente para uma série de frutas tropicais. Para os açúcares redutores e amido, as concentrações máximas foram fixadas com base na composição da banana madura, (ITAL, 1980). Em relação as fibras e gordura, definiram-se limites máximos tomando como referência os resultados obtidos em análises físico-químicas realizadas em amostras de polpas de abacates produzidos na região. A concentração média de pectina na goiaba, segundo ITAL (1981), foi tomada com referência para definição da concentração máxima deste constituinte nas polpas modificadas.

A metodologia para definição da matriz experimental, as concentrações máximas e mínimas expressas em frações mássicas, assim como as planilhas dos balanços materiais efetuados para cálculo das massas dos componentes que participaram da formulação das polpas modificadas, são mostradas no Apêndice I.

Para os testes fluidodinâmicos, as variáveis de resposta foram a vazão de jorro mínimo, a queda de pressão de jorro estável e o ângulo de repouso das partículas molhadas com a polpa. Nos ensaios de secagem, a análise foi feita, tendo como respostas a eficiência de produção de pó, a retenção de sólidos no leito e o ângulo de repouso do leito após a secagem (θ_s).

A matriz experimental, baseada no planejamento fatorial, encontra-se ilustrada na Tabela 3.2. Os níveis de concentração são dados pela razão entre a fração mássica de cada constituinte analisado e a fração mássica de água presente em cada polpa.

Tabela 3.2 - Matriz experimental

Ensaio	Concentração (x/xágua%)				
	Açúcares Redutores	Gordura	Fibras	Amido	Pectina
01	7.67 (-1)	0.78(-1)	0.50(-1)	0.52(-1)	1.82(+1)
02	19.95(+1)	0.78(-1)	0.50(-1)	0.52(-1)	0.67(-1)
03	7.67(-1)	6.84(+1)	0.50(-1)	0.52(-1)	0.67(-1)
04	19.95(+1)	6.84(+1)	0.50(-1)	0.52(-1)	1.82(+1)
05	7.67(-1)	0.78(-1)	2.00(+1)	0.52(-1)	0.67(-1)
06	19.95(+1)	0.78(-1)	2.00(+1)	0.52(-1)	1.82(+1)
07	7.67(-1)	6.84(+1)	2.00(+1)	0.52(-1)	1.82(+1)
08	19.95(+1)	6.84(+1)	2.00(+1)	0.52(-1)	0.67(-1)
09	7.67(-1)	0.78(-1)	0.50(-1)	4.66(+1)	0.67(-1)
10	19.95(+1)	0.78(-1)	0.50(-1)	4.66(+1)	1.82(+1)
11	7.67(-1)	6.84(+1)	0.50(-1)	4.66(+1)	1.82(+1)
12	19.95(+1)	6.84(+1)	0.50(-1)	4.66(+1)	0.67(-1)
13	7.67(-1)	0.78(-1)	2.00(+1)	4.66(+1)	1.82(+1)
14	19.95(+1)	0.78(-1)	2.00(+1)	4.66(+1)	0.67(-1)
15	7.67(-1)	6.84(+1)	2.00(+1)	4.66(+1)	0.67(-1)
16	19.95(+1)	6.84(+1)	2.00(+1)	4.66(+1)	1.82(+1)
17	13.81(0)	3.81(0)	1.25(0)	2.59(0)	1.25(0)
18	13.81(0)	3.81(0)	1.25(0)	2.59(0)	1.25(0)
19	13.81(0)	3.81(0)	1.25(0)	2.59(0)	1.25(0)

3.4.1 - Caracterização Físico-Química da Polpa Natural

Na caracterização físico-química da polpa de manga natural, bem como das demais polpas utilizadas nos ensaios preliminares, foram empregados os seguintes métodos analíticos:

3.4.1.1 - Lipídios

A determinação de lipídios foi feita pela extração com éter etílico, seguida da remoção por evaporação deste solvente. O resíduo obtido não é constituído unicamente por

lipídios, mas por todos os compostos que, nas condições do ensaio, são extraídos pelo éter. Utilizou-se um extrator contínuo do tipo Soxhlet. O procedimento experimental é conhecido e encontra-se descrito nas Normas Analíticas do Instituto Adolf Lutz, Método nº 4.10 (Instituto Adolf Lutz, 1985).

3.4.1.2 - Fibras

O método analítico empregado na determinação das fibras seguiu as Normas Analíticas do Instituto Adolf Lutz, Método nº 4.15.1 (Instituto Adolf Lutz, 1985). As fibras foram obtidas como resíduo orgânico da extração com éter etílico, após tratamento com ácido sulfúrico diluído, hidróxido de sódio diluído, álcool e éter. O resíduo é constituído em grande parte por celulose, podendo estar ou não acompanhado de lignina.

A extração foi feita em extrator contínuo do tipo Soxhlet, seguida de filtração a quente acompanhada de sucessivas lavagens com água destilada até pH neutro. Após uma última lavagem com acetona o resíduo foi submetido à secagem em estufa a 105°C e posterior incineração em mufla à 550°C.

3.4.1.3 - Amido

Empregou-se o Método nº 4.14.1 (Instituto Adolf Lutz, 1985) para determinação do amido presente na polpa de manga. O procedimento experimental consiste em tratar o amido com substâncias capazes de dispersá-lo em um solvente, após serem removidos os lipídios e proteínas. Eliminado o solvente, o amido é determinado por polarimetria, usando um tubo de 1 dm e efetuando-se cinco leituras do desvio polarimétrico.

3.4.1.4 - Pectina

Os métodos de determinação de pectina baseiam-se na sua extração em água quente, seguida de precipitação por adição de álcool, purificação e pesagem na forma de ácido péctico. Seguindo o procedimento descrito no Método nº 4.17.2 (Instituto Adolf Lutz, 1985), preparou-se as amostras de acordo com a metodologia específica para frutas frescas, determinando-se o teor de pectina expresso em porcentagem de ácido péctico.

3.4.1.5 - Brix (sólidos solúveis por refratometria)

Através da leitura direta no refratômetro mediu-se o °Brix das polpas naturais e modificadas. Foi empregado o Método nº 13.6.1 (Instituto Adolf Lutz, 1985), tomando os devidos cuidados de descartar as partículas maiores em suspensão nas polpas, aferir o instrumento com água e aguardar que as temperaturas da amostra e do instrumento tornassem-se iguais.

3.4.1.6 - pH

O pH foi medido diretamente através de um potenciômetro previamente calibrado. Método nº 4.7.2 (Instituto Adolf Lutz, 1985).

3.4.1.7 - Cinzas (resíduo por incineração)

O resíduo por incineração ou cinzas é o nome dado ao resíduo obtido por aquecimento de um produto em temperaturas em torno de 550°C - 570°C. O procedimento experimental empregado na determinação do teor de cinzas da manga encontra-se descrito no Método 4.8 (Instituto Adolf Lutz, 1985).

3.4.1.8 - Acidez Titulável

A acidez titulável foi determinada pelo Método nº 13.6.2 (Instituto Adolf Lutz, 1985) específico para polpas de frutas. De acordo com o procedimento descrito, amostras em triplicata das polpas foram diluídas e tituladas com solução de Na OH 0,1 N, usando como indicador solução alcoólica de fenolftaleína a 1%. A acidez foi expressa em % de ácido cítrico.

3.4.1.9 - Umidade

A umidade das polpas (naturais e algumas modificadas) foi determinada por evaporação até peso constante em estufa com circulação de ar à 70°C. Para um melhor controle da umidade do ar circulante, uma bandeja contendo leito de sílica gel foi colocada

na estufa. As amostras de polpa (6 g em média) eram pesadas em pesa-filtros de vidro com tampa esmerilhada previamente tarados, sendo aquecidas em estufa durante 4 horas. Durante o acompanhamento da perda de umidade as amostras eram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores, aguardando seu resfriamento até a temperatura ambiente (mantida à 25°C), quando então procedia-se a pesagem. As operações de aquecimento, resfriamento e pesagem eram repetidas até peso constante. Todas as determinações de umidade foram feitas em triplicata.

Na determinação da umidade dos materiais desidratados empregou-se a mesma metodologia, diminuindo-se, entretanto, o peso das amostras analisadas (2 g em média), e o tempo de aquecimento inicial (2 horas).

3.4.1.10 - Açúcares Redutores e Redutores Totais

Na determinação da concentração de açúcares redutores totais foi empregado o método de Somogyi. O método utiliza três soluções distintas, reagentes de Somogyi. Este método encontra-se descrito em SOMOGYI (1952).

3.4.2 – Preparação das Polpas Modificadas

Na preparação das polpas modificadas foi empregada a seguinte metodologia:

- 1 - pesagem dos constituintes individuais em balança analítica com precisão de quatro casas decimais;
- 2 - homogeneização da polpa natural em liquidificador doméstico por 2 minutos;
- 3 - adição dos demais constituintes de acordo com a seguinte seqüência:
 - fibras e água destilada;
 - ácido cítrico diluído em água destilada;
 - glicose, frutose e pectina previamente misturadas;
 - azeite de oliva;
 - amido dissolvido em água;

- água;

4 - intercalava-se cada adição de constituintes com homogeneização do material, mediante acionamento do liquidificador em baixa rotação, por 2 a 3 minutos;

5 - com o objetivo de manter uma certa uniformidade das polpas modificadas, no que concerne ao tamanho das partículas em suspensão, todas as polpas foram submetidas à peneiramento com prensagem manual em peneiras de plástico com malha de Nylon de 0,5 mm;

6 - medidas de BRIX e pH;

7 - armazenamento em refrigerador doméstico para posterior determinação das propriedades físicas, ensaios fluidodinâmicos e de secagem.

Para cada ensaio de repetição, foram preparadas três polpas distintas, mantendo-se a mesma formulação (composição no ponto central).

3.4.3- Extração das Fibras

As fibras foram extraídas da polpa de manga natural. Foi adaptado o método empregado na clarificação de sucos de frutas, mediante diluição da polpa com adição e mistura de solução de gelatina natural e posterior decantação da fase densa. O procedimento experimental pode ser assim descrito:

1 - diluição da polpa em água na proporção 1:10 em volume, utilizando-se provetas graduadas (2.000 ml de capacidade);

2 - adição de solução 2% de gelatina natural (sem sabor), na proporção 1:10, seguida de homogeneização da mistura, mantida então em repouso até que se observasse a separação das fases;

3 - descarte da fase sobrenadante, promovendo-se nova diluição mediante complementação do volume descartado;

4 - repetição do procedimento anterior até que o líquido sobrenadante se mostrasse límpido;

5 - acondicionamento do resíduo decantado em sacos plásticos, estocados em freezer doméstico à -20°C.

Após obtenção do resíduo fibroso úmido em quantidade suficiente para preparação das polpas modificadas, procedeu-se a secagem do mesmo no leito de jorro com partículas inertes de polietileno de alta densidade. Foram efetuadas alimentações em bateladas de aproximadamente 100 g do material fibroso úmido em intervalos regulares de 20 minutos. A velocidade do ar no jorro foi mantida em 0,8 m/s, com o sistema de aquecimento desligado. Nestas condições, a temperatura do ar oscilou entre 50°C e 55°C. A eficiência de produção do material desidratado foi da ordem de 85%. O produto foi acondicionado em vidros escuros bem vedados. Amostras deste material foram separadas e caracterizadas, determinando-se os teores de fibras, de açúcares redutores e redutores totais, de lipídios, de sólidos totais e de sólidos solúveis, a acidez titulável, o pH e a umidade. Os métodos analíticos foram os mesmos empregados na caracterização da polpa de manga. Testes qualitativos para determinação de amido e pectina não detectaram presença destes componentes no material fibroso desidratado.

3.4.4 - Determinação das Propriedades Físicas

Empregou-se a mesma metodologia na determinação das propriedades físicas da polpa natural e das polpas modificadas. Retirava-se a polpa do refrigerador ou freezer (no caso da polpa natural, aguardava-se o descongelamento) e esperava-se que atingisse a temperatura ambiente, mantida em torno de 25°C. Efetuava-se novas medidas do BRIX e pH para controle de alguma alteração decorrente do tempo de estocagem no refrigerador (máximo de dois dias após preparação das polpas modificadas) ou freezer.

3.4.4.1 - Medidas da Tensão Superficial

As medidas foram efetuadas no tensiômetro CSC-DuNOY que baseia-se no método do anel. Segundo as instruções do fabricante, o método de medidas consiste em aplicar uma tensão para suspender o anel submerso na polpa até que o menisco desta seja rompido. As medidas foram feitas em quintuplicata, à temperatura ambiente (temperatura ambiente do laboratório, controlada em 25±2°C).

Com este instrumento não foi possível medir a tensão superficial de algumas polpas modificadas mais consistentes. Foi utilizada a correlação de ZUIDEMA e WATERS (1941), recomendada pelo fabricante para correção das leituras.

$$(F - a)^2 = \left[\frac{4b}{\pi^2 R^2} \right] \frac{P}{(D - d)} + c \quad (3.1)$$

Onde: $a = 0,7250$

$$b = 0,0009075$$

$$c = 0,04534 - 1,679 (r/R) \quad (3.2)$$

Sendo R o raio do anel, F o fator de correção, D a densidade do líquido e d a densidade do ar.

3.4.4.2 - Medidas da Densidade

As densidades das polpas natural e modificadas foram medidas por picnometria, utilizando-se picnômetros padrões de 50 ml previamente calibrados (medidas efetuadas em triplicata).

3.4.4.3 - Ensaio Reológicos

No reômetro foram efetuadas medidas de torque e viscosidade aparente em função da velocidade da haste (Spindle na forma de disco), em amostras de 600 ml de polpa.. Iniciava-se o ensaio na maior velocidade de rotação, aguardando-se 1 minuto e anotando-se a viscosidade aparente e o torque. Prosseguia-se o ensaio diminuindo gradativamente a velocidade de rotação até o valor mínimo, respeitando-se o tempo para estabilização das medidas (cerca de 1 minuto) e anotando-se o valor das leituras. Seguiu-se, então, o caminho inverso, aumentando a velocidade de rotação até o valor máximo.

O procedimento completo era, então, repetido. Os resultados são apresentados na forma de gráficos da viscosidade aparente e torque, em função da velocidade de rotação.

3.4.5 - Condições Operacionais

Em ensaios realizados no mesmo secador utilizado neste trabalho, LIMA et al. (1995, 1996) verificaram que temperaturas entre 65°C e 75°C e cargas de inerte entre 2 kg e 3 kg favoreciam a secagem de polpas de uma série de frutas tropicais. A melhor forma de alimentação, também encontrada pelos autores nos ensaios de cinética de produção de pó, foi a semi-contínua, com pequenas bateladas de polpa alimentadas em intervalos regulares de tempo.

Considerando-se estes dados, adotou-se, no presente trabalho, as condições operacionais mostradas na Tabela 3.3, efetuando-se apenas uma alimentação de 50g de polpa para todas as corridas experimentais.

Tabela 3.3 - Condições operacionais

Carga de inerte	2,5±0,005kg
Massa de polpa alimentada	50±1 g
Tempo de processamento	40 min
Temperatura do ar (entrada do secador)	70±1°C
Razão entre a vazão do ar e a vazão de jorro mínimo	1,25 ± 0,05

Importante se faz observar que a alimentação de 50 g de polpa foi definida tomando como base os dados obtidos por RAMOS (1997) e os determinados em ensaios fluidodinâmicos e de secagem efetuados, preliminarmente, com as polpas modificadas definidas pelos ensaios 1, 2, 5, 6 e 8.

O tempo de processamento de 40 minutos foi dimensionado a partir de ensaios preliminares de secagem de polpa de umbu. Neste ensaio acompanhou-se, mediante pesagem do pó recolhido no ciclone, a produção do pó em intervalos regulares de cinco minutos, a partir do momento em que se efetuava a alimentação de 50 g de polpa. Verificou-se que após 40 minutos de processamento não havia mais arraste do produto desidratado.

Devido à pouca disponibilidade dos materiais utilizados na formulação das polpas modificadas e ao fato de não ter ocorrido produção de pó em alguns dos experimentos preliminares (eficiência = 0), os dados sobre cinética de produção de pó, para várias alimentações de polpa, foram obtidos em apenas dois ensaios de secagem. Detalhes sobre as condições operacionais destes ensaios, bem como sobre a cinética de retenção de sólidos no leito são apresentados nos tópicos 3.4.10 e 3.4.11.

Com respeito à razão $Q/Q_{jm} = 1,25 \pm 0,05$, esta foi escolhida a partir dos testes preliminares efetuados com as polpas modificadas segundo os ensaios 1, 2, 5, 6 e 8. A máxima vazão do soprador fornecia para o ensaio com a polpa 2 (máximo teor de açúcar e mínimo de gordura) uma razão de Q/Q_{jm} máxima igual a 1,28. Em níveis de vazão mais baixos a circulação de sólidos, neste ensaio, ficava prejudicada. A variação de 5% foi decorrente das variações inerentes ao controle da vazão do ar.

3.4.6 - Ensaios Fluidodinâmicos

Inicialmente foi obtida a curva característica do leito com partículas inertes, de acordo com a seguinte metodologia:

1 - carregava-se a coluna com 2,5 kg de inerte. Pre-aquecia-se o sistema, fixando-se a temperatura em 70°C e mantendo-se a vazão do ar em $21,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a uma velocidade superficial no jorro de 0,88 m/s. Esta vazão promovia um jorro com boa circulação de sólidos e uma altura da fonte que não comprometia arraste das partículas para fora do secador;

2 - Alcançada a temperatura de trabalho, diminuía-se gradativamente a vazão do ar, registrando a queda de pressão correspondente.

3 - Atingida a estabilidade, registrava-se a queda de pressão de jorro estável, passando-se a diminuir mais cautelosamente a vazão do ar. A menor vazão em que ainda se verificava a formação da fonte foi registrada como a vazão de jorro mínimo. Prosseguia-se o experimento até a interrupção completa do fluxo do ar.

O procedimento empregado na obtenção das curvas características do leito com adição das polpas modificadas foi o seguinte:

1 - Pré-aquecimento do sistema com 2,5 kg de inerte, fixando-se a temperatura do ar em 70°C e numa vazão de $19,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,8 m/s), 25% superior à vazão de jorro mínimo obtida com o leito de inertes.

2 - Alcançada a temperatura de trabalho e estabelecido o regime permanente, efetuava-se a alimentação de 50 g de polpa, injetadas na região da fonte através de uma seringa veterinária.

3 - Controlava-se o tempo a partir do momento em que se iniciava a alimentação, procedendo-se o acompanhamento do processo durante a alimentação (cerca de 1 minuto) e após suspensão da mesma. Acompanhava-se as medidas de queda de pressão, temperatura e velocidade do ar, alturas da fonte e do anel, até que o regime permanente fosse novamente restabelecido.

4 - Estabelecido o regime permanente (cerca de 10 minutos), passava-se a diminuir a vazão do ar, obtendo-se a curva característica e os parâmetros fluidodinâmicos do leito de acordo com o procedimento anteriormente descrito para o leito formado apenas pelas partículas inertes.

Algumas considerações devem ser feitas com respeito à obtenção das curvas características:

1 - foram determinadas as perdas de carga do leito vazio (teste em branco), procedendo-se as medidas de queda de pressão em todos os níveis de vazão, até a capacidade máxima do soprador. Este ensaio foi conduzido fixando-se a temperatura em 70°C e no sentido de vazões crescentes e decrescentes (abrindo e fechando a válvula). Estes valores foram considerados na obtenção das curvas características e, conseqüentemente, na determinação da queda de pressão de jorro estável dos leitos com e sem adição das polpas e água;

2 - o mesmo procedimento experimental empregado com as polpas foi adotado com alimentação de água.;

3 - em níveis de vazão muito baixos e depois de ser verificado o colapso do jorro, o sistema de aquecimento foi desligado para evitar problemas com as resistências elétricas;

4 - mesmo com a temperatura ajustada no controlador para 70°C, devido ao decréscimo gradativo da vazão do ar, as medidas de temperatura na entrada do secador oscilaram entre 67°C e 72°C;

5 - além da queda de pressão correspondente a cada vazão de ar, foram registradas medidas da altura da fonte e do anel. Para acompanhar estas medidas, uma fita graduada foi fixada na parede externa dos visores.

3.4.7 - Ensaio de Secagem

Os ensaios de secagem foram conduzidos de acordo com a seguinte metodologia experimental:

1 - pré-aquecimento do sistema com o material inerte, mantendo-se a velocidade do ar no jorro em 0,8 m/s. Esta velocidade corresponde à relação $Q/Q_{jm}^0 = 1,25$;

2 - atingida a temperatura de trabalho (70°C), procedia-se a alimentação da polpa, acompanhando-se as medidas de temperatura do ar na entrada do secador, bem como da umidade relativa e temperatura do ar na saída, da queda de pressão no leito e das alturas da fonte e do anel. Estas medidas eram registradas continuamente a cada minuto, de forma a se identificar o tempo necessário para o sistema alcançar o regime permanente (cerca de 10 minutos);

3 - estabelecido o regime, ajustava-se a vazão do ar, mantendo-se a relação $Q/Q_{jm} = 1,25 \pm 0,05$ (Q_{jm} determinado no ensaio fluidodinâmico correspondente a cada polpa processada). Prosseguia-se o acompanhamento das medidas em intervalos regulares de 5 minutos;

4 - ao final do ensaio, desligava-se o soprador e efetuava-se a pesagem do pó recolhido no ciclone em sacos plásticos limpos, secos e previamente pesados. Quando obtido em quantidade suficiente, o pó coletado era submetido à determinação do teor de umidade;

5 - descarregava-se o secador e amostras eram coletadas do leito para medidas do ângulo de repouso e determinação do material retido no leito.

Observações:

Nos ensaios preliminares realizados, tanto com as polpas de frutas como com algumas polpas modificadas, intensas modificações nos leitos eram observadas quando se efetuava a alimentação da polpa. Estas modificações, dependendo do material processado, manifestavam-se com maior ou menor intensidade e se refletiam em bruscas diminuições na queda de pressão, fontes mais altas e menos densas, expansão do anel e aumento da velocidade superficial do ar. Mesmo sem qualquer mudança no controle da vazão (válvula de controle mantida na mesma posição), em decorrência das modificações fluidodinâmicas observadas no leito, principalmente em relação a queda de pressão, a velocidade superficial do ar (injetado no sistema através de um soprador centrífugo) também sofria modificações.

Suspensa a alimentação, gradativamente a queda de pressão voltava a subir, a velocidade do ar e a altura da fonte diminuía e o regime era restabelecido. Entretanto, ainda em função do material processado, as condições em que o regime era estabelecido diferiam bastante das condições iniciais do leito, antes de se efetuar a alimentação das polpas. Optou-se, assim, por se fixar uma única velocidade do ar (0,8 m/s) correspondente a uma relação $Q/Q_{jm}^0 = 1,25$, para se efetuar a alimentação das polpas em todos os ensaios, fluidodinâmicos e de secagem. Com este procedimento, evitou-se que a expansão do leito provocasse o arraste das partículas inertes para fora da coluna.

No capítulo 4 serão apresentados e discutidos os dados relativos às modificações nas alturas da fonte e do anel, queda de pressão e velocidade do ar ao longo do tempo e em função das propriedades das polpas processadas.

3.4.8 - Medidas do Ângulo de Repouso

O ângulo de repouso foi determinado pela inclinação de uma plataforma horizontal, ilustrada na Figura 3.2. Amostras representativas do material eram espalhadas em camadas sobrepostas (mantendo-se uma camada completa de mesma espessura para todos os materiais) sobre a plataforma horizontal. Em seguida, variava-se lentamente o ângulo de inclinação da superfície até observar-se o início do deslocamento do material. A inclinação da superfície no momento em que o material começava a se mover, medida na escala acoplada à estrutura, foi designada como o ângulo de repouso.

Foram efetuadas medidas dos ângulos de repouso do leito sem e com adição de polpas e de água, e após o ensaio de secagem com o material seco aderido. Na adição de

água e polpas, utilizou-se uma porcentagem fixa de 2% sobre o leito de inertes (a mesma empregada nos ensaios fluidodinâmicos e de secagem).

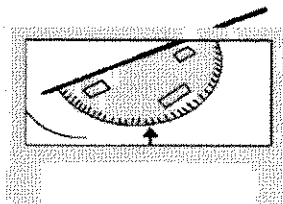


Figura 3.2 – Célula de medidas do ângulo de repouso

Todas as medidas foram efetuadas, no mínimo, em quadruplicata.

Nos ensaios preliminares, com as polpas de frutas naturais, foram efetuadas medidas do ângulo de repouso de leitos de diferentes materiais (polietileno de alta e baixa densidade, poliestireno de alta e baixa densidade, polipropileno e SANGEL[®]) com e sem adição de água e de polpas de uma série de frutas (cajá, acerola, abacate, umbu, manga, seriguela e pinha).

3.4.9 - Determinação de Material Retido no Leito

Considerando-se o elevado grau de mistura do leito de jorro, segundo MATHUR e EPSTEIN (1974), amostras representativas das partículas, tomadas em triplicata, foram retiradas do leito já descarregado. As amostras foram pesadas e levadas para secagem em estufa à 70°C, até que toda a umidade fosse eliminada, ou seja, até que atingisse peso constante. Em seguida, as amostras foram lavadas em água corrente para retirada do filme seco aderido, procedendo-se nova secagem em estufa até peso constante.

Desta forma, foram determinadas as massa da água existente, de sólido seco retido e das partículas inertes. As relações (massa de água/massa das partículas inertes) e (massa de sólido seco/massa das partículas inertes) foram extrapoladas para todo o leito.

As análises gravimétricas foram efetuadas com pesa-filtros previamente tarados. As amostras ocupavam cerca de 1/3 do volume dos pesa-filtros e pesavam, em média, 15 g.

3.4.10 - Cinética de Produção de Pó

A cinética de produção de pó foi avaliada nos ensaios de secagem das polpas 1 e 15. O procedimento experimental foi o mesmo já descrito, ampliando-se apenas o número de alimentações de polpa.

Foram feitas 5 alimentações de 50g, efetuadas em intervalos regulares de 40 minutos, totalizando o tempo de duração do ensaio completo em 3 horas e 20 minutos.

Antes de se efetuar nova alimentação, o pó coletado no ciclone era recolhido e pesado.

Ao término do ensaio, procedia-se medidas do ângulo de repouso e a coleta de amostras para determinação da retenção.

Observação: os ensaios 1 e 15 também foram realizados com apenas uma alimentação, sendo determinados os ângulos de repouso e a retenção nesta condição.

3.4.11 - Cinética de Retenção

A cinética de retenção de material no leito foi obtida numa série de 5 ensaios realizados com a polpa 18 (composição no ponto central).

O procedimento experimental foi o mesmo empregado nos ensaios de secagem, modificando-se apenas o tempo de processamento, 40, 30, 20, 10 e 5 minutos. Em todos os ensaios mediu-se a quantidade de pó produzido, o ângulo de repouso e a retenção de material no leito.

3.4.12 – Curvas de Secagem

As curvas de secagem foram construídas a partir dos dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar, obtidos durante os 10 minutos iniciais da secagem, contados a partir do instante em que se iniciava a alimentação das polpas, de acordo com a metodologia descrita no item 3.3.7. A metodologia empregada na construção das curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação pode ser assim descrita:

1 - antes de se proceder a alimentação da polpa, após estabilizado o sistema na temperatura de trabalho e com a vazão do ar no jorro fixada em 0,8 m/s, registrava-se as

medidas de umidade relativa e das temperaturas de bulbo seco do ar na entrada e na saída do secador;

2 - considerando que nestas condições (na ausência da polpa) não ocorre qualquer processo de secagem, a umidade absoluta do ar de exaustão é a mesma do ar alimentado. Com os dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar de exaustão, determinou-se através das cartas psicrométricas a umidade absoluta do ar. A partir da umidade absoluta e com a temperatura de bulbo seco do ar, medida na entrada do secador, as demais propriedades do ar alimentado foram determinadas: umidade relativa, umidade de saturação, temperatura de bulbo úmido e densidade;

3 - a partir do momento em que se efetuava a alimentação de polpa, registrava-se a cada minuto a temperatura e umidade relativa do ar na saída do secador. Utilizando-se as cartas psicrométricas, obteve-se todas as informações necessárias para construção das curvas de umidade e determinação das taxas de evaporação nos 10 minutos iniciais da secagem;

4 - a seguinte metodologia de cálculo foi empregada:

4.1 - calculou-se a vazão mássica de ar isento de umidade (W_s), a partir dos dados psicrométricos do ar na saída do secador e da velocidade do ar no jorro, de acordo com a Equação (3.3):

$$W_s = \frac{\pi D_c^2 v \rho_{gs}}{4(U_{gs} + 1)} \quad (3.3)$$

Estes cálculos foram efetuados com as medidas registradas a cada minuto a partir do instante em que se efetuava a alimentação da polpa, sendo consideradas, portanto, as variações na velocidade superficial do ar, conforme já citado nas observações do item 3.3.7.

4.2 - as taxas de evaporação foram calculadas a partir da Equação (3.4):

$$W_{ev} = W_s (U_{gs} - U_{ge}) \quad (3.4)$$

A forma dinâmica como foram efetuadas as medidas de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída do secador durante os primeiros minutos da

secagem, poderiam estar defasadas no tempo, já que dependem do tempo de resposta do termohigrômetro. É importante se registrar que foram realizados alguns testes para se avaliar o tempo de resposta do instrumento, através do acompanhamento de medidas efetuadas no leito com adição de água. Verificou-se nestes testes que o tempo de resposta do instrumento era de cerca de 20 a 30 s.

A Figura 3.3 ilustra o fluxograma completo da metodologia experimental.

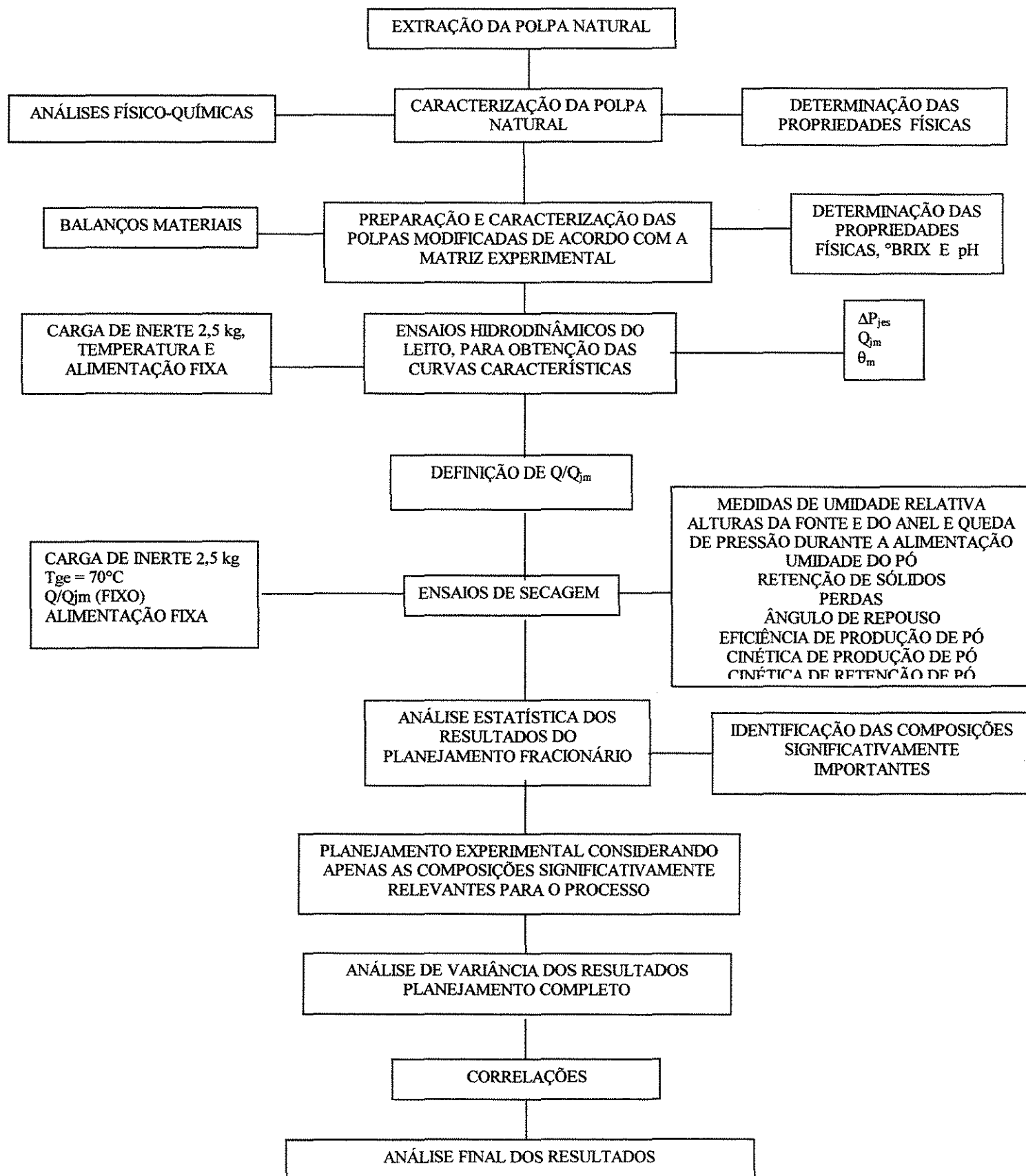


Figura 3.3 - Fluxograma simplificado do procedimento experimental

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Caracterização Físico-Química da Polpa de Manga e do Material Fibroso Empregado no Ajuste da Concentração de Fibras

A polpa de manga espada, empregada como polpa padrão neste trabalho, foi caracterizada de acordo com os métodos analíticos descritos no Capítulo 3. Os resultados obtidos nas determinações físico-químicas são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização físico-química da polpa de manga espada padrão

Determinações Físico- Químicas	Resultados
PH	4,16
Sólidos Solúveis (° BRIX) (%)	17,5
Acidez (% de ácido cítrico)	0,31
Fibras (%)	0,38
Matéria Graxa (extrato etéreo)(%)	0,40
Sólidos Totais (%)	21,17
Açúcares Redutores (%)	5,77
Açúcares Não Redutores (%)	11,33
Açúcares Redutores Totais (%)	17,1
Pectina (%)	0,50
Amido (%)	0,40
Proteínas (%)	0,48
Umidade (%)	78,83
Outros componentes	1,60

Estes resultados podem ser comparados com outros dados obtidos experimentalmente para polpas de manga espada de três lotes diversos, oriundos de diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Norte e com dados da literatura. Os dados da literatura se referem à variedade de manga espada cultivada no Estado de São Paulo, segundo ITAL (1981). Esses dados são mostrados na Tabela 4.2.

Não foram encontrados na literatura consultada dados relativos às concentrações de amido, fibras, pectina e sólidos totais da polpa de manga espada.

Comparando-se as Tabelas 4.1 e 4.2, verifica-se que os dados de composição da polpa de manga espada padrão são compatíveis com os dados encontrados por KATO et al. (1976) e com os referentes às demais polpas de manga espada analisadas na etapa preliminar deste trabalho.

Segundo FRANCO (1997), a polpa de manga espada contém em média 0,40% de lipídios e 0,30% de proteínas. Os dados de composição destes constituintes na polpa de manga padrão estão de acordo com os relatados por FRANCO (1997).

Tabela 4.2 - Caracterização físico-química da polpa de manga espada

Determinações Físico-Químicas	Lote 1	Lote 2	Lote 3	ITAL (1981)
pH	4,36	4,36	4,1	4,9
Sólidos Solúveis °BRIX (%)	15,0	19,1	18,5	18
Acidez (% de ácido cítrico)	0,22	0,23	0,23	0,21
Fibras (%)	0,30	0,45	0,34	-
Matéria Graxa (extrato etéreo) (%)	0,26	0,34	0,31	-
Sólidos Totais (%)	16,34	20,34	21,74	-
Açúcares Redutores (%)	-	-	-	4,1
Açúcares Não Redutores (%)	-	-	-	11,78
Açúcares Redutores Totais (%)	-	-	-	15,88
Umidade (%)	83,66	77,66	78,26	-

O material fibroso empregado para o ajuste da composição de fibras das polpas modificadas também foi caracterizado segundo os métodos analíticos utilizados na caracterização da manga espada. Os resultados das determinações físico-químicas encontram-se ilustrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização físico-química do material fibroso empregado no ajuste da concentração de fibras

Determinações Físico- Químicas	Resultados
PH	4,27
Sólidos Solúveis (° BRIX) (%)	3,45
Acidez (% de ácido cítrico)	1,02
Fibras (%)	63,73
Matéria Graxa (extrato etéreo)(%)	3,36
Sólidos Totais (%)	93,03
Açúcares Redutores (%)	2,73
Açúcares Não Redutores (%)	5,38
Açúcares Redutores Totais (%)	8,11
Pectina (%)	Não detectada
Amido (%)	Não detectada
Proteínas (%)	10,57
Umidade (%)	6,97
Outros componentes	6,24

Estas concentrações foram consideradas nos balanços efetuados para determinar as quantidades de materiais utilizados na preparação das polpas modificadas.

4.2 - Propriedades Físicas das Polpas Natural e Modificada

As concentrações X (expressas pela razão entre a fração mássica (x_i) de cada constituinte e a fração mássica de água em cada polpa, ($x_{\text{água}}$)), densidade, viscosidade aparente a 60 rpm e tensão superficial, assim como os dados relativos às medidas de pH e BRIX da polpa de manga natural e das polpas modificadas são apresentadas na Tabela 4.4. Conforme se observa nesta tabela, não foi possível medir a tensão superficial de algumas polpas. Na determinação da tensão superficial das polpas 11, 13, 15 e 16, no ponto correspondente ao máximo valor de tensão superficial medido na escala do tensiômetro, ainda não havia sido observado o rompimento do menisco do líquido.

Embora se tenha tentado controlar o pH através do ajuste da concentração de ácido cítrico, mantida fixa e equivalente a da polpa de manga natural, os dados da Tabela 4.4 mostram que houve variações expressivas nesta propriedade (2,82 na polpa 8 a 4,4 na polpa 9) nas polpas modificadas. Desta forma, o pH também interferiu nas propriedades físicas das polpas modificadas, o que implica numa discussão mais complexa sobre a influência da composição associada às modificações no pH.

Com respeito ao teor de sólidos solúveis, de acordo com a metodologia empregada na formulação das polpas modificadas (Anexo I), a concentração de açúcares redutores totais foi ajustada de forma a se manter constante e equivalente a da polpa de manga, o que levaria a pequenas variações na determinação do BRIX, já que segundo ITAL (1981), os açúcares constituem a maior quantidade de sólidos solúveis presentes na manga madura.

Observa-se na Tabela 4.4 que a concentração de sólidos solúveis variou entre um mínimo de 17,1% e máximo de 19,8%, para as polpas modificadas 5 e 14, respectivamente. Esta variação era prevista e concorda com os dados relativos à caracterização de polpas de manga espada ilustrados na Tabela 4.2.

Verifica-se ainda na Tabela 4.4 que as propriedades físicas e as medidas do BRIX e pH das polpas 17, 18 e 19, cujas concentrações foram mantidas no ponto central, apresentaram uma boa reprodutibilidade.

As densidades das polpas modificadas não sofreram variações expressivas, observando-se densidades maiores do que a da polpa de manga padrão apenas nas polpas

10, 14, 17, 18 e 19. No Anexo II encontra-se a planilha com os dados de reprodutibilidade das medidas de densidade das polpas modificadas.

As polpas modificadas apresentaram o mesmo comportamento reológico. De acordo com os reogramas obtidos, todas se comportam como fluidos não Newtonianos, visto que há interação entre os componentes das polpas e essas interações dependem e afetam a velocidade de deformação causada por forças externas, conforme citam BOBBIO e BOBBIO (1995). Apresentaram ainda características pseudoplásticas, já que em todos os ensaios reológicos verificou-se a diminuição da viscosidade à medida que se aumentava a velocidade de rotação do viscosímetro. As explicações relativas às características pseudoplásticas encontram-se contempladas em CHEFTEL e CHEFTEL(1983).

Os resultados ilustrados na Tabela 4.4 são compatíveis com os encontrados em LIMA et al. (1995) para uma série de polpas de frutas tropicais.

Não foi possível calcular os índices de fluxo do fluido (n) pelos métodos descritos na literatura, a partir das curvas de tensão em função da velocidade de deformação. Os valores apresentados na Tabela 4.4 foram determinados a partir das curvas do logaritmo do torque em função do logaritmo da velocidade de rotação e variaram entre 0,22 para a polpa 5 e 0,57 para a polpa 10. Apesar de apresentarem as mesmas características pseudoplásticas e mesmo comportamento de fluido não Newtoniano, as viscosidades aparentes das polpas modificadas, conforme os dados apresentados na Tabela 4.4, variaram de forma bastante acentuada. Para a mesma velocidade de rotação, enquanto algumas polpas apresentaram valores de viscosidade correspondentes ao dobro da viscosidade da polpa padrão, outras tiveram sua viscosidade reduzida a 20% deste valor. Estes resultados indicam uma importante interferência da composição nas propriedades reológicas das polpas de frutas.

Em relação à tensão superficial, os dados apresentados na Tabela 4.4 também indicam que a composição das polpas interfere nesta propriedade. Para as polpas para as quais foi possível efetuar as medidas de tensão superficial, os valores variaram dentro de um intervalo compreendido entre 47,7 e 64,6 dyn /cm para as polpas 5 e 12, respectivamente. Verifica-se portanto que, de uma forma geral, as modificações na composição da manga contribuíram para aumentar a tensão superficial em relação à manga padrão, mantendo-se, porém, inferior à da água, (73 dyn/cm), como era de esperar.

Tabela 4.4 - Propriedades físicas da polpa de manga padrão e das polpas modificadas para

T=25±2°C

Polpa	X _{açu} (%)	X _{gor} (%)	X _{fib} (%)	X _{ami} (%)	X _{pec} (%)	μ (cp)	n	σ (dyn/cm)	ρ (g/cm³)	°BRIX (%)	pH
Manga	7,32	0,51	0,48	0,49	0,63	1046	0,23	44,3	1,079	17,5	4,16
1	7,67	0,78	0,50	0,52	1,82	2273	0,39	64,3	1,062	17,5	3,84
2	19,95	0,78	0,50	0,52	0,67	215	0,49	52,8	1,054	17,3	2,91
3	7,67	6,84	0,50	0,52	0,67	1332	0,29	64,2	1,035	18,9	2,98
4	19,95	6,84	0,50	0,52	1,82	512	0,56	54,1	1,056	19,0	2,90
5	7,67	0,78	2,00	0,52	0,67	1916	0,22	47,7	1,060	17,1	4,08
6	19,95	0,78	2,00	0,52	1,82	1242	0,36	63,1	1,066	20,5	2,79
7	7,67	6,84	2,00	0,52	1,82	2516	0,27	60,3	1,057	18,5	3,80
8	19,95	6,84	2,00	0,52	0,67	983	0,26	58,9	1,053	19,5	2,82
9	7,67	0,78	0,50	4,66	0,67	1275	0,29	50,7	1,064	18,0	4,20
10	19,95	0,78	0,50	4,66	1,82	422	0,57	57,2	1,099	19,2	3,06
11	7,67	6,84	0,50	4,66	1,82	2203	0,40	*	1,064	19,6	3,25
12	19,95	6,84	0,50	4,66	0,67	230	0,43	64,6	1,046	19,2	3,13
13	7,67	0,78	2,00	4,66	1,82	2892	0,33	*	1,053	18,9	3,18
14	19,95	0,78	2,00	4,66	0,67	725	0,35	54,2	1,086	19,8	3,34
15	7,67	6,84	2,00	4,66	0,67	2353	0,24	*	1,050	19,2	4,13
16	19,95	6,84	2,00	4,66	1,82	1809	0,35	*	1,056	18,8	2,91
17	13,81	3,81	1,25	2,59	1,25	791	0,33	62,2	1,080	19,0	3,60
18	13,81	3,81	1,25	2,59	1,25	863	0,30	62,9	1,088	19,2	3,50
19	13,81	3,81	1,25	2,59	1,25	914	0,31	62,4	1,083	19,0	3,50

A Tabela 4.5 mostra dados relativos às propriedades físicas de algumas polpas de frutas tropicais, determinadas na fase preliminar deste trabalho, utilizando-se a mesma metodologia empregada com as polpas modificadas.

Tabela 4.5 - Propriedades físicas de polpas de frutas tropicais para $T=25\pm 2^{\circ}\text{C}$

Polpa	μ (cp)	n	σ (dyn/cm)	ρ (g/cm³)	°BRIX (%)	pH
Cajá	1350	0,23	62,3	1,065	10,8	2,48
Acerola	518	0,32	54,4	1,071	5,0	3,20
Abacate	1675	0,32	*	1,054	5,0	4,90
Seriguela	525	0,40	58,1	1,123	18,4	3,25
Pinha	2496	0,22	*	1,131	24,0	5,95
Manga	1046	0,23	44,3	1,079	17,5	4,16
Umbu	748	0,25	62,1	1,108	12,0	2,58

Comparando-se os dados das Tabelas 4.4 e 4.5, verifica-se que as propriedades físicas das polpas modificadas apresentam valores de mesma ordem de grandeza de forma satisfatória as propriedades das polpas naturais.

A Tabela 4.6 apresenta alguns dados relativos à composição das polpas naturais. Importante se faz registrar que a composição apresentada corresponde a valores médios obtidos em análises físico-químicas de polpas das mesmas frutas, porém oriundas de diferentes lotes, que também não correspondem necessariamente aos lotes cujas polpas foram extraídas para determinação das propriedades físicas, apresentadas na Tabela 4.5. Sabendo-se que a variedade da fruta, seu grau de maturação, período de safra, condições do solo são variáveis que, entre outras, exercem importante influência na composição, os dados apresentados na Tabela 4.6 serão tomados como base apenas para comparar o comportamento das polpas naturais com o das polpas modificadas no que se refere ao efeito da composição sobre as propriedades físicas.

Tabela 4.6- Composição de polpas de frutas tropicais

Polpa	X _{açú} (%)	X _{gor} (%)	X _{fib} (%)	X _{ami} (%)	X _{pec} (%)
Acerola	7,14	0,32	0,55	0,31	0,82
Cajá	5,90	1,26	0,25	0,65	0,67
Umbu	4,70	1,47	0,48	1,68	0,82
Abacate	8,14	3,25	3,0	-	-
Pinha	22,48	0,72	3,5	-	-
Seriguela	10,76	0,31	0,64	5,26	0,66

A discussão sobre a interferência da composição química nas propriedades físicas inicialmente estará restrita aos efeitos individuais dos açúcares redutores, gorduras, fibras amido e pectina. Esta análise será feita mediante comparação das propriedades das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9 com as propriedades da polpa de manga natural. Os níveis mínimos de concentração para todos os constituintes analisados neste trabalho correspondem praticamente aos da polpa de manga, conforme mostra a Tabela 4.4. As polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9 foram formuladas ajustando-se apenas uma composição no nível máximo de concentração (pectina na polpa 1, açúcares redutores na polpa 2, gorduras na polpa 3, fibras na polpa 5 e amido na polpa 9), o que permite uma avaliação preliminar sobre o efeito da concentração destes constituintes nas propriedades físicas das polpas modificadas.

Conforme se observa na Tabela 4.4, excetuando-se a gordura, cuja concentração mínima foi ajustada para um valor ligeiramente maior, para os demais componentes as concentrações mínimas correspondem praticamente às da polpa de manga.

Na Tabela 4.7, os dados de composição e propriedades físicas das polpas modificadas foram parametrizados em relação à composição e propriedades físicas da polpa de manga, permitindo uma melhor avaliação da interferência das composições.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.7, não houve modificação significativa na densidade das polpas em virtude do aumento da concentração de qualquer um dos componentes estudados. Este resultado é compatível com os dados apresentados na

Tabela 4.5, onde se observa pouca variação na densidade de polpas de diferentes frutas. Segundo dados da literatura, ALSINA et al. (1988) e LIMA et al. (1995), entre outros, a densidade das polpas de frutas tende a aumentar com o teor de sólidos solúveis. Esta interferência, entretanto, se restringe ao comportamento de cada fruta individualmente ou de frutas de composição química muito semelhante. No caso das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9 a variação no teor de sólidos solúveis não justificaria um efeito importante sobre o comportamento na densidade.

Tabela 4.7 - Influência das composições nas propriedades físicas das polpas modificadas

Polpas	$X_{açú}^*$	X_{gor}^*	X_{fib}^*	X_{ami}^*	X_{pec}^*	ρ^*	μ^*	σ^*
1	1,05	1,51	1,04	1,06	2,89	0,98	2,17	1,45
2	2,73	1,51	1,04	1,06	1,06	0,98	0,21	1,19
3	1,05	13,41	1,04	1,06	1,06	0,96	1,27	1,45
5	1,05	1,51	4,10	1,06	1,06	0,98	1,83	1,08
9	1,05	1,51	1,04	9,5	1,06	0,99	1,22	1,14

De acordo com a literatura, a viscosidade das polpas de frutas tende a aumentar com a concentração de sólidos solúveis, LIMA et al. (1995) e ALSINA et al. (1988). A concentração de sólidos solúveis nas polpas modificadas corresponde praticamente ao teor de açúcares redutores totais, mantido fixo em todas as polpas. Diante destas observações, o resultado apresentado na Tabela 4.7, no que se refere à drástica redução na viscosidade aparente da polpa 2, da ordem de 80%, cujo BRIX praticamente coincide com o da polpa de manga natural e a composição só difere desta em relação aos açúcares redutores, parece absurdo. Todavia, estudando o efeito da adição de conservantes e outros aditivos na reologia de polpas de manga, GUERRERO et al. (1995) relatam uma diminuição expressiva na viscosidade aparente quando aumenta-se a concentração de glicose em polpas de manga de baixo pH ($\leq 3,0$). O comportamento aparentemente absurdo da viscosidade da polpa 2 em relação à polpa de manga concorda com o relatado por estes autores.

A viscosidade aparente aumentou com a elevação das concentrações de pectina (117% na polpa 1), de fibras (83% na polpa 5), de gordura (27% na polpa 3) e de amido (22% na polpa 9).

Segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), os amidos naturais e modificados, as celulosas modificadas, pectinas, gelatina, outras proteínas e gomas, constituem os principais agentes estabilizantes das suspensões coloidais. Estes agentes são utilizados para aumentar a viscosidade de soluções, suspensões ou emulsões, cuja fase dispersante seja aquosa; atuam como espessantes, aumentando a viscosidade, estabilizando a fase dispersa, impedindo ou reduzindo a formação de cristais de açúcar ou retardando a difusão das moléculas.

Os resultados apresentados na Tabela 4.7 são compatíveis com a literatura no que se refere à influência das concentrações de fibras e pectina. Esperava-se, entretanto, uma maior interferência do amido na viscosidade das polpas. Todavia, em relação à polpa de manga natural, a polpa 9, com elevada concentração de amido, não teve sua viscosidade aumentada conforme era esperado. Este resultado pode ser decorrente das medidas de viscosidade terem sido conduzidas com as polpas na temperatura ambiente, razoavelmente controlada em 25°C. Em temperaturas mais elevadas o amido solubiliza, provocando um aumento acentuado na viscosidade, conforme cita CHEFTEL e CHEFTEL (1983), BOBBIO e BOBBIO (1995), entre outros. Este comportamento foi observado por LIMA et al. (1995) na obtenção dos parâmetros reológicos da polpa de seriguela quando estudou o efeito da temperatura sobre a reologia de polpas de frutas tropicais. A viscosidade aparente da polpa de seriguela aumentou significativamente com o aumento da temperatura. Em temperaturas da ordem de 50°C as mudanças no comportamento reológico na polpa de seriguela foram de tal ordem que impossibilitou a condução das medidas no reômetro que estava sendo utilizado naquele trabalho.

Na faixa de temperatura em que foram conduzidos os ensaios reológicos do presente trabalho, a viscosidade aparente da polpa de seriguela, conforme se mostra nos dados da Tabela 4.5, é mais baixa do que a viscosidade da maioria das polpas, entretanto, de acordo com os dados ilustrados na Tabela 4.6, a mais elevada concentração de amido é verificada exatamente na polpa de seriguela. Estas considerações explicam o comportamento reológico inesperado da polpa 9.

Em relação à polpa de manga, a polpa 9 apresentou praticamente o mesmo pH e BRIX, o que se deve à insolubilidade do amido em água em temperaturas ordinárias, conforme citado anteriormente.

O relevante aumento na tensão superficial, da ordem de 45%, observado nas polpas 1 e 3, mostra que tanto a pectina como a gordura provocam efeitos positivos importantes sobre esta propriedade. As interferências do amido e dos açúcares redutores na tensão superficial das polpas 2 e 5, da ordem de 19% e 14%, respectivamente não se mostraram tão significativos.

A elevada concentração de fibras da polpa 5 praticamente não interferiu na tensão superficial. Interessante se faz observar que, excetuando-se a viscosidade aparente, as demais propriedades desta polpa, incluindo-se o BRIX e o pH, reproduzem as medidas efetuadas na polpa de manga natural. Segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), as fibras da celulose são extremamente resistentes, praticamente insolúveis na maioria dos solventes, e suas ligações rompem com dificuldade mesmo por hidrólise ácida. A estrutura linear estabilizada por ligações de hidrogênio intermoleculares provavelmente contribui para a insolubilidade e para a pouca reatividade da celulose, segundo BOBBIO e BOBBIO (1995). Desta forma, os resultados referentes ao comportamento da polpa 5, cujo BRIX e pH não sofreram alterações com a significativa elevação da concentração de fibras, podem ser justificados pela inexistência de interações químicas entre as fibras e os demais constituintes da polpa de manga.

O fato do pH ter sofrido importante variação, conforme já discutido anteriormente, interagindo com as demais composições e interferindo conseqüentemente nas propriedades físicas das polpas modificadas, comprometeu a análise estatística que seria realizada de acordo com o planejamento fatorial. A impossibilidade de medir a tensão superficial de algumas polpas modificadas com o instrumento disponível também dificulta a análise estatística dos efeitos da composição, tendo como variável resposta a tensão superficial.

Observa-se, entretanto, que o efeito positivo das demais composições sobre a viscosidade aparente das polpas, principalmente em relação à pectina e às fibras, contribuiu de forma combinada para atenuar o efeito negativo provocado pela elevada concentração de açúcares redutores presente em outras polpas modificadas que apresentaram baixo pH (polpas 6 e 16 com elevadas concentrações de fibras e pectina).

Quando apenas uma das concentrações, fibras ou pectina, foi fixada no nível máximo de concentração, os efeitos são atenuados de forma mais discreta (polpas 4, 8, 10 e 14). Quando as concentrações de fibras e pectina são mínimas, o efeito do alto teor de açúcar e baixo pH é predominante e independe das concentrações de amido e gordura serem mínimas ou máximas (polpas 2 e 12, respectivamente).

Por outro lado, independentemente do pH e das concentrações de gordura e amido, todas as polpas com baixa concentração de açúcares redutores apresentaram viscosidades bastante elevadas quando uma das duas concentrações, seja de fibras ou pectina, foi aumentada (polpas 1,5,11 e 15). As polpas 7 e 13, com concentrações de fibras e pectina mantidas no nível máximo, apresentaram as mais elevadas viscosidades, conforme mostra a Tabela 4.4.

As polpas 17, 18 e 19, cujas concentrações foram fixadas no ponto central, apresentaram valores intermediários compreendidos entre os valores, tanto do BRIX e pH como das propriedades físicas das demais polpas modificadas. Este resultado respalda a discussão apresentada nos parágrafos anteriores.

Uma análise dos dados ilustrados nas Tabelas 4.5 e 4.6 mostra que o efeito da composição e do pH sobre as propriedades físicas das polpas naturais é análogo ao observado com as polpas modificadas. As polpas de umbu e cajá, com baixas concentrações de açúcares redutores e baixo pH, apresentaram viscosidades numa faixa intermediária, 748cp e 1350cp respectivamente. É importante registrar que as medidas das propriedades físicas da polpa de umbu se referem à uma variedade um pouco diferente daquela cuja composição foi analisada. Isto justifica o resultado encontrado para a polpa de cajá, com menor conteúdo de fibras e pectina, concentrações de açúcares redutores e pH muito próximos aos da polpa de umbu e viscosidade mais elevada do que a mesma. Já em relação à tensão superficial, os valores medidos para ambas as polpas são quase os mesmos.

A polpa de pinha, com alta concentração de açúcares redutores, apresentou a mais elevada viscosidade, contrariamente ao observado com as polpas modificadas. Considerando, todavia, a elevada concentração de fibras desta polpa, associada ao pH quase 6,0, o resultado obtido, com respeito à viscosidade, pode ser justificado. A polpa de abacate, além da baixa concentração de açúcar associada ao pH próximo de 5,0, apresenta elevada concentração de fibras, o que também justificaria a elevada viscosidade encontrada.

Não se dispõe de dados relativos à concentração de amido e pectina nestas polpas, porém testes qualitativos para identificação destes constituintes na polpa de pinha indicaram elevadas concentrações de amido e pectina na mesma. Tal como aconteceu com algumas polpas modificadas não foi possível medir as tensões superficiais das polpas de pinha e abacate.

A variedade da acerola da qual foi extraída a polpa para determinação das propriedades físicas também não corresponde à variedade utilizada na análise da composição da polpa. Enquanto as propriedades físicas se referem à uma polpa com apenas 5% de sólidos solúveis, nas determinações físico-químicas foram analisadas polpas de acerola com BRIX compreendido entre 7% e 9%. Comparadas com polpas de outras frutas, tanto a polpa de acerola como a de seriguela apresentaram baixas viscosidades. Com respeito às fibras, pectina e gorduras, ambas as polpas apresentaram concentrações muito próximas, o mesmo sendo observado em relação ao pH, viscosidade aparente e tensão superficial, o que é consistente com os resultados discutidos anteriormente.

Finalizando a discussão sobre a influência da composição sobre as propriedades físicas das polpas, é importante registrar a influência da concentração de outros constituintes presentes na polpas, cujos efeitos não foram considerados na análise dos resultados apresentados:

- Na preparação das polpas modificadas, conforme explicado em parágrafo precedente, a concentração dos açúcares redutores totais (ART) foi fixada em torno de 17%(concentração expressa em fração mássica), que corresponde a concentração de ART na manga natural. Assim, nas polpas modificadas cujas concentrações de açúcares redutores (frutose e a glicose) foram fixadas no nível máximo de concentração (15% em média, também expressa em fração mássica), a concentração de açúcares não redutores (sacarose) era mínima e em torno de 2%. Reciprocamente, polpas com níveis mínimos de concentração de AR (5,7% em média), foram preparadas com concentração de ANR, em torno de 10,5%. Soluções de sacarose em água são empregadas como padrões reológicos, cuja viscosidade aumenta com a concentração. Portanto, além dos efeitos positivos das fibras e pectina sobre a viscosidade das polpas modificadas, deve-se considerar também a influência da elevada concentração de sacarose presente nas polpas 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, e 15 (que no entanto, possuem BRIX semelhante);

- Nas polpas modificadas a umidade variou entre um mínimo de 72% (polpa 16) e um máximo de 79% (polpa 2). Como as composições foram parametrizadas em relação ao conteúdo de água em cada polpa, a influência da mesma nas propriedades físicas também não foi considerada. Todavia, em virtude da pequena faixa de variação desta composição, os efeitos podem ser negligenciados, não comprometendo a discussão dos resultados referentes às importantes influências dos demais constituintes;

- Com as polpas de frutas naturais a variação no conteúdo de água é bastante significativa. Nas análises destas polpas foram determinadas umidades compreendidas entre um mínimo de 73% (pinha), e um máximo de 95% (acerola). A mesma fruta, dependendo da variedade ou do grau de maturação, pode apresentar significativas variações no conteúdo de água, tal como foi observado com algumas polpas de acerola e cajá. Polpas de manga, da variedade espada, cujos resultados das determinações físico-químicas são apresentados no início deste capítulo, Tabela 4.2, também apresentaram variações no conteúdo de água. Na análise preliminar dos dados apresentados não foi considerada a influência da água nas propriedades físicas das polpas naturais, o que pode justificar a aparente inconsistência de alguns resultados.

4.3 – Curvas de Secagem

Com os dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída do secador, obteve-se, de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3, os dados de umidade absoluta, a partir dos quais foram construídas as curvas de secagem das polpas modificadas. As curvas de secagem dos ensaios 16, 18 e 19 (Figuras 4.1 e 4.2) ilustram o comportamento da secagem observado também nos demais ensaios.

Antes de se discutir os resultados referentes às curvas de secagem, é importante se registrar que as medidas de umidade relativa e temperatura de bulbo seco, a partir das quais foram obtidos os demais dados psicrométricos, podem estar defasadas no tempo, devido a inércia da instrumentação. De acordo com a metodologia experimental descrita no Capítulo 3, o tempo de resposta do termohigrômetro foi previamente avaliado entre 20 e 30 segundos. Portanto, as curvas ilustradas nas Figuras 4.1 a 4.3 estariam 20 a 30s deslocadas em relação ao eixo das ordenadas. A defasagem no tempo, entretanto, não invalida os resultados relativos à da secagem das polpas no leito de jorro.

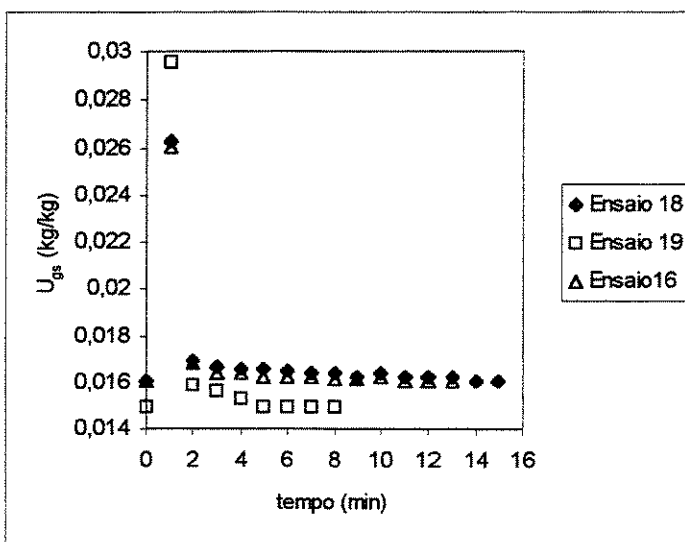


Figura 4.1 – Umidade do ar em função do tempo - ensaios 16,18 e 19

Conforme se pode observar nas curvas ilustradas, a evaporação é muito rápida, ocorrendo praticamente nos dois minutos iniciais da secagem. A partir dos dois minutos

iniciais a umidade do ar na saída tende a atingir um valor constante, igualando-se à umidade medida na entrada do secador, o que se traduz em taxas de evaporação nulas. Na maioria dos experimentos este comportamento foi observado em tempos relativamente curtos, inferiores a dez minutos.

Não foi verificada qualquer influência da composição ou das propriedades físicas das polpas sobre as taxas de evaporação. As pequenas diferenças na umidade do ar na saída do secador e nas taxas de evaporação ilustradas nas Figura 4.1 e 4.2, se devem às condições psicrométricas do ar de secagem, não controladas no presente trabalho. Os ensaios 18 e 19, com polpas processadas com a composição no ponto central, foram realizados para testar a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Entretanto, a diferença nas condições de umidade do ar de secagem, conforme se observa na Figura 4.1, influenciaram nas taxas de secagem iniciais. No ensaio 19, uma mais baixa umidade do ar, promoveu a secagem mais rápida da polpa 19. Por outro lado, comparando-se o comportamento da secagem das polpas 16 (composições fixadas no nível máximo de concentração para todos os constituintes) e 18 (composições fixadas no ponto central), também ilustrados nas Figuras 4.1 e 4.2, observa-se que as curvas são coincidentes. Nestes ensaios, conforme mostra a Figura 4.1, a umidade do ar de secagem foi praticamente a mesma.

Esses resultados mostram que não houve interferência da composição das polpas nas taxas de evaporação, mas que estas são sensíveis a variações nas condições operacionais, no caso específico às condições psicrométricas do ar, visto que nestes ensaios as demais variáveis (carga de inerte, massa de polpa alimentada e temperatura) eram fixas e controladas. As modificações observadas no comportamento fluidodinâmico do leito quando se efetuava a alimentação das polpas chegavam a promover razoáveis variações na velocidade do ar. Estas variações também podem ter interferido nas taxas de evaporação. O curto intervalo de tempo em que ocorre a maior parte da evaporação de água compromete uma discussão mais aprofundada sobre os distintos períodos de secagem identificados nas curvas ilustradas.

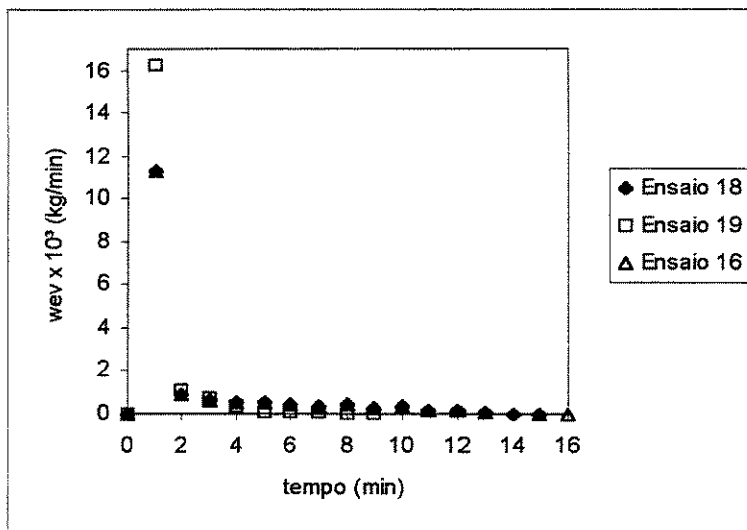


Figura 4.2 – Taxas de evaporação em função do tempo – ensaios 16,18,19

Para validação da metodologia de cálculo empregada no tratamento dos dados experimentais relativos às curvas de secagem, os balanços materiais foram consolidados, comparando-se a massa de água evaporada, calculada a partir da integração das curvas, com a estimada a partir do balanço global de água no secador.

A Figura 4.3 ilustra as curvas acumulativas da massa de água evaporada em função do tempo, para os ensaios onde foi possível acompanhar as medidas de umidade relativa e temperatura de bulbo seco, simultaneamente com as medidas de velocidade do ar no jorro. Nos demais ensaios, estas medidas ficaram prejudicadas devido a problemas técnicos com a instrumentação.

Conforme ilustra a Figura 4.3, independentemente da composição das polpas, as massas de água evaporada nos dois primeiros minutos da secagem variaram entre 30g (ensaio 13) e 38g (ensaios 10 e 19). Em relação às quantidades de água presentes nas polpas processadas, as frações evaporadas variaram entre 84,5% e 95,8%, conforme resultados apresentados na Tabela 4.8.

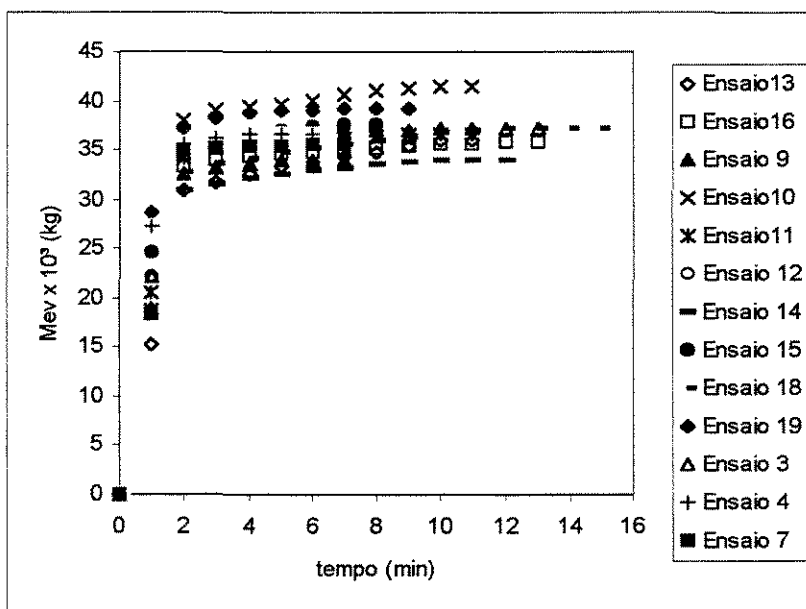


Figura 4.3 – Curvas acumulativas da massa de água evaporada com o tempo

Tabela 4.8 – Frações de água evaporada nos dois minutos iniciais da secagem

Ensaio	Fração evaporada (%)
3	92,9
4	94,0
7	95,8
9	94,4
10	94,9
11	91,9
12	93,3
13	84,5
14	87,6
15	92,0
16	87,3
18	87,0
19	93,6

Estes resultados são importantes para a discussão posterior das curvas hidrodinâmicas. Pela metodologia empregada e de acordo com as curvas de secagem obtidas para todos os ensaios, a obtenção dos dados relativos às curvas características se deu no período em que a película aderida à superfície das partículas já estava seca. Assim, a influência da composição sobre as variáveis fluidodinâmicas estará limitada às condições em que a umidade das polpas foi praticamente eliminada.

Vale ainda registrar que durante os 10 a 15 minutos em que foram acompanhadas as medidas de umidade relativa, o arraste de pó era mínimo e verificado apenas em alguns poucos ensaios, após 5 minutos de processamento. Para os ensaios em que houve produção de pó, a quebra da película e o arraste se verificava de forma mais intensa nos trinta minutos finais do experimento.

4.4 - Ensaios Fluidodinâmicos

Conforme os resultados apresentados e discutidos no item anterior, a obtenção das curvas hidrodinâmicas se refere às medidas de queda de pressão em função da vazão do ar para o leito de partículas onde a película aderida já se encontrava praticamente isenta de umidade. Entretanto, o processo de ruptura da película e arraste do produto seco depende das condições fluidodinâmicas do leito, principalmente no que concerne às taxas de circulação de sólidos e concentração de partículas no jorro e na fonte. Desta forma, a apresentação e discussão das curvas hidrodinâmicas obtidas para o leito, nas condições citadas anteriormente, torna-se essencial para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, tanto no que se refere à produção e retenção de pó, como aos problemas de instabilidade observados em alguns ensaios.

A alimentação das polpas era acompanhada por intensas modificações no comportamento fluidodinâmico do leito, caracterizadas por variações na queda de pressão, velocidade do ar, altura da fonte e expansão do anel. Dependendo da intensidade destas flutuações, o leito sofria sérios problemas de instabilidade e ameaças sucessivas de colapso do jorro. Em alguns ensaios, os problemas de instabilidade, embora atenuados pela evaporação da água, persistiam mesmo quando as taxas de evaporação tornavam-se nulas.

Verificou-se, assim, que a interferência da composição sobre a fluidodinâmica do leito acontece não somente quando se efetua a alimentação, e que os problemas de instabilidade provocados pela presença da polpa podem persistir, mesmo com o leito praticamente seco. Diante destas considerações, optou-se por apresentar os resultados referentes às curvas características conjuntamente com as medidas das variáveis fluidodinâmicas acompanhadas nos instantes iniciais da secagem.

4.4.1 - Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares

Inicialmente foi obtida a curva característica do leito formado apenas pelas partículas inertes, obtendo-se uma vazão de jorro mínimo (Q_{jmo}) de $17,07 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ para uma queda de pressão de jorro estável (ΔP_{jeso}) de 670Pa. Posteriormente, as mudanças no comportamento fluidodinâmico do leito devido à presença da água, foram registradas. Para um melhor acompanhamento dessas variações, as medidas das variáveis fluidodinâmicas (ΔP , v , h_f e h_a) foram parametrizadas em relação às medidas iniciais efetuadas no leito antes da adição de água (ΔP_0 , h_{f0} , h_{a0} e v_0). Estes dados encontram-se ilustrados na Figura 4.4.

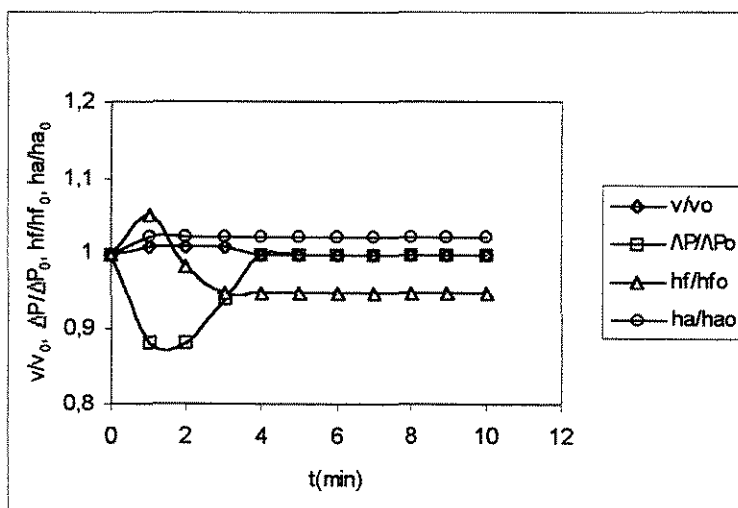


Figura 4.4 – Influência da alimentação de água nas variáveis fluidodinâmicas do leito

Conforme ilustra a Figura 4.4, a presença da água promove mudanças no comportamento do leito. A velocidade superficial do ar no jorro sofre um pequeno aumento, a queda de pressão cai bruscamente, o anel se expande e a altura da fonte aumenta, diminuindo porém a concentração de partículas na mesma. Entretanto, à medida que a secagem prossegue, o leito estabiliza em condições de vazão e pressão praticamente idênticas às iniciais, com pequenas modificações na altura da fonte e do anel, ligeiramente mais expandido.

Com relação à altura da fonte SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) descrevem comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 4.4. Para um leito de partículas esféricas de vidro, mantendo fixa a velocidade superficial do ar, os autores injetaram água no leito acompanhando medidas da altura da fonte com o tempo. Eles observaram que após a injeção de água a altura da fonte aumentava instantaneamente atingindo um pico. Para diferentes quantidades de água adicionadas, mantendo fixa a carga de inertes, os autores mostram que, a partir do pico, h_f cai uniforme e linearmente, com o tempo, passando por um mínimo e voltando ao valor inicial observado antes da injeção de água. Embora o pico atingido pela fonte dependa da relação entre o volume de água e o volume do leito, aumentando com esta relação, a diminuição de h_f com o tempo, segundo os autores, ocorre à mesma taxa. O acompanhamento das medidas de h_f foi feito em intervalos de tempo de 20 segundos. No presente trabalho, as medidas da altura da fonte foram acompanhadas em intervalos de 60s, não sendo possível verificar a evolução da altura da fonte na forma quase instantânea apresentada por SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993).

A curva característica do leito após a adição de água, mostrada na Figura 4.5, foi obtida de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3.

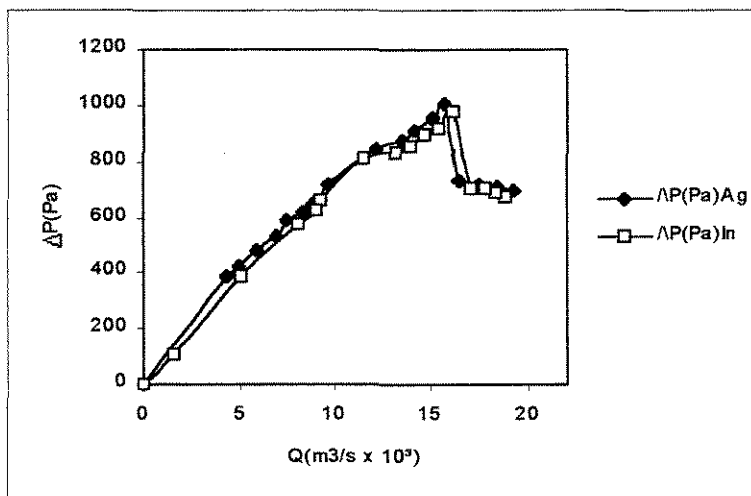


Figura 4.5 – Curvas características do leito de partículas inertes com e sem adição de água

Conforme se pode observar na figura, não houve qualquer interferência da água na curvas característica do leito, fato evidenciado pela sobreposição das curvas ilustradas. Este resultado é decorrente da metodologia empregada, e está de acordo com a discussão das curvas de secagem apresentada no item 4.3. O comportamento é praticamente coincidente porque quando as medidas para obtenção das curvas características foram iniciadas, após restabelecido o regime, o leito já se encontrava praticamente seco

Empregando-se a mesma metodologia, foram acompanhadas as mudanças no comportamento fluidodinâmico do leito devido à presença da polpa de manga natural. As medidas das variáveis fluidodinâmicas (ΔP e v) foram parametrizadas em relação às medidas iniciais efetuadas no leito antes da adição de polpa (ΔP_0 e v_0). Problemas de visualização do leito comprometeram o acompanhamento das medidas da alturas da fonte e do anel. A Figura 4.6 ilustra o comportamento observado em relação à queda de pressão e à velocidade superficial do ar. Observa-se nesta figura que, analogamente ao acontecido com a adição de água, no momento da alimentação a polpa de manga promove uma diminuição expressiva na queda de pressão e um pequeno aumento na velocidade superficial do ar. Com o prosseguimento da secagem, a queda de pressão volta a subir e a velocidade do ar retorna às condições iniciais. Entretanto, ao contrário do comportamento observado com a água, o leito entra em regime em níveis mais baixos de queda de pressão e de vazão de ar no jorro. Estas observações, aliadas às constatações acerca da evolução da secagem referidas no ponto anterior, confirma que, além dos efeitos da alimentação do líquido,

manifestados nos instantes iniciais tanto para água como para a polpa, uma vez estabelecido o regime, quando praticamente já foi evaporada a maior parte da água, há uma nítida interferência da manga sobre o comportamento hidrodinâmico do leito. Estes efeitos podem ser atribuídos à película aderida às partículas de inerte.

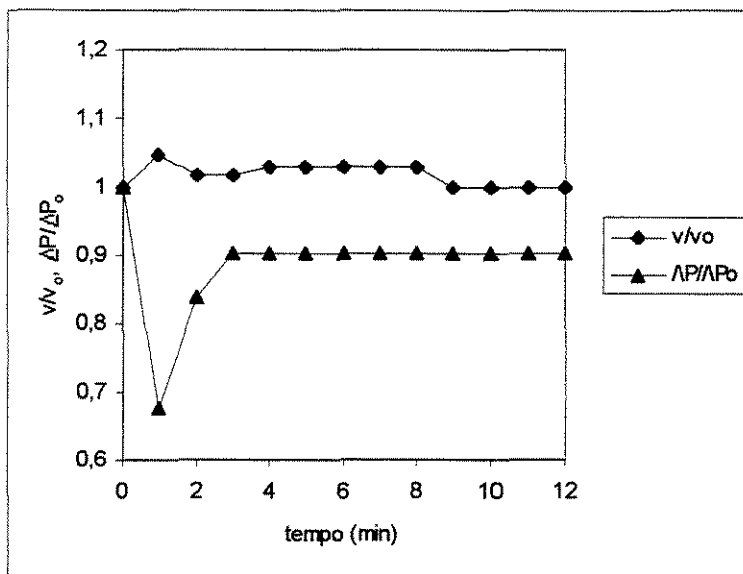


Figura 4.6 – Influência da alimentação de polpa de manga natural nas variáveis fluidodinâmicas do leito

Para confirmar a influência da película aderida sobre a hidrodinâmica do leito em condições de regime estabelecido, obteve-se a curva característica do leito após a secagem de polpa de manga natural. A Figura 4.7 ilustra a interferência da manga nos parâmetros fluidodinâmicos em relação aos obtidos com o leito constituído apenas pelas partículas inertes. De acordo com o comportamento ilustrado, há uma relevante interferência da presença da manga, tanto na vazão de jorro mínimo como na queda de pressão de jorro estável. A queda de pressão diminui e a vazão de jorro mínimo aumenta, comparativamente aos valores encontrados para o leito de inertes com e sem adição de água. Estes resultados não coincidem com os encontrados por LIMA (1993) para a polpa de umbu, onde a vazão de jorro mínimo do leito acrescido desta polpa era menor do que a encontrada para o leito de partículas inertes de poliestireno de baixa densidade. IERÔNIMO et al. (1999)

encontraram comportamento fluidodinâmico semelhante ao relatado por LIMA (1993) em leitos de partículas de poliestireno de baixa densidade com adição de polpa de manga.

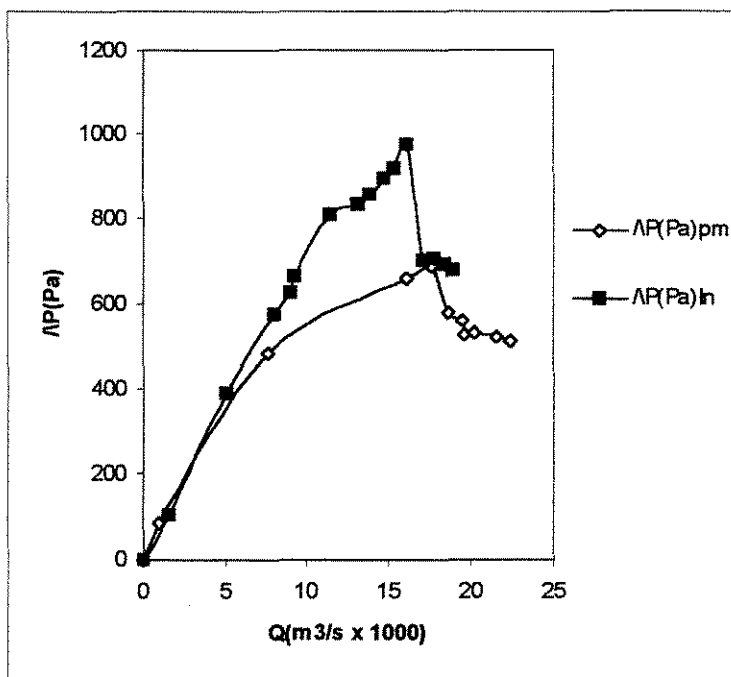


Figura 4.7 – Curvas características do leito de partículas inertes (In) com e sem adição de polpa de manga natural (pm)

Os resultados sugerem a existência de interações entre a polpa e as propriedades do material inerte empregado na secagem em leito de jorro, no que concerne aos efeitos da polpa sobre os parâmetros fluidodinâmicos do leito. Destaca-se também a possível influência das características dos materiais inertes com respeito ao diâmetro e esfericidade das partículas, densidade do sólido, entre outros. Na Tabela 4.9 são mostrados os valores correspondentes às relações entre os parâmetros fluidodinâmicos com e sem adição de polpa de manga (Q_{jm}/Q_{jmo} , $\Delta P_{jes}/\Delta P_{jeso}$). São mostrados, ainda, dados obtidos na fase preliminar deste trabalho para leitos de polietileno de alta densidade, acrescidos de diversas polpas de frutas e os obtidos por LIMA (1993) e JERÔNIMO et al. (1999) com leitos de poliestireno de baixa densidade e de SANGEL[®].

Tabela 4.9 - Influência do material inerte nos parâmetros fluidodinâmicos do leito de jorro -
Dados referentes à secagem de polpas de frutas tropicais

Material inerte	Poliestireno de Baixa Densidade $d_p=0,34\text{cm}$ $\phi=0,59$ $\rho_p=1028\text{ kg/m}^3$		Polietileno de Alta Densidade $d_p=0,39\text{cm}$ $\phi=0,75$ $\rho_p=950\text{ kg/m}^3$		SANGEL[®] $d_p=0,37\text{cm}$ $\phi=0,64$ $\rho_p=1066\text{ kg/m}^3$	
Polpa	Q_{jm}/Q_{jmo}	$\Delta P_{jes}/\Delta P_{jeso}$	Q_{jm}/Q_{jmo}	$\Delta P_{jes}/\Delta P_{jeso}$	Q_{jm}/Q_{jmo}	$\Delta P_{jes}/\Delta P_{jeso}$
Cajá	1,02	1,00	1,19	0,75	-	-
Manga	0,92	1,33	1,09	0,78	1,10	1,50
Umbu	0,96	1,31	1,14	0,81	-	-
Acerola	1,31	0,48	1,33	0,69	-	-
Seriguela	1,27	0,97	1,17	0,79	-	-

Conforme se mostra nos dados tabelados, a presença da polpa de manga provoca uma diminuição da ordem de 8%, da vazão de jorro mínimo obtida para o leito de poliestireno de baixa densidade. Já em relação ao polietileno de alta densidade e ao SANGEL[®], há um acréscimo de 10%, em média. Em relação ao poliestireno de baixa densidade e ao polietileno de alta densidade, nos ensaios fluidodinâmicos em presença da polpa de umbu, os efeitos são praticamente os mesmos observados com a polpa de manga. De um modo geral, as polpas de frutas provocaram maiores vazões de jorro mínimo e menores quedas de pressão de jorro estável relativas aos valores respectivos do leito de inertes com o polietileno de alta densidade. Excetua-se desta tendência geral os ensaios com as polpas de seriguela e acerola, que respectivamente apresentaram, no caso do poliestireno de baixa densidade, maior vazão de jorro mínimo e menor queda de pressão de jorro estável relativa à este inerte.

Esses resultados indicam preliminarmente que em presença das polpas, o leito de partículas de poliestireno de baixa densidade oferece em geral condições fluidodinâmicas mais estáveis do que o leito de polietileno de alta densidade.

4.4.2 – Curvas Características com as Polpas Modificadas

O comportamento fluidodinâmico do leito com as polpas modificadas se assemelham aos que têm sido observados com as polpas de frutas naturais. Algumas polpas interferiram favoravelmente na dinâmica do leito, provocando circulação de sólidos mais intensa e vazões de jorro mínimo em níveis mais baixos do que o obtido com o leito de inerte. Outras polpas interferiram negativamente, provocando problemas de instabilidade do leito, bem caracterizada pela expansão do leito, diminuição na queda de pressão e aumento da vazão de jorro mínimo.

Conforme já citado no item 4.3, os níveis mínimos das concentração dos constituintes, cuja interferência no desempenho do leito de jorro está sendo avaliada, correspondem aos da polpa natural. Da mesma forma como foi conduzida a discussão sobre as propriedades das polpas, tomando-se como base os efeitos da polpa natural sobre o comportamento fluidodinâmico do leito, inicialmente são apresentados os dados relativos às mudanças no comportamento do leito em decorrência da alimentação das polpas cujas concentrações, em relação à polpa natural, tenham sido modificadas para apenas um constituinte individualmente, polpas 1, 2, 3, 5 e 9.

As Figuras 4.8 a 4.11 ilustram as variações promovidas pelas alimentações das polpas 1, 2, 3, 5, 9, da água e da polpa de manga na queda de pressão, velocidade superficial do ar, alturas da fonte e do anel, respectivamente. Os dados também se encontram parametrizados em relação às medidas iniciais no leito constituído apenas pelas partículas inertes.

Conforme mostra a Figura 4.8, todas as polpas, assim como a água e a polpa de manga natural, provocaram uma diminuição brusca na queda de pressão no momento em que foram adicionadas ao leito. A diminuição de ΔP , segundo SPITZNER NETO e FREIRE, (1997) pode ser explicada pela aglomeração que, juntamente com a viscosidade da pasta, prejudicam tanto a circulação das partículas quanto a passagem do ar através do leito, aumentando assim a fração de ar que percola a região do jorro e, conseqüentemente, a velocidade do ar nesta região. Havendo uma maior resistência à passagem do ar para a região anular, a queda de pressão diminui. Embora os autores tenham se referido às condições de jorro mínimo, o efeito da pasta sobre as condições de estabilidade do leito em qualquer nível de vazão é bem caracterizado pela diminuição na queda de pressão. Esta

diminuição é tanto maior quanto maior é a instabilidade provocada pela pasta ou suspensão alimentada. Os autores trabalharam com alimentação contínua de pasta. No presente trabalho, os efeitos da alimentação em batelada sobre a queda de pressão também são evidentes.

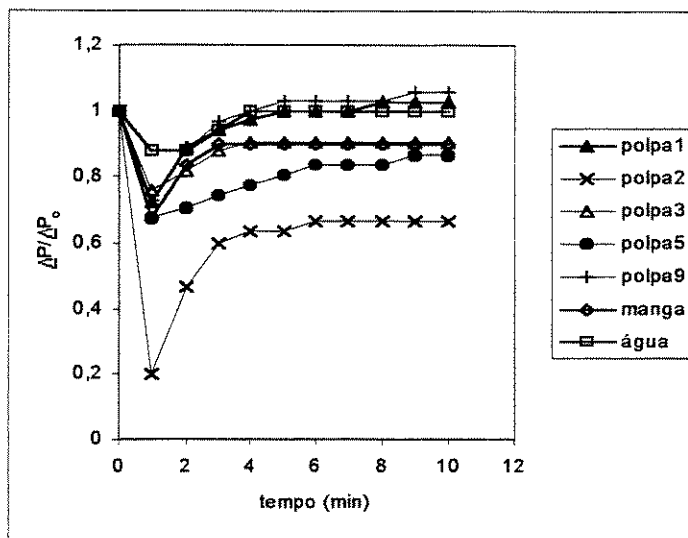


Figura 4.8 – Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na queda de pressão no leito (ΔP)

SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) mostram para uma relação fixa entre o volume de líquido presente no leito e o volume do leito (V_l/V_b), que ΔP diminui com a viscosidade do líquido. Os autores trabalharam com líquidos de diferentes viscosidades, alimentados em batelada, e seus dados referem-se às condições de jorro mínimo. Em relação à queda de pressão do leito seco, a razão $\Delta P/\Delta P_0 < 1$ foi verificada praticamente para toda a faixa de V_l/V_b utilizada pelos autores, diminuindo conforme aumentava a quantidade de líquido no leito. O comportamento ilustrado na Figura 4.10 é consistente com os dados apresentados por SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993). Deve-se considerar, entretanto, que no presente trabalho a relação inicial V_l/V_b , foi praticamente fixa e da ordem de 1,25%, e que após estabilização das condições de jorro, em presença das polpas 1 e 9, $\Delta P/\Delta P_0 > 1$, das polpas 2, 3, 5, e de manga natural, $\Delta P/\Delta P_0 < 1$ enquanto no ensaio com a água as condições iniciais de queda de pressão foram restabelecidas, ou seja, $\Delta P/\Delta P_0 = 1$.

Observando-se o comportamento ilustrado na Figura 4.8, verifica-se que enquanto a alimentação de água promove uma diminuição na queda de pressão da ordem de 12% do valor correspondente ao leito seco, para as demais polpas a redução encontra-se numa faixa de 24%(polpa 3 com teor máximo de gordura) a 80% (polpa 2 com teor máximo de açúcares redutores). Estes resultados mostram que enquanto a concentração de gordura favorece a estabilidade do leito, os açúcares redutores prejudicam a performance fluidodinâmica do mesmo. Comparando-se o comportamento do leito em presença da polpa de manga com os observados em presença das demais polpas, pode-se constatar que a polpa de manga e a polpa 5 (teores máximo de fibras) apresentam o mesmo mínimo de queda de pressão, relativa ao leito de inertes, enquanto para as polpas 1 e 9 (teores máximos de pectina e amido, respectivamente) o comportamento assemelha-se mais ao observado no leito com adição da polpa 3. Desta forma, avalia-se preliminarmente que o aumento na concentração de fibras não provocou mudanças significativas na dinâmica do leito, enquanto uma maior concentração de pectina e amido promovem maior estabilidade.

A Figura 4.9 mostra o efeito da alimentação das polpas sobre a velocidade superficial do ar.

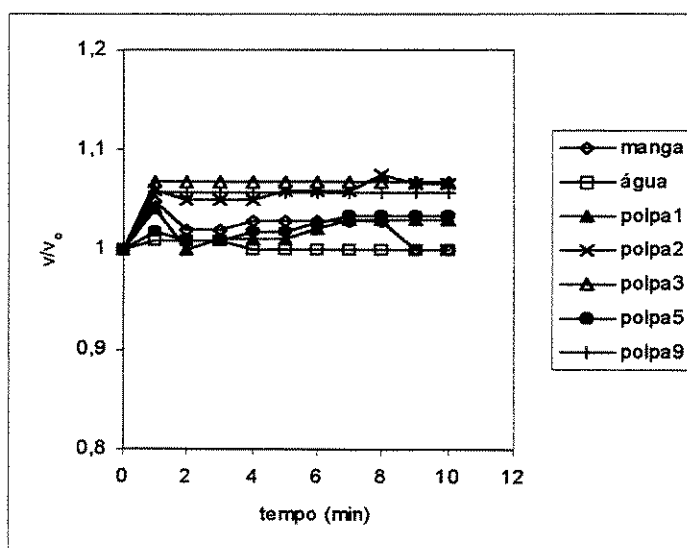


Figura 4.9 – Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na velocidade superficial do ar (v)

Conforme já discutido anteriormente, a aglomeração desfavorece a passagem do ar para a região anular e uma maior distribuição do ar na região do jorro, promovendo maiores velocidades do ar, que circula mais livremente por esta região. Tanto no ensaio com a água, como nos experimentos realizados com as polpas, cujos dados são ilustrados nesta figura, observou-se um pico na velocidade superficial do ar no momento em que se efetuava a alimentação. Observa-se, entretanto, que excetuando-se o ensaio realizado com a água, nos demais ensaios o regime é restabelecido em níveis de velocidade mais elevados, o que mostra a interferência da película de material seco aderido à superfície das partículas, visto que, conforme foi discutido anteriormente, nos primeiros 10 minutos iniciais, quando ocorre a evaporação da água, não foi observado arraste do produto desidratado. De acordo com a Figura 4.9, os ensaios com alimentação das polpas 2, 3 e 9 foram os que apresentaram maiores velocidades do ar após a alimentação. Com relação à polpa 2, com elevada concentração de açúcares redutores, após o pico a velocidade sofre oscilações inerentes à instabilidade verificada neste ensaio. Nos ensaios 3 e 9, a velocidade atingida no primeiro minuto permanece ao longo do tempo. Nos demais ensaios, após atingir o pico, a velocidade decresce, estabilizando num valor ligeiramente superior ao da velocidade inicial, estabilizada no leito de inertes.

O comportamento, aparentemente complexo em relação aos efeitos da composição das polpas, indica que em relação à interferência da gordura e do amido, as maiores velocidades do ar são justificadas por melhores condições fluidodinâmicas do leito, promovidas pela elevada concentração destes constituintes nas polpas 3 e 9. Nestes ensaios, foram observados tanto uma maior circulação de sólidos como elevadas velocidades de deslizamento das partículas na parede dos visores, correspondente à região anular do leito. Com a polpa 2, cuja concentração de açúcares redutores é máxima, o aumento na velocidade do ar é decorrente da aglomeração das partículas, com distribuição preferencial da vazão do ar, conforme discutido anteriormente.

As Figuras 4.10 e 4.11 ilustram o efeito da alimentação das polpas na expansão do leito, no que se refere às alturas da fonte e do anel, respectivamente. Com relação à fonte, excetuando-se o comportamento observado no leito acrescido da polpa 2 (teor máximo de açúcares redutores), o das demais polpas foi semelhante ao apresentado com adição de água, preliminarmente apresentado e discutido no item 4.4.1. É interessante se observar que o comportamento do leito com adição da polpa 5 (teor máximo de fibras), corresponde

exatamente ao descrito por SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993). No presente trabalho, as medidas da altura da fonte foram tomadas a partir da superfície do anel. Desta forma, tanto a expansão do anel, como a da fonte ou de ambas as regiões do leito promoveram, a expansão do leito como um todo.

Com a alimentação da polpa 2, observa-se na Figura 4.10 que a altura da fonte não chega a aumentar, decrescendo à medida que a secagem prossegue, atingindo um mínimo aos 3 minutos, passando por um posterior período de oscilação e alcançando aos 8 minutos um patamar, cujo valor corresponde a cerca de 85% do valor inicial. Todavia, a Figura 4.11 mostra que em relação à altura do anel, a maior expansão foi verificada no leito com adição da polpa 2, da ordem de 9%. Após estabilização a expansão do anel fica na faixa de 7%.

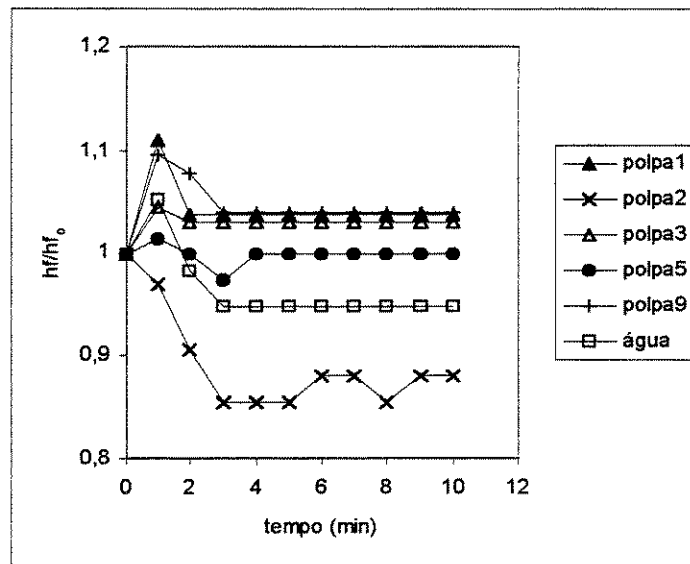


Figura 4.10 – Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na altura da fonte

No ensaio com a água também foi observado, conforme discussão anterior, que após restabelecido o regime, o anel ainda se apresentava ligeiramente expandido, já com as demais polpas, de acordo com a Figura 4.11, a altura do anel retorna às condições iniciais após a evaporação da água.

A expansão da região anular pode ser explicada pela diminuição na taxa de circulação de sólidos, com conseqüente redução na concentração de partículas no jorro e na

fonte. A redistribuição de partículas no leito, com maior concentração de sólidos no anel, promove a expansão do mesmo. No momento em que a polpa é adicionada ao leito estes efeitos são mais evidentes. A maior distribuição de ar na região do jorro promove a formação de fontes mais altas, porém em virtude da aglomeração das partículas, menos densas. Verifica-se, assim, modificações simultâneas no leito, caracterizadas pelo aumento na velocidade superficial do ar, diminuição na queda de pressão, fonte e anel mais expandidos. Estes fenômenos foram observados em quase todos os ensaios, excetuando-se o ensaio 2, cuja ameaça de colapso ficou bem caracterizada pela observação de uma fonte pouco densa e mais baixa que a fonte inicial do leito de inertes.

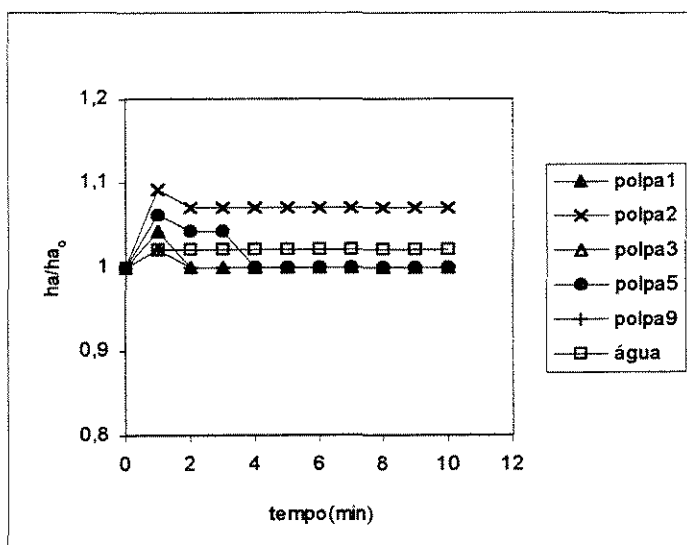


Figura 4.11 – Influência da alimentação das polpas 1 (pectina), 2 (açúcares redutores), 3 (gorduras), 5 (fibras), 9 (amido), manga natural e água na altura do anel

Dependendo da polpa, observava-se que o leito estabilizava cerca de 4 minutos, após a alimentação, período em que se verificava praticamente a evaporação da maior parte da umidade. As curvas hidrodinâmicas apresentadas a seguir foram obtidas 10 minutos após a alimentação, ou seja, com o leito praticamente seco. Serão analisados, então, o efeito da composição da polpa em relação ao material praticamente isento de umidade. Considerando-se, entretanto, que não houve arraste de material e que os constituintes, cuja influência na fluidodinâmica do leito está sendo analisada, não são voláteis (açúcares, amido, pectina fibras), ou apresentam elevado ponto de ebulição (azeite de oliva),

considera-se que as proporções entre suas concentrações no material desidratado sejam as mesmas fixadas nas polpas.

A Figura 4.12 mostra a curva característica obtida no ensaio 1, cuja composição da polpa alimentada (polpa 1) é praticamente a mesma da polpa de manga natural, excetuando-se a concentração de pectina, mantida no nível máximo.

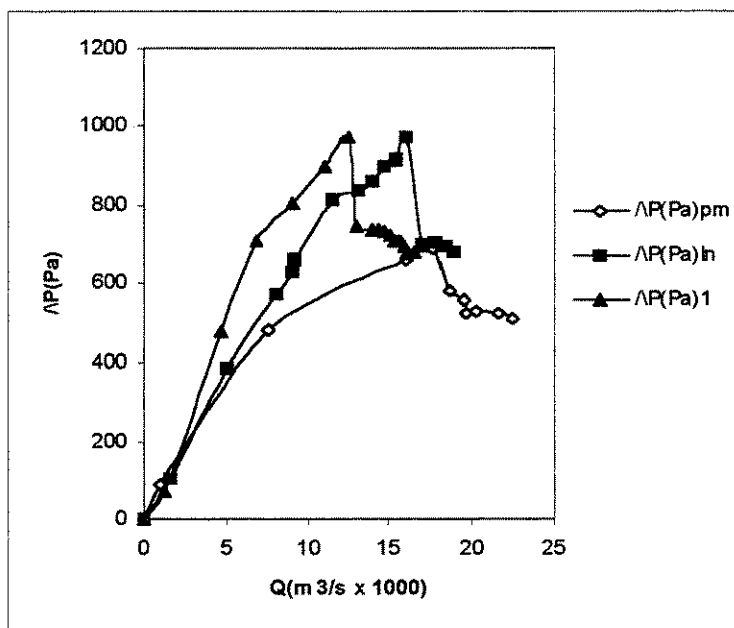


Figura 4.12 - Influência da concentração de pectina no comportamento fluidodinâmico do leito (1-polpa 1, In-inerte, pm-polpa de manga)

A elevada concentração de pectina não afetou o comportamento do leito no que diz respeito à queda de pressão de jorro estável, praticamente a mesma obtida com o leito de partículas inertes, conforme ilustra a Figura 4.12. Verifica-se, entretanto, uma significativa diminuição da vazão de jorro mínima em relação ao leito constituído pelas partículas inertes. Comparando-se o ensaio 1 com o efetuado com a polpa natural, tanto o registro das observações experimentais como os dados obtidos constatarem que a elevada concentração de pectina favoreceu a dinâmica do leito, promovendo mais estabilidade e melhor circulação de partículas em níveis mais baixos de vazão de ar.

A curva característica obtida no ensaio 2, cuja polpa (polpa 2) alimentada teve sua concentração de açúcares redutores fixada no nível máximo, é mostrada na Figura 4.13.

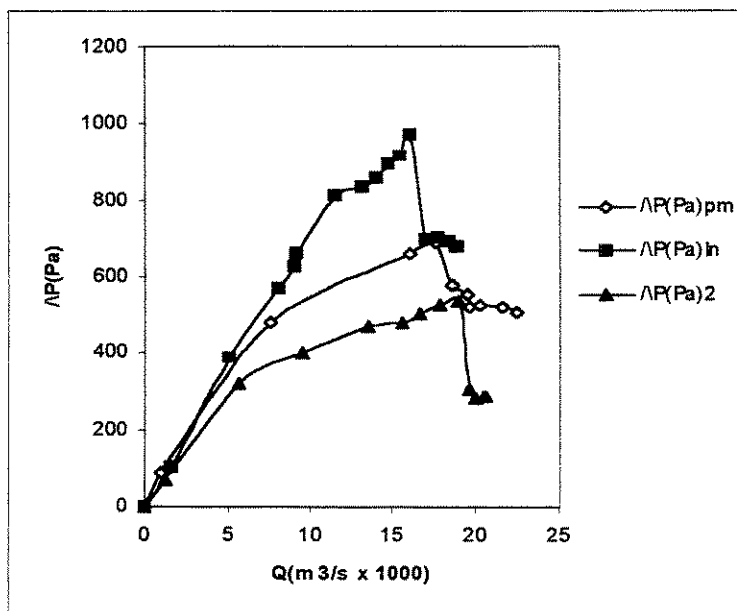


Figura 4.13 - Influência da concentração de açúcares redutores no comportamento fluidodinâmico do leito (2-polpa 2, In-inerte, pm-polpa de manga)

A elevada concentração de açúcares redutores provocou instabilidade no leito, bastante evidenciada pela excessiva diminuição na queda de pressão e aumento da vazão de jorro mínimo, ilustrados na Figura 4.13. Neste ensaio, conforme relatado anteriormente, durante a alimentação da polpa, o jorro mostrou-se instável com sucessivas ameaças de colapso. Na região anular o movimento das partículas foi prejudicado, observando-se uma região estagnada próxima à parede da coluna. Uma camada de partículas ficou aderida às paredes dos visores. Analisando-se as curvas apresentadas na Figura 4.13, verifica-se que, em relação à polpa natural, os efeitos negativos da composição da polpa 2 sobre o comportamento fluidodinâmico do leito são mais relevantes. Este resultado confirma a interferência negativa de polpas com elevadas concentrações de açúcares redutores no desempenho do leito de jorro, de acordo com MARTINEZ et al. (1993), RAMOS (1997) e LIMA et al. (2000).

O efeito da concentração de gordura da polpa 3, ajustada no nível máximo, é mostrado na Figura 4.14 que ilustra a curva característica obtida no ensaio 3.

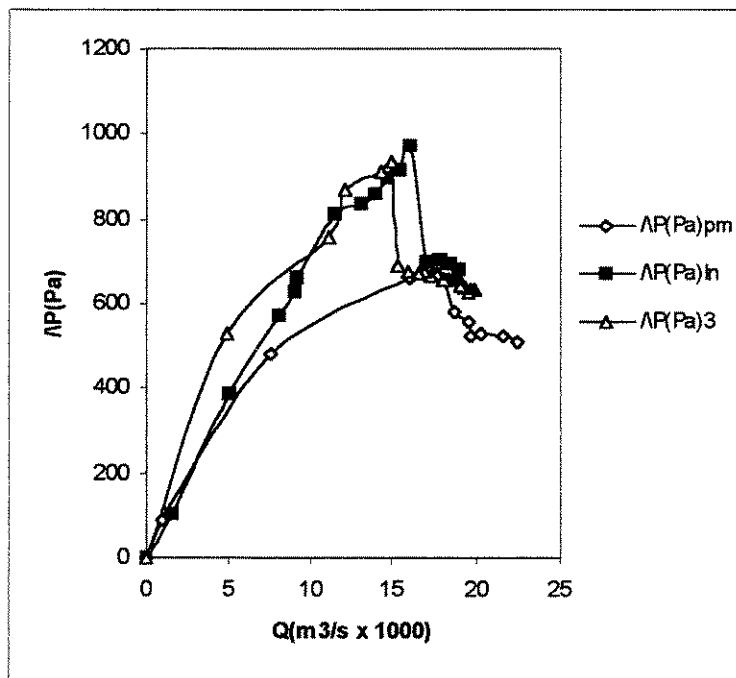


Figura 4.14 - Influência da concentração de gorduras no comportamento fluidodinâmico do leito (3-polpa 3, In-inerte, pm-polpa de manga)

Conforme se observa na Figura 4.14, a elevada concentração de gorduras provoca uma diminuição na vazão de jorro mínimo. A queda de pressão de jorro estável também é afetada pela gordura, sendo um pouco mais baixa do que a observada no leito constituído apenas pelas partículas inertes. Entretanto, esta relativa diminuição na queda de pressão não se deve a problemas de instabilidade, visto que o comportamento fluidodinâmico do leito foi completamente estável, com intensa circulação de partículas, tanto na região da fonte como na anular. Foi observado um aumento significativo na velocidade de deslocamento das partículas na parede dos visores, correspondente à região do anel. Este aumento pode ser atribuído ao efeito lubrificante da gordura. Comparando-se o comportamento do leito no ensaio 3 ao observado com a polpa natural, constata-se a favorável interferência da gordura na fluidodinâmica do jorro. Este resultado é compatível com os encontrados e relatados por LIMA (1993) para a polpa de umbu.

As curvas características ilustradas na Figura 4.15 mostram a interferência das fibras na fluidodinâmica do leito para o ensaio 5.

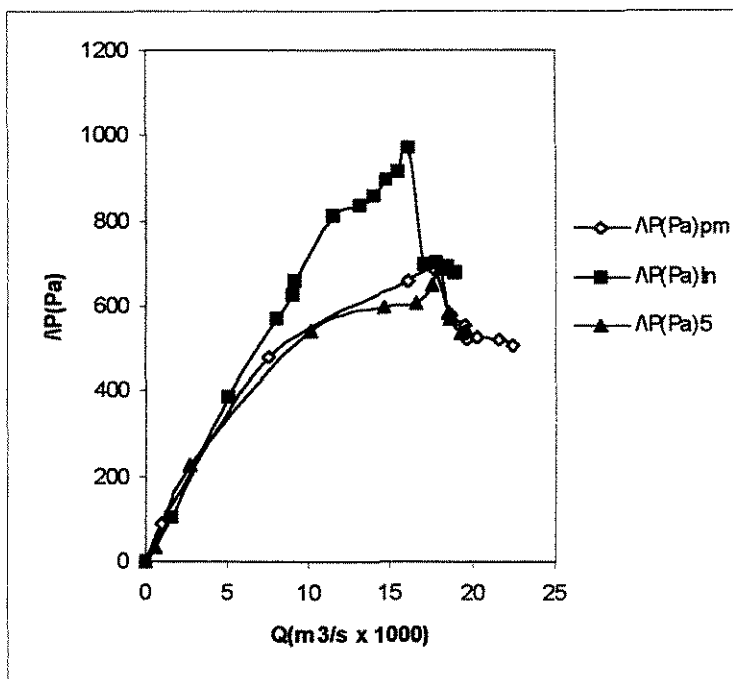


Figura 4.15 - Influência da concentração de fibras no comportamento fluidodinâmico do leito (5-polpa 5, In-inerte, pm-polpa de manga)

O comportamento fluidodinâmico foi o mesmo observado com a polpa natural. A sobreposição das curvas características ilustradas na Figura 4.15 constata as observações experimentais. A elevada concentração de fibras não interferiu nos parâmetros fluidodinâmicos obtidos para o leito em presença da polpa de manga natural.

Em relação ao amido, a concentração máxima ajustada no ensaio 9 não provocou diferenças significativas nos parâmetros fluidodinâmicos do leito constituído apenas pelas partículas inertes. A Figura 4.16 ilustra o comportamento observado. As curvas características obtidas no ensaio 9 e no ensaio preliminar com o leito de partículas inertes praticamente coincidem. O ensaio transcorreu sem qualquer problema, com respeito à estabilidade do leito, mesmo durante a alimentação da polpa. Comparando-se ao ensaio com a polpa natural, a estabilidade observada no ensaio fluidodinâmico do leito com a polpa 9 é atribuída à presença do amido, que provoca uma melhor escoabilidade das partículas, segundo LIMA (1999). KACHAN (1988) acrescentou amido em proporções de 1% e 2% em peso à pasta de tomate a ser desidratada em leito de jorro com partículas inertes de vidro, com o objetivo de melhorar as características higroscópicas do pó de tomate obtido. Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que a adição de amido

melhorou a performance do leito de jorro, no que diz respeito à vazão máxima de alimentação da pasta que era suportada pelo leito, sem provocar colapso do jorro.

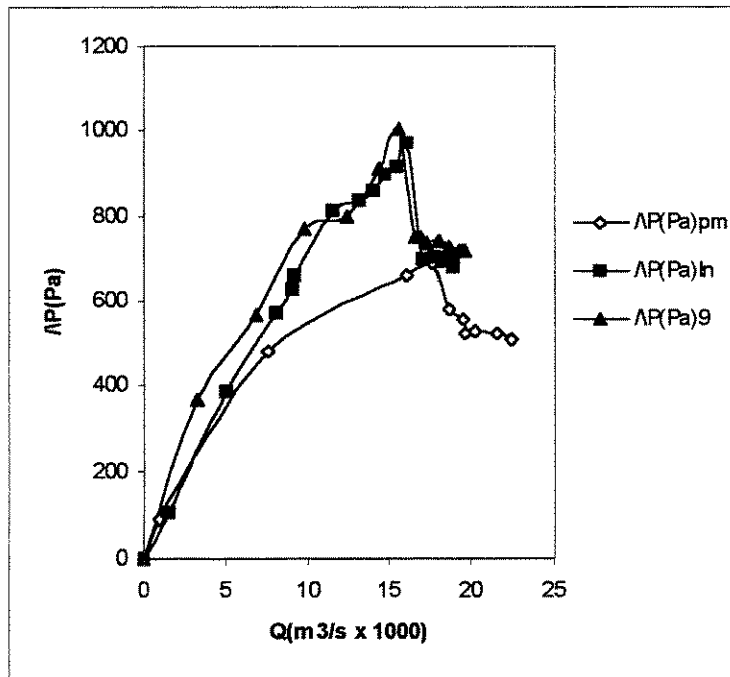


Figura 4.16 - Influência da concentração de amido no comportamento fluidodinâmico do leito (9-polpa 9, ln-inerte, pm-polpa de manga)

Os efeitos das concentrações combinadas nas curvas características do leito são mostrados nas Figuras 4.17 a 4.23. Com respeito às mudanças na fluidodinâmica do leito, decorrentes da alimentação das polpas, os ensaios, cujas curvas características são ilustradas nestas figuras, apresentaram a mesma tendência de comportamento em relação à estabilidade discutida nos parágrafos anteriores.

A Figura 4.17 mostra a interferência da composição quando todas as concentrações foram ajustadas para o nível máximo (ensaio 16) e para o nível médio entre as concentrações máximas e mínimas (ensaio 17). Analisando-se as curvas mostradas na Figura 4.17, observa-se que em relação à composição da manga natural, tanto a polpa 16 como a polpa 17 promovem uma melhor performance na fluidodinâmica do leito. Os ensaios 16 e 17, de acordo com as observações experimentais, apresentaram comportamentos fluidodinâmicos semelhantes, comprovados pela quase coincidência de

suas curvas características, de acordo com a Figura 4.17. Não foram registrados problemas de instabilidade, observando-se, entretanto, que para a mesma vazão de ar, a fonte do experimento 17 era mais alta. Conforme ilustra a Figura 4.17, as vazões de jorro mínimo dos ensaios 16 e 17 apresentam valores muito próximos ao do leite constituído apenas pelas partículas inertes, porém, nas condições de jorro estável, as quedas de pressão são visivelmente mais baixas.

Uma análise mais detalhada destes resultados indica que para a faixa de concentração em que foram conduzidos os ensaios, as interações combinadas das variáveis de composição, mantidas entre si no mesmo nível, interferem de forma mais ou menos acentuada, dependendo dos níveis de concentração em que foram ajustadas. No ensaio com polpa de manga, as concentrações mínimas de todos os constituintes interferiram sensivelmente no comportamento fluidodinâmico do leite, prejudicando a performance do processo. Nos ensaios 16 e 17 o comportamento fluidodinâmico foi semelhante, independentemente das concentrações das polpas 16 e 17 terem sido ajustadas no nível máximo e médio, respectivamente. Com respeito aos efeitos individuais, estes resultados sugerem ainda que, dependendo do nível de concentração, os efeitos negativos provocados pela presença dos açúcares redutores podem ser anulados pela interferência combinada das concentrações de gordura, amido e pectina que, conforme discussão anterior, interferem favoravelmente no comportamento fluidodinâmico do leite.

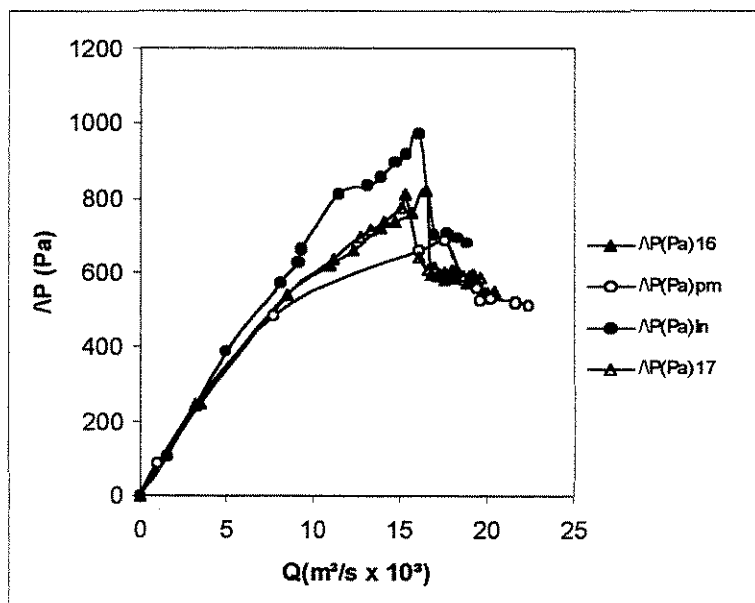


Figura 4.17 - Influência da composição no comportamento fluidodinâmico do leito, quando todas as concentrações encontram-se combinadas nos níveis máximos (ensaio 16), médios (ensaio 17) e mínimos (ensaio com a polpa natural) (16 e 17-polpas 16 e 17, In-inerte, pm-polpa de manga)

Na Figura 4.18 encontram-se ilustradas as curvas características obtidas nos ensaios 4, 10, 11 e 12. Desconsiderando-se a concentração de fibras, visto que os resultados anteriormente apresentados apontaram para a não interferência desta composição no comportamento fluidodinâmico do leito, a análise das curvas mostradas na Figura 4.18 se detêm aos efeitos das demais composições. Nestes ensaios foram ajustadas três concentrações no nível máximo, mantendo-se uma concentração no nível mínimo. As concentrações mantidas no nível mínimo, em cada ensaio, foram as seguintes: gordura no ensaio 10, pectina no ensaio 12, amido no ensaio 4 e açúcares redutores no ensaio 11.

De acordo com as observações experimentais, o ensaio 10 foi acompanhado por problemas de instabilidade no leito, o que pode ser justificado pela elevada concentração de açúcar e baixo conteúdo de gordura da polpa alimentada (polpa 10). Os efeitos da combinação de altas concentrações de amido e pectina, que de forma isolada interferem de forma favorável na dinâmica do leito, não foi suficiente para anular a influência negativa do alto teor de açúcar.

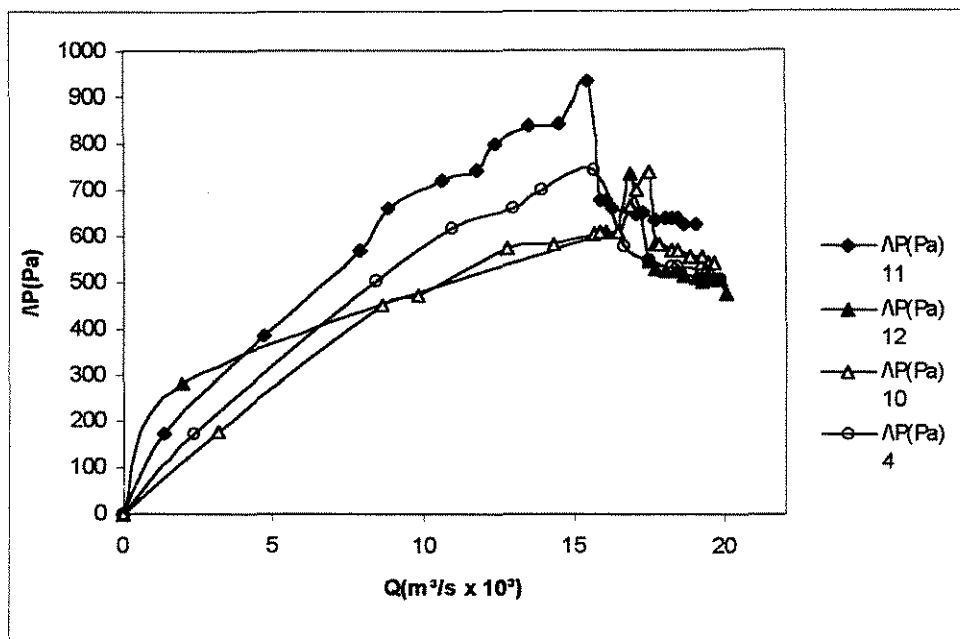


Figura 4.18 - Influência da composição no comportamento fluidodinâmico do leito, quando uma das concentrações é mantida no mínimo e as demais encontram-se combinadas nos níveis máximos; mínimo de açúcares redutores (ensaio 11); mínimo de gordura (ensaio 10); mínimo de pectina, (ensaio 12); mínimo de amido (ensaio 4)

No ensaio com a polpa 12 o leito se manteve mais estável, o que justifica uma interferência mais eficiente da interação gordura e amido frente à interação amido e pectina, no que diz respeito à estabilidade do leito. Comportamento semelhante foi observado no ensaio 4, no que tange à interação gordura e pectina. Estes resultados mostram que das composições que favorecem a dinâmica do leito, a gordura é a que apresenta efeito mais importante.

Com relação aos parâmetros fluidodinâmicos, observa-se na Figura 4.18 que não houve mudanças significativas nas quedas de pressão de jorro estável dos ensaios 4, 10 e 12, embora com a polpa 4 o jorro tenha colapsado numa vazão mais baixa. De forma isolada, conforme discussão dos resultados obtidos no ensaio 1, a pectina promove uma diminuição na vazão de jorro mínimo. A elevada concentração de pectina, associada ao alto teor de gordura da polpa 4 justifica o resultado encontrado.

O ensaio 11 apresentou os melhores resultados. A baixa concentração de açúcares associada aos elevados teores de gordura, amido e pectina, que interferem de forma

favorável no comportamento fluidodinâmico do leito, promoveram ótimas condições de estabilidade em baixos níveis de vazão do ar. Estes resultados, observados experimentalmente, são mostrados na curva característica obtida no ensaio 11, ilustrada na Figura 4.18.

Para uma avaliação mais consistente das interferências combinadas das composições estudadas, as curvas características dos ensaios 14 e 7, 8 e 13, 6 e 15 são ilustradas, respectivamente, nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

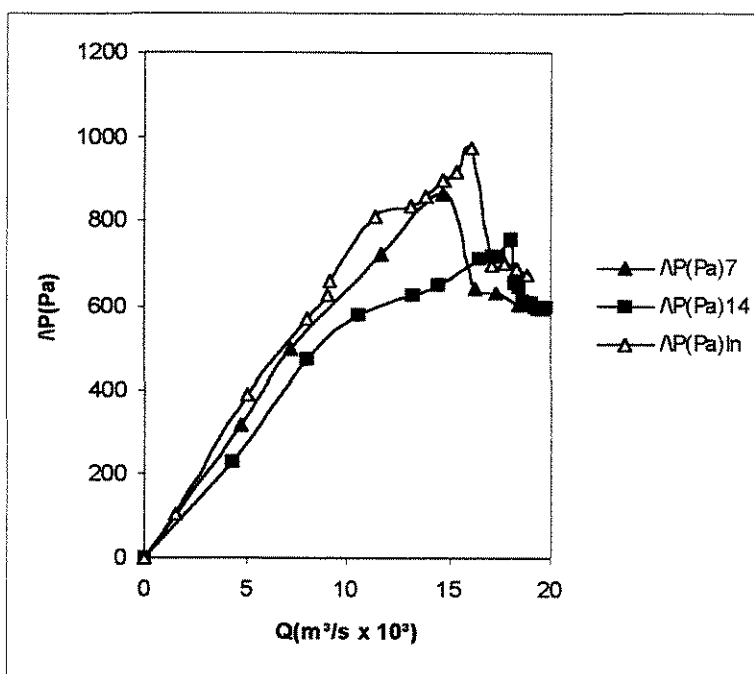


Figura 4.19 – Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leito; Ensaio 7 (teores máximos de gordura e pectina e mínimos de açúcares redutores e amido); Ensaio 14 (teores máximos de açúcares redutores e amido e mínimos de gordura e pectina)

No ensaio 14, as concentrações máximas referem-se ao açúcar e ao amido, enquanto as mínimas correspondem à gordura e à pectina. Inversamente, no ensaio 7, os níveis máximos correspondem à gordura e pectina e os mínimos ao açúcar e ao amido. O comportamento das curvas características ilustradas na Figura 4.19 constata os resultados observados nos demais ensaios. O ensaio 14 apresentou problemas de instabilidade e

acentuado aumento da vazão de jorro mínimo, apesar da elevada concentração de amido. Os efeitos combinados das elevadas concentrações de gordura e pectina, associado ao baixo teor de açúcares redutores, justificam a estabilidade do leite no ensaio 7.

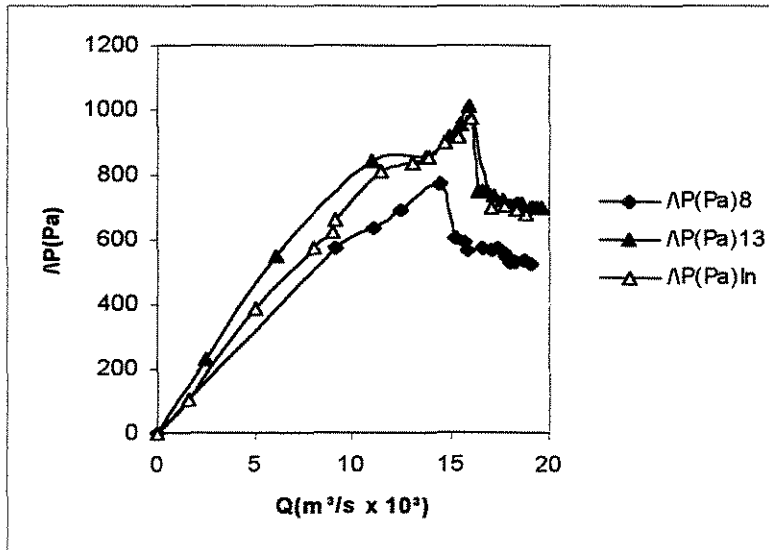


Figura 4.20 - Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leite; Ensaio 8 (teores máximos de açúcares redutores e gordura e mínimos de amido e pectina); Ensaio 13 (teores máximos de amido e pectina e mínimos de açúcares redutores e gordura)

No ensaio 8, as concentrações foram ajustadas nos níveis máximos de açúcares redutores e gordura e mínimos de amido e pectina. O comportamento fluidodinâmico representado pela curva característica ilustrada na Figura 4.20 confirma o importante efeito da concentração de gordura, frente à interferência negativa da elevada concentração de açúcares redutores, praticamente anulada neste ensaio, apesar dos baixos níveis de concentração de amido e pectina. O ensaio 13, cuja composição foi ajustada em níveis de concentração inversos aos do ensaio 8, também não apresentou problemas de instabilidade. A curva característica obtida praticamente coincide com a curva correspondente ao leite sem adição de polpa. Apesar da concentração mínima de gordura fixada no ensaio 13, como a concentração de açúcares redutores também foi fixada no mínimo, as interferências combinadas dos elevados teores de amido e pectina foram suficientes para manter a

estabilidade, observada tanto na curva característica mostrada na Figura 4.20, como confirmada experimentalmente.

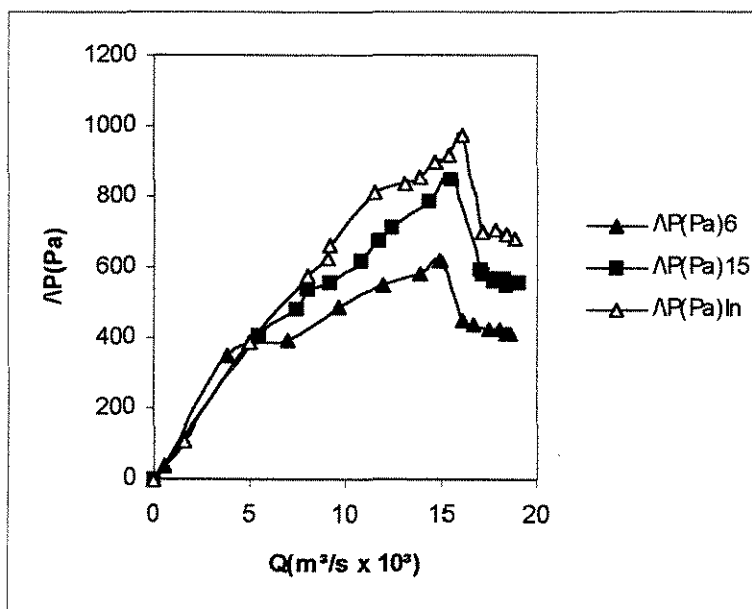


Figura 4.21 - Efeitos combinados das composições no comportamento fluidodinâmico do leite; Ensaio 6 (teores máximos de açúcares redutores e pectina e mínimos de gordura e amido); Ensaio 15 (teores máximos de amido e gordura e mínimos de açúcares redutores e pectina)

O comportamento fluidodinâmico dos ensaios 6 e 15, ilustrados na Figura 4.21, mostra que no ensaio 15 a combinação de concentrações mínimas de açúcares redutores e pectina com teores máximos de gordura e amido, interferiu favoravelmente na dinâmica do leite, o que está de acordo com os resultados anteriormente discutidos.

No ensaio 6, as concentrações de açúcar e pectina foram ajustadas no máximo e as de gordura e amido no mínimo. Os resultados obtidos também respaldam toda a discussão anterior, no que diz respeito à influência combinada das composições. A elevada concentração de pectina, embora tenha influência favorável sobre a dinâmica do jorro, não foi suficiente para anular os efeitos negativos decorrentes do alto teor de açúcares redutores, associado às baixas concentrações de gordura e de amido. Este ensaio apresentou problemas de instabilidade e o comportamento foi semelhante ao observado no ensaio 2,

ilustrado na Figura 4.15. É importante se registrar que os problemas de instabilidade do ensaio 2 foram verificados em maior intensidade do que os do ensaio 6, certamente atenuados pela elevada concentração de pectina fixada no ensaio 6.

Na Figura 4.22 encontram-se ilustradas as curvas características obtidas nos ensaios 17, 18 e 19, cujas concentrações foram todas ajustadas no ponto central. As repetições foram efetuadas com a finalidade de avaliar-se a reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos.

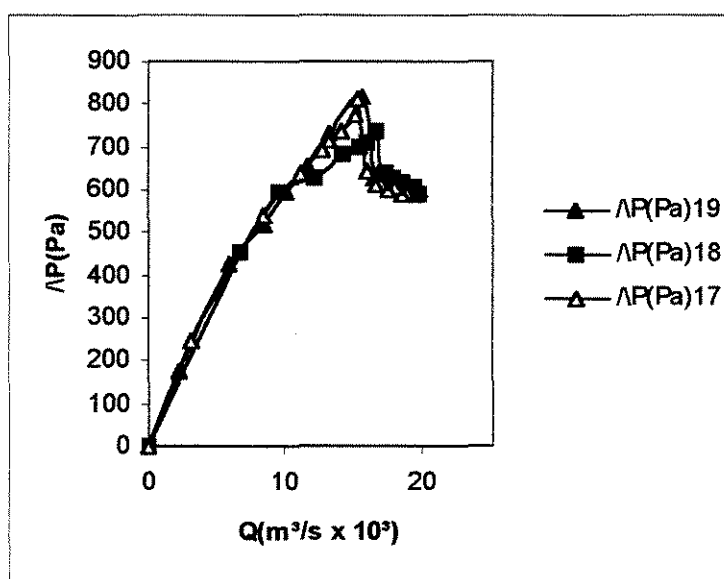


Figura 4.22 - Reprodutibilidade dos Ensaios 17, 18 e 19 (concentrações no ponto central)

De acordo com as curvas características apresentadas, os ensaios 17 e 19 apresentaram boa reprodutibilidade. Quanto ao ensaio 18, embora as observações experimentais registrem reprodutibilidade no comportamento fluidodinâmico, a curva característica obtida reproduziu de forma apenas satisfatória os resultados obtidos nos ensaios 17 e 19.

4.4.3 - Resultados dos Parâmetros Fluidodinâmicos

Os parâmetros fluidodinâmicos determinados para cada ensaio do planejamento experimental, a partir das curvas características apresentadas e discutidas nos item 4.4.2, são apresentados na Tabela 4.10. Esta tabela também mostra os resultados referentes às medidas do ângulo de repouso do leito com adição de polpas.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios fluidodinâmicos de acordo com o planejamento experimental

Ensaio	X _{açú} (%)	X _{gor} (%)	X _{fib} (%)	X _{fib} (%)	X _{pec} (%)	ΔP _{jes} (Pa)	Q _{jm} (m ³ /s) x10 ³	θ _m
1	7,67	0,77	0,50	0,52	1,82	696,8	13,0	39,5
2	19,95	0,77	0,50	0,52	0,67	286,6	19,6	36,5
3	7,67	6,84	0,50	0,52	0,67	653,5	15,3	30,0
4	19,95	16,84	0,50	0,52	1,82	524,2	16,7	28,0
5	7,67	0,77	2,01	0,52	0,67	542,3	18,5	36,0
6	19,95	0,77	2,01	0,52	1,82	422,9	16,1	39,5
7	7,67	6,84	2,01	0,52	1,82	603,7	16,3	30,0
8	19,95	6,84	2,01	0,52	0,67	556,7	15,3	32,0
9	7,67	0,77	0,50	4,66	0,67	730,9	16,5	29,5
10	19,95	0,77	0,50	4,66	1,82	556,6	17,7	29,0
11	7,67	6,84	0,50	4,66	1,82	637,9	15,9	28,0
12	19,95	6,84	0,50	4,66	0,67	516,2	17,7	34,5
13	7,67	0,77	2,01	4,66	1,82	718,3	16,5	31,5
14	19,95	0,77	2,01	4,66	0,67	603,9	18,3	32,0
15	7,67	6,84	2,01	4,66	0,67	560,3	17,0	28,5
16	19,95	6,84	2,01	4,66	1,82	582,6	17,0	24,0
17	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	599,4	16,1	26,0
18	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	634,0	18,1	26,5
19	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	603,0	16,5	29,0

Conforme pode ser observado na Tabela 4.10, os valores da queda de pressão de jorro estável variaram de um mínimo de 286,6Pa a um máximo de 730,9 Pa (ensaio 2 e 9 respectivamente). Com respeito à reprodutibilidade das medidas, conforme foi discutido no item 4.4.2, verifica-se que os ensaios 17 e 19 reproduziram bem as medidas da queda de pressão de jorro estável, o mesmo não ocorrendo com o ensaio 18, cuja reprodutibilidade foi apenas satisfatória.

Os valores da vazão de jorro mínimo ficaram compreendidos numa faixa de variação, entre $13,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $19,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Entretanto, observando-se os resultados apresentados na Figura 4.23, verifica-se que, excetuando-se os limites desta faixa que correspondem aos ensaios 1 e 2, nos demais ensaios as vazões de jorro mínimo ficaram uniformemente dispersas, em torno de um valor médio de $16,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, que praticamente coincide com a média dos valores obtidos nos ensaios de repetição, $16,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

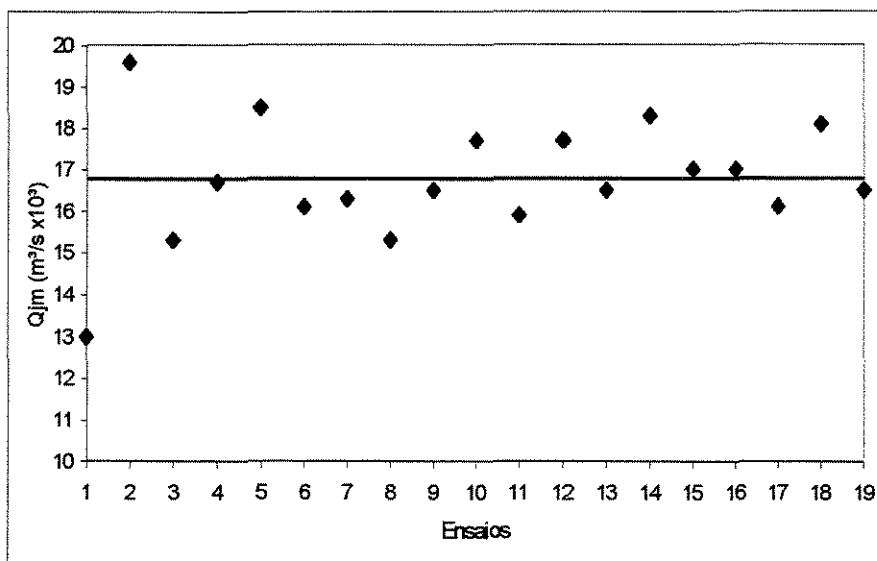


Figura 4.23 - Vazões de jorro mínimo

Pode-se discutir estes resultados procurando explicar o comportamento observado na Figura 4.23, mediante as seguintes possibilidades de justificativa:

- individualmente, apenas o açúcar e a pectina influenciaram na vazão de jorro mínimo, de forma positiva e negativa, respectivamente;

- para as combinações previstas pelo planejamento experimental, na faixa de concentrações em que as composições foram ajustadas, as interações entre as composições anularam outros efeitos individuais, ou combinados, fazendo com que a vazão de jorro mínimo fosse praticamente a mesma, sofrendo variações médias em torno de $\pm 10\%$, também identificada nos experimentos para testar a reprodutibilidade das medidas.

Com as polpas de frutas naturais, JERÔNIMO et al. (1999) e LIMA (1992) encontraram resultados que apontavam para a interferência da gordura na vazão de jorro mínimo. No presente trabalho, de acordo com as análises das curvas características e discussões apresentadas no item 4.4.2, a gordura interferiu favoravelmente na dinâmica do leito, provocando melhor estabilidade e vazões de jorro mínimo inferiores às obtidas nos ensaios fluidodinâmicos com o leito de inertes e com o leito acrescido de polpa de manga natural. Estes resultados parecem contraditórios com os apresentados na Figura 4.23, invalidando a primeira justificativa apresentada no que se refere às interferências individuais de apenas duas composições, açúcar e pectina.

Uma outra consideração importante se relaciona com grau de saturação das polpas no leito. O grau de saturação é representado pela razão entre o volume de pasta existente no interior do leito e o volume de poros do leito de partículas, (SPITZNER NETO e FREIRE (2000)). Diversos trabalhos encontrados na literatura, SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993), CUNHA (1999), e SPITZNER NETO e FREIRE (2000), entre outros, mostram que esta variável é de fundamental importância para a estabilidade do leito de jorro empregado na secagem de pastas e suspensões e exerce grande influência nos parâmetros fluidodinâmicos. SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) trabalharam com alimentação em batelada de glicerina líquida que, por apresentar baixa pressão de vapor, simula de forma aproximada o comportamento da secagem de um leito com alimentação contínua de pasta. CUNHA (1999) trabalhou com alimentação contínua de pasta de ovo de galinha homogeneizado e suspensões de goma xantana. SPITZNER NETO (2000) estudou a influência do grau de saturação da pasta de ovo e de glicerina no leito, sobre os parâmetros fluidodinâmicos (ΔP_{jes} e Q_{jm}).

Nos ensaios com as polpas modificadas, a relação entre o volume de polpa alimentada e o volume de poros do leito de partículas foi praticamente a mesma para todos os ensaios (0,044), entretanto, em função da composição mantida em cada ensaio, o grau de saturação das polpas no leito no decorrer da secagem poderia não ser o mesmo. Os

resultados obtidos em relação às curvas de secagem mostram, todavia, que a evaporação da água independe da composição e se verifica de forma quase instantânea.

Dada a complexidade dos resultados obtidos com respeito à vazão de jorro mínimo, para se aprofundar esta discussão deve-se levar em consideração a estabilidade do leito. A análise dos efeitos provocados pela presença da polpa, que segundo SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) e SPITZNER NETO (1997), se relacionam com o aumento das forças de adesão entre as partículas recobertas pelo filme e com o aumento das forças viscosas que prejudicam a circulação das partículas, depende dos dados de viscosidade e tensão superficial. Estes dados são de fundamental importância para estimativa das forças viscosas e de adesão, respectivamente.

Considerando, entretanto, as elevadas taxas de evaporação e os resultados obtidos a partir das curvas de secagem das polpas modificadas, conclui-se que aos dois minutos do início do processo o filme aderido já se encontrava praticamente seco. Estes resultados são compatíveis com os obtidos por SPITZNER NETO e FREIRE (2000), na secagem do ovo, apesar dos autores terem trabalhado com alimentação contínua de pasta. Os trabalhos recentes relativos às mudanças fluidodinâmicas que ocorrem no leito de jorro com a presença da pasta referem-se ao grau de saturação e a estabilidade de leitos de partículas recobertas por filmes líquidos, SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993), PASSOS e MUJUMDAR (2000), entre outros. Os modelos e equações propostas nestes trabalhos, para estimativa das forças de coesão, correlacionadas com o grau de saturação e com as variáveis fluidodinâmicas do leito nas condições de jorro mínimo não são, portanto, adequados para simular o comportamento do leito com as polpas modificadas.

Com relação à influência das propriedades físicas sobre as variáveis fluidodinâmicas, conforme citado anteriormente, as curvas características foram obtidas com o leito praticamente seco, enquanto os dados de densidade, viscosidade e tensão superficial apresentados na Tabela 4.4 referem-se às polpas com teor de umidade original. As modificações nas propriedades das polpa, em virtude da evaporação da água e do aquecimento do material, inviabiliza, portanto, um estudo mais aprofundado sobre a influência destas propriedades no comportamento fluidodinâmico do leito.

Embora não tenha sido possível medir o grau de saturação das pastas no leito, quando foram obtidas as curvas características, os dados de queda de pressão relativos aos

10 minutos iniciais da secagem, ilustrados nas Figuras 4.8, mostram que a queda de pressão, após sofrer uma brusca diminuição no instante em que a polpa era alimentada, passava a aumentar com o prosseguimento da secagem.

A Figura 4.24 ilustra os dados de queda de pressão referentes ao primeiro minuto da secagem e nas condições de jorro mínimo, para todos os ensaios com as polpas modificadas, com polpa de manga natural e com a água. Os dados também encontram-se parametrizados em relação à queda de pressão no leito de partículas inertes, nas condições mantidas antes de se efetuar a alimentação da polpa e nas condições de jorro mínimo, respectivamente. O efeito das polpas sobre a queda de pressão, no início da secagem, é o mesmo para todos os ensaios, ou seja, em relação ao leito de inertes, o ΔP diminui em presença das polpas modificadas.

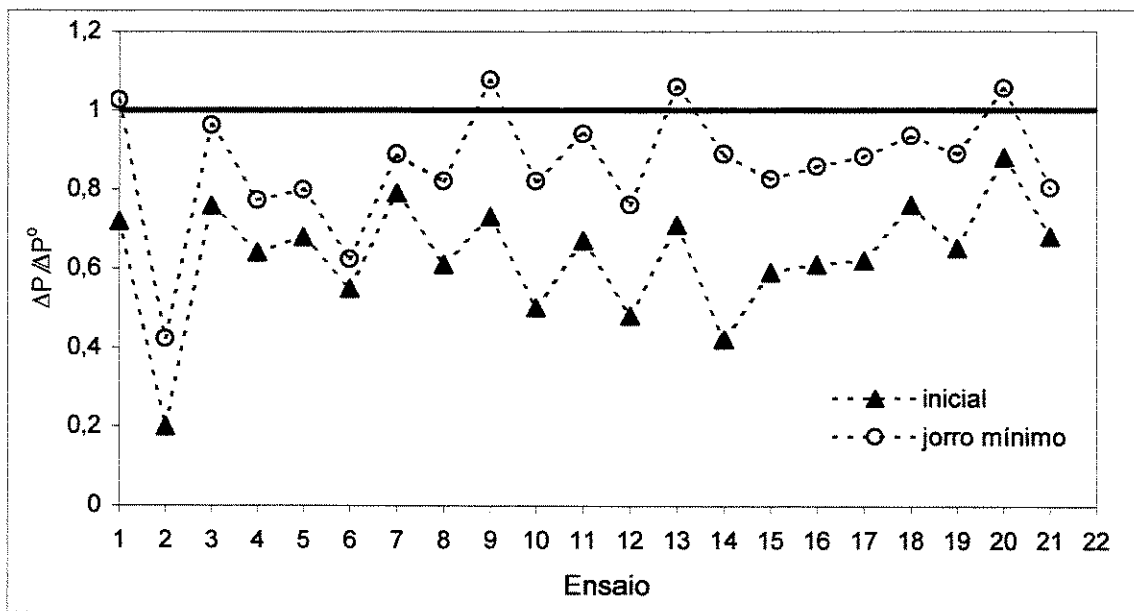


Figura 4.24 - Queda de Pressão no leito durante a secagem, para $t=1\text{min}$ e nas condições de jorro mínimo. Ensaios com as polpas modificadas (1 a 19), com a água (20) e com a polpa de manga (21)

Observa-se nesta figura que, embora a queda de pressão no jorro mínimo tenha sido medida nas condições citadas anteriormente, com o leito praticamente seco, em relação aos ensaios, o comportamento observado no leito úmido se repete. Menores e maiores

quedas de pressão no leito úmido se reproduzem em menores e maiores quedas de pressão de jorro estável.

Este gráfico também mostra que, a partir do ensaio 9 até o ensaio 19, as diferenças entre as quedas de pressão são mais acentuadas, o que se deve à mudanças mais intensas nas propriedades físicas, devido à maiores interações químicas entre os constituintes das mesmas, decorrentes tanto do aquecimento como da evaporação da água. De acordo com a discussão apresentada sobre os efeitos da composição nas propriedades físicas, o amido é muito sensível ao aquecimento, sendo solubilizado em água e apresentando a capacidade de gelatinizar à temperaturas relativamente baixas, segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), entre outros. Conforme mostra a Tabela 4.10, todas as polpas processadas nestes ensaios foram formuladas com a concentração de amido fixada no nível máximo (9 a 16) e no ponto central (17,18 e 19). Verifica-se assim que, em relação ao amido, a influência sobre ΔP acentua-se no leito seco e mais aquecido. Na Figura 4.24 também pode ser observado o importante efeito da presença da água sobre a queda de pressão no leito.

Apesar do comportamento observado com o amido, o gráfico ilustrado na Figura 4.24 respalda as considerações feitas na apresentação e discussão das curvas características do leito quando se considerou que, mesmo em diferentes condições de umidade, os efeitos das demais composições sobre a fluidodinâmica do leito seriam mantidos.

4.4.4 – Grau de Saturação e Estabilidade do Leito

Devido às importantes modificações observadas no leito no início do processo, desenvolveu-se uma metodologia de cálculo para estimar de forma aproximada, o grau de saturação de algumas polpas modificadas, no primeiro minuto da secagem. Esta metodologia está sujeita à aplicação de uma série de hipóteses, descritas a seguir:

1- no primeiro minuto da secagem, todo o material sólido se encontrava retido no leito, visto que não foi detectado arraste de pó em qualquer um dos ensaios, neste intervalo de tempo;

2- a massa de polpa úmida retida no leito corresponde à diferença entre a massa de polpa alimentada e quantidade de água evaporada no primeiro minuto, calculada a partir da taxa de evaporação;

3- em virtude do elevado grau de mistura do leito de jorro, logo no primeiro minuto da secagem, todas as partículas se encontravam uniformemente recobertas com o filme, cuja umidade era uniforme em todo o leito;

4- os efeitos do aquecimento sobre as propriedades físicas da polpa, principalmente no que se refere à densidade, foram negligenciados. Desconsiderou-se a evaporação de qualquer componente volátil presente nas polpas modificadas;

Com base nestas suposições, a umidade do filme foi calculada pela Equação 4.1, obtida a partir dos balanços globais e de sólidos no leito:

$$U_{filme} = 100 - \left(\frac{M_{polpa}(100 - U_{polpa})}{(M_{polpa} - M_{ev})} \right) \quad (4.1)$$

O grau de saturação foi então determinado pela Equação 4.2:

$$\phi = \frac{V_{polpa}}{V_{poros}} = \frac{(1 - \varepsilon)\rho_p(M_{polpa} - M_{ev})100}{\rho_{polpa}M_{leito}\varepsilon} \quad (4.2)$$

Neste cálculo, a densidade da película foi considerada como sendo igual a densidade da polpa modificada e a porosidade, a do leito em repouso (0,29). Suposições similares foram feitas por SPITZNER NETO e FREIRE (2000 e 2001), na determinação do grau de saturação da pasta de ovo no leito.

Os resultados referentes às umidades dos filmes (parametrizadas em relação às umidades das polpas) e aos graus de saturação dos filmes no leito (parametrizados em relação aos graus de saturação inicial da polpas no leito (ϕ_0)) para $t=1$ min, são apresentadas na Figura 4.25, conjuntamente com os dados simultâneos das quedas de pressão, parametrizadas em relação às medidas efetuadas no leito de partículas inertes antes de se efetuar a alimentação das polpas.

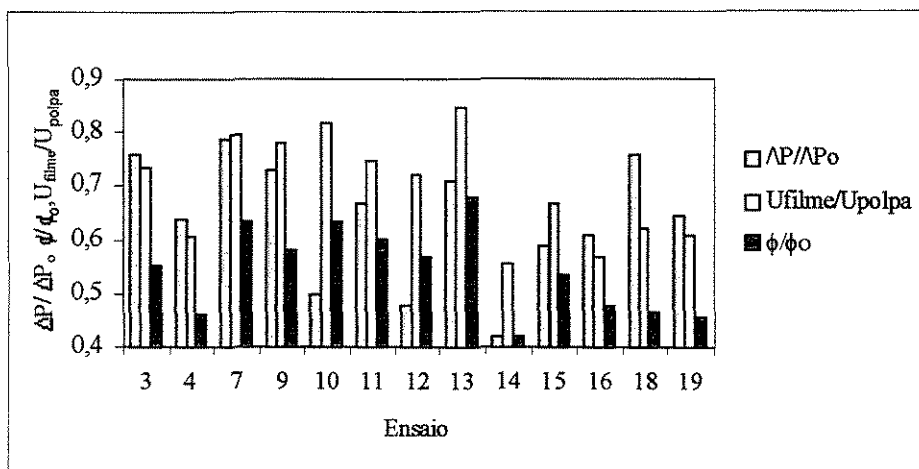


Figura 4.25 - Dados relativos a ϕ/ϕ_0 , U_{filme}/U_{polpa} e $\Delta P/\Delta P_0$ para $t=1$ min

O grau de saturação das polpas no leito após 1 minuto de secagem ficou compreendido numa faixa entre 0,017 e 0,029, enquanto a umidade do filme variou entre 41% e 63%, em base úmida. Entretanto, de acordo com as curvas de secagem apresentadas e discutidas no item 4.3, as taxas de evaporação, para a faixa de concentração e composições analisadas no presente trabalho, não dependem da composição, mas das condições psicrométricas do ar de secagem. Desta forma, avalia-se que as variações no grau de saturação das polpas também independem da composição.

Não se observa na Figura 4.25 qualquer tendência de comportamento da queda de pressão frente ao grau de saturação do filme parametrizado em relação ao grau de saturação inicial para as diferentes polpas diferentes polpas. Significativas diminuições na queda de pressão foram observadas em leitos com elevados e baixos ϕ/ϕ_0 (ensaios 10, 12 e 14, respectivamente). Da mesma forma, leitos com elevados valores de ϕ/ϕ_0 apresentaram pequenas diminuições no valor da queda de pressão (ensaios 7 e 13).

Embora a determinação do grau de saturação das polpas no leito para o período inicial da secagem tenha partido de hipóteses aproximadas, principalmente no que se refere à densidade do filme e à condição de todas as partículas se encontrarem uniformemente recobertas, os resultados indicam que o efeito da composição sobre a estabilidade do leito se sobrepõe à influência do grau de saturação de cada polpa.

No entanto, quando se analisa individualmente, o comportamento apresentado nos ensaios com as polpas modificadas, com a polpa de manga natural e com água, o comportamento da queda de pressão, frente a quantidade de material presente no leito, é compatível com o comportamento descrito por SPITZNER NETO e FREIRE (2001), cuja queda de pressão em jorro estável diminuía à medida que era aumentado o grau de saturação da pasta de ovo no leito de partículas inertes de vidro.

Por outro lado, avalia-se que nos ensaios onde foram registrados problemas de instabilidade, cuja discussão encontra-se contemplada na apresentação dos resultados referentes às curvas características do leito, o grau de saturação máximo das polpas 2, 6, 10, 12 e 14 no leito tenham sido atingidos ou ultrapassados. Todavia, na maioria dos ensaios, a alimentação em batelada de 50g de polpa que fornece uma saturação inicial (V_{polpa}/V_{poros}) de 0,044, não chegou a provocar problemas de instabilidade. Estes resultados confirmam o importante efeito da composição das polpas no grau de saturação máximo do leito. Avalia-se ainda que, embora os problemas de instabilidade sejam atenuados à medida que a secagem prossegue, a interferência da composição se mantém. Para a relação V_{polpa}/V_{poros} mantida nos ensaios, verificou-se que o efeito da composição sobre a estabilidade do leito, quer seja no sentido de somar ou de se contrapor ao efeito da diminuição do grau de saturação, se sobrepõe ao mesmo.

Diante das observações relacionadas com a estabilidade do leito, os resultados da vazão de jorro mínimo encontrados no presente trabalho, embora não apresentem uma tendência definida, são coerentes com os apresentados na literatura. Segundo SPITZNER NETO e FREIRE (1997 e 2001), tanto na secagem de sangue, como de pasta de ovo, o comportamento da vazão de jorro mínimo, frente ao grau de saturação destes materiais no leito, apresentaram significativas diferenças em relação ao apresentado em ensaios fluidodinâmicos com alimentação contínua de água e de glicerina (alimentada em batelada).

Nos ensaios com adição tanto de sangue bovino, como de pasta de ovo, os autores observaram que a vazão de jorro mínimo aumentava com o grau de saturação destas pastas no leito. Para leitos em presença da glicerina, estes autores relatam comportamento inverso, ou seja, Q_{jm} diminui com o grau de saturação de glicerina no leito, enquanto SCHNEIDER e BRIDGWATER (1993) relatam que à medida que ϕ aumenta, Q_{jm} aumenta atingindo um valor máximo, quando então passa a diminuir.

SPITZNER NETO e FREIRE (2001) discutem que as diferenças de comportamento observadas em relação à vazão de jorro mínimo para filmes líquidos e sólidos podem ser assim explicadas: “provavelmente, em filmes líquidos, o efeito provocado pela diminuição de partículas inertes e aumento da porção de ar que atravessa a região do jorro seja suficiente para compensar o provocado pela instabilidade do leito, e a velocidade de jorro mínimo passa a diminuir com o aumento do grau de saturação”.

Nos ensaios com adição das polpas modificadas já se discutiu que o efeito da composição se mostrou mais importante do que o do grau de saturação. Devido às diferentes propriedades e às possíveis interações químicas existentes entre os constituintes, cujos efeitos no comportamento fluidodinâmico do leito estão sendo estudados, as películas sólidas poderiam romper com mais facilidade, evitando a aglomeração das partículas, tornando o leito mais estável, e diminuindo a vazão de ar necessária para manter o jorro em condições estáveis (Q_{jm}). Por outro lado, dependendo do nível de resistência das películas formadas, pode ocorrer fenômeno semelhante ao relatado por SPITZNER e FREIRE (2001) para filmes líquidos, o efeito da maior porção de ar e da pequena concentração de partículas no jorro se sobrepõe ao da instabilidade e o jorro se mantém em menores níveis de vazão do ar. Com a formação de películas de alta resistência, o leito atinge condições de instabilidade cujos efeitos não são mais compensados pelo desvio do ar para o jorro, e este só se mantém em níveis de vazão do ar muito elevados, tal como foi observado nos ensaios 2 e 14. Portanto, os efeitos contrários promovidos pela instabilidade do leito, associados à importante influência da composição, explicam a complexidade dos resultados obtidos neste trabalho, em relação à vazão de jorro mínimo.

As medidas do ângulo de repouso variaram entre um mínimo de 24° para o leito acrescido da polpa 16 e um máximo de $39,5^\circ$ observado tanto pela adição da polpa 1 como da polpa 6. A análise dos resultados inicialmente se restringe, nesta etapa do trabalho, aos efeitos individuais das composições. Os efeitos são avaliados mediante comparação dos ângulos de repouso do material inerte sem adição de polpa, com adição de polpa de manga, com adição de água e com adição das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9, seguindo o mesmo procedimento empregado na análise das curvas características.

Tabela 4.11 - Comparação entre os ângulos de repouso do leito de inertes e do leito acrescido de diferentes materiais (água, polpa de manga e polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9)

	θ_m	θ_m/θ_o	θ_m^*
Sem Polpa	19,5	1,0	0,62
Água	26,5	1,36	0,85
Polpa de Manga	31,3	1,61	1,00
Polpa 1 (pectina)	39,5	2,02	1,26
Polpa 2 (açúcar)	36,5	1,87	1,16
Polpa 3 (gordura)	30	1,54	0,96
Polpa 5 (fibras)	36	1,84	1,15
Polpa 9 (amido)	29,5	1,51	0,94

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.11, a presença tanto de água como de todas as demais polpas, natural ou modificadas, provocam um aumento no ângulo de repouso, ou seja, diminuem a escoabilidade do leito. Os efeitos provocados pelas polpas 1, 2 e 5 são mais acentuados e os ângulos de repouso em relação aos valores obtidos com o leito formado apenas pelas partículas chegam a ser 100% superiores. Com a adição da polpa de manga e das polpas 3 e 9, o aumento no ângulo de repouso é praticamente o mesmo, em torno de 55%, enquanto a água promove um acréscimo da ordem de 36%. As medidas efetuadas com adição das polpas modificadas comparadas às obtidas com polpa de manga indicam, conforme mostra a Tabela 4.11, que os efeitos individuais das composições de pectina, açúcares e fibras, sobre a escoabilidade do leito, são os mais importantes. A interferência das polpas 3 e 9 é praticamente a mesma da polpa de manga, ângulos de repouso praticamente iguais. Em relação à polpa de manga natural, o aumento nas concentrações de gordura e amido não provocou mudanças no ângulo de repouso, o que preliminarmente sugere que elevadas concentrações de amido e gordura não interferem na escoabilidade. Este resultado é contraditório, tanto no que se refere às propriedades lubrificantes da gordura, como às características do amido, no que diz respeito à escoabilidade, segundo LIMA.(2001).

A Figura 4.26 ilustra os resultados referentes ao ângulo de repouso de todos os ensaios, comparando-os com a média dos valores obtidos. Contrariamente ao comportamento observado com as vazões de jorro mínimo, a dispersão dos valores em torno da média apresenta uma tendência nítida de comportamento. A partir do ensaio 9, excetuando-se o ensaio 12, os desvios em relação à média são negativos ou nulos. Nos ensaios de 1 a 8 ocorre alternância dos desvios a cada dois ensaios.

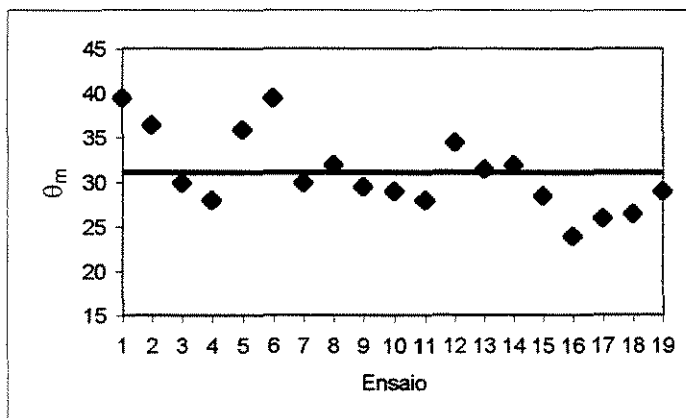


Figura 4.26 - Ângulos de repouso do leitos com adição de polpas

Comparando-se os dados ilustrados nesta figura com os níveis de concentração de amido e gordura, ajustados de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tabela 4.10, constata-se a interferência de elevadas concentrações de amido, visto que a concentração deste constituinte nas polpas modificadas foi mantida no nível máximo a partir do ensaio 9 e até o ensaio 16. Portanto, a elevada concentração de amido favoreceu a escoabilidade do leito. Com respeito à interferência da gordura, de acordo com o planejamento fatorial, nos ensaios onde a concentração de amido foi mínima (1 a 8), os desvios são positivos e negativos, quando os teores de gordura são mínimo e máximo, respectivamente. Ou seja, houve uma evidente interferência da gordura nestes ensaios, no sentido de aumentar a escoabilidade do leito, conforme era esperado e de acordo com as características lubrificantes do material.

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 4.11, quando se analisou os efeitos individuais a partir da comparação dos ângulos de repouso do leito com adição de manga, os resultados ilustrados na Figura 4.26 apontam para uma discussão mais

aprofundada sobre a importância dos efeitos das interações combinadas sobre os efeitos individuais de cada composição. Registra-se, ainda, a interferência da água na escoabilidade do leito. Visto que, de forma isolada esta já dificulta a escoabilidade, provocando um aumento no ângulo de repouso da ordem de 36%, associada aos demais constituintes, dependendo da intensidade das interações, os efeitos serão mais ou menos acentuados.

Conforme mostra a Tabela 4.10 e a Figura 4.26, os ensaios correspondentes às concentrações no ponto central apresentaram reprodutibilidade nas determinações do ângulo de repouso com adição das polpas 17 e 18. Com a adição da polpa 19, a reprodutibilidade é satisfatória, apresentando um desvio em relação ao valor obtido nos ensaios 17 e 18, da ordem de 9%.

É relevante se registrar a importância dos dados do ângulo de repouso com adição de polpas ou água, no que diz respeito à instabilidade do leito molhado, ou seja, a partir do momento em que se promovia a alimentação. Entretanto, as medidas do ângulo de repouso ao longo da secagem foram acompanhadas apenas em um ensaio, cujos resultados serão apresentados e discutidos no item referente à cinética de secagem e retenção de sólidos.

4.5 - Ensaio de Secagem

4.5.1 - Resultados dos Ensaio de Secagem

Os ensaios de secagem foram conduzidos de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Obteve-se uma grande quantidade de informações nesses experimentos, cuja ênfase principal será dada aos resultados referentes à produção e retenção de sólidos, à quantidade de material disperso no equipamento e ao ângulo de repouso do leito após a secagem.

Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios de secagem de acordo com o planejamento experimental

Ensaio	X _{açú}	X _{gor}	X _{fib}	X _{ami}	X _{pec}	Efic	Rets	Perdas	θ_s
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	7,67	0,77	0,50	0,52	1,82	14,06	68,95	16,99	24,5
2	19,95	0,77	0,50	0,52	0,67	0,00	97,07	2,93	31,0
3	7,67	6,84	0,50	0,52	0,67	22,10	22,64	55,26	23,0
4	19,95	16,84	0,50	0,52	1,82	0,00	23,05	76,95	20,5
5	7,67	0,77	2,01	0,52	0,67	12,19	75,02	12,79	31,5
6	19,95	0,77	2,01	0,52	1,82	0,00	94,89	5,11	26,5
7	7,67	6,84	2,01	0,52	1,82	27,77	9,09	63,14	21,0
8	19,95	6,84	2,01	0,52	0,67	0,00	58,37	41,63	20,0
9	7,67	0,77	0,50	4,66	0,67	20,83	49,08	30,09	21,0
10	19,95	0,77	0,50	4,66	1,82	9,11	58,14	32,75	26,0
11	7,67	6,84	0,50	4,66	1,82	49,65	19,87	30,48	25,0
12	19,95	6,84	0,50	4,66	0,67	6,69	33,07	60,23	23,0
13	7,67	0,77	2,01	4,66	1,82	26,70	37,29	36,01	27,5
14	19,95	0,77	2,01	4,66	0,67	5,89	66,12	27,99	27,5
15	7,67	6,84	2,01	4,66	0,67	27,57	12,56	59,87	22,0
16	19,95	6,84	2,01	4,66	1,82	23,88	6,72	69,40	19,5
17	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	16,09	16,69	67,22	23,0
18	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	15,86	18,58	55,56	22,0
19	13,81	3,81	1,26	2,59	1,24	19,49	11,05	69,46	20,0

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados para cada ensaio de secagem do planejamento experimental

A eficiência de produção foi calculada pela equação 4.6:

$$Efic = \frac{M_{pó}(1 - U_{pó})100}{M_{polpa}(1 - U_{polpa})} \quad (4.6)$$

onde,

Efic = eficiência de produção de pó (base seca) (%)

$M_{pó}$ = massa de pó recolhido no ciclone (g)

M_{polpa} = massa de polpa alimentada (g)

$U_{pó}$ = umidade do pó (base úmida) (%)

U_{polpa} = umidade da polpa (base úmida) (%)

A partir de análises gravimétricas das amostras retiradas do leito após a secagem, e de acordo com a metodologia experimental descrita no Capítulo 3, foram determinadas as quantidades de água e de sólidos retidos nas amostras analisadas. Considerando-se que as amostras eram representativas, as quantidades de água e de sólidos no leito foram determinadas por extrapolação, a partir da relações entre as quantidades retidas de água e sólidos nas amostras analisadas e a massa de partículas inertes de cada amostra. A equação 4.7 foi empregada para o cálculo da retenção de sólidos:

$$Rets = \frac{Msr.100}{M_{polpa}(1 - U_{polpa})} \quad (4.7)$$

onde,

Rets = retenção de sólidos no leito (base seca) (%)

Msr = massa de sólidos retida no leito (g)

As perdas referem-se à quantidade de sólidos que fica no equipamento, seja aderido ou disperso sobre as paredes da coluna e na saída do leito, ou eventualmente perdida no ciclone. As perdas são calculadas pela diferença entre a quantidade de sólidos

alimentados, e a soma das quantidades retida no leito e recolhida no ciclone. Assim, expressas na forma de porcentagem, as perdas foram calculadas pela equação 4.8 :

$$Perdas = 100 - Efic - Ret \quad (4.8)$$

com

Perdas = fração de sólidos perdidos no equipamento (%)

Os resultados apresentados na Tabela 4.12 mostram que a eficiência de produção de pó foi muito baixa em quase todos os ensaios. Nos ensaios 2, 4, 6 e 8 não foi recolhida qualquer quantidade de pó no ciclone ou seja, eficiência nula. Apenas no ensaio 11, a eficiência foi mais elevada, chegando muito próxima de 50%, valor considerado alto, quando comparado a eficiência de produção de pó, na secagem de polpas de frutas naturais.

Na maioria dos ensaios, conforme mostra a Tabela 4.12, a fração de sólidos alimentados que fica retida no leito, definida neste trabalho como retenção de sólidos, foi elevada, variando entre um mínimo de 6,72% no ensaio 16 a um máximo de 97,07% no ensaio 2. Em relação as perdas, estas foram mínimas no ensaio 2, visto que praticamente todos os sólidos ficaram retidos no leito. Todavia, as perdas máximas, de 76,95%, foram observadas no ensaio 4, quando nenhum pó foi coletado na saída do ciclone e cuja retenção de sólidos no leito foi de 23,05%.

O ângulo de repouso do leito após a secagem variou de um mínimo de 19,5 (ensaio 16) a um máximo de 31,5 (ensaio 5).

De acordo com as observações experimentais destes ensaios, e de ensaios preliminares de secagem efetuados com as polpas 1, 2, 5, 6 e 8, pode-se registrar alguns comportamentos típicos observados:

- 1) o leito operava em condições de estabilidade, com pouco ou nenhum pó recolhido no ciclone, aderido ou disperso nas paredes do equipamento;
- 2) o leito operava em condições de estabilidade, com pouco pó recolhido no ciclone e muito pó disperso nas paredes do equipamento;
- 3) o leito operava em condições de estabilidade, com razoável quantidade de pó recolhido no ciclone e disperso ou aderido às paredes do equipamento;

4) o leito operava com problemas de estabilidade, nenhum ou pouco pó recolhido no ciclone, nenhum material disperso e camada de partículas coladas às paredes do equipamento, principalmente na região cônica.

O registro das observações experimentais se torna necessário para uma melhor compreensão e discussão dos resultados obtidos, no que se refere a influência das variáveis de composição no desempenho do leito de jorro em relação à produção de pó. Deve-se ainda registrar que a referência ao material disperso nas paredes da coluna significa dizer que ao término do ensaio, ao se desmontar o equipamento, observava-se finas camadas de pó distribuído nas paredes da coluna, e no tubo curvo que conecta o leito ao ciclone. Essas camadas eram facilmente removidas à um simples deslizar de mão. Assemelhavam-se à camadas de farinha de trigo polvilhadas sobre superfícies untadas com manteiga. Esta técnica é comumente empregada na culinária universal, na confecção de bolos, tortas etc., para evitar que o produto ao sair do forno fique aderido ao recipiente em que foi processado. O material aderido refere-se ao pó e às camadas de partículas coladas nas paredes da coluna. Foi desconsiderado no cálculo das perdas o material aderido às partículas que ficavam coladas às paredes do equipamento.

4.5.2 - Resultados dos Ensaios de Secagem com Polpas de Frutas

Os dados apresentados na Tabela 4.13 referem-se aos resultados dos ensaios preliminares de secagem com polpas de frutas e aos obtidos por RAMOS (1997), que utilizou partículas de poliestireno de baixa densidade como material inerte. As condições operacionais, no que diz respeito a alimentação de polpa (50g), carga de inerte (2,5 kg) e temperatura do ar de secagem (70° C), foram as mesmas, excetuando-se o ensaio com a polpa de acerola cuja temperatura foi mantida em 60°C. Com respeito à vazão do ar, RAMOS (1997) conduziu todos os seus ensaios numa vazão fixa de $24,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto nos ensaios preliminares com o polietileno de alta densidade, foi mantida uma vazão de $22,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, em média.

Embora a influência da relação Q/Q_{jm} , não tenha sido considerada nos ensaios de RAMOS (1997), cálculos efetuados a partir dos dados de vazões de jorro mínimo, determinados na fase preliminar do presente trabalho para leitos de poliestireno de baixa

densidade (mesma carga), acrescidos destas polpas nas mesmas proporções, permitiu estimar as relações Q/Q_{jm} mantidas nos ensaios de RAMOS (1997).

Os ensaios de RAMOS (1997) e os ensaios preliminares com o polietileno de alta densidade foram realizados com diversas alimentações de polpa, entretanto os dados apresentados na Tabela 4.13 correspondem à eficiência de produção e umidade do pó obtido na primeira alimentação.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.13, os ensaios de secagem com as polpas de frutas utilizando-se o polietileno de alta densidade como material inerte, apresentaram eficiências compatíveis com os resultados obtidos na secagem das polpas modificadas, Tabela 4.12.

Tabela 4.13 – Secagem de polpas de frutas - eficiência de produção e umidade do pó

Material Inerte	Poliestireno de Baixa Densidade			Polietileno de Alta Densidade		
Polpa	Q/Q _{jm}	Efic(%)	U _{pó} (%)	Q/Q _{jm}	U _{pó} (%)	Efic(%)
Umbu	1,52	63,50	4,5	1,42	5,8 e 12,1	15,0 e 12,4
Seriguela	1,21	17,50 e 26,51	5,9 e 4,8	1,23	7,5	41,0
Acerola	1,12	24,44	8,3	1,05	-	5,8
Manga	1,67	37,50 e 25,0	4,8 e 6,7	1,23	7,9 e 7,2	15,8 e 14,4
Cajá	1,47	71,95	5,4	1,34	7,5	13,34
Pinha	1,37	8,11	5,6	-	-	-
Cajá Manga	1,41	19,75	5,7	-	-	-

Com relação à influência do material inerte, verifica-se que os resultados de RAMOS (1997), para a maioria das frutas processadas são praticamente opostos aos

obtidos nos ensaios preliminares. Elevadas eficiências, verificadas quando foi empregado o poliestireno de baixa densidade (secagem de polpas de cajá, umbu e manga) correspondem às baixas eficiências quando as mesmas polpas foram processadas com o polietileno de alta densidade.

Na secagem de polpas de manga, cajá e umbu, RAMOS (1997), a relação $Q/Q_{jm} > 1,5$, pode ter favorecido a maior produção de pó, comparativamente a eficiência obtida nos ensaios com o polietileno, visto que nestes $Q/Q_{jm} < 1,4$. Todavia, nos ensaios com a polpa de acerola, apesar das relações Q/Q_{jm} serem muito próximas, a produção de pó no ensaio com o poliestireno foi sensivelmente mais elevada. Analisando-se os dados da secagem de polpa de seriguela, observa-se que a eficiência atingida no ensaio com o polietileno é significativamente mais alta do que a obtida nos ensaios com o poliestireno, embora os ensaios tenham sido conduzidos em condições de Q/Q_{jm} praticamente iguais. Estes resultados indicam que além do efeito da relação Q/Q_{jm} que pode ter favorecido a maior eficiência observada nos ensaios de secagem de polpas de manga, umbu e cajá com o poliestireno, os efeitos das interações entre as polpas processadas e o material inerte, bem como as diferentes características, no que se refere à densidade do sólido, área superficial, esfericidade e diâmetro das partículas, também são relevantes e devem ser levadas em consideração.

Na seleção prévia do inerte a ser utilizado na secagem das polpas modificadas foram realizados ensaios de secagem de polpa de manga com diferentes polímeros cujos resultados são apresentados na Tabela 4.14. Nestes ensaios foram mantidas as mesmas condições operacionais citadas anteriormente, porém em relação à vazão do ar, a relação Q/Q_{jm} não foi a mesma. Procurou-se trabalhar com vazões de ar que fornecessem para os diferentes leitos condições fluidodinâmicas semelhantes em relação à altura da fonte e a circulação de partículas. As relações Q/Q_{jm} mantidas nestes ensaios também são mostradas na Tabela 4.14. Não foram obtidos dados sobre as curvas hidrodinâmicas do leito de partículas de polipropileno.

Tabela 4.14 – Influência do material inerte na secagem de polpa de manga

Material Inerte	$Q(m^3/s) \times 10^3$	Q/Q_{jm}	Efic (%)	Upó (%)
Polietileno de alta densidade	22,7	1,23	15,8 e 14,4	7,8 e 7,2
Poliestireno de baixa densidade	24,5	1,67	37,5 e 25,0	4,8 e 6,7
Polipropileno	32,4	-	6,5	9,4
SANGEL®	20,4	1,36	18	8,1

Algumas observações importantes com respeito aos ensaios com os diferentes inertes são citadas a seguir:

- No ensaio realizado com o SANGEL® o pó obtido apresentou consistência pegajosa com formação de aglomerados embora tenham sido observadas boas condições fluidodinâmicas do leito, com elevada concentração de partículas na fonte e intensa velocidade de deslizamento das partículas sobre as paredes dos visores de acrílico, na região anular do leito;

- Foi realizado um teste com o SANGEL®, adicionando-se margarina à polpa de manga, com o objetivo de se avaliar o desgaste do material frente a elevadas concentrações de gordura. Tal como observado com o poliestireno de baixa densidade, a gordura provocou a quebra das partículas de SANGEL®, com contaminação do pó produzido.

- Uma elevada vazão de ar foi necessária para manter o leito de polipropileno em condições fluidodinâmicas semelhantes às mantidas nos demais leitos. Na condição de vazão do ar em que o ensaio foi realizado, Tabela 4.14, o leito acrescido da polpa de manga, não apresentou problemas de instabilidade e a secagem transcorreu de forma estável sem ameaça de colapso do jorro. Entretanto, a eficiência de produção é baixa e o pó obtido apresentou elevado teor de umidade;

- SANTOS et al. (1998) estudaram a influência das variáveis operacionais na secagem de polpa de manga utilizando o polipropileno. De acordo com os resultados

apresentados pelo autor, o polipropileno absorveu parte da polpa a ser desidratada. Os resultados do ensaio preliminar com este inerte coincidem com os de SANTOS et al. (1998). Na secagem da polpa de manga, as partículas de polipropileno absorveram a coloração da manga. Mesmo após sucessivas lavagens, a coloração permaneceu, indicando que o inerte absorveu parte do material processado;

- Nos ensaios de secagem com o poliestireno de baixa densidade, diferentes condições psicrométricas do ar de secagem interferiram tanto na eficiência de produção como na umidade do pó obtido. O ensaio de secagem com eficiência de produção da ordem de 25%, segundo RAMOS (1997), foi realizado em um dia chuvoso, cuja umidade relativa ambiente encontrava-se numa faixa superior à 90%;

- Constituído de partículas inertes de polietileno de alta densidade, o leito de jorro em presença da polpa de manga apresentou boa performance fluidodinâmica. O pó obtido não apresentou problemas de aglomeração, embora o teor de umidade tenha se apresentado relativamente alto. A baixa eficiência de produção pode ser melhorada, mediante otimização das condições operacionais;

- Apesar do leito de jorro constituído de partículas inertes de poliestireno ter apresentado os melhores resultados, a utilização do mesmo como material inerte se restringe à secagem de produtos com baixa concentração de gordura, o que inviabilizou a escolha deste polímero para o estudo sobre a influência da composição das polpas sobre o desempenho do processo, objetivo principal do presente trabalho.

4.5.3 – Influência da Composição das Polpas Modificadas na Eficiência de Produção de Pó, na Retenção de Sólidos, nas Perdas e no Ângulo de Repouso do Leito após a Secagem

Da mesma forma como foram conduzidas as discussões dos resultados fluidodinâmicos, uma análise preliminar da interferências das composições é feita, mediante comparação dos resultados da secagem de polpa de manga com os obtidos nos ensaios com as polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9. Estes dados são apresentados na Tabela 4.15 e se referem à eficiência de produção de pó, à retenção de sólidos no leito, às perdas de material disperso ou aderido às paredes do equipamento e ao ângulo de repouso do leito

após a secagem. Nesta tabela também são mostradas as mesmas variáveis, parametrizadas (*) em relação às obtidas nos ensaios com a polpa de manga,

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de secagem de polpa de manga e das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9

Polpa	Efic (%)	Efic *	Rets (%)	Rets *	Perdas (%)	Perdas *	θ_s	θ_s^*
Manga	14,42	1,00	66,49	1,00	19,09	1,00	26,6	1,00
Polpa 1 (pectina)	14,06	0,98	68,95	1,04	16,99	0,89	24,5	0,92
Polpa 2 (açúcar)	0,00	-	97,03	1,46	2,93	0,16	31,0	1,17
Polpa 3 (gordura)	22,1	1,53	22,64	0,34	55,26	2,90	23,0	0,87
Polpa 5 (fibras)	12,19	0,85	75,02	1,13	12,79	0,67	31,5	1,18
Polpa 9 (amido)	20,83	1,45	49,08	0,74	32,75	1,72	21,0	0,79

Conforme mostra a Tabela 4.15, as eficiências dos ensaios 1 e 5 apresentam resultados muito próximos ao do ensaio com a polpa de manga. No ensaio 2 não houve produção de pó, eficiência nula. Nos ensaios 3 e 9 os valores das eficiências são praticamente os mesmos, e cerca de 50% mais elevados do que o obtido na secagem da polpa de manga. Estes resultados indicam preliminarmente que o aumento da concentração de fibras e pectina não interferiu na eficiência. Enquanto o alto teor de açúcares redutores presente na polpa 2 inviabilizou o processo, no que concerne à produção de pó e as elevadas concentrações de gordura e amido das polpas 3 e 9 a favoreceu.

Com relação à retenção de sólidos, os ensaios 1 e 5 também apresentaram resultados similares aos encontrados na secagem da polpa e manga, o que indica que o aumento na concentração de pectina e fibras aparentemente não interferiu na quantidade de sólidos retida no leito. A retenção no leito de praticamente 100% dos sólidos alimentados no ensaio 2, constata a importante e negativa interferência dos açúcares redutores no desempenho do processo. Em relação à secagem de polpa de polpa de manga, o aumento na retenção de sólidos é da ordem de 46%.

O ensaio 3 apresentou baixa retenção de sólidos, correspondente a 34% da retenção verificada no ensaio de secagem da polpa de manga, o que mostra que a gordura

facilita a ruptura da película de polpa seca aderida à superfície das partículas, facilitando o arraste dos sólidos. Comportamento similar foi verificado com respeito à concentração de amido, cujo valor da retenção correspondeu a 74% do atingido no ensaio com a polpa natural.

As perdas foram determinadas a partir do balanço material de sólidos no secador. Mesmo não se tratando de uma variável independente, a discussão dos resultados encontrados faz-se necessária, visto que as observações experimentais apontam para uma importante influência da composição sobre a quantidade de material que se desprende das partículas, mas não são arrastadas pela corrente de ar, ficando disperso nas paredes do equipamento.

Antes de se iniciar esta discussão, vale ressaltar que testes preliminares com algumas farinhas alimentícias foram realizados para testar o arraste do pó e a eficiência de coleta do ciclone. Com base na granulometria de pós de jerimum, cenoura e beterraba obtidos mediante secagem em leito de jorro, de acordo com LIMA et al. (1997) e LIMA et al. (1998), foram escolhidas algumas farinhas comerciais (farinha de trigo e farinha de milho), que foram peneiradas e misturadas, em diferentes proporções, à leitos de polietileno de alta densidade, poliestireno de baixa densidade e SANGEL[®]. Para uma relação de 10 g de farinha de milho, adicionadas a um leito de 2,5 kg de partículas de polietileno de alta densidade, a recuperação da farinha no ciclone atingiu a faixa de 90% aos 15 minutos de processamento no leito de jorro, com resistência desligada (temperatura em torno de 45°C), e vazão de ar correspondente à razão $Q/Q_{jmo}=1,15$. Os resultados destes testes preliminares confirmaram a boa performance do ciclone utilizado no presente trabalho.

Desconsiderando-se, portanto, dificuldades operacionais advindas do ciclone, as perdas observadas na maioria dos ensaios com as polpas modificadas, podem ser discutidas considerando-se a influência da composição. De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.15, praticamente todos os sólidos alimentados no ensaio 2 ficaram retidos no leito, em decorrência da elevada concentração de açúcares redutores presentes na polpa 2. Portanto, o efeito dos açúcares redutores sobre as perdas de material disperso na coluna deverá ser analisado de acordo com os efeitos combinados das variáveis de composição, a partir dos resultados do planejamento fatorial, apresentados e discutidos no item 4.7

Com respeito à influência das fibras e pectina, observa-se na Tabela 4.15 que as perdas são muito próximas das determinadas no ensaio com a manga, ou seja, o aumento na concentração destes constituintes não provocou mudanças importantes na quantidade de material aderido ou disperso no equipamento. Entretanto, elevadas concentrações de amido e principalmente de gordura, provocaram aumentos nas perdas da ordem de 72% e 190%, respectivamente. Os resultados dos ensaios 3 e 9 são compatíveis com as observações experimentais 2 e 3, citadas no item 4.5.1.

No que se refere ao ângulo de repouso, os resultados apresentados na Tabela 4.15 mostram que, de um modo geral, elevados teores de pectina, amido e gordura promoveram a diminuição do ângulo de repouso favorecendo a escoabilidade do leite. Elevadas concentrações de fibras e de açúcares redutores provocaram, em relação ao ensaio com a polpa de manga, um aumento de cerca de 18% no ângulo de repouso. Entretanto, tal como observado com o ângulo de repouso do leite molhado, em relação à polpa de manga desidratada, o aumento ou diminuição do ângulo de repouso após a secagem, independentemente da composição máxima ajustada, não se mostra muito importante (redução máxima de 13% e aumento máximo de 18%).

Complementando os dados da Tabela 4.15, a Tabela 4.16 mostra a influência do processo de secagem sobre o ângulo de repouso. Conforme ilustrado nesta tabela, a presença das polpas natural e modificadas, tanto úmidas como desidratadas, provocam o aumento do ângulo de repouso, dificultando a escoabilidade do leite. Observa-se, entretanto, que para a relação entre a massa de polpa alimentada e massa do leite de inertes mantida fixa no presente trabalho em 2%, o filme líquido que recobre as partículas exerce maior influência sobre o ângulo de repouso do que o filme seco. Após a secagem a relação entre a massa de polpa desidratada e a massa de inertes, em virtude da evaporação e da ruptura da película seca aderida com conseqüente arraste do pó é de 0,23%, (valor médio d obtido, considerando todos os ensaios, Tabela IV.2), cerca de 10 vezes inferior à relação entre a massa úmida e a massa de inerte inicial. No filme sólido, as pontes sólidas são mais fortes e devem interferir na escoabilidade do leite, devido a uma maior tendência das partículas revestidas se colarem umas às outras, formando aglomerados de partículas. Entretanto, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.16 e Figura 4.27, o leite após a secagem apresentou maior escoabilidade (avaliada através das medidas do ângulo de repouso) do que o leite molhado com as polpas. Registra-se, entretanto, que este resultado

restringe-se à uma única alimentação de polpa, e a uma relação fixa $M_{polpa}/MI = 2\%$. No item 4.8, esta discussão será ampliada para resultados obtidos em ensaios com mais de uma alimentação, onde serão avaliados os efeitos da reumidificação do leito sobre o ângulo de repouso.

Tabela 4.16 - Ângulo de repouso após a secagem e ângulo de repouso com adição de polpas de manga e modificadas, parametrizados em relação ao ângulo de repouso do leito de inertes (θ_o)

Polpa	θ_s / θ_o	θ_m / θ_o	θ_m / θ_s
Manga	1,36	1,61	1,18
Polpa 1 (pectina)	1,26	2,02	1,61
Polpa 2 (açúcar)	1,59	1,87	1,18
Polpa3 (gordura)	1,18	1,54	1,30
Polpa 5 (fibras)	1,62	1,84	1,14
Polpa 9 (amido)	1,08	1,51	1,41

Com relação à influência das composições sobre o ângulo de repouso, a discussão apresentada no item 4.43, indicava uma importante influência da água, e de suas interações com o material inerte e com os demais constituintes das polpas sobre o ângulo de repouso do leito úmido. Conforme é mostrado na Tabela 4.16, principalmente em relação à pectina e ao amido, a influência destes constituintes sobre o ângulo de repouso após a secagem é significativamente inferior ao observado quando o leito se encontrava molhado com as polpas.

Esperava-se que o importante efeito do aquecimento sobre as propriedades de soluções de amido e de pectina em água, principalmente em relação ao aumento da viscosidade e a capacidade de gelatinizar, conforme citado por CHEFTEL e CHEFTEL (1983) e BOBBIO e BOBBIO (1995), interferiria de forma negativa na escoabilidade do leito durante a secagem, entretanto, os resultados mostrados na Tabela 4.16 indicam que, individualmente, a interferência negativa destes constituintes é mais

acentuada na escoabilidade do leito com elevado conteúdo de água e na temperatura ambiente, em torno de 25°C.

Em relação ao açúcar e as fibras as medidas de θ_m e θ_s , quando apenas uma destas concentrações é individualmente aumentada, são muito próximas, registrando-se uma diminuição de θ_s relativa a θ_m da ordem de 82 e 86%, respectivamente. O ângulo de repouso do leito molhado com a polpa 3, cuja concentração de gordura foi fixada no nível máximo, é 30% superior ao medido após a secagem. Deve-se considerar ainda, que a friabilidade da película formada sobre a superfície das partículas, também interfere na escoabilidade, o que leva a uma discussão posterior do ângulo de repouso em função da quantidade de material retida no leito. Deste modo, as composições e as interações que interferem na retenção, também devem interferir no ângulo de repouso do leito após a secagem.

Na Figura 4.27 se reproduz a Figura 4.26, acrescentando-se os dados relativos ao ângulo de repouso do leito após a secagem, para todos os ensaios com as polpas modificadas e o ângulo de repouso do leito de inertes.

O resultados apresentados e discutidos anteriormente encontram-se contemplados nesta figura, que também ilustra a importância dos efeitos das interações entre as composições no sentido de atenuar ou mesmo anular os efeitos de alguns constituintes, quando apenas uma concentração é fixada no nível máximo estudado. O importante efeito de elevadas concentrações de açúcares redutores sobre o ângulo de repouso dos leitos, secos ou úmidos, é praticamente anulado, quando simultaneamente a concentração de gordura também é máxima. Este comportamento é mais evidente para θ_s , conforme mostra a Figura 4.27, (θ_m e θ_s do ensaio 2, comparados aos dos ensaios 4, 8, 12 e 16). Comportamento semelhante é observado com respeito às fibras, cuja concentração máxima promove individualmente aumentos importantes tanto em θ_m como em θ_s . Estes efeitos, principalmente para θ_s , também são atenuados por elevadas concentrações de gordura, (θ_m e θ_{sm} do ensaio 5, comparados aos dos ensaios 7, 8, 15 e 16).

A dispersão dos valores de θ_m e θ_s em torno do valor médio obtido para todos os ensaios, na forma como foi apresentada na Figura 4.26, também é ilustrada na Figura 4.27. Observa-se que, em relação à gordura, a tendência nítida de comportamento de θ_m nos ensaios de 1 a 8, com alternância dos desvios a cada dois ensaios, se repete em relação à θ_s .

Todavia, a constatação de desvios negativos ou nulos em relação à média dos valores de θ_m a partir do ensaio 9, quando as concentrações de amido são máximas, não se reproduz para θ_s . Estes resultados indicam que para θ_s , os efeitos combinados das composições associados ao processo de aquecimento, evaporação da água e ruptura da película desidratada, se sobrepõe ao efeito de elevada concentrações de amido que, em relação ao leito molhado com polpa, promovia melhores condições de escoabilidade. Registra-se o comportamento anômalo observado no valor do ângulo de repouso do leito molhado com a polpa 12, já identificado na discussão apresentada no item 4.43.

Com relação à influência dos açúcares redutores e da gordura sobre a eficiência de produção de pó e ângulo de repouso do leitos úmidos e após a secagem, os resultados encontrados com as polpas modificadas reproduzem os obtidos na secagem de polpas de frutas, LIMA et al. (2000) e RAMOS (1997) .

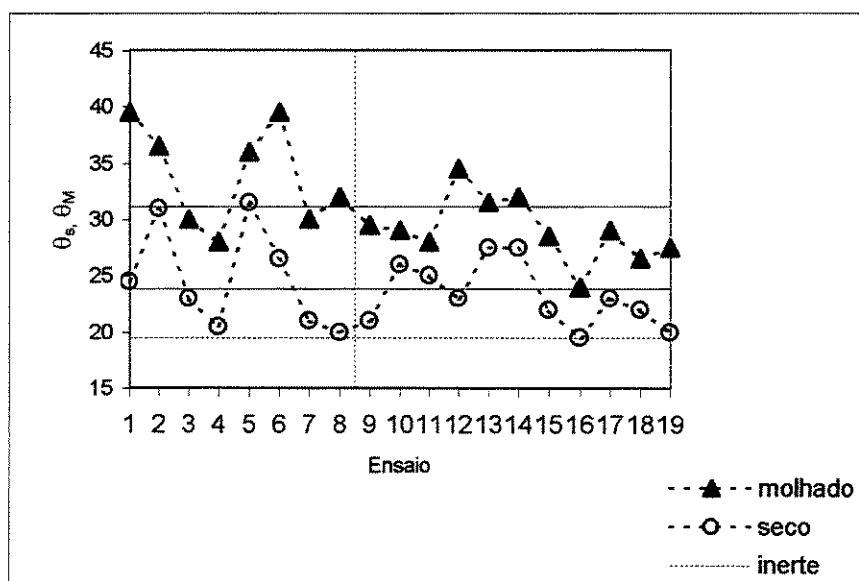


Figura 4.27 - Ângulo de repouso após a secagem e ângulo de repouso com adição de polpas modificadas

4.6 - Resultados do Planejamento Fatorial Fracionário 2^{5-1}

4.6.1 - Análise dos Resultados dos Ensaios Fluidodinâmicos Através do Planejamento Experimental 2^{5-1}

A análise dos resultados obtidos para a vazão de jorro mínimo, a queda de pressão de jorro estável e para o ângulo de repouso com adição de polpas foi realizada através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “Statística” de acordo com o planejamento fatorial 2^{5-1} , cuja matriz estatística é mostrada na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Planejamento fatorial 2^{5-1} – Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios fluidodinâmicos

Ensaio	$Y_{a\acute{c}u}$	Y_{gor}	Y_{fib}	Y_{ami}	Y_{pec}	ΔP_{jes} (Pa)	Q_{jm} (m^3/s) $\times 10^{-3}$	θ_m
1	-1	-1	-1	-1	+1	696,8	13,0	39,5
2	+1	-1	-1	-1	-1	286,6	19,6	36,5
3	-1	+1	-1	-1	-1	653,5	15,3	30,0
4	+1	+1	-1	-1	+1	524,2	16,7	28,0
5	-1	-1	+1	-1	-1	542,3	18,5	36,0
6	+1	-1	+1	-1	+1	422,9	16,1	39,5
7	-1	+1	+1	-1	+1	603,7	16,3	30,0
8	+1	+1	+1	-1	-1	556,7	15,3	32,0
9	-1	-1	-1	+1	-1	730,9	16,5	29,5
10	+1	-1	-1	+1	+1	556,6	17,7	29,0
11	-1	+1	-1	+1	+1	637,9	15,9	28,0
12	+1	+1	-1	+1	-1	516,2	17,7	34,5
13	-1	-1	+1	+1	+1	718,3	16,5	31,5
14	+1	-1	+1	+1	-1	603,9	18,3	32,0
15	-1	+1	+1	+1	-1	560,3	17,0	28,5
16	+1	+1	+1	+1	+1	582,6	17,0	24,0
17	0	0	0	0	0	599,4	16,1	29,0
18	0	0	0	0	0	634,0	18,1	26,5
19	0	0	0	0	0	603,0	16,5	27,5

A Tabela 4.18 apresenta os efeitos principais das variáveis independentes, tendo como resposta a queda de pressão de jorro estável para um modelo de 1ª ordem, sem considerar as interações entre as variáveis com um limite de confiança de 95%. As interações entre as variáveis independentes não foram consideradas em virtude de se tratar de um planejamento fatorial fracionário do tipo 2⁽⁵⁻¹⁾, cujos efeitos das interações se confundem com os efeitos principais.

As variáveis codificadas , $Y_{açú}$, Y_{gor} , Y_{fib} , Y_{ami} e Y_{pec} são definidas nas equações 4.9 a 4.13:

$$Y_{açú} = (X_{açú} - 13,81) / 6,14 \quad (4.9)$$

$$Y_{gor} = (X_{gor} - 3,81) / 3,03 \quad (4.10)$$

$$Y_{fib} = (X_{fib} - 1,25) / 0,75 \quad (4.11)$$

$$Y_{ami} = (X_{ami} - 2,59) / 2,07 \quad (4.12)$$

$$Y_{pec} = (X_{pec} - 1,25) / 0,57 \quad (4.13)$$

Na Tabela 4.18, os termos grifados correspondem às variáveis independentes cujos efeitos apresentaram significância estatística. Conforme mostra a Tabela 4.18, apenas as variáveis independentes, concentrações de açúcar e de amido ($Y_{açú}$ e Y_{ami}) apresentam efeitos estatisticamente significativos sobre a variável resposta, queda de pressão de jorro estável. Os efeitos das concentrações de açúcar e de amido são negativo e positivo, respectivamente. Em valores absolutos o efeito da concentração de açúcar é mais importante.

Os resultados da análise estatística condizem com toda a discussão apresentada no item 4.4.2 e 4.4.3, com respeito aos problemas de instabilidade associados às diminuições buscas na queda de pressão, observados nos ensaios com adição de polpas com elevada

concentração de açúcares redutores. O efeito positivo provocado pelo amido, no sentido de promover melhor estabilidade ao leite, refletido em níveis de maiores quedas de pressão, também foi identificado na análise das curvas características, cuja discussão está contemplada no também no item 4.4.2.

Tabela 4.18 - Estimativa dos efeitos para a queda de pressão de jorro estável

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	580,516	4,364	561,739	599,293
Y_{açu}	-136,750	9,511	-177,673	-95,827
Y_{gor}	9,600	9,511	-31,323	50,524
Y_{fib}	-1,500	9,511	-42,423	39,424
Y_{ami}	77,500	9,511	36,577	118,424
Y_{pec}	36,575	9,511	-4,38	77,499

A análise dos resultados obtidos para a vazão de jorro mínimo através de métodos estatísticos não identificou efeitos significativos sobre a variável resposta de qualquer das variáveis independentes. Este resultado reafirma a análise dos resultados ilustrados na Figura 4.23.

A Tabela 4.19 apresenta os efeitos principais das variáveis independentes, tendo como resposta o ângulo de repouso do leite com adição de polpas para um modelo de 1ª ordem, sem considerar as interações entre as variáveis com um limite de confiança de 95%. Verifica-se nesta tabela que, dentre as variáveis independentes analisadas, apenas as concentrações de gordura e amido apresentaram efeitos significativos sobre o ângulo de repouso com adição de polpas. Os efeitos de ambas variáveis são negativos e, de acordo com os resultados da análise estatística, apresentam o mesmo nível de importância.

Tabela 4.19 - Estimativa dos efeitos para o ângulo de repouso do leite com adição de polpas

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	31,132	0,289	29,890	32,374
Y_{açu}	0,313	0,629	-2,395	3,020
Y_{gor}	-4,813	0,629	-7,520	-2,106
Y_{fib}	-0,188	0,629	-2,895	2,520
Y_{am}	-4,313	0,629	-7,020	-1,606
Y_{pec}	-1,188	0,629	-3,895	1,520

Estes resultados respaldam a discussão apresentada no item 4.4.3.3 e concordam com os resultados ilustrados na Figura 4.26.

4.6.2 - Análise dos Resultados dos Ensaios de Secagem Através do Planejamento Experimental 2^{S-1}

A análise dos resultados obtidos para a eficiência de produção de pó, retenção de sólidos no leite, perdas de sólidos no equipamento e para o ângulo de repouso do leite após a secagem das polpas também foi realizada de através de métodos estatísticos, utilizando-se o programa “Statística”, cuja matriz das variáveis independentes e de resposta é mostrada na Tabela 4.20.

A Tabela 4.21 apresenta os efeitos principais das variáveis independentes tendo como resposta a eficiência de produção de pó, para um modelo de 1ª ordem, sem considerar as interações entre as variáveis, com um limite de confiança de 95%. Conforme justificado na análise estatística dos resultados dos ensaios fluidodinâmicos, os efeitos das interações entre as variáveis independentes não foram consideradas em virtude de se tratar de um

planejamento fatorial fracionário do tipo $2^{(5-1)}$, cujos efeitos das interações se confundem com os efeitos principais.

Tabela 4.20 - Planejamento fatorial 2^{5-1} - Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios de secagem

Ensaio	$Y_{açu}$	Y_{gor}	Y_{fib}	Y_{ami}	Y_{pec}	Efic (%)	Rets (%)	Perdas (%)	θ_s
1	-1	-1	-1	-1	+1	14,06	68,95	16,99	24,5
2	+1	-1	-1	-1	-1	0,00	97,07	2,93	31,0
3	-1	+1	-1	-1	-1	22,10	22,64	55,26	23,0
4	+1	+1	-1	-1	+1	0,00	23,05	76,95	20,5
5	-1	-1	+1	-1	-1	12,19	75,02	12,79	31,5
6	+1	-1	+1	-1	+1	0,00	94,89	5,11	26,5
7	-1	+1	+1	-1	+1	27,77	9,09	63,14	21,0
8	+1	+1	+1	-1	-1	0,00	58,37	41,63	20,0
9	-1	-1	-1	+1	-1	20,83	49,08	30,09	21,0
10	+1	-1	-1	+1	+1	9,11	58,14	32,75	26,0
11	-1	+1	-1	+1	+1	49,65	19,87	30,48	25,0
12	+1	+1	-1	+1	-1	6,69	33,07	60,23	23,0
13	-1	-1	+1	+1	+1	26,70	37,29	36,01	27,5
14	+1	-1	+1	+1	-1	5,89	66,12	27,99	27,5
15	-1	+1	+1	+1	-1	27,57	12,56	59,87	22,0
16	+1	+1	+1	+1	+1	23,88	6,72	69,40	19,5
17	0	0	0	0	0	16,09	16,69	67,22	23,0
18	0	0	0	0	0	15,86	18,58	55,56	22,0
19	0	0	0	0	0	19,49	11,05	69,46	20,0

As variáveis codificadas , $Y_{açu}$, Y_{gor} , Y_{fib} , Y_{ami} e Y_{pec} são as mesmas definidas no item 4.6.1, equações 4.9 a 4.13.

Tabela 4.21 - Estimativa dos efeitos para a eficiência de produção de pó

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	15,678	0,466	13,672	17,684
Y_{açu}	-19,413	1,016	-23,785	-15,040
Y_{gor}	8,610	1,016	4,237	12,983
Y_{fib}	0,195	1,016	-4,178	4,568
Y_{ami}	11,775	1,016	7,402	16,148
Y_{pec}	6,988	1,016	2,615	11,360

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.21, excetuando-se a concentração de fibras, todas as demais variáveis de composição apresentam efeitos significativos sobre a variável resposta, eficiência de produção de pó. O açúcar provoca diminuição na eficiência, e o seu efeito é o mais importante. A gordura, o amido e a pectina favorecem a produção de pó. Das variáveis que interferem favoravelmente na eficiência, a concentração de amido é a mais importante. No que concerne aos efeitos do açúcar, gordura e amido, estes resultados apenas reafirmam os discutidos na análise preliminar apresentada no item 4.5.3, quando os resultados da secagem de polpa de manga foram comparados com os obtidos na secagem das polpas modificadas 1, 2, 3, 5 e 9.

Os efeitos principais das variáveis de composição tendo como resposta a retenção de sólidos no leite, são apresentados na Tabela 4.22.

As variáveis independentes que apresentam efeitos significativos sobre a variável resposta retenção de sólidos, são as mesmas que se mostraram significativas na análise estatística dos resultados da eficiência. Entretanto, conforme era esperado, os efeitos são invertidos, ou seja, o açúcar aumenta a retenção enquanto a gordura, o amido e a pectina diminuem. A concentração de gorduras seguida da concentração de amido exercem os efeitos mais importante sobre a retenção de sólidos.

Tabela 4.22 - Estimativa dos efeitos para a retenção de sólidos no leite

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	41,427	0,8988	37,560	45,294
Y_{açu}	18,974	1,9588	10,546	27,402
Y_{gor}	-44,041	1,9588	-52,469	-35,613
Y_{fib}	4,435	1,9588	-10,762	19,633
Y_{ami}	-25,861	1,9588	-34,289	-17,433
Y_{pec}	-13,099	1,9588	-21,527	-4,671

Com relação à importância dos efeitos das variáveis independentes, esperava-se que a tendência fosse a mesma verificada na eficiência de produção de pó, entretanto, verifica-se que a gordura cujo efeito sobre a eficiência embora significativo, não foi dos mais relevantes, na retenção de sólidos apresenta-se como o mais importante. Este resultado leva a uma discussão mais detalhada sobre o efeito da gordura sobre a eficiência de produção de pó. Os efeitos das interações entre as variáveis independentes de composição na variável resposta devem atenuar alguns efeitos principais.

A Tabela 4.23 mostra os efeitos principais das variáveis de composição sobre as perdas de sólidos no equipamento. Os dados apresentados nesta tabela mostram que o efeito do açúcar sobre as perdas não é significativo.

Com respeito aos efeitos das variáveis de composição, gordura, amido e pectina, todos os efeitos sobre a variável resposta são significativos e positivos. O efeito mais importante é provocado pela gordura e em seguida pelo amido.

Tabela 4.23 - Estimativa dos efeitos para as perdas de sólidos no equipamento

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	42,895	0,449	40,963	44,827
Y_{açu}	0,439	0,979	-3,772	4,649
Y_{gor}	35,413	0,979	31,221	39,642
Y_{fib}	-3,801	0,979	-8,012	0,4093
Y_{ami}	14,086	0,979	9,876	18,297
Y_{pec}	6,111	0,979	1,901	10,901

Com relação à concentração de fibras, de acordo com os dados apresentados na Tabela 4.23, esta também não apresenta efeitos significativos sobre a variável resposta, perdas.

Tabela 4.24 - Estimativa dos efeitos para o ângulo de repouso do leito após a secagem

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	23,921	0,350	22,413	25,429
Y_{açu}	-1,188	0,764	-3,474	3,099
Y_{gor}	-5,188	0,764	-8,474	-1,901
Y_{fib}	0,188	0,764	-3,099	3,474
Y_{ami}	-0,183	0,764	-4,099	2,474
Y_{pec}	-1,063	0,764	-4,3487	2,224

Os dados relativos aos efeitos das variáveis de composição sobre o ângulo de repouso do leito após a secagem são mostrados na Tabela 4.24. De acordo com os dados

mostrados nesta tabela, apenas a gordura interfere de forma significativa sobre o ângulo de repouso do leite após a secagem. A discussão apresentada em relação ao ângulo de repouso do leite com adição de polpas, item 4.5.3, apontava para a interferência das interações entre a água e os constituintes das polpas. Os dados da tabela 4.22, mostram que, com a evaporação da água, apenas a concentração de gordura apresenta efeito significativo sobre o ângulo de repouso. Este resultado respalda portanto, a discussão anterior.

4.7 – Resultados do Planejamento Fatorial Completo 2^4

Como a concentração de fibras não apresentou efeitos significativos sobre qualquer das variáveis resposta analisadas, tanto na análise estatística dos resultados fluidodinâmicos como nos dos ensaios de secagem, esta variável foi eliminada e o planejamento experimental rearranjado para um fatorial completo do tipo 2^4 , podendo-se assim avaliar os efeitos das interações entre as variáveis de composição. A Tabela 4.25 exibe a matriz das variáveis independentes e de resposta, empregada na análise estatística do planejamento fatorial 2^4 , onde as s variáveis codificadas, $Y_{açú}$, Y_{gor} , Y_{ami} e Y_{pec} são as mesmas definidas no item 4.6.1, equações 4.9, 4.10, 4.12 e 4.13, respectivamente.

Tabela 4.25 – Planejamento fatorial 2^4 – Matriz das variáveis independentes codificadas e variáveis de resposta para os ensaios fluidodinâmicos e de secagem

Ensaio	$Y_{açu}$	Y_{gor}	Y_{ami}	Y_{pec}	ΔP_{jes} (Pa)	θ_m	Efic (%)	Rets (%)	Perdas (%)	θ_s
5	-1	-1	-1	-1	542,3	36,0	12,19	75,02	12,79	31,5
2	+1	-1	-1	-1	286,6	36,5	0,00	97,04	2,93	31,0
3	-1	+1	-1	-1	653,5	30,0	22,1	22,64	55,26	23,0
8	+1	+1	-1	-1	556,7	32,0	0,00	58,37	41,63	20,0
9	-1	-1	+1	-1	730,9	29,5	20,83	49,08	30,09	21,0
14	+1	-1	+1	-1	603,9	32,0	5,89	66,12	27,99	27,5
15	-1	+1	+1	-1	560,3	28,5	27,57	12,56	59,87	22,0
12	+1	+1	+1	-1	516,2	34,5	6,69	33,07	60,23	23,0
1	-1	-1	-1	+1	696,8	39,5	14,06	68,95	16,99	24,5
6	+1	-1	-1	+1	422,9	39,5	0,00	94,89	5,11	26,5
7	-1	+1	-1	+1	603,7	30,0	27,77	9,09	63,14	21,0
4	+1	+1	-1	+1	524,2	28,0	0,00	23,05	76,95	20,5
13	-1	-1	+1	+1	718,3	31,5	26,70	37,29	36,01	27,5
10	+1	-1	+1	+1	556,6	29,0	9,11	58,14	32,75	26,0
11	-1	+1	+1	+1	637,9	28,0	49,65	19,87	30,48	25,0
16	+1	+1	+1	+1	582,6	24,0	23,88	6,72	69,40	19,5
17	0	0	0	0	599,4	16,1	16,09	16,69	67,22	23,0
18	0	0	0	0	634,0	18,1	15,86	18,58	55,56	22,0
19	0	0	0	0	603,0	16,5	19,49	11,05	69,46	21,0

A análise estatística dos resultados considerando o fatorial completo, não identificou efeito significativo de qualquer interação entre as variáveis de concentração sobre a vazão de jorro mínimo.

4.7.1 - Análise dos Efeitos

A Tabela 4.26 apresenta um resumo dos efeitos das variáveis independentes $Y_{açú}$, Y_{gor} , Y_{ami} e Y_{pec} e das interações entre as mesmas, sobre as variáveis de resposta ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s , para um modelo de primeira ordem com três interações e limite de confiança de 95%. Os dados detalhados, incluindo o desvio padrão e desvios relativos à estimativa dos efeitos das variáveis de composição e de suas interações sobre todas as variáveis respostas analisadas, são mostrados nas Tabelas V.1 a V.6, do Apêndice V.

Tabela 4.26 - Estimativa dos efeitos para ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados					
	ΔP_{jes}	θ_m	Efic	Rets	Perdas	θ_s
Média	580,516	31,132	15,678	41,427	42,895	23,921
$Y_{açú}$	-136,750	0,313	-19,413	18,974	0,439	-0,188
Y_{gor}	9,600	-4,813	8,610	-44,041	35,431	-5,188
Y_{ami}	77,500	-4,313	11,775	-25,861	14,086	-0,813
Y_{pec}	36,575	-1,188	6,988	-13,099	6,111	-1,063
$Y_{açú} \cdot Y_{gor}$	67,825	0,188	-4,718	-2,496	7,214	-1,813
$Y_{açú} \cdot Y_{ami}$	39,725	0,188	-0,383	-11,636	12,019	0,313
$Y_{açú} \cdot Y_{pec}$	-5,850	-2,438	-1,885	-7,074	8,959	-1,188
$Y_{gor} \cdot Y_{ami}$	-87,775	3,063	2,705	5,464	-8,169	2,063
$Y_{gor} \cdot Y_{pec}$	-21,150	-2,563	4,248	-6,094	1,846	0,563
$Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	-15,550	-1,813	5,103	7,371	-12,474	2,188
$Y_{açú} \cdot Y_{gor} \cdot Y_{ami}$	-20,500	0,313	1,188	-9,111	7,924	-0,563
$Y_{açú} \cdot Y_{gor} \cdot Y_{pec}$	7,375	1,063	-0,755	-8,999	9,754	0,188
$Y_{açú} \cdot Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	-5,625	1,313	0,000	3,586	-3,586	-2,438
$Y_{gor} \cdot Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	72,125	0,063	3,298	10,251	-13,549	-1,938

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.26, os efeitos significativos das variáveis de composição e de suas interações sobre as variáveis respostas analisadas, considerando o planejamento fatorial 2^4 , são as seguintes:

1 - além dos efeitos principais das variáveis, já discutidos no item 4.6.1, as interações $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{gor}}$, $Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{ami}}$ e $Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{ami}} \cdot Y_{\text{pec}}$ também apresentam efeitos significativos sobre a variável resposta ΔP_{jes} ;

2 - com relação a θ_m , além das variáveis independentes Y_{gor} e Y_{ami} , cuja significância estatística dos efeitos principais já tinha sido identificada no item 4.6.1, apenas a interação $Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{ami}}$ apresenta efeito significativo sobre esta variável resposta;

3 - além dos efeitos significativos principais de todas as variáveis de composição sobre a eficiência de produção de pó, ainda são significativos os efeitos das interações $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{gor}}$ e $Y_{\text{ami}} \cdot Y_{\text{pec}}$;

4 - as interações $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{ami}}$, $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{ami}}$, $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{pec}}$ e $Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{ami}} \cdot Y_{\text{pec}}$, apresentam efeitos significativos sobre a retenção de sólidos e, conforme já observado no item 4.6.1, todos os efeitos principais das variáveis de composição também são significativos;

5 - apenas a variável independente $Y_{\text{açu}}$ e as interações $Y_{\text{gor}} \cdot Y_{\text{pec}}$, $Y_{\text{açu}} \cdot Y_{\text{ami}} \cdot Y_{\text{pec}}$ não apresentam efeitos significativos sobre a variável resposta perdas de sólidos no equipamento. Ressalta-se que esta variável é uma combinação linear das variáveis da eficiência de produção de pó e retenção de sólidos;

6 - não há efeito significativo de qualquer interação entre as variáveis independentes sobre o ângulo de repouso do leito após a secagem, o qual sofre influência significativa apenas da concentração de gordura. Mantém-se portanto o resultado apresentado anteriormente quando a análise estatística foi realizada considerando o planejamento fatorial fracionário.

A análise conjunta dos efeitos das variáveis de composição sobre todas as variáveis respostas, conduz a importantes observações e constatações, citadas a seguir:

1 - entre as variáveis de composição estudadas, as concentrações de gordura e amido apresentam efeitos significativos muito importantes sobre a maioria das respostas analisadas. De um modo geral, desconsiderando-se o efeito sobre as perdas, os efeitos tanto

da gordura como do amido se traduz em condições mais favoráveis ao processamento das polpas no leite de jorro, visto que promovem melhores condições de estabilidade, favorecem a escoabilidade das partículas, diminuem a retenção e aumentam a produção de pó;

2 - embora a concentração de açúcares redutores tenha apresentado efeitos significativos, apenas sobre três variáveis respostas, deve-se considerar que em relação a performance do leite de jorro na secagem de pastas e suspensões, estes efeitos são negativos, e podem comprometer e inviabilizar o processo, devido aos problemas de instabilidade associado à formação de aglomerados e acumulação de material no leite, entre outros;

3 - os efeitos principais da concentração de pectina são significativos em relação a eficiência, retenção de sólidos e às perdas. Seus efeitos, também desconsiderando-se as perdas, são favoráveis ao desempenho do processo, porém de importância aparentemente menos relevante do que os efeitos das demais variáveis de composição.

4.7.2 - Análise de Regressão dos Modelos Estatísticos

Para todas as variáveis respostas analisadas os termos não significativos podem ser eliminados do modelo estatístico. As equações 4.14 a 4.19 correspondem aos modelos estatísticos codificados para as variáveis respostas ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s , em função apenas das variáveis que influenciam em cada resposta, respectivamente;

$$\begin{aligned} \Delta P_{jes} = & 580,52 - 68,38Y_{açu} + 38,75Y_{ami} + 33,93Y_{açu}Y_{gor} - 43,89Y_{gor}Y_{ami} \\ & + 36,06Y_{gor}Y_{ami}Y_{pec} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\theta_m = 31,13 - 2,41Y_{gor} - 2,16Y_{ami} + 1,53Y_{gor}Y_{ami} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} Efic = & 15,68 - 9,71Y_{açu} + 4,31Y_{gor} + 5,89Y_{ami} + 3,49Y_{pec} - 2,36Y_{açu}Y_{gor} \\ & + 2,55Y_{ami}Y_{pec} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} Rets = & 41,43 + 9,49Y_{açu} - 22,02Y_{gor} - 12,93Y_{ami} - 6,55Y_{pec} - 5,82Y_{ami}Y_{pec} \\ & - 4,56Y_{açu}Y_{gor}Y_{ami} - 4,50Y_{açu}Y_{gor}Y_{pec} + 5,13Y_{gor}Y_{ami}Y_{pec} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} Perdas = & 42,9 + 17,7Y_{gor} + 7,04Y_{ami} + 3,06Y_{pec} + 3,61Y_{açu}Y_{gor} + 6,01Y_{açu}Y_{ami} + 4,48Y_{açu}Y_{pec} \\ & + 4,09Y_{gor}Y_{ami} - 6,24Y_{ami}Y_{pec} + 3,96Y_{açu}Y_{gor}Y_{ami} + 4,88Y_{açu}Y_{gor}Y_{pec} - 6,78Y_{gor}Y_{ami}Y_{pec} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\theta_s = 23,92 - 2,59Y_{gor} \quad (4.19)$$

Para cada modelo representado nas equações 4.14 a 4.19 a significância estatística foi determinada pela análise de variância, cujos resultados são mostrados nas Tabelas V.7 a V.12 do Apêndice V.

A Tabela 4.27 mostra uma síntese dos resultados da análise de regressão para todas as variáveis respostas analisadas.

Tabela 4.27 – Resultados da análise de regressão - ΔP_{jes} , θ_m , Efic, Rets, Perdas e θ_s

			Teste F (Regressão)			Teste F (Falta de Ajuste)		
Variável Resposta	Qualidade do Ajuste (%)	Coefficiente de Correlação	F _{calc} MQ _R /MQ _r	F _{tab} (95%)	F _{calc} /F _{tab}	F _{calc} MQ _{faj} /MQ _{ep}	F _{tab} (95%)	F _{calc} /F _{tab}
ΔP_{jes}	88,82	0,943	20,66	3,03	6,82	5,16	19,41	0,27
θ_m	61,63	0,785	8,03	3,29	2,44	6,03	19,42	0,31
Efic	93,73	0,968	29,90	3,00	9,97	4,25	19,40	0,22
Rets	81,35	0,902	5,45	3,07	1,78	26,91	19,37	1,39
Perdas	77,32	0,879	3,41	3,18	1,07	97,92	19,35	5,06
θ_s	45,88	0,677	14,42	246,7	0,06	3,50	19,43	0,18

De acordo com os dados da Tabela 4.27, o coeficiente de correlação entre as respostas observadas e os valores preditos pelo modelo estatístico de primeira ordem, ajustado aos dados da queda de pressão de jorro estável é de 0,943. 88,82% da variação total em torno da média é explicada pela regressão para um valor máximo explicável de 99,62%. Com relação ao teste F, que verifica se o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados obtidos pela simulação, observa-se que o valor de F é 6,82 vezes superior ao valor tabelado, a um nível de confiança de 95%, mostrando que a equação ajustada é estatisticamente significativa e útil para fins preditivos. A Figura 4.28 apresenta os pontos experimentais de ΔP_{jes} em boa concordância com a reta dos valores previstos pelo modelo.

Observa-se na Figura 4.29 uma distribuição aleatória dos resíduos na região central do gráfico, enquanto nas extremidades os resíduos tendem a ser negativos. Este comportamento pode ser indicativo de anormalidade na distribuição dos resíduos o que invalidaria o emprego do teste F, segundo BARROS NETO et al. (1996). Realizando-se um teste F da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} , pode-se avaliar se o modelo está ou não bem ajustado às observações experimentais. Valores altos de MQ_{faj}/MQ_{ep} ($F > 1$), significa falta de ajuste. Os resultados da análise de variância para o modelo estatístico de primeira ordem ajustado aos dados de ΔP_{jes} mostrados na Tabela 4.27, fornecem $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 5,16$, valor bastante inferior ao F tabelado, $F_{11,2} = 19,41$. Há portanto, um ajuste satisfatório do modelo às observações experimentais.

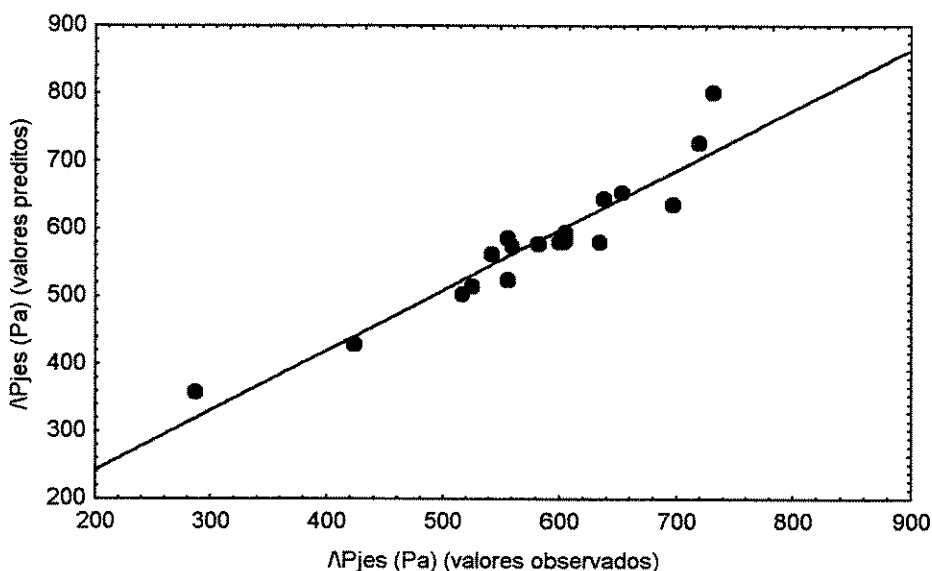
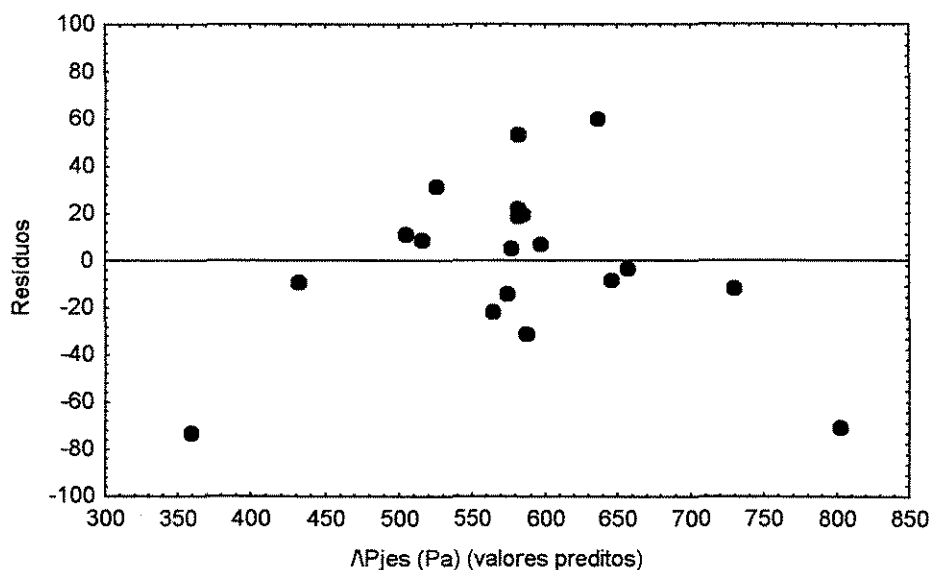


Figura 4.28 – Valores observados versus valores preditos - ΔP_{jes} (Pa)

Figura 4.29 – Distribuição dos resíduos - ΔP_{jes} (Pa)

Em relação ao ângulo de repouso do leito com adição de polpas θ_m , a equação ajustada apresenta um coeficiente de correlação de 0,78, enquanto o valor da qualidade do ajuste é de apenas 61,63%. O valor de F é 2,44 vezes superior ao F tabelado, o que demonstra que o modelo embora significativo não é útil para fins preditivos, de acordo com BOX e WETZ (1963). Na Figura 4.30 pode-se verificar a má qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais, não havendo concordância satisfatória entre os valores observados e os preditos pela equação.

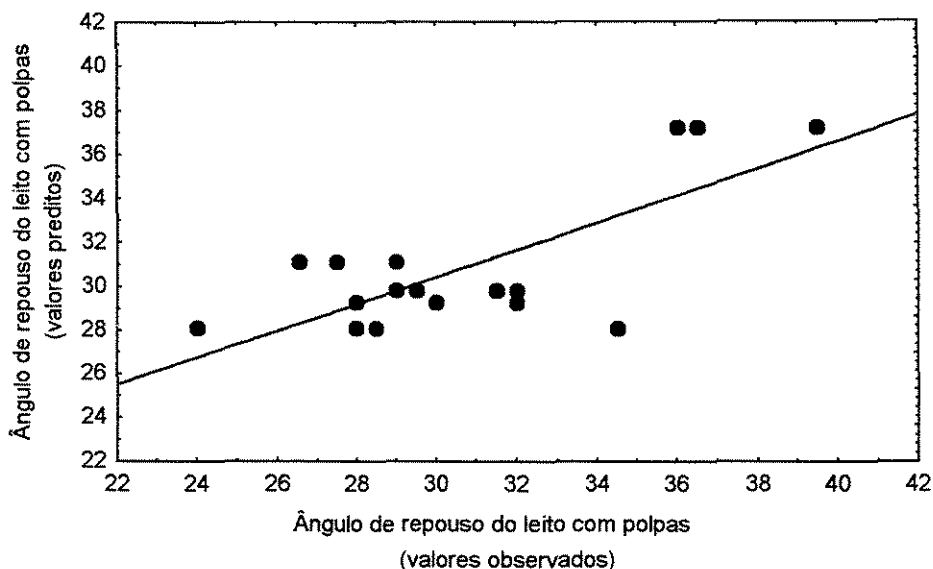


Figura 4.30– Valores observados versus valores preditos - θ_m

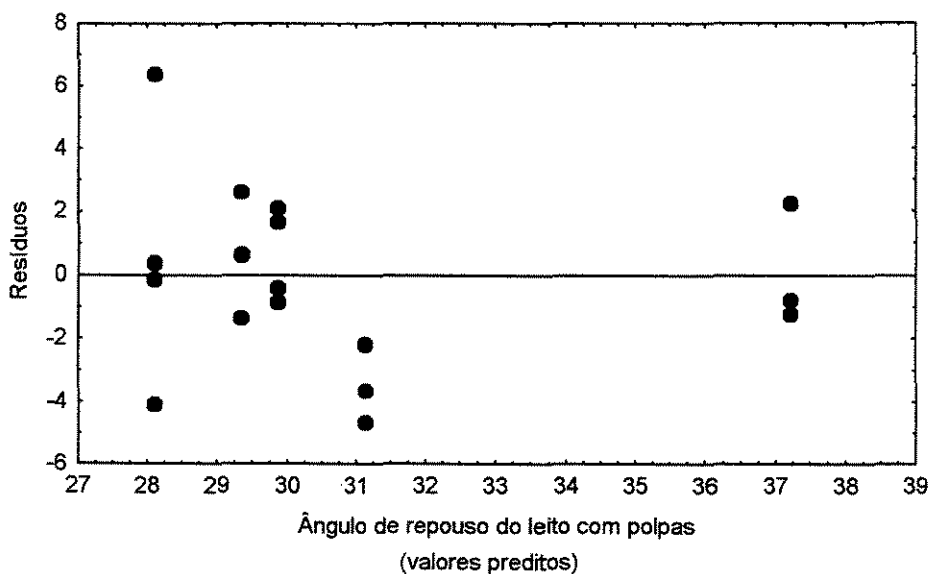


Figura 4.31 – Distribuição dos resíduos - θ_m

Apesar da baixa percentagem de variação explicada pela regressão (61,63%) em relação a percentagem máxima explicável de 99,05%, o valor da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} , (6,03), calculado a partir dos dados da Tabela VI.8, é baixo quando comparado ao valor tabelado

$F_{13,12} = 19,43$. Este resultado é indicativo de que o erro aleatório pode estar afetando as respostas e refletindo na dispersão dos resíduos ilustrados na Figura 4.31.

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 4.27 o modelo ajustado aos dados de eficiência de produção de pó apresenta uma boa qualidade de ajuste. A regressão explica 93,73% da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 99,72%. O coeficiente de correlação é 0,968, o que significa que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo é quase 10 vezes superior ao F tabelado a um nível de confiança de 95%. O teste F garante portanto, que para a eficiência de produção de pó o modelo ajustado é estatisticamente significativo e preditivo. A Figura 4.32 confirma que para todas as regiões estudadas o modelo ajustado aos dados de eficiência de produção de pó apresenta boa qualidade de ajuste.

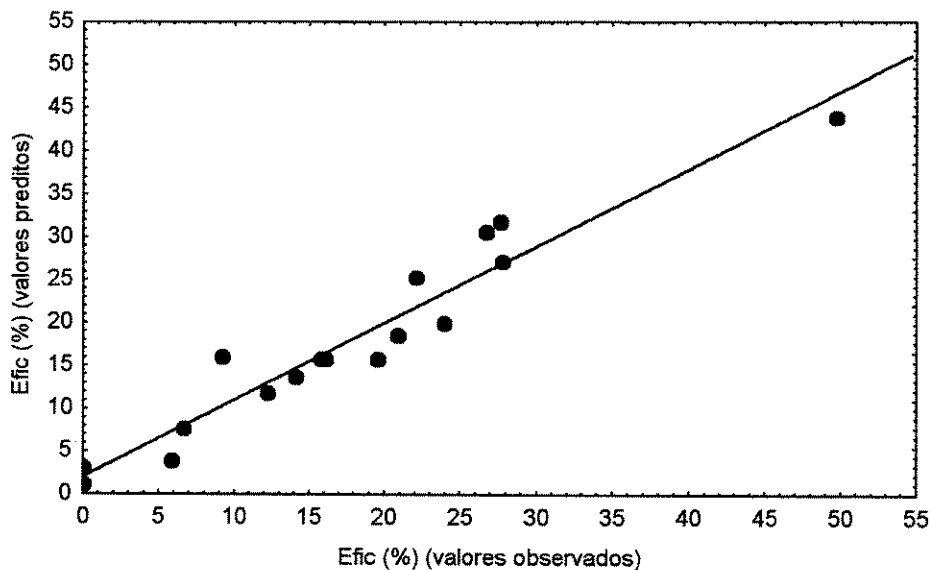


Figura 4.32 – Valores observados versus valores preditos – Efic (%)

A Figura 4.33 mostra uma distribuição aleatória dos resíduos indicando que o modelo representa adequadamente as variações na eficiência de produção de pó, o que torna desnecessária a discussão do teste F para a razão MQ_{faj}/MQ_{ep} .

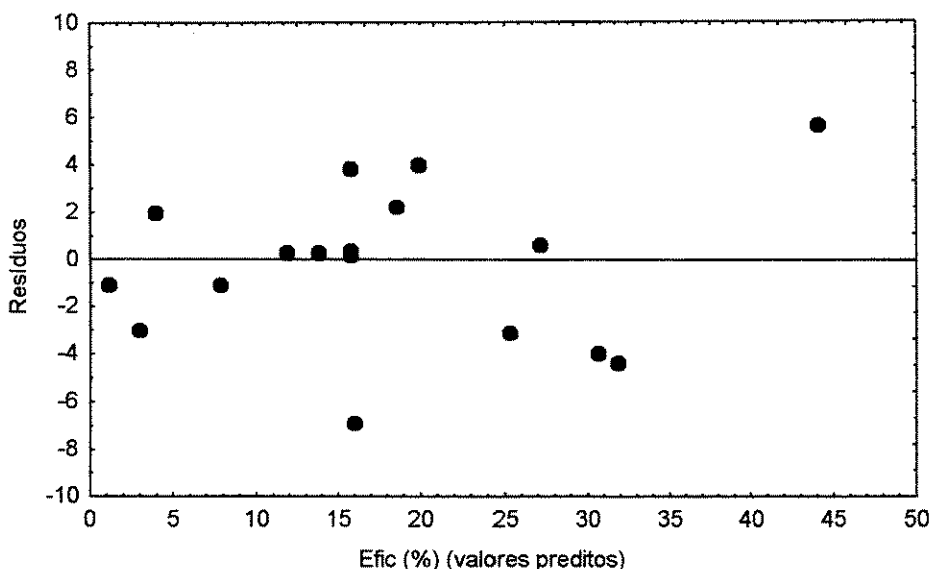


Figura 4.33 – Distribuição dos resíduos – Efic (%)

O modelo estatístico para a retenção de sólidos, conforme mostra a Tabela 4.27, apresenta uma percentagem de variação explicada pela regressão de 81,35% em relação ao valor máximo explicável de 99,82%. O coeficiente de correlação 0,902 indica um ajuste satisfatório entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido através do modelo é 1,78 vezes superior ao valor tabelado, demonstrando que o modelo é significativo, porém não preditivo.

Estes resultados, embora indiquem uma regressão razoavelmente significativa, não são compatíveis com a inadequação do modelo visualizada na Figura 4.34 e evidenciada na Figura 4.35. Nesta última percebe-se claramente que a distribuição dos resíduos não é aleatória. Os resíduos negativos concentram-se na região central do gráfico, enquanto os resíduos positivos estão localizados nas regiões onde a retenção é baixa ou alta. A não aleatoriedade dos resíduos invalida o resultado do teste F para a regressão. O emprego do teste F pressupõe uma distribuição normal dos resíduos, de acordo com BARROS NETO et al. (1996). Os dados da Tabela 4.27 fornece $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 26,21$, valor alto e superior ao valor tabelado $F_{8,2} = 19,37$. Fica confirmada assim a falta de ajuste do modelo de primeira ordem aos dados de retenção de sólidos.

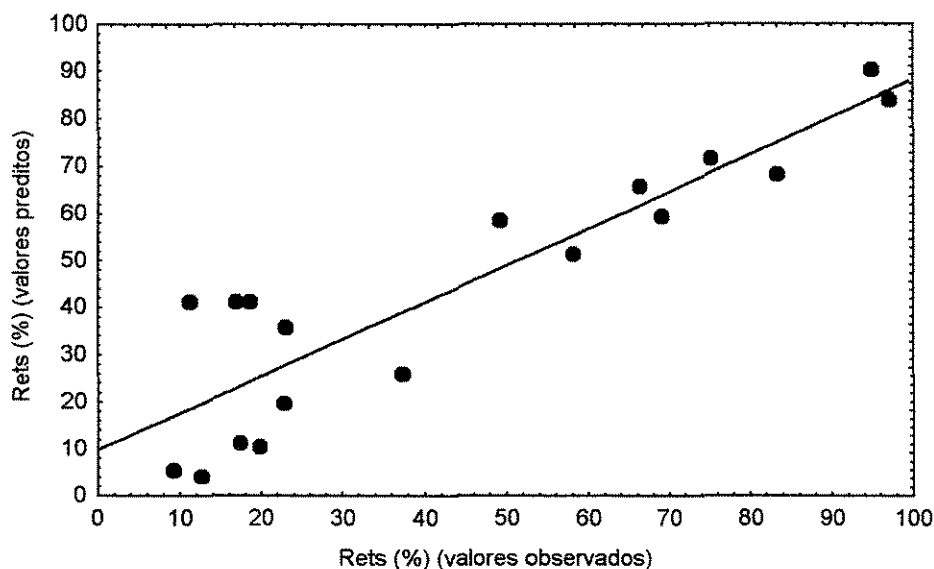


Figura 4.34 – Valores observados versus valores preditos - Rets (%)

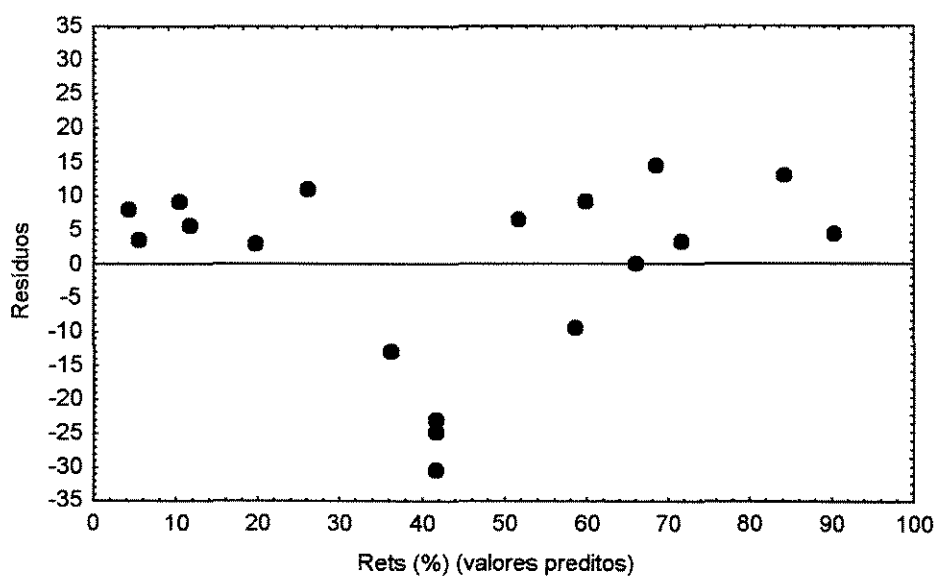


Figura 4.35 – Distribuição dos resíduos – Rets (%)

A variável resposta Perdas foi calculada como uma função da eficiência de produção de pó e da retenção de sólidos. A inadequação do modelo de primeira ordem aos dados da retenção reflete-se no modelo ajustado aos dados relativos às perdas de sólidos no equipamento. Os resultados apresentados na Tabela 4.27 mostram que a qualidade do ajuste corresponde a uma percentagem de variação explicada pela regressão de 77,32%

comparada a uma variação máxima explicável de 99,93%. O coeficiente de correlação sugere um ajuste pouco satisfatório dos resultados preditos pelo modelo aos obtidos através da combinação linear da eficiência de produção de pó com a retenção de sólidos. A razão entre o F calculado e o F tabelado para 95% de confiança é 1,07, conforme mostra a Tabela 4.27. Este valor praticamente coincide com o menor valor para o qual uma regressão é considerada significativa ($F_{\text{cal}}/F_{\text{tab}} > 1$).

O gráfico ilustrado na Figura 4.36 mostra que a qualidade do ajuste é razoável para a região que corresponde à Perdas inferiores a 60%. Entretanto, o gráfico ilustrado na Figura 4.37 indica a inadequação do modelo de primeira ordem ajustado, uma vez que a distribuição dos resíduos não é aleatória. Verifica-se resíduos negativos praticamente em todas as regiões do gráfico, excetuando-se os resíduos positivos relativos ao ponto central.

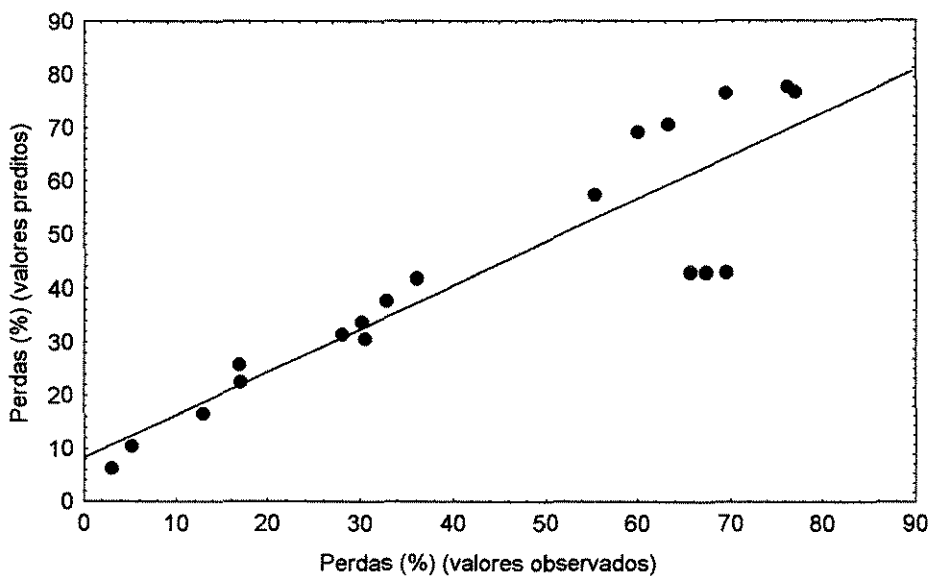


Figura 4.36 – Valores observado versus valores preditos – Perdas (%)

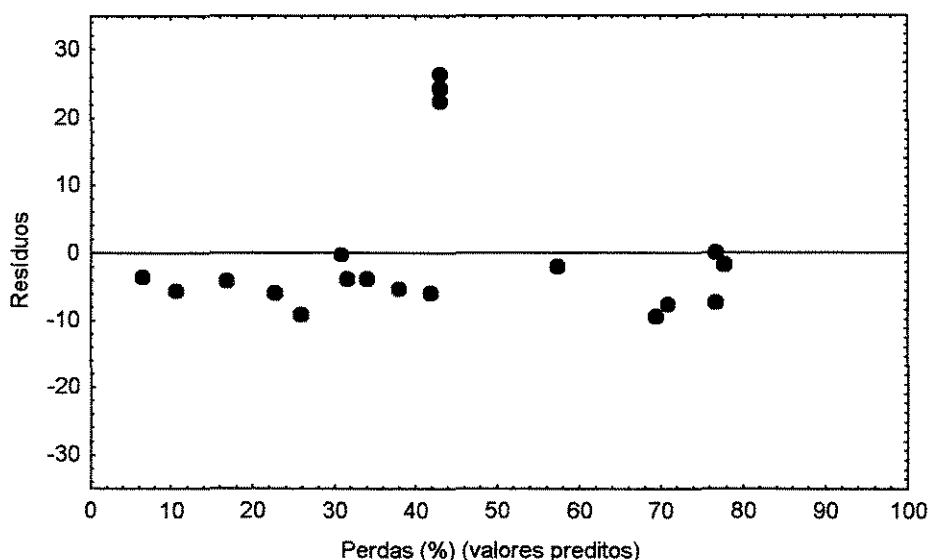


Figura 4.37 – Distribuição dos resíduos – Perdas (%)

A razão MQ_{faj}/MQ_{cp} , mostrada na Tabela 4.27 é 97,92. Este valor é bastante elevado e muito superior a $F_{7,2} = 19,35$, comprometendo assim a qualidade do ajuste do modelo de primeira ordem proposto. A inadequação dos modelos de primeira ordem aos dados da retenção de sólidos e perdas de sólidos no equipamento sugerem a ampliação dos mesmos para modelos de ordem superior.

A análise de variância do modelo linear ajustado aos dados do ângulo de repouso do leito após a secagem apresentou, conforme mostra os dados da Tabela 4.27, resultados insatisfatórios. A percentagem de variação explicada pela regressão é 45,88% comparada a uma variação máxima explicável de 98,01%. O coeficiente de correlação 0,677 indica que os valores preditos pela equação ajustada não reproduzem as observações experimentais. A razão entre o F calculado e o F tabelado é 0,06, confirmando que a regressão não é significativa.

O gráfico ilustrado na Figura 4.38 confirma a má qualidade do modelo linear ajustado aos dados do ângulo de repouso do leito após a secagem.

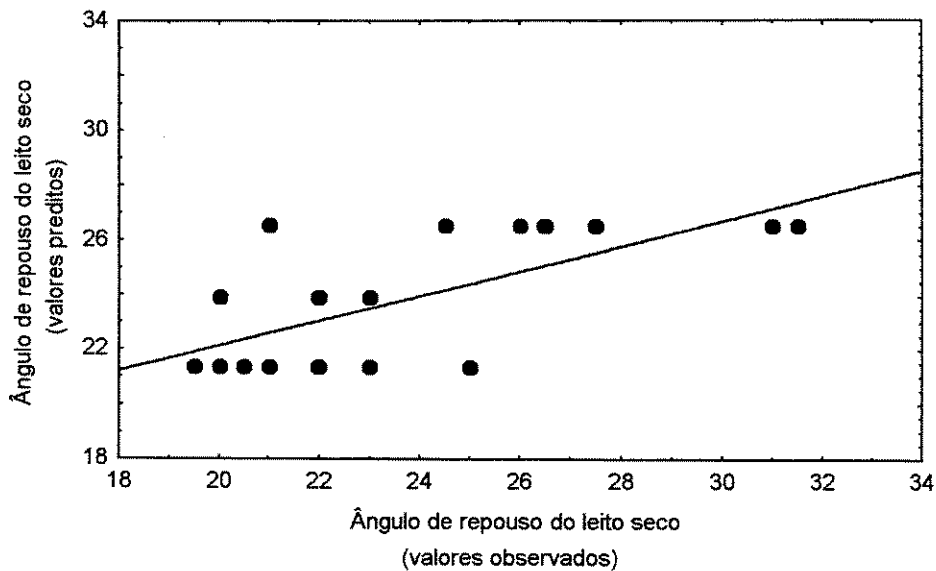
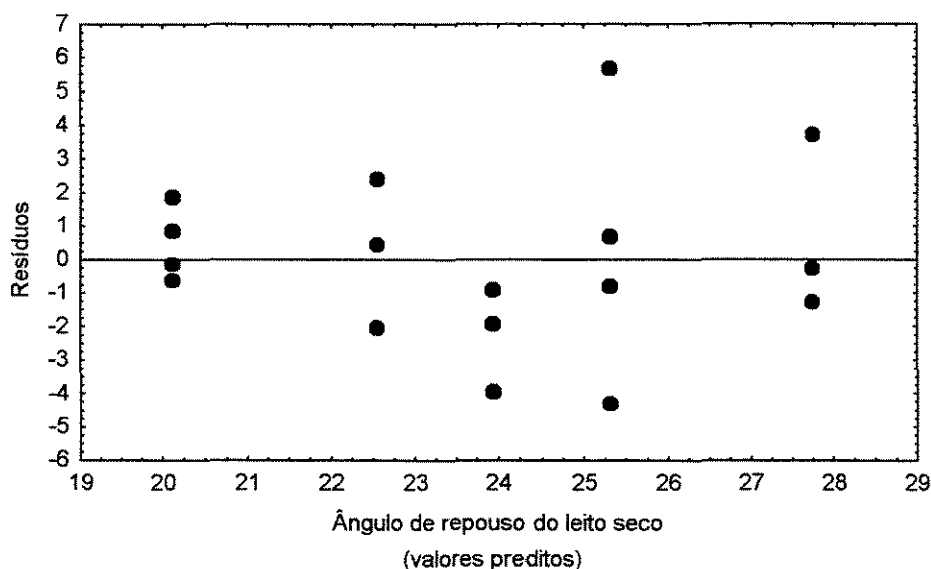


Figura 4.38 – Valores observados versus valores preditos – θ_s

Observa-se na Figura 4.39 que a distribuição dos resíduos é aleatória. O cálculo da razão MQ_{faj}/MQ_{ep} fornece um valor igual a 3,50, muito pequeno quando comparado ao valor tabelado para 95% de confiança que corresponde a $F_{15,2} = 19,43$. Este resultado, em conformidade com o comportamento dos resíduos, sugere uma importante interferência do erro aleatório nos resultados da análise de variância do modelo ajustado às observações experimentais do ângulo de repouso do leito após a secagem. Observações semelhantes foram apresentadas na discussão dos resultados da análise de variância do ângulo de repouso do leito com adição de polpas.

Figura 4.39 – Distribuição dos resíduos – θ_s

Para os ângulos de repouso a identificação da falta de ajuste devido ao erro aleatório das medidas, implicaria em uma nova análise estatística, com diminuição da confiabilidade. De acordo com os dados apresentados na Tabela III.1, do Apêndice III, as variações em relação ao valor médio obtidos em todos os ensaios, tanto para o ângulo de repouso das partículas molhadas como secas é de aproximadamente 4° , para um desvio médio das medidas da ordem de 1° . Mesmo considerando-se que o desvio das medidas é relativamente alto, quando comparado com a faixa de variação tanto do ângulo de repouso das partículas molhadas como do ângulo de repouso das partículas com o filme seco aderido, optou-se por não se realizar nova análise estatística, restringindo-se a análise dos efeitos das composições apenas aos efeitos principais identificados preliminarmente nos resultados do planejamento fatorial fracionário, Tabelas 4.20 e 4.24, cuja discussão considera-se contemplada no item 4.5.3.

De acordo com a análise de variância, os modelos ajustados tanto para a retenção de sólidos com para as perdas apresentaram falta de ajuste bastante evidenciada nos gráficos dos resíduos. A análise dos resultados, fica portanto, restrita aos efeitos principais das variáveis de composição, previamente identificados nos resultados do planejamento fatorial fracionário, apresentados nas tabelas 4.22 e 4.23. A análise preliminar apresentada no item 4.6.2, é complementada, discutindo-se os efeitos principais das variáveis de

composição que se mostraram significativas, para a retenção de sólidos e perdas de sólidos nas paredes do equipamento.

A influência do açúcar no sentido de promover acumulação e instabilidade do jorro na secagem de pastas e suspensões é conhecida e amplamente discutida na literatura, conforme cita, MARTINEZ et al. (1995), entre outros. Polpas com elevadas concentrações de açúcares, principalmente redutores de acordo com RAMOS (1997), promovem a formação de películas fortemente aderidas à superfície das partículas, cujo atrito e impacto entre as partículas não são suficientes para rompê-las à medida que a secagem prossegue. Devido ainda à característica grudenta dos açúcares, ocorre a formação de aglomerados de partículas, que comprometem a qualidade do jorro, provocando problemas de instabilidade que muitas vezes culminam no colapso do jorro. A instabilidade, conforme discussão anterior, se dá principalmente no momento da alimentação, quando sob efeito da temperatura, as partículas molhadas com a polpa apresentam maior tendência de se aglomerarem. Justifica-se assim o efeito positivo do açúcar sobre a retenção.

Segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), é muito difícil precisar as relações entre a composição das matérias graxas e suas propriedades funcionais tais como: a capacidade de untar (lubrificar, engordurar); a textura quebradiça mesmo em temperatura ambiente, porém ao mesmo tempo fundente à temperatura da boca; a capacidade que possuem certos produtos graxos usados em docerias e pastelarias de emulsionarem ao ar e lubrificar a textura dos alimentos.

O importante efeito negativo da gordura sobre a retenção de sólidos está relacionado, conforme justifica MARTINEZ et al. (1995) com a formação de regiões de baixo impacto mecânico sobre a superfície das partículas, reduzindo a dureza do material depositado sobre elas, o que conseqüentemente facilita a quebra da película aderida e o arraste do pó. O caráter lubrificante interfere na dinâmica do leite, promovendo maior circulação de sólidos e aumentando conseqüentemente o número de colisões entre as partículas o que por sua vez também facilita a fratura do filme aderido.

Com relação ao efeito negativo do amido sobre a retenção de sólidos, a discussão apresentada na análise das curvas características com respeito a pressão de jorro estável, contempla o efeito do amido sobre a retenção de sólidos. Conforme discutido anteriormente a presença do amido interfere de forma importante na dinâmica do leite, promovendo

melhor escoabilidade das partículas e melhor estabilidade ao leite quando se efetua a alimentação das polpas. Isto se reflete em maior circulação de sólidos, um dos fatores que propicia uma menor retenção. Vale ressaltar que no decorrer da secagem, sob efeito da temperatura a influência negativa do amido sobre a retenção de sólidos pode deixar de existir ou passar a influir positivamente na retenção de sólidos, em virtude de modificações nas suas propriedades físicas, principalmente reológicas.

Das variáveis de composição estudadas nesta etapa do trabalho, a concentração de pectina é a que menor efeito produz sobre a retenção de sólidos. Na discussão prévia sobre os efeitos das composições sobre as variáveis fluidodinâmicas, foi observado que a polpa cuja composição só diferia da polpa de manga natural na concentração de pectina, fixada no nível máximo, foi a que proporcionou melhor estabilidade ao leite e melhor circulação de partículas em níveis mais baixos de vazão de ar. Desta forma se pode deduzir que o efeito negativo da pectina sobre a retenção se deve em parte à melhoria das condições fluidodinâmicas do leite.

Por outro lado, segundo CHEFTEL e CHEFTEL (1983), a pectina presente nas frutas favorece a manutenção da polpa e de outras substâncias em suspensão e causam turvação. O mesmo autor afirma que no processamento de frutas e vegetais, a presença da pectina dificulta a filtração e a clarificação. A despectinização torna-se então necessária e é comumente empregada no processamento industrial de sucos de frutas, para facilitar a separação de partículas em suspensão por sedimentação ou filtração.

Na secagem em leite de jorro de polpas com elevadas concentrações de pectina, a influência da pectina no sentido de manter uma distribuição uniforme de partículas dispersas na polpa parece ter favorecido o processo, no sentido de diminuir a retenção.

Esperava-se que o efeito da geleificação provocado por elevadas concentrações de pectina, sob efeito da temperatura, com modificações importantes no comportamento reológico das polpas, viesse a prejudicar a estabilidade do leite, entretanto este efeito não foi observado.

As perdas foram obtidas a partir dos dados de retenção e eficiência mediante o balanço de sólidos no secador. Entretanto, as observações experimentais registradas em todos os ensaios com respeito às perdas, conforme a discussão preliminar apresentada no

item 4.5.3 respalda uma discussão mais detalhada sobre os efeitos das variáveis de composição sobre esta variável.

O efeito principal da variável concentração de açúcar sobre a variável resposta perdas, é não significativo e condiz parcialmente com as observações experimentais. No ensaio 2 com eficiência nula, não foi observado pó disperso sobre às paredes da coluna, entretanto, verificou-se camadas de partículas coladas à superfície das paredes, principalmente na parte cônica da coluna. Considerando, que o cálculo da retenção foi feito extrapolando-se a razão MR/MI para todo o leito a partir das amostras coletadas após a secagem, o material aderido as partículas coladas às paredes do equipamento foi contabilizado neste cálculo. Portanto, para os ensaios em que foram observadas camadas de partículas coladas às paredes do equipamento, a determinação das perdas a partir do balanço de sólidos alimentados, recuperados e retidos no leito, ficou prejudicada.

Com respeito às variáveis de composição, concentração de gordura e de amido, os efeitos positivos e significativos sobre a variável resposta perdas, conforme citado anteriormente, são respaldados pelo registro das observações experimentais. Associada à presença do amido, as secagens de polpas com altas concentrações de gordura foram acompanhadas de elevadas perdas nas paredes do equipamento, dispersas sobre a forma de pós finos, semelhante, conforme citado anteriormente, a camadas de farinha de trigo polvilhadas sobre superfícies untadas com manteiga.

4.7.3 – Análise das Superfícies de Resposta

A comparação dos valores de F tabelados com relação aos obtidos pelos modelos para a queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó garante que os modelos apresentam uma quantidade de variação devido ao modelo ajustado bem superior a variação não explicada, mostrando que os valores experimentais são bem representados pelos modelos ajustados.

Verifica-se desta forma que os dois modelos são estatisticamente validados, sendo utilizados para gerar as superfícies de resposta.

4.7.3.1 – Análise das Superfícies de Resposta para a Queda de Pressão de Jorro Estável

Nas Figuras 4.40 a 4.45 são mostradas as superfícies de resposta, para ΔP_{jes} , construídas para todas as combinações possíveis de variação de duas variáveis de composição, mantendo as outras duas fixadas no ponto central. Para facilitar a análise das superfícies de resposta da queda de pressão de estável, rescreve-se a Equação 4.14:

$$\begin{aligned} \Delta P_{jes} = & 580,52 - 68,38Y_{açu} + 38,75Y_{ami} + 33,93Y_{açu}Y_{gor} - 43,89Y_{gor}Y_{ami} \\ & + 36,06Y_{gor}Y_{ami}Y_{pec} \end{aligned} \quad (4.14)$$

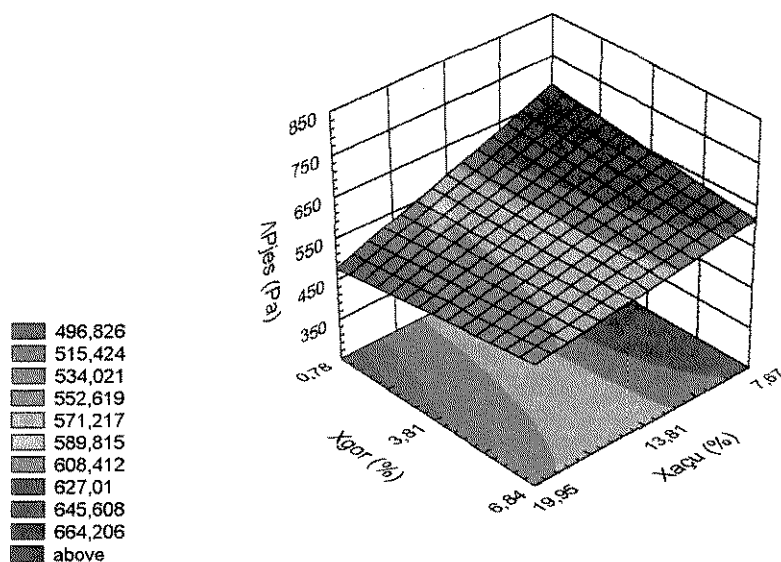


Figura 4.40 – Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{açu}$ e X_{gor} para $X_{ami}=2,59\%$ e $X_{pec}=1,25\%$

O comportamento da queda de pressão de jorro estável frente à variações nas concentrações de açúcar e de gordura, quando as concentrações de amido e pectina são fixadas no ponto central, conforme mostra a Figura 4.40, é complexo. A influência do açúcar é negativa e tanto maior quanto menor é o teor de gordura. Nos níveis extremos de teores de açúcar a influência da gordura é pequena e apresenta sentidos opostos, diminuindo e aumentando ΔP_{jes} quando os teores de açúcar são mínimos e máximos,

respectivamente. À medida que a concentração de açúcar se aproxima do valor médio entre os extremos (ponto central), a queda de pressão de jorro estável deixa de sofrer influência da concentração de gordura. Este comportamento ilustra a influência positiva da interação $Y_{\text{aç}} \cdot Y_{\text{gor}}$ sobre ΔP_{jes} , conforme mostra a Equação 4.14, e está relacionado com a questão da estabilidade do leito e a escoabilidade. A estabilidade do leito, conforme discutido no item 4.4.3 tende a ser comprometida ao se processar polpas com elevadas concentrações de açúcar e baixos teores de gorduras. A instabilidade é acompanhada de bruscas diminuições na queda de pressão, conforme discussão anteriormente apresentada. Por outro lado, melhores condições de escoabilidade podem promover estabilidade ao jorro em níveis mais baixos de queda de pressão. O açúcar prejudica a escoabilidade do leito uma vez que promove aderência entre as partículas, enquanto a gordura devido à característica lubrificante facilita.

O comportamento de ΔP_{jes} observado através da superfície de resposta pode ser explicado da seguinte forma: O aumento da concentração de gordura melhora a escoabilidade das partículas diminuindo conseqüentemente a queda de pressão. Para baixas concentrações de gordura, quando a concentração de açúcar é elevada ocorre a formação de aglomerados de partículas que prejudica a dinâmica do leito, conforme discussão já apresentada, havendo formação de um canal preferencial por onde as partículas soltas circulam livremente, o que se traduz em diminuição da queda de pressão e instabilidade. Nestas condições, o efeito negativo do açúcar é o mais importante. Com o aumento da concentração de gordura, a escoabilidade das partículas aumenta minimizando os problemas da instabilidade, e da queda de pressão. Não foi observado problemas de instabilidade do jorro no processamento de polpas com baixas concentrações de açúcar; a queda de pressão diminui com o aumento da concentração de gordura, em decorrência das melhores condições de escoabilidade. Em níveis médios de concentração de açúcar (em torno do ponto central) os efeitos contrários promovidos pela concentração de açúcar, de forma individual e combinada com a concentração de gordura, se anulam e a queda de pressão praticamente não sofre variação.

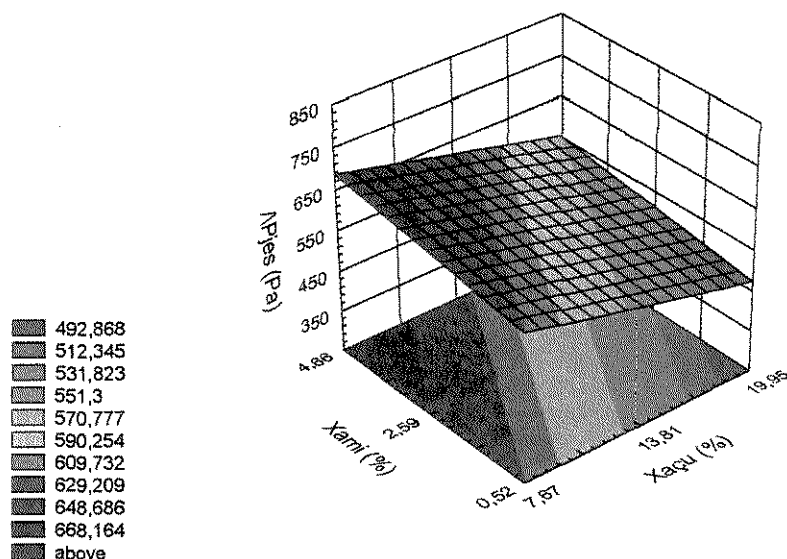


Figura 4.41 – Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=3,81\%$ e $X_{pec}=1,25\%$

A Figura 4.41 mostra a influência positiva da concentração de amido frente à influência negativa do açúcar sobre a queda de pressão de jorro estável, quando as concentrações de gordura e pectina são fixadas no ponto central. Verifica-se que ΔP_{jes} é menos sensível à variação na concentração de amido do que à variação no teor de açúcar, comprovando o importante efeito do açúcar ilustrado na Tabela 4.26.

Os efeitos do açúcar sobre ΔP_{jes} já foram contemplados na discussão anterior. Na ausência de interação entre as concentrações de açúcar e amido quando as demais concentrações estão fixadas no ponto central, discute-se apenas o efeito positivo da concentração de amido sobre a queda de pressão de jorro estável.

Observa-se na superfície de resposta ilustrada na Figura 4.41, que o amido atenua o efeito da instabilidade provocada por elevadas concentrações de açúcar. Este resultado está respaldado no efeito do amido sobre a escoabilidade das partículas molhadas com a polpa, avaliada através das medidas de θ_m , cujo efeito da composição de amido é negativo, conforme ilustra a Tabela 4.26. O registro das observações experimentais mostram que os maiores problemas de instabilidade acontecem exatamente quando se efetua a alimentação da polpa. As possíveis interações entre a água e as demais composições, principalmente de açúcar, são responsáveis pelos problemas de aderência e formação de aglomerados que

comprometem a qualidade do jorro. O efeito do amido no sentido de promover melhor escoabilidade ao leite ameniza os problemas iniciais de instabilidade, refletido na queda de pressão. À medida que a secagem prossegue o efeito do amido sobre a escoabilidade diminui, certamente em decorrência do aumento da temperatura que provoca mudanças na sua estrutura molecular de acordo com a discussão apresentada no item 4.2. A gelatinização das polpas com o aumento da concentrações de amido sob efeito da temperatura é um dos fatores que contribui para o efeito positivo do amido sobre ΔP_{jes} , mesmo em baixos níveis de concentração de açúcar.

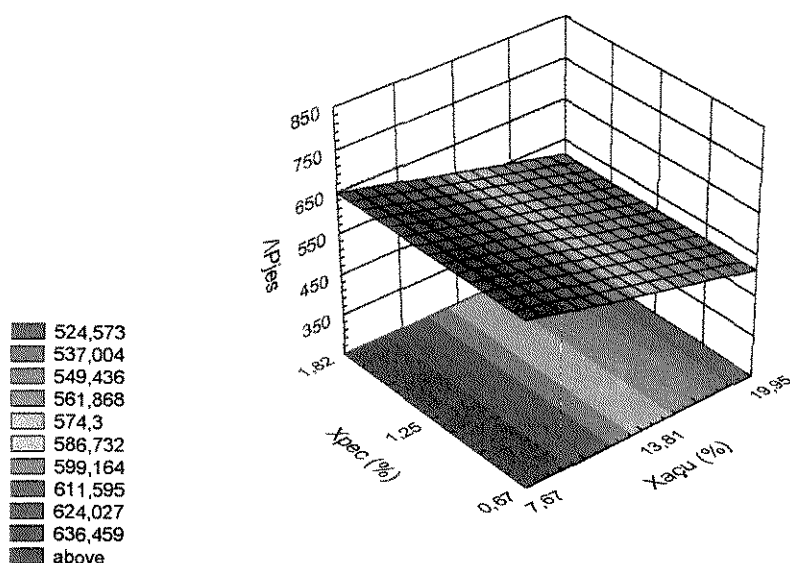


Figura 4.42 – Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de $X_{açu}$ e X_{pec} para $X_{gor}=3,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$

Conforme mostra a Figura 4.42 e de acordo com os efeitos ilustrados na Tabela 4.26, não há influência da pectina sobre ΔP_{jes} quando as concentrações de gordura e amido encontram-se no ponto central, para qualquer nível de concentração de açúcar compreendido ente os limites máximos e mínimos em que foram conduzidos os ensaios.

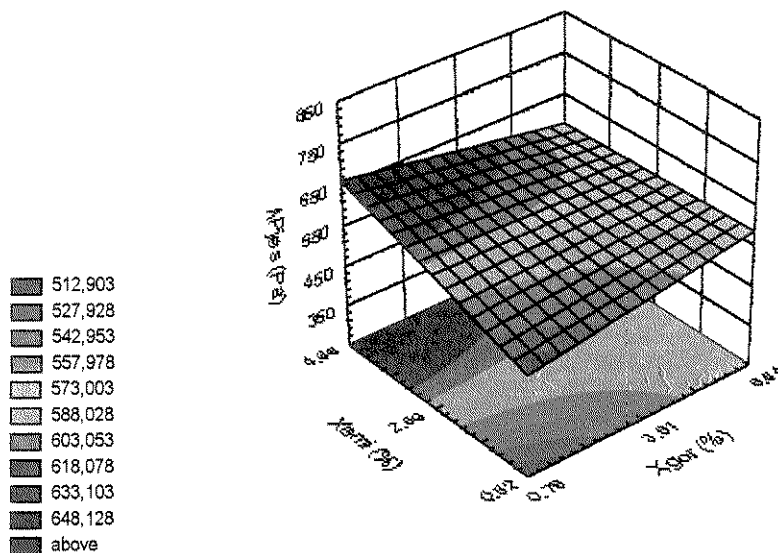


Figura 4.43 – Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,25\%$

O efeito negativo da interação $X_{gor} \cdot X_{ami}$ sobre a queda de pressão de jorro estável, quando as concentrações de açúcar e pectina são mantidas no ponto central, é bastante evidenciado quando ambas concentrações são mínimas, conforme mostra a superfície de resposta ilustrada na Figura 4.43. Este resultado é coerente com a equação 4.14 e com as observações experimentais. Polpas com concentração intermediária de açúcar, e baixas concentrações de amido e gordura também provocam instabilidade no leite, observação esta constatada tanto com as polpas modificadas como com polpas naturais, de acordo com o comportamento típico apresentado pelo leite de jorro na secagem da acerola, relatado em LIMA et al. (1995).

Em níveis elevados de concentração de gordura, problemas relativos a instabilidade do leite são minimizados, e a queda de pressão atinge um patamar intermediário, praticamente independente da concentração de amido.

Quando a concentração de amido é elevada, há um leve decaimento de ΔP_{jes} com o aumento da concentração de gordura, devido à característica lubrificante da mesma.

Em níveis de concentração de amido próximo ao ponto central, ΔP_{jes} deixa de sofrer a influência da gordura. Este resultado condiz com o discutido na análise da influência da gordura quando $X_{açu}$ se aproxima do valor médio enquanto X_{ami} e X_{pec} são

fixados no ponto central (Figura 4.40). Nesta região as superfícies de resposta praticamente reproduzem a mesma combinação de variáveis composição.

Para concentrações de amido abaixo do valor médio, ΔP_{jes} diminui com o decrescimento da concentração de gordura, devido aos problemas de instabilidade já discutidos, atingindo o valor mínimo quando as concentrações de gordura e amido são mínimas.

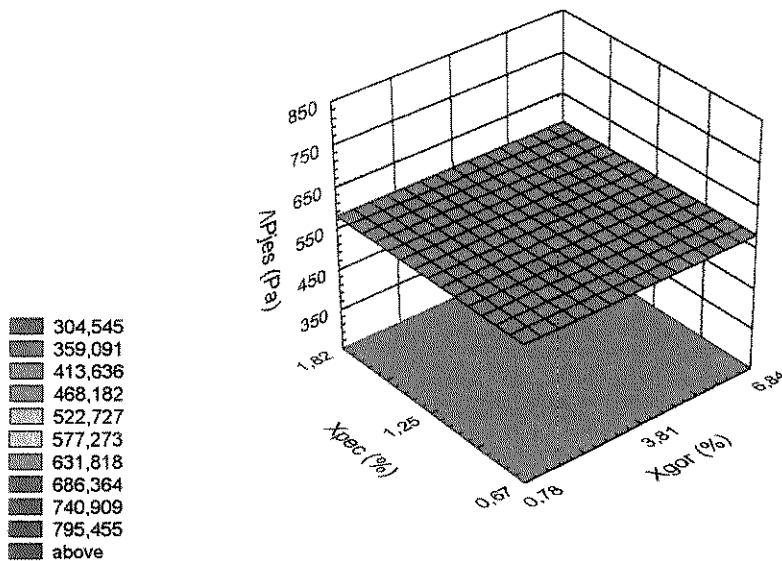


Figura 4.44 – Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{pec} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$

Não há qualquer influência da gordura ou da pectina sobre a queda de pressão de jorro estável quando as concentrações de amido e açúcar são mantidas no ponto central, conforme mostra a superfície de resposta ilustrada na Figura 4.44. Este resultado já se encontra contemplado na discussão anterior e concorda com a equação 4.14.

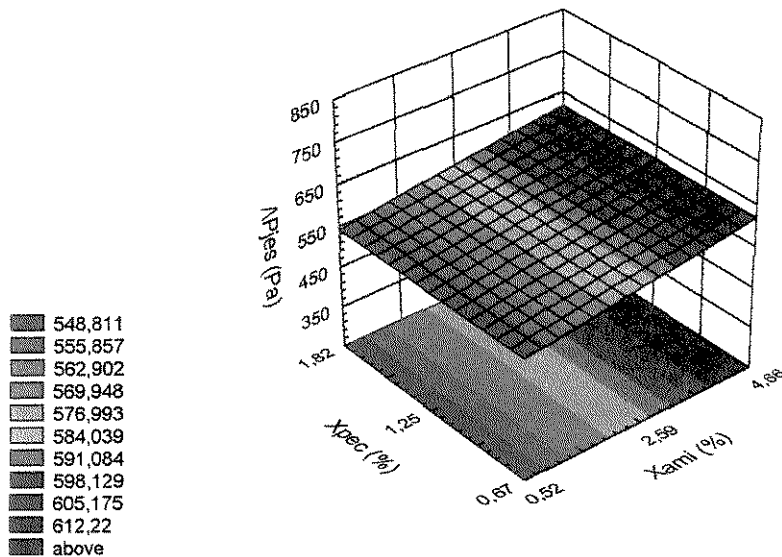


Figura 4.45 - Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{pec} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81$ e $X_{gor}=3,81$

A superfície de resposta ilustrada na Figura 4.45 mostra que para concentrações de açúcar e gordura fixadas no ponto central, não há interferência da pectina na queda de pressão de jorro estável, independentemente da concentração de amido, sofrer variações entre os limites máximos e mínimos em que foram conduzidos os ensaios.

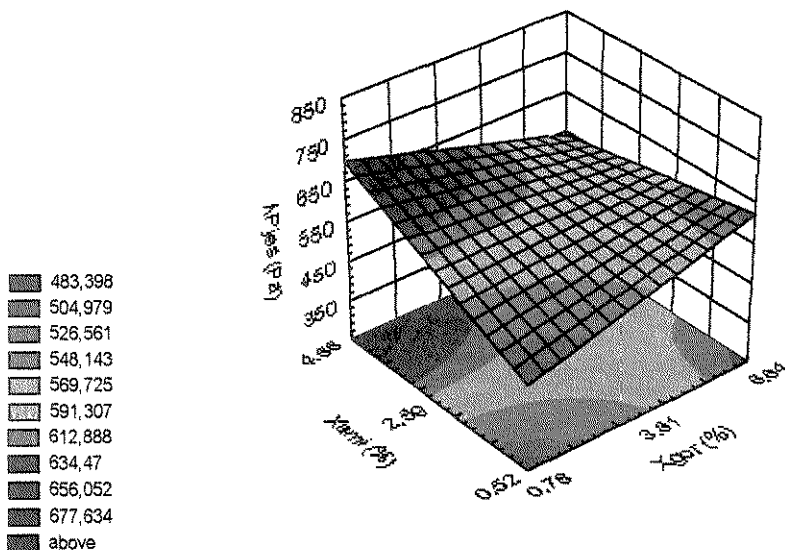


Figura 4.46 - Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=0,67\%$

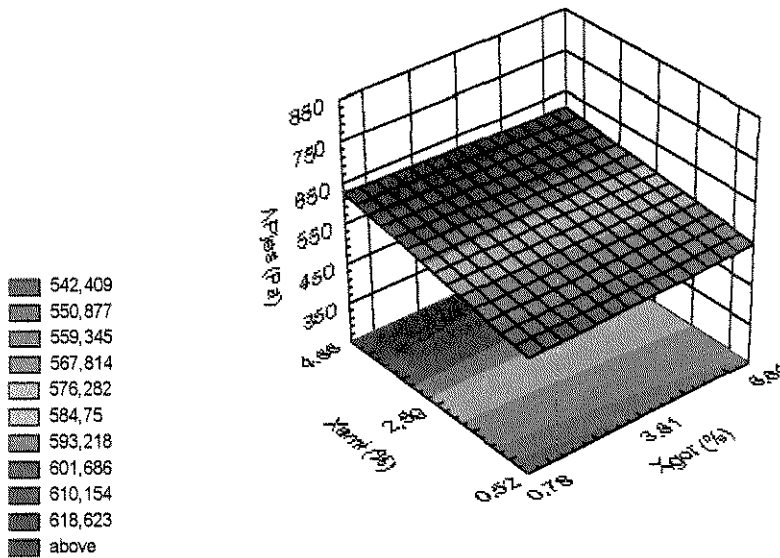


Figura 4.47 - Superfície de resposta da queda de pressão de jorro estável em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,82\%$

O efeito positivo da interação $X_{gor} \cdot X_{ami} \cdot X_{pec}$ sobre ΔP_{jes} fica evidenciado quando analisa-se conjuntamente as superfícies de resposta ilustradas nas Figuras 4.43, 4.46 e 4.47. Estas superfícies de resposta ilustram o comportamento de ΔP frente à X_{ami} e X_{gor} quando $X_{açu}$ é fixada no ponto central e X_{pec} mantém-se no ponto central (Figura 4.43), é mínima (Figura 4.46), e máxima (Figura 4.47).

Comparando-se as superfícies de resposta das Figuras 4.43, e 4.47, verifica-se que os problemas de instabilidade do leito em presença de polpas com baixas concentrações de amido e gordura e teores intermediários de açúcar e pectina são agravados quando a concentração de pectina é mínima.

Quando a concentração de pectina é máxima, conforme mostra a superfície de resposta ilustrada na Figura 4.47, os efeitos do açúcar são minimizados pela elevada concentração de pectina, não se identificando problemas de instabilidade no jorro, mesmo em condições mínimas de concentração de gordura e amido. Observa-se, ainda, que ΔP_{jes} , praticamente independe da concentração de gordura para qualquer nível de concentração do amido, dentro da faixa pesquisada. Mantém-se entretanto, um moderado aumento de ΔP_{jes} com o aumento da concentração de amido.

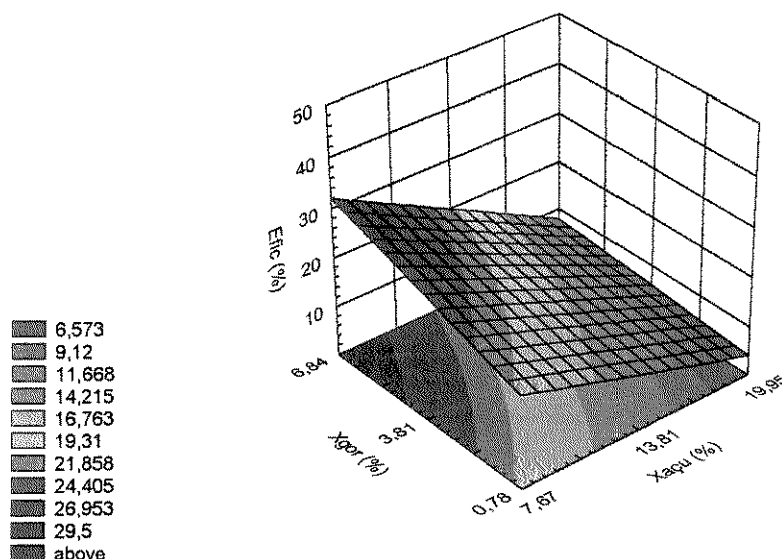


Figura 4.48 – Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açúcar}$ e $X_{gordura}$ para $X_{amido} = 2,59\%$ e $X_{pectina} = 1,25\%$

A Figura 4.48 ilustra os efeitos das concentrações de açúcar e gordura na eficiência de produção de pó, quando as concentrações de amido e pectina são mantidas no ponto central. Reafirma-se o efeito negativo do açúcar e positivo da gordura, identificado na Tabela 4.26. O valor da eficiência é bem susceptível à variação da concentração de açúcar e pouco sensível à variação da concentração de gordura. Verifica-se que a região que apresenta maiores eficiências encontra-se na faixa de baixas concentrações de açúcar.

Para elevadas concentrações de açúcar, a eficiência praticamente não é afetada pela variação da concentração de gordura, enquanto para teores intermediários (ponto central) aumenta de cerca de 11,4% para 20%, quando a concentração de gordura passa de um mínimo de 0,78% para um máximo de 6,54%. No nível mínimo de concentração de açúcar, a eficiência aumenta com a concentração de gordura de um mínimo de 18,7% para 32%, valor máximo alcançado para as possíveis combinações representadas na superfície de resposta ilustrada na Figura 4.48.

Para uma variação máxima na concentração de açúcar de 7,67% a 19,95%, a eficiência cai de 18,7% para 4%, de 30% para 5,3%, e de 32% para 8% para concentrações de gordura mínimas, no ponto central e máximas, respectivamente. Estes resultados

A análise destas superfícies evidencia a importância dos efeitos das interações entre as variáveis no sentido de atenuar ou mesmo anular os efeitos principais das variáveis de composição. Por outro lado, variáveis que pela análise dos efeitos principais praticamente não interferem na queda de pressão relacionada com a instabilidade do leito, de forma combinada exercem influência das mais relevantes, conforme foi observado com a concentração de gordura e pectina.

4.7.3.2 – Análise das Superfícies de Resposta para a Eficiência de Produção de Pó

Nas Figuras 4.48 a 4.53 são mostradas as superfícies de resposta para a eficiência de produção de pó, construídas para todas as combinações possíveis de variação de duas variáveis de composição, mantendo as outras duas fixadas no ponto central.

Inicialmente rescreve-se a Equação 4.16 para facilitar a apresentação e discussão das superfícies de resposta:

$$Efic = 15,68 - 9,71Y_{acu} + 4,31Y_{gor} + 5,89Y_{ami} + 3,49Y_{pec} - 2,36Y_{acu}Y_{gor} + 2,55Y_{ami}Y_{pec} \quad (4.16)$$

Deve-se levar em consideração na análise destas superfícies que a eficiência de produção de pó foi determinada a partir das massas de polpa alimentada e de pó coletado e das umidades da polpa e do pó, estando pois sujeita a erros mínimos na determinação das medidas, em comparação com as medidas do material retido no leito. Entretanto, analisando-se o processo de secagem das polpas no leito de jorro, é evidente que a eficiência é função das quantidades de material que fica retido e que se perde, agregado às paredes do equipamento. Deste modo, os efeitos principais e das interações entre as variáveis de composição sobre a retenção de sólidos e sobre as perdas são de fundamental importância para explicar o comportamento das superfícies de resposta da eficiência de produção de pó. A inadequação dos modelos de primeira ordem, ajustados aos dados relativos à retenção e perdas, prejudica a análise das superfícies de resposta da eficiência, em virtude da incerteza dos efeitos das interações entre as composições sobre aquelas variáveis.

condizem com o importante efeito do açúcar associado ao efeito da interação $X_{\text{açu}} \cdot X_{\text{gor}}$, também negativo em relação à eficiência, de acordo com a Equação 4.16 e Tabela 4.26.

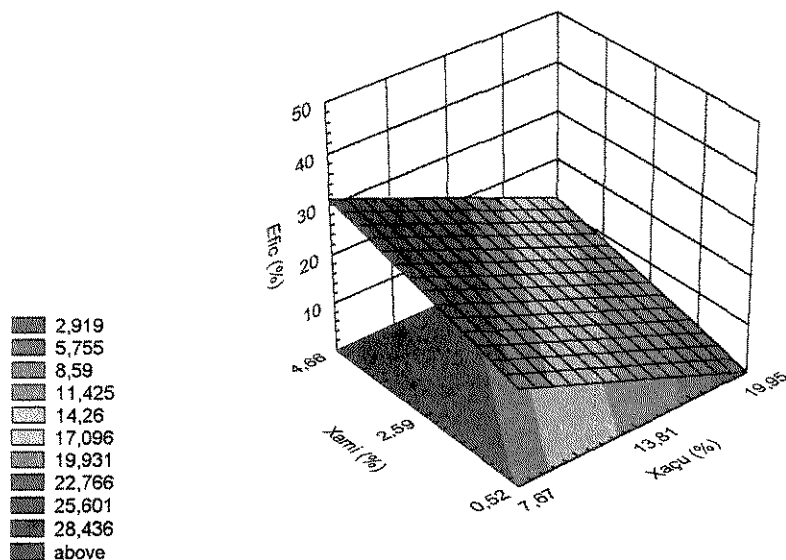


Figura 4.49 – Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{\text{açu}}$ e X_{ami} para $X_{\text{gor}} = 3,8$ e $X_{\text{pec}} = 1,25$

A Figura 4.49 mostra a influência da concentração de amido na eficiência de produção de pó frente à influência negativa do açúcar, quando as concentrações de gordura e pectina se encontram no ponto central. Observa-se que a eficiência é menos sensível à variação da concentração de amido do que à variação no teor de açúcar, conforme identificado na Tabela 4.26.

As maiores variações se verificam para baixas concentrações de amido, quando o teor de açúcar varia entre as concentrações máxima e mínima. Variações importantes também são verificadas nas polpas com elevados teores de açúcar, quando a concentração de amido varia entre o valor mínimo e máximo. As maiores eficiências são atingidas na região correspondente à elevadas concentrações de amido associada a baixos teores de açúcar.

No ponto central a eficiência também é mais sensível à variação na concentração de açúcar. A ausência de interações estatisticamente significativas entre $Y_{\text{açu}}$ e Y_{ami} , de

acordo com a equação 4.16 e a Tabela 4.26, justifica o comportamento observado através da análise da superfície de resposta ilustrada na Figura 4.49.

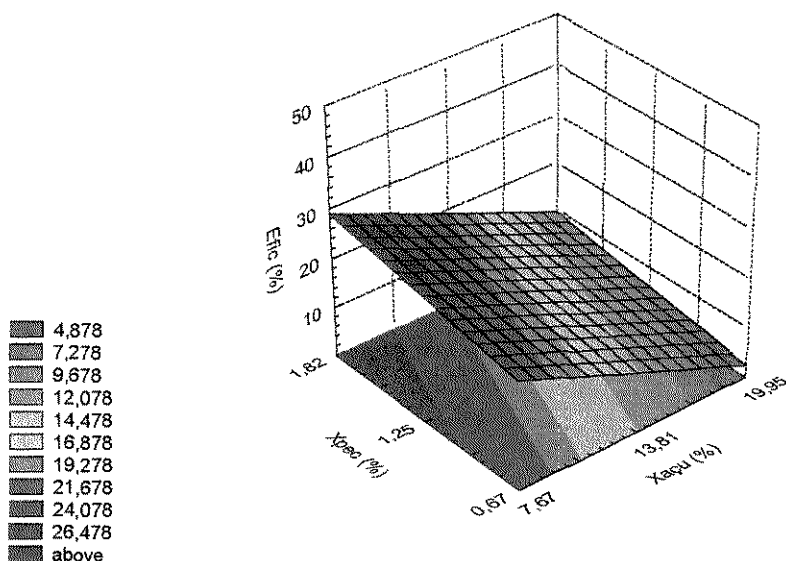


Figura 4.50 – Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{pec} para $X_{gor}=3,81\%$ e $X_{ami}=2,59\%$

Conforme ilustra a Figura 4.50, o efeito da concentração de pectina sobre a eficiência de produção de pó é positivo. Verifica-se entretanto, que a eficiência é pouco sensível à variação na concentração de pectina, quando as concentrações de gordura e amido são mantidas no ponto central. Este comportamento é justificado pelo pequeno efeito da pectina sobre a eficiência de produção de pó e pela inexistência de interações entre $Y_{açu}$. Y_{pec} de acordo com a equação 4.16 e Tabela 4.26.

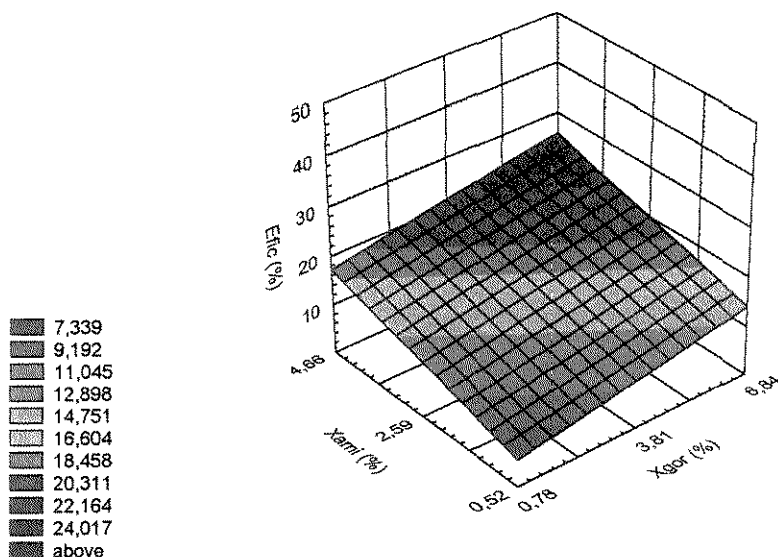


Figura 4.51 – Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{gor} e X_{ami} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{pec}=1,25\%$

De acordo com a superfície de resposta ilustrada na Figura 4.51, quando as concentrações de açúcar e pectina encontram-se no ponto central, as influências positivas das concentrações de gordura e amido são praticamente as mesmas, visto que não há efeitos de interações entre estas variáveis de composição e que os efeitos principais apresentam valores muito próximos conforme mostra a Tabela 4.26 e a Equação 4.16. Este mesmo comportamento é observado na superfície de resposta ilustrada na Figura 4.52, em relação aos efeitos de X_{gor} e X_{pec} sobre a eficiência de produção de pó, quando as concentrações de açúcar e amido são fixadas no ponto central.

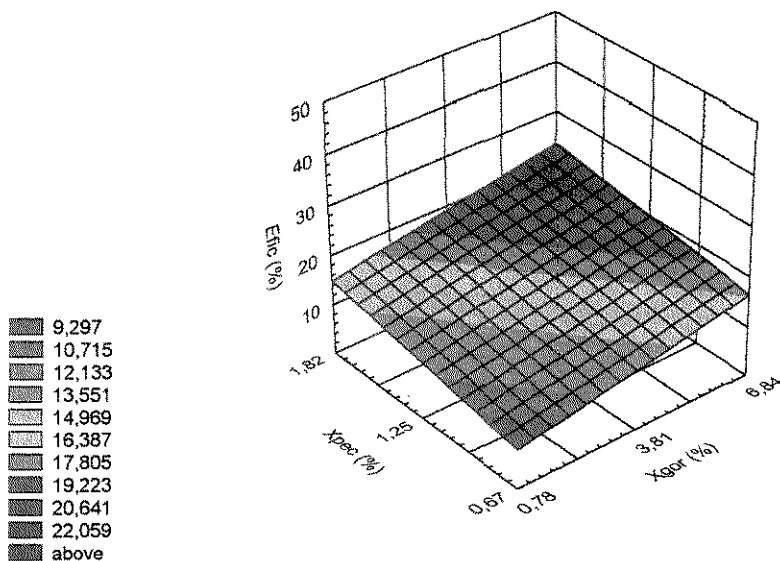


Figura 4.52– Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{gor} e X_{pec} para $X_{açu} = 13,81\%$ e $X_{ami} = 2,59\%$

O comportamento da eficiência frente à concentração de amido e pectina, quando as concentrações de gordura e açúcar se encontram no ponto central, é ilustrado na Figura 4.53. Para baixas concentrações de amido, próximas ao limite mínimo de $X_{ami} = 0,52\%$, não há praticamente interferência da pectina sobre a eficiência. Este resultado é justificado pelos efeitos da concentração de pectina (principal) e da interação $Y_{ami} \cdot Y_{pec}$ apresentarem valores muito próximos e de mesmo sinal (positivo), conforme mostra a Equação 4.16 e a Tabela 4.26. Para baixas concentrações de pectina, observa-se um suave aumento da eficiência com a concentração de amido, uma vez que o efeito principal da concentração de amido é mais de duas vezes superior ao efeito da interação $Y_{ami} \cdot Y_{pec}$, conforme Tabela 4.26 e Equação 4.16.

Em níveis de concentração de amido mais elevadas, acima de $2,59\%$, aumentos na concentração de pectina promovem aumentos significativos na eficiência de produção de pó. O efeito do amido sobre a eficiência para níveis elevados de concentração de pectina, acima de $1,25\%$ é ainda mais evidente. O efeito positivo da interação, discutido anteriormente, associado aos efeitos positivos principais destas variáveis de composição, justifica este comportamento.

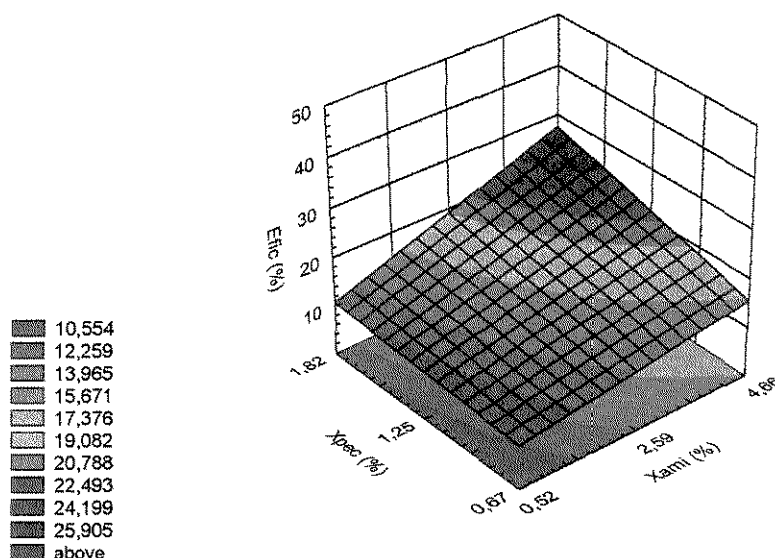


Figura 4.53 – Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de X_{ami} e X_{pec} para $X_{açu}=13,81\%$ e $X_{gor}=3,81\%$

Dentro dos limites de concentração utilizados no planejamento experimental e de acordo com o modelo estatístico ajustado aos dados experimentais representado pela Equação 4.16, a composição que fornece a maior eficiência, acima de 40%, é $X_{açu}=7,67\%$ ($Y_{açu}=-1$), $X_{gor}=6,84\%$, ($Y_{gor}=1$), $X_{ami}=4,66\%$ ($Y_{ami}=1$) e $X_{pec}=1,82$ ($Y_{pec}=1$). A Figura 4.54 exibe a superfície de resposta para a melhor composição.

A Figura 4.55 exibe a superfície de resposta, cujas combinações das composições se reproduz, de acordo com o modelo ajustado na mais baixa eficiência (nula), $X_{açu}=19,95\%$ ($Y_{açu}=1$), $X_{gor}=0,77\%$, ($Y_{gor}=-1$), $X_{ami}=0,52\%$ ($Y_{ami}=-1$) e $X_{pec}=0,67$ ($Y_{pec}=-1$).

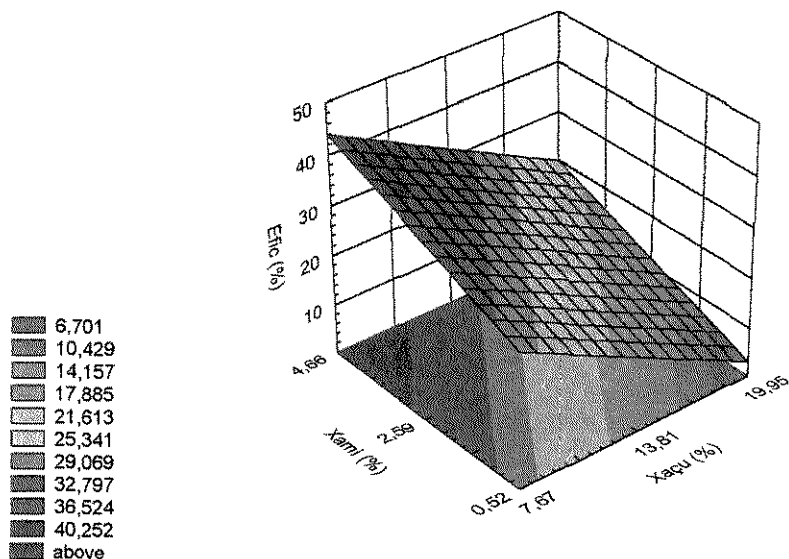


Figura 4.54– Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=6,84\%$ e $X_{pec}=1,82\%$

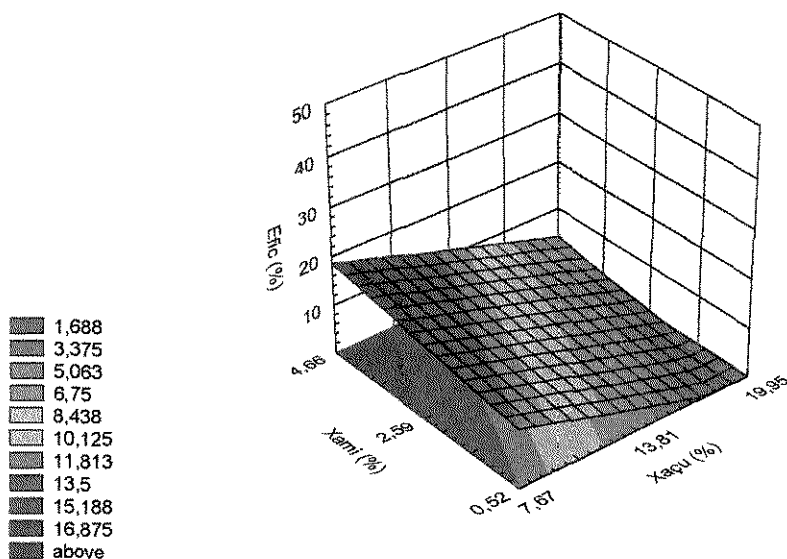


Figura 4.55– Superfície de resposta da eficiência de produção de pó em função de $X_{açu}$ e X_{ami} para $X_{gor}=0,77\%$ e $X_{pec}=0,67\%$

4.7.4 - Validação dos Modelos Estatísticos

Os resultados obtidos nos ensaios de secagem de polpas de frutas tropicais, apresentados nas Tabelas VI.8 e 4.13, foram utilizados para se verificar a validação dos modelos estatísticos para estimativa da queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó.

Como pela análise de regressão, ambos os modelos mostraram-se estatisticamente significativos e preditivos, avalia-se que a extrapolação dos limites de aplicação dos mesmos não compromete o teste de validação com as polpas de frutas cujas concentrações de alguns constituintes estão fora dos limites de concentração fixados nos ensaios com as polpas modificadas.

Na Tabela 4.28 as composições que não estão compreendidas na faixa de aplicação dos modelos, e afastam-se significativamente dos limites (-1, +1) de aplicabilidade dos mesmos, encontram-se destacadas.

Tabela 4.28 - Variáveis de composição codificadas e respostas relativas aos ensaios de secagem de polpas de frutas

Polpas	Y _{açu}	Y _{gor}	Y _{fib}	Y _{ami}	Y _{pec}	ΔP_{jes} (Pa)	Efic (%)
Acerola	-1,09	-1,15	-0,93	-1,1	-1,1	171,5	5,88
Cajá	-1,29	-0,84	-1,33	-0,94	-0,94	514,5	13,34
Umbu	-1,48	-0,77	-1,03	-0,44	-0,44	548,8	15,0/12,4
Seriguela	-0,50	-1,16	-0,81	1,29	-1,04	497,4	41,0
Manga	-1,06	-1,09	-1,03	-1,01	-1,09	463	15,8/14,4

Nas Figuras 4.56 e 4.57 são comparados os resultados referentes aos valores experimentais e preditos pelos modelos para a queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó, respectivamente. Nestas figuras também são incluídos os dados relativos aos ensaios com as polpas modificadas. Há de se considerar que as

condições operacionais relativas a razão Q/Q_{jm} , mantidas nos ensaios com as polpas naturais, não são as mesmas fixadas nos ensaios com as polpas modificadas, conforme já foi discutido no item 4.5.2.

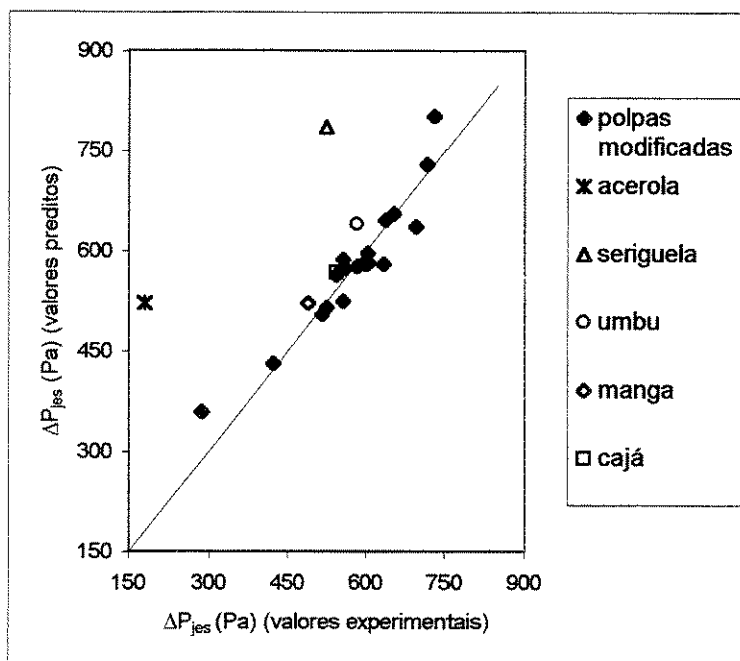


Figura 4.56 - Queda de pressão de jorro estável - Ensaio com polpas naturais e modificadas – Valores observados versus valores preditos

Conforme mostra a Figura 4.56, excetuando-se os importantes desvios observados em relação ao ΔP_{jes} dos ensaios com as polpas de seriguela e, principalmente, de acerola, cujos valores experimentais correspondem respectivamente a cerca de 67% e 35% dos valores estimados, os valores preditos pelo modelo para as quedas de pressão de jorro estável apresentam uma boa concordância com os valores experimentais obtidos nos ensaios com as demais frutas.

De acordo com os resultados ilustrados na Figura 4.57, para o ensaio com a polpa de seriguela a eficiência predita pelo modelo apresenta um desvio negativo grande relativo ao valor experimental. O valor predito pelo modelo corresponde a 34% da eficiência de produção de pó determinada neste ensaio.

Para os ensaios de secagem realizados com as polpas de cajá e umbu e principalmente de manga, se verifica uma boa concordância entre os valores preditos e os experimentais, cujos desvios são compatíveis com os observados nos ensaios com as polpas modificadas.

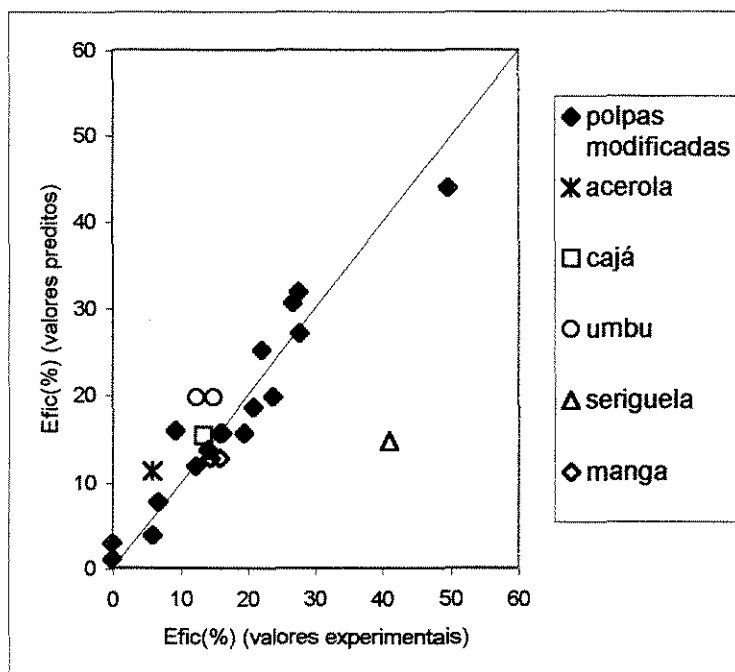


Figura 4.57 – Eficiência de produção de pó – Ensaios com polpas de frutas naturais e modificadas – Valores observados versus valores preditos

A falta de ajuste dos modelos aos dados experimentais relativos à secagem das polpas de acerola e seriguela, poderiam ser explicados a partir das seguintes considerações:

1- o modelo empírico ajustado aos dados de ΔP_{jes} obtidos nos ensaios com as polpas modificadas já mostrava no gráfico dos resíduos, Figura 4.25, um importante desvio na estimativa da queda de pressão do ensaio 2 que apresentou problemas de instabilidade. O ensaio com a polpa de acerola também apresentou problemas de instabilidade, e o comportamento fluidodinâmico do jorro registrado nas observações experimentais coincide com o observado naquele ensaio;

2- com relação a diferença entre a eficiência estimada pelo modelo e a determinada no ensaio de secagem com a polpa de acerola, esta poderia ser justificada pela

baixa relação Q/Q_{jm} empregada neste ensaio, da ordem de 1,05, conforme foi mostrado na Tabela 4.13. LIMA et al (1995) relata sérios problemas de aglomeração na secagem de polpa de acerola em leito de jorro com temperaturas acima de 60°C . Acima desta faixa de temperatura a polpa de acerola sofria caramelização, que tanto prejudicava o desempenho fluidodinâmico do leito como comprometia a qualidade do produto obtido. Com base nestas informações, a secagem da acerola foi conduzida no presente trabalho com o sistema de aquecimento desligado, cuja temperatura do ar alimentado ficou na faixa de 50°C . Portanto, as condições operacionais atípicas deste ensaio podem justificar os desvios dos valores preditos pelo modelo em relação aos dados experimentais;

3- o ensaio com a polpa de seriguela não apresentou qualquer problema de instabilidade e foi conduzido em condições operacionais praticamente idênticas às fixadas nos ensaios com as polpas modificadas, razão $Q/Q_{jm}=1,21$ e temperatura de 70°C . O importante desvio, principalmente em relação ao valor predito pelo modelo estatístico para a eficiência de produção de pó, poderia então estar associado a problemas de incompatibilidade entre a composição da polpa que foi analisada e a composição da polpa processada no leito de jorro. Conforme amplamente discutido no item 4.2, a polpa de seriguela contém elevada concentração de amido. A análise estatística dos resultados obtidos com as polpas modificadas identificou o importante efeito da concentração de amido sobre a eficiência de produção de pó e ΔP_{jes} , tanto como efeito principal, como pelas interações com as outras variáveis de composição. Por outro lado, em termos de composição de frutas, conforme citado na literatura, a concentração de amido é uma das mais sensíveis ao grau maturação. Cita-se como exemplo o nível de concentração de amido em bananas da mesma variedade. Segundo ITAL (1981), o teor de amido na variedade *prata* varia de um máximo de 25,92% na fruta verde a um mínimo de 3,41% na fruta madura. Considerações similares são feitas em relação ao teor de amido da goiaba (0,08% a 0,02%) e da manga. Na goiaba, o desaparecimento quase total do amido com o amadurecimento é acompanhada pela redução do teor de açúcares redutores e pelo aumento do teor de sacarose. Com respeito a manga, segundo ITAL (1981), “à medida que a fruta vai crescendo aumenta proporcionalmente o teor de amido, mas quando ela completa o seu desenvolvimento fisiológico inicia-se a sua redução, com a transformação em açúcares”. Não foi encontrada na literatura consultada, dados relativos às transformações bioquímicas que ocorrem na seriguela durante seu amadurecimento. A elevada concentração de amido

identificada pelo comportamento reológico da polpa desta fruta sob efeito do aquecimento e confirmada na análise físico química (5,26%), indica entretanto que o grau de maturação desta fruta deve exercer influência das mais importantes na sua composição. Considerando-se portanto, a incerteza na concentração de amido da polpa de seriguela desidratada no leito de jorro, os desvios entre os valores preditos pela correlação, tanto para a eficiência de produção de pó , como para a queda de pressão de jorro estável estariam justificados.

As justificativas apresentadas quanto aos desvios dos valores estimados em relação aos observados mostram portanto que, embora sujeitos a todas as restrições, relativas às variações inerentes aos produtos naturais e às condições operacionais, os modelos empíricos reproduzem de forma satisfatória os valores de ΔP_{jes} e da eficiência de produção de pó na secagem de polpas de frutas em leito de jorro, podendo ser considerados úteis para fins preditivos.

4.8 – Cinética de Produção de Pó e de Retenção de Sólidos no Leito

4.8.1 – Cinética de Produção de Pó - Ensaios com Polpas Modificadas e com Polpas de Frutas

De acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3, foram realizados alguns ensaios de secagem com as polpas modificadas (ensaios 1*, 2*, 4*, 5*, 6*, 8* e 15[#]), procedendo-se alimentações de 50 g de polpa em intervalos regulares de 40 min. Os ensaios com sobrescrito em asterisco foram realizados na fase preliminar deste trabalho, quando se estava ajustando a metodologia experimental. Embora tenham sido conduzidos em condições operacionais similares, o número de bateladas e as condições de vazão do ar, relativas a razão Q/Q_{im} não foram as mesmas. Nos ensaios 1* e 15[#] foi possível se efetuar 5 alimentações, com o leito operando em condições estáveis. Devido a baixíssima ou total inexistência de produção de pó, observada nos ensaios 2*, 5*, e 8*, na terceira alimentação, estes experimentos foram interrompidos. A interrupção do Ensaio 6* se processou na quarta alimentação.

Com relação ao Ensaio 15[#], este foi realizado na segunda fase do trabalho, quando já se dispunha dos dados relativos à fluidodinâmica, o que permitiu fixar as mesmas condições de vazão do ar mantidas nos ensaios com todas as polpas modificadas. Um resumo das condições operacionais e dos resultados obtidos nestes ensaios são mostrados na Tabela 4.29. O cálculo da eficiência acumulativa de produção de pó ao longo dos ensaios foi feito de acordo com a Equação 4.17

$$Efic = \frac{(1 - U_{pó}) \sum_{i=1}^N M_{pó}^i}{(1 - U_{polpa}) \sum_{i=1}^N M_{polpa}^i} \cdot 100 \quad (4.17)$$

N= número de bateladas

Para facilitar a análise e discussão dos resultados, a Tabela 4.30 reproduz os dados relativos aos ensaios 1, 2, 5, 6, 8 e 15, para a primeira alimentação de polpa da segunda etapa experimental.

Uma análise preliminar dos resultados apresentados na Tabela 4.29, mostra que as elevadas retenções observadas nos ensaios 2*, 5* e 6*, sem arraste perceptível de pó, estão associadas a instabilidade fluidodinâmica verificada nestes ensaios, no caso das polpas 2 e 6, logo na primeira alimentação. A partir da segunda alimentação, com a reumidificação da película aderida à superfície das partículas, os problemas de instabilidade acentuavam-se, culminando em colapso do jorro na terceira alimentação. O jorro colapsava e depois retornava, porém as condições fluidodinâmicas do leito ficavam visivelmente prejudicadas. Os resultados obtidos nestes ensaios são compatíveis com os obtidos na segunda etapa experimental, visto que nos ensaios 2,5 e 6 as condições operacionais no que diz respeito à razão Q/Q_{jm} , fixadas em torno de 1,25, são muito próximas das condições em que foram conduzidos os ensaios 2*,5* e 6*, conforme ilustra as tabelas 4.29 e 4.30. Observa-se entretanto uma pequena produção de pó no Ensaio 5, não verificada no Ensaio 5*.

Tabela 4.29 - Resultados dos ensaios de secagem com alimentações intermitentes de polpa
– Polpas naturais e modificadas

Ensaio	U_{polpa} (%)	Q/Q_{jm}	Bateladas	MR/MI (%)	Rets (%)	RetT (%)	Efic (%)	θ_s	$U_{pó}$ (%)
1*	78,4	1,52	5 x 50	1,33	55,5	14,13	30,94	36,0	5,22
2*	79,1	1,19	3 x 50	1,06	76,94	18,05	0	40,0	-
5*	78,1	1,28	3 x 50	1,18	78,07	20,12	0	39,0	-
6*	77,4	1,35	4 x 50	1,92	89,0	24,97	0	42,0	-
8*	74,6	1,41	3 x 50	0,64	38,25	10,40	0	19,5	-
15	72,4	1,25	5 x 50	1,16	35,35	10,99	15,40	30,0	11,6
Umbu	88,7	1,42	4 x 50	0,94	78,02	11,30	20,47	30,5	12,1
Seriguela	75,5	1,23	6 x 50	1,38	37,99	11,02	44,14	30,0	7,47
Cajá	86,0	1,34	6 x 50	1,23	58,30	10,18	24,15	34,0	7,49
Manga	78,8	1,23	4 x 50	1,31	62,40	15,78	22,14	40,5	7,58

No Ensaio 8*, a retenção de material no leito foi muito baixa, o leito apresentou boa performance fluidodinâmica, porém não verificou-se coleta de pó no ciclone. Ao se desmontar o equipamento havia bastante material aderido às paredes da coluna e ao tubo curvo que conecta o ciclone. Este ensaio caracteriza-se então por elevadas perdas de material, também verificadas no Ensaio 8, porém com menos intensidade. No ensaio 8 a produção de pó também foi nula, porém verificou-se uma maior retenção de sólidos (58,5%), certamente devido à menor razão Q/Q_{jm} fixada neste ensaio (1,24) em relação ao Q/Q_{jm} do Ensaio 8*(1,41), de acordo com as tabelas 4.29 e 4.30.

Tabela 4.30 - Resultados dos ensaios de secagem com 1 alimentação de 50 g de polpa e $Q/Q_{jm}=1,25\pm0,05$

Ensaio	MR/MI (%)	Rets (%)	RetT (%)	Efic (%)	θ_s	$U_{pó}$ (%)
1	0,32	68,95	15,89	14,06	24,5	6,09
2	0,45	97,07	21,88	0,00	31	-
5	0,38	75,02	19,21	12,19	31,5	14,59
6	0,55	94,89	27,73	0,00	26,5	-
8	0,32	58,37	15,54	0,00	20	-
15	0,12	12,56	5,63	27,99	22	11,8

O Ensaio 1* foi conduzido em condições fluidodinâmicas favorecidas pela elevada razão Q/Q_{jm} . O leito operou em condições estáveis, suportando as 5 alimentações de polpa, sem registro de qualquer sinal de mal funcionamento do jorro. Verificou-se uma razoável produção de pó, com eficiência de produção de 31% e retenção de sólidos de 55,5%. A contabilização destes dados implica em perdas da ordem de 13,5%. Em relação ao Ensaio 1*, o Ensaio 1 com razão Q/Q_{jm} fixada em 1,25, apresentou uma baixa produção de pó, com eficiência de 14%, 69% de retenção de sólidos e perdas da ordem de 17%.

De acordo com a metodologia, definida a partir dos ensaios preliminares, o Ensaio 15 foi conduzido inicialmente para uma única alimentação de polpa. Repetiu-se, então, este

ensaio em condições operacionais idênticas, procedendo-se 5 alimentações de polpa. Embora operando em condições fluidodinâmicas estáveis, ao se efetuar a terceira alimentação o jorro colapsou, retornado logo em seguida, mas passando a operar em níveis mais altos de queda de pressão, anel mais expandido e fonte mais baixa. Na quarta e quinta alimentação não foram registrados problemas de instabilidade, e mesmo no momento em que as polpas foram alimentadas não foram observadas mudanças bruscas na queda de pressão nem na altura da fonte.

O comportamento atípico registrado no Ensaio 15[#] indica que o leito passou por uma fase de transição de regime, mas que atingiu novamente condições de estabilidade em condições fluidodinâmicas diferentes. Supõe-se que o colapso e retorno do jorro foi acompanhado de um novo empacotamento do leito, que passou a operar em condições que favoreceram a estabilidade constatada no decorrer deste ensaio, a partir da terceira alimentação.

Outras observações interessantes relativas aos ensaios 15 e 15[#] também merecem ser registradas: A eficiência de produção de pó inicial do Ensaio 15[#] da ordem de 28% reproduziu a obtida quando se realizou uma única alimentação (Ensaio 15); com o prosseguimento de novas alimentações a eficiência passou a decair, aumentando a retenção de sólidos no leito; a retenção obtida com uma única alimentação da ordem de 12,6% (Tabela 4.30) atingiu 35,5% após as 5 alimentações, conforme mostra a Tabela 4.29. Com relação ao ângulo de repouso, os dados apresentados nas Tabelas 4.29 e 4.30 mostram que após à secagem com 1 alimentação de polpa seu valor corresponde a 22°. Com 5 alimentações as medidas efetuadas no leito seco, registraram um ângulo de repouso de 30°.

Os resultados relativos à secagem das polpas de frutas, discutidos no item 4.5.2 e Tabela 4.13, são ampliados na Tabela 4.29, a qual mostra os dados referentes a retenção de sólidos, ângulo de repouso e eficiência de produção pó para os ensaios completos, com as diversas alimentações de polpas. Não se dispõe, entretanto, de dados relativos à retenção de sólidos e ângulo de repouso, com 1 única alimentação de polpa. As eficiências de produção para a primeira alimentação de polpa, cujos dados foram apresentados na Tabela 4.13 e discutidos também no item 4.5.2, encontram-se ilustradas na Figura 4.59.

Os ensaios de secagem com as polpas de frutas apresentaram comportamento semelhante ao verificado na secagem da polpa 1, principalmente no que se refere a

estabilidade do leito. Destaca-se ainda a boa performance apresentada pelo leito na secagem da polpa de seriguela, cuja eficiência de produção de pó foi bem mais elevada do que a obtida nos ensaios com as outras frutas.

Nas Figuras 4.58 e 4.59 são ilustradas as cinéticas de produção de pó dos ensaios 1* e 15[#], e dos ensaios com polpas de frutas naturais. Devido às diferentes condições operacionais mantidas nestes ensaios, a discussão destes resultados restringe-se apenas à produção uniforme de pó, observada em quase todos os experimentos cujos dados da massa acumulativa em função do tempo são ilustrados na Figura 4.58. Observa-se, neste gráfico, a linearidade da massa acumulativa de pó em função do tempo. Excetuando-se as variações registradas no Ensaio 15[#] este comportamento é verificado para todos os ensaios, indicando que as taxas de produção de pó são praticamente constantes. Os resultados do ajuste linear aos dados experimentais da massa acumulativa em função do tempo, são mostrados na Tabela 4.31.

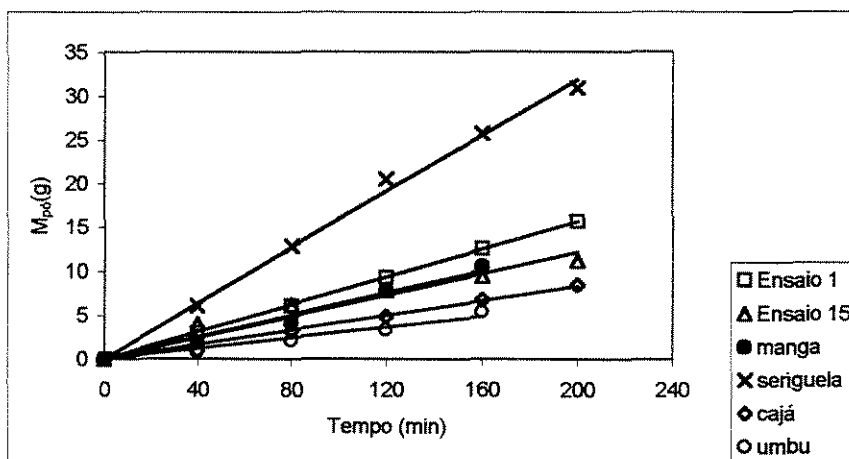


Figura 4.58 – Massa de pó coletado em função do tempo – Ensaios 1*, 15[#] e com polpas de frutas

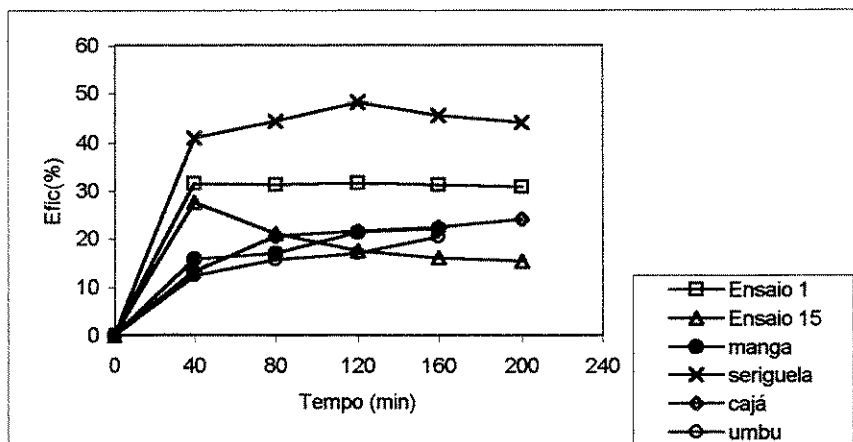


Figura 4.59 – Eficiência de produção de pó em função do tempo – Ensaios 1*, 15[#] e com polpas de frutas

Tabela 4.31 - Resultados da regressão linear

Ensaio	Equação Ajustada	Coefficiente de Correlação
1*	$M_{pó} = 0,0782t$	0,9997
15 [#]	$M_{pó} = 0,0610t$	0,9274
Umbu	$M_{pó} = 0,0309t$	0,9612
Seriguela	$M_{pó} = 0,1597t$	0,9958
Cajá	$M_{pó} = 0,0419t$	0,9915
Manga	$M_{pó} = 0,0635t$	0,9817

Os resultados apresentados na Tabela 4.31, confirmam a produção uniforme de pó nos ensaios com as polpas de frutas e com a polpa modificada 1.

Na Figura 4.59, observa-se que a eficiência de produção de pó ao longo dos ensaios 1* e com polpas de frutas são praticamente constantes, o que respalda a constatação anterior de uniformidade nas taxas de produção de pó. A eficiência representa as taxas acumulativas de produção de pó, relativas às massas alimentadas, ambas expressas em base seca.

Confirma-se através do gráfico ilustrado na Figura 4.59 o comportamento atípico do ensaio com a polpa 15, relatado em parágrafo anterior. A uniformidade da eficiência de produção de pó, a partir da terceira alimentação de polpa fica bem evidenciada neste

gráfico. O baixo coeficiente de correlação obtido no ajuste do modelo linear aos dados cinéticos deste ensaio é decorrente das mudanças de comportamento do leito a partir da terceira alimentação.

Outras observações e considerações importantes, ainda com respeito à cinética de produção de pó dos ensaios com alimentações intermitentes de polpa, merecem ser citadas:

1- a uniformidade na produção de pó, observada em quase todos os ensaios, sugere que embora a quantidade de material acumulado no leito aumente à medida que nova alimentação é efetuada, as taxas de acumulação também são uniformes, permitindo que o leito opere em regime permanente, bem caracterizado pelas medidas uniformes das temperaturas e quedas de pressão ao longo destes ensaios, excetuando-se evidentemente o período de transiência registrado no momento em que as polpas são alimentadas;

2- com relação ao grau de saturação do leito, os resultados obtidos indicam, que nos ensaios com produção uniforme de pó, o grau de saturação máximo não foi atingido. Contrariamente, nos ensaios 2*, 6* e 5*, a saturação máxima foi atingida logo nas primeiras alimentações, o que respalda as discussões relativas à estabilidade do leito, apresentadas no item 4.4.4. Com respeito ao Ensaio 8*, a baixa retenção de sólidos associada às elevadas perdas indica que a saturação máxima não foi alcançada, entretanto os efeitos da composição da polpa 8 favoreceram a acumulação do material sobre as paredes do equipamento, inviabilizando o arraste do pó;

Com a finalidade de se avaliar o efeito das alimentações intermitentes na evaporação de água, calculou-se pela Equação 4.17 a razão entre a quantidade de material retido no leito e a quantidade total de polpa alimentada, definida como retenção total (RetT):

$$RetT = \frac{MR}{\sum_{i=1}^N M_{polpa}^i} \cdot 100 \quad (4.18)$$

onde N= número de bateladas

MR= massa de material retido no leito (g)

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.29 e 4.30 confirmam a evaporação praticamente completa da água, independentemente do número de alimentações efetuadas nos ensaios. As maiores retenções são verificadas exatamente nos ensaios que apresentaram problemas de instabilidade e, evidentemente, se referem às quantidades de sólidos retidos no leito.

De acordo com os dados também apresentados nas Tabelas 29 e 30, excetuando-se o ensaio com a polpa 8, em todos os demais ensaios com as polpas modificadas, o ângulo de repouso aumentou com a quantidade de material retido no leito. Estes resultados encontram-se ilustrados na Figura 4.60 e 4.61. A Figura 4.60, ilustra o aumento de θ_s , (parametrizado em relação ao ângulo de repouso do leito de inertes), com a massa de material retida no leito, relativa a massa de inertes.

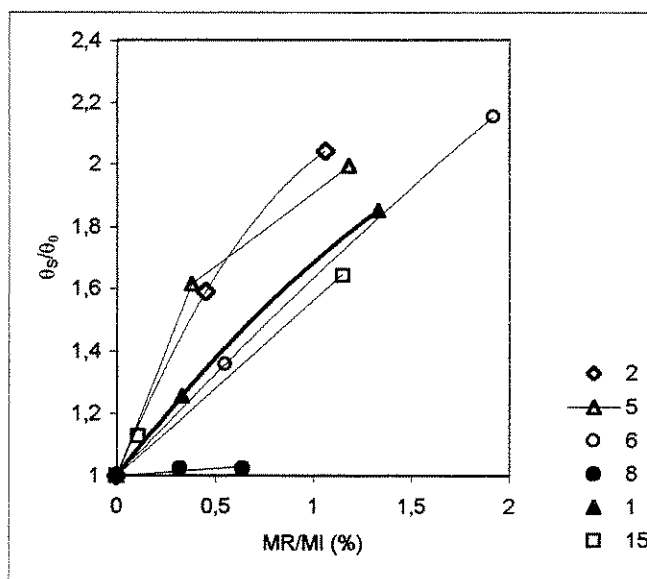


Figura 4.60 – θ_s/θ_0 em função da relação MR/MI

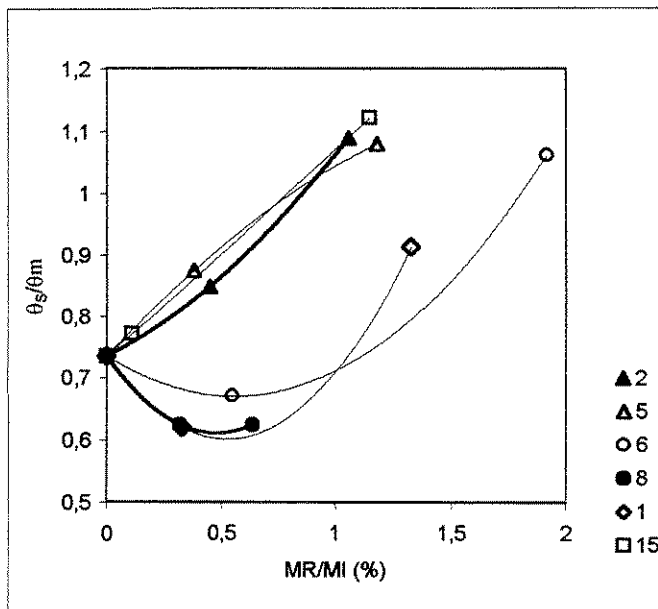


Figura 4.61 – θ_s / θ_m em função da massa retida no leito

Na Figura 4.61 ilustra-se a relação θ_s / θ_m , também em função da massa de material retida no leito relativa a massa de inertes. Considerou-se, nesta figura, que a retenção de material no leito seria nula, quando $\theta_s = \theta_0 = 19,5$ e $\theta_m = \theta_{\text{água}} = 26,5$. Uma observação interessante evidenciada neste gráfico é que nos ensaios onde não foram registrados qualquer problema de instabilidade (1* e 8*), o ângulo de repouso do leito com a película seca aderida não alcançou o valor correspondente ao ângulo do leito molhado com a polpa. Observa-se ainda que nos ensaios 2*, 5* e 15#, para uma mesma razão MR/MI, (~1,1% em média), as relações θ_s / θ_m apresentam valores muito próximos àquela, com ângulos de repouso do leito seco cerca de 10% superiores ao leito molhado. Estes resultados indicam que existe uma importante relação entre os ângulos de repouso e o grau de saturação das polpas no leito. É importante, todavia, se registrar que as curvas ilustradas são apenas indicativas do comportamento do ângulo de repouso frente à retenção de material no leito. A pouca disponibilidade de dados experimentais com respeito a evolução de θ_s , à medida que uma nova alimentação de polpa é efetuada, compromete uma análise mais consistente dos resultados apresentados.

Em virtude de não se dispor de dados quanto a densidade do material desidratado, ou seja do filme aderido às partículas, não foi possível calcular o grau de saturação do leito,

após a secagem; as considerações anteriores no que diz respeito à saturação do leito, são feitas com base nas observações experimentais relativas à estabilidade.

4.8.2 – Cinética de Retenção de Sólidos

Dados relativos à cinética de retenção de sólidos foram determinados, de acordo com a metodologia experimental descrita no item 3.3.11. Foram realizados cinco ensaios com a polpa 18. Para uma única alimentação de polpa e tempos de processamento que variaram entre 5 e 40 min, determinou-se a produção de pó, a quantidade de material retido no leito e o ângulo de repouso. Com esta metodologia foi possível se reproduzir o comportamento destas variáveis ao longo de um ensaio de 40 minutos.

Esses resultados são apresentados na Figura 4.62. Observa-se que a produção de pó nos 10 minutos iniciais é muito baixa, praticamente nula. A partir de 10 minutos a eficiência apresenta um crescimento praticamente linear, observando-se, entretanto, que a taxa de produção de pó é sensivelmente inferior à taxa de remoção de material agregado ao leito. Este resultado confirma a elevada quantidade de material que se desprende do leito, mas fica retido nas paredes do equipamento. A evolução destas perdas de material ao longo do ensaio, também é ilustrada na Figura 4.62.

A diminuição do ângulo de repouso ao longo do tempo acompanha o comportamento observado com a retenção de sólidos. Verifica-se, entretanto, que já nos 5 minutos iniciais, θ/θ_m sofre uma expressiva diminuição. Este resultado é coerente com toda a discussão apresentada com respeito ao efeito da evaporação da água, sobre o ângulo de repouso. Nos 5 minutos iniciais, enquanto a retenção corresponde a, praticamente 100%, a diminuição no ângulo de repouso já é evidente. Aos 10 minutos, verifica-se a diminuição na retenção de sólidos. À medida que o material se desprende das partículas, ou seja, quando inicia-se o processo de ruptura ou demolição da película aderida à superfície das partículas, o ângulo de repouso vai diminuindo, melhorando a escoabilidade do leito. Estes resultados condizem com todas as discussões apresentadas em parágrafos anteriores.

Os dados cinéticos obtidos a partir dos ensaios de retenção, ilustrados na Figura 4.62, confirmam uma série de considerações realizadas ao longo deste trabalho, e consolidam resultados apresentados em outros tópicos, tais como: evaporação praticamente completa da água nos minutos iniciais; inexistência ou insignificante produção de pó no

início do processo; taxas de remoção dos sólidos depositados sobre as partículas inertes visivelmente superiores às taxas de material recolhido no ciclone; elevadas perdas de material nas paredes do equipamento; efeito da evaporação da água sobre o ângulo de repouso, confirmando a maior influência do filme líquido sobre o ângulo de repouso, e a diminuição do mesmo com a retenção de sólidos.

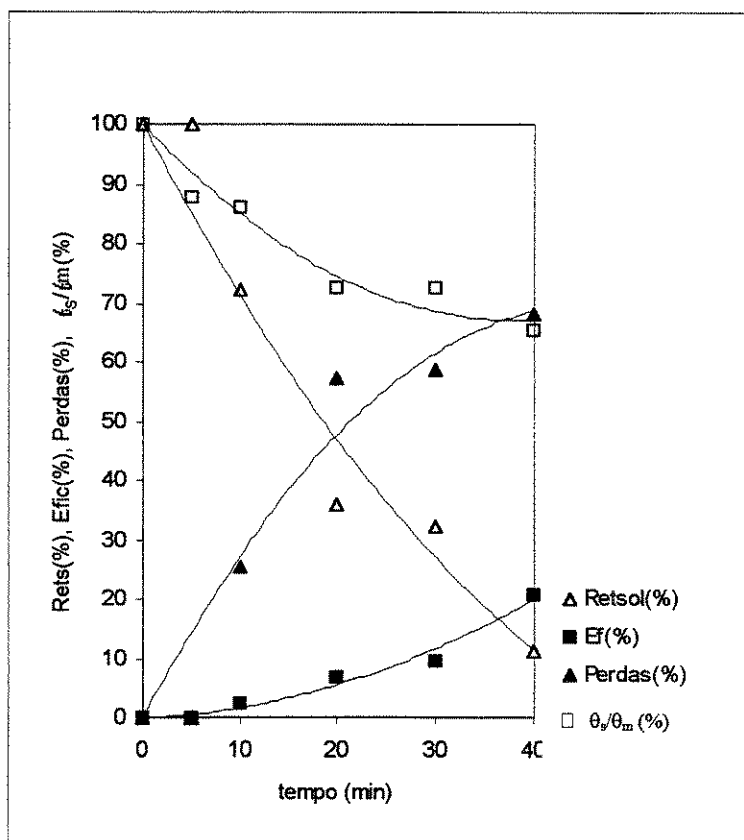


Figura 4.62 - Cinética de produção, retenção e perdas de sólidos e do ângulo de repouso — Ensaio com a polpa 18 (composição no ponto central)

4.9 - Ensaios de Secagem com a Polpa de Composição Otimizada

O modelo empírico ajustado aos dados da eficiência de produção de pó, mostrou-se estatisticamente significativo e preditivo, sendo validado satisfatoriamente com os resultados obtidos na secagem de polpas de frutas. Diante destes resultados, foi solicitada ao especialista em Engenharia de Sistemas na área de pesquisa operacional, Carlos Augusto Cavalcanti de Lima, professor do Departamento de Informática e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, orientação com respeito às metodologias de otimização de modelos empíricos, na forma do que foi ajustado a eficiência de produção de pó, visando-se encontrar a composição que fornecesse a eficiência máxima, numa faixa mais ampliada de concentração que contemplasse as concentrações máximas e mínimas de açúcares redutores, gorduras, amido e pectina presentes nas frutas tropicais.

A metodologia empregada pelo professor Carlos Augusto na otimização do modelo, é mostrada no Apêndice VII. De acordo com os resultados encontrados, o valor máximo da eficiência encontra-se na região de mínima concentração de açúcares e máximas concentrações de gordura, amido e pectina. Assim, dentro da faixa de concentração em que o modelo foi otimizado a composição que forneceria uma eficiência máxima de 80,73%, seria $Y^*_{açu} = -1,35$, $Y^*_{gor} = 3,59$, $Y^*_{ami} = 1,24$, $Y^*_{pec} = 2,68$.

Essas concentrações expressas em frações mássicas, parametrizadas em relação a composição da água, correspondem a $X_{açu} = 5,52\%$, $X_{gor} = 14,69\%$, $X_{ami} = 4,93\%$ e $X_{pec} = 2,78\%$.

Foi preparada uma polpa com a composição otimizada e realizado um ensaio de secagem com 5 alimentações de polpa, para uma vazão de ar de $20,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a uma relação $Q/Q_{jmo} = 1,22$, com temperatura do ar na entrada do secador fixada em 70°C . Os resultados deste ensaio são mostrados nas Figuras 4.63 a 4.66.

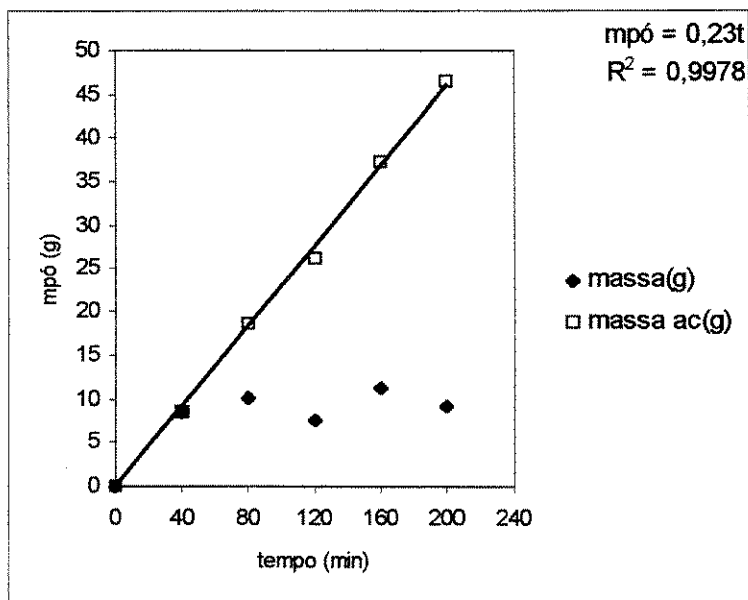


Figura 4.63 - Cinética de produção de pó - Massa acumulada ao longo do ensaio e massa de pó obtida em cada intervalo de alimentação. Ensaio com a polpa otimizada

Conforme se observa nas Figuras 4.63 e 4.64, o ensaio com a polpa otimizada apresentou excelentes resultados, com produção uniforme de pó e eficiência praticamente constante, da ordem de 70%, reproduzindo o comportamento verificado na secagem das polpas de frutas e polpa modificada 1, porém com taxas de produção de pó e eficiência significativamente mais altas.

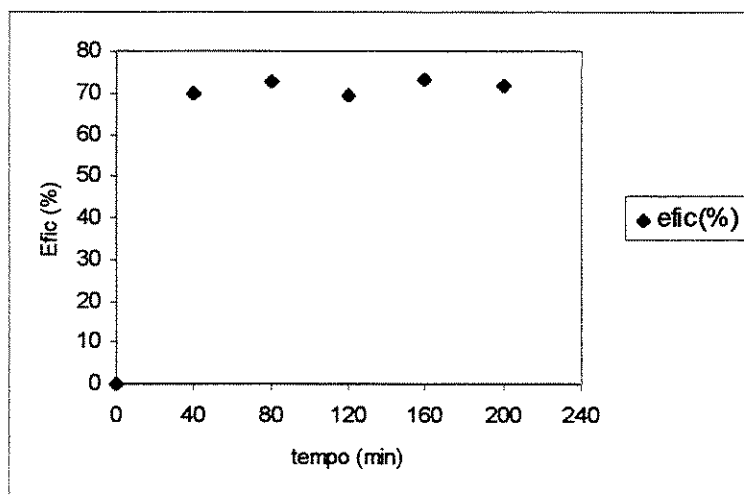


Figura 4.64 - Eficiência de produção de pó - Ensaio com a polpa otimizada

Na primeira alimentação foi acompanhada a produção de pó a cada dois minutos, cujos resultados são mostrados na Figura 4.65.

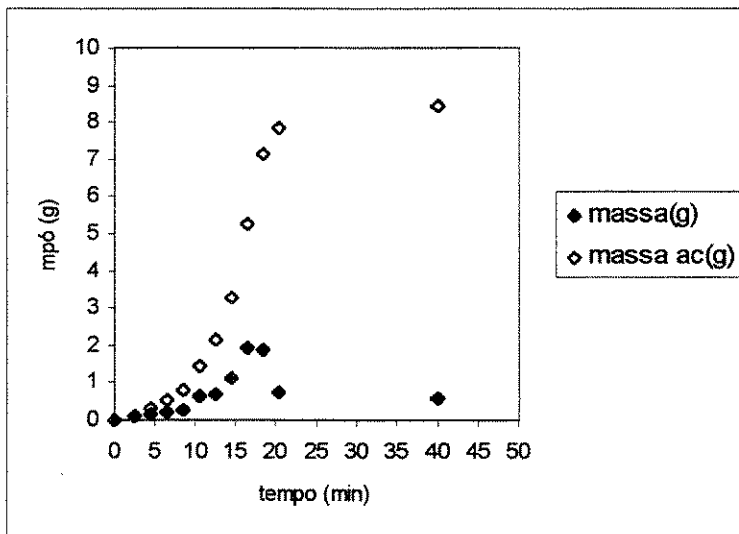


Figura 4.65 - Cinética de produção de pó referente a primeira alimentação. Ensaio com a polpa otimizada

Os resultados apresentados na Figura 4.65 mostram que nos 10 minutos iniciais a produção de pó é muito baixa, o que coincide com todos os resultados apresentados no tópico 4.8, em relação ao ensaio com a polpa 18. Verifica-se que, no intervalo entre 10 e 18 minutos, a produção aumenta, atinge um máximo e passa a decair atingindo uma taxa praticamente constante a partir dos 20 minutos. Este comportamento está, evidentemente, correlacionado com o processo de secagem da película líquida, ruptura e arraste da película desidratada. Os resultados indicam também que neste ensaio, onde as condições de estabilidade do leito foram registradas como das mais favoráveis, o comportamento cinético da produção de pó observado na Figura 4.65 se repete a cada nova alimentação.

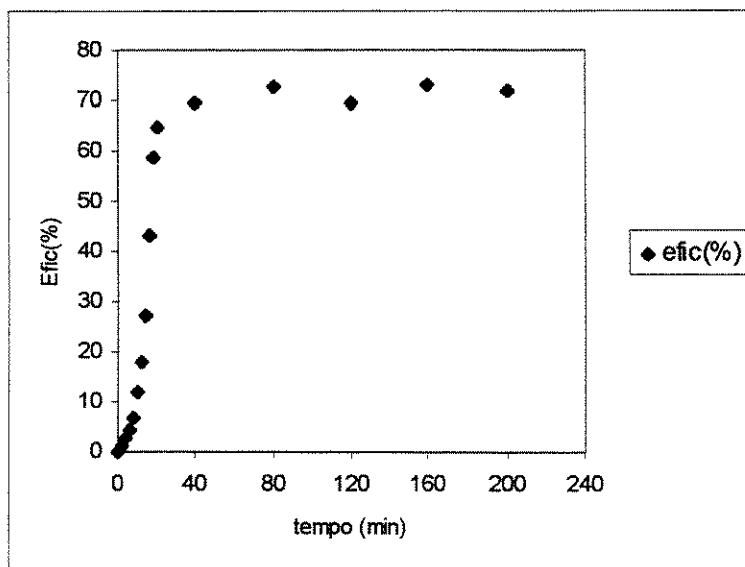


Figura 4.66 - Eficiência de produção de pó Ensaio com a polpa otimizada incluindo os dados referentes a eficiência de produção inicial

Na Figura 4.66 apresenta-se os resultados da eficiência de produção considerando-se o ensaio completo. Para os primeiros 40 minutos também se verifica que o comporta deste ensaio reproduz o observado no ensaio 18, porém com eficiências significativamente mais altas.

O valor da eficiência predito pelo modelo é de 82%, o valor experimental obtido da ordem de 70%, também é um resultado que valida o modelo empírico para predição da eficiência de produção de polpas em função da composição.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 - Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos, as conclusões do presente trabalho são as seguintes:

- 1- As polpas com composição modificada apresentaram propriedades físicas e comportamento reológico semelhantes aos observados nas polpas de frutas naturais;
- 2- As curvas de secagem mostraram que a evaporação é muito rápida, ocorrendo praticamente nos dois minutos iniciais da secagem. Não foi identificada qualquer influência da composição ou das propriedades físicas das polpas sobre as taxas de evaporação;
- 3- A alimentação das polpas era acompanhada por intensas modificações nas variáveis fluidodinâmicas do leito, principalmente, em relação à queda de pressão e à altura da fonte. A diminuição na queda de pressão, provocada pela presença da polpa, embora atenuada com a evaporação da água, se reproduziu nas medidas da queda de pressão em jorro estável, quando o leito já se encontrava praticamente seco;
- 4- As repetições dos ensaios com as concentrações no ponto central mostraram a boa reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos;
- 5- Não se observou influência das composições sobre a vazão de jorro mínimo;
- 6- De acordo com a análise das curvas características, não foi observada interferência da concentração de fibras no comportamento fluidodinâmico do leito;
- 7- A presença de polpas com elevadas concentrações de açúcares redutores provoca problemas de instabilidade no jorro, enquanto a gordura e o amido favorecem a dinâmica do leito;

8- Foi proposto um modelo simplificado para determinação do grau de saturação de polpa no leito para o período inicial da secagem. Através do modelo foi possível calcular esta variável para a maioria dos ensaios experimentais. Não foi identificada qualquer tendência de comportamento da queda de pressão frente ao grau de saturação das diferentes polpas, para a faixa de concentração e condições operacionais em que os experimentos foram conduzidos;

9- Os ensaios de secagem das polpas modificadas apresentaram um baixo rendimento em relação à produção de pó. Foram verificadas elevadas perdas de material disperso ou aderido às paredes do equipamento. A retenção de material no leito também foi elevada.

11- Os resultados indicam, entretanto, que a eficiência pode ser melhorada mediante otimização das condições operacionais, inclusive em relação à escolha do material inerte apropriado, visto que foi verificado neste trabalho, que o inerte exerce influência tanto nos parâmetros fluidodinâmicos como na eficiência de produção de pó;

12- A presença tanto da polpa úmida com desidratada provoca o aumento do ângulo de repouso, diminuindo consequentemente a escoabilidade do leito. Para o nível de saturação inicial em que os ensaios foram conduzidos, verificou-se que o filme líquido exerceu maior influência sobre o ângulo de repouso do que o filme sólido;

13- A análise estatística dos resultados através do planejamento experimental fracionário 2^{5-1} não identificou efeitos significativos das variáveis de composição sobre a vazão de jorro mínimo;

14- De acordo com o planejamento fatorial fracionário, a concentração de fibras não apresentou efeito significativo sobre qualquer das variáveis respostas analisadas no presente trabalho: queda de pressão de jorro estável, ângulos de repouso do leito úmido e seco, eficiência de produção de pó, retenção de sólidos e perdas. Os efeitos significativos principais das demais variáveis de composição foram os seguintes:

Concentração de açúcares redutores - efeitos negativos sobre a queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó e positivos sobre a retenção de sólidos e perdas;

Concentração de gorduras – efeitos negativos sobre os ângulos de repouso do leito molhado e seco e retenção de sólidos e positivos sobre a eficiência e perdas;

Concentração de amido – efeitos negativos sobre o ângulo de repouso molhado e retenção de sólidos e positivos sobre a queda de pressão de jorro estável, eficiência e perdas;

Concentração de pectina – efeito negativo sobre a retenção de sólidos e efeitos positivos sobre a eficiência e perdas;

15- Eliminada a concentração de fibras, o planejamento fatorial fracionário foi rearranjado para um fatorial completo 2^4 , sendo possível identificar os efeitos significativos das seguintes interações entre as variáveis de composição, sobre as variáveis respostas analisadas:

$Y_{açu}, Y_{gor}$ – efeito negativo sobre a eficiência e efeitos positivos sobre a queda de pressão de jorro estável e perdas;

$Y_{açu}, Y_{ami}$ – efeito negativo sobre a retenção de sólidos e positivo sobre as perdas;

$Y_{açu}, Y_{pec}$ – efeito negativo sobre as perdas;

Y_{gor}, Y_{ami} – efeitos negativos sobre a queda de pressão de jorro estável e perdas e positivo sobre o ângulo de repouso do leito úmido;

Y_{ami}, Y_{pec} – efeito negativo sobre as perdas e positivo sobre a eficiência;

$Y_{açu}, Y_{gor} \cdot Y_{ami}$ – efeito negativo sobre a retenção de sólidos e positivo sobre as perdas;

$Y_{gor}, Y_{ami} \cdot Y_{pec}$ – efeito negativo sobre as perdas e efeitos positivos sobre a queda de pressão de jorro estável, eficiência de produção de pó e retenção de sólidos;

Os efeitos principais das concentrações de açúcares redutores, gorduras, amido e pectina que se mostraram significativos na análise estatística do planejamento experimental completo foram os mesmos identificados através do planejamento experimental fracionário;

16- Foi possível se obter modelos empíricos estatisticamente significativos e preditivos para a queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó;

17- A análise dos resultados dos parâmetros fluidodinâmicos conjuntamente com a análise das superfícies de resposta permite concluir que:

Os açúcares redutores prejudicam o desempenho do leito de jorro, tanto em relação aos parâmetros fluidodinâmicos como em relação à produção de pó. Promovem a formação de aglomerados de partículas que prejudicam a dinâmica do leito, aumentam a retenção e comprometem a estabilidade chegando a inviabilizar o processo;

A gordura, o amido e a pectina promovem condições mais favoráveis ao processamento de polpas de frutas no leito de jorro, visto que melhoram a performance fluidodinâmica, diminuem a retenção de sólidos no leito, oferecem condições de estabilidade e aumentam a produção de pó. Todavia, acentuam as perdas de material disperso sobre as paredes do equipamento;

Evidencia-se a importância dos efeitos das interações entre as variáveis de composição no sentido de atenuar ou mesmo anular os efeitos principais das variáveis de composição.

18- Os resultados da cinética de produção de pó mostraram que em condições de estabilidade a produção de pó é uniforme, com eficiência praticamente constante. O ângulo de repouso do leito seco sofre influência da reumidificação da película, à medida que se procede novas alimentações de polpa; aumenta com a retenção de sólidos e aproxima-se ou supera o valor do ângulo de repouso do leito úmido, quando o jorro começa a apresentar problemas de instabilidade.

19- O comportamento da secagem das polpas modificadas no leito de jorro, reproduziram o comportamento observado com as polpas de frutas naturais, tanto no que se refere aos parâmetros fluidodinâmicos como a produção de pó;

20- Os modelos empíricos para a queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó, foram validados com os resultados obtidos na secagem de polpas de frutas naturais. Apesar de todas as restrições relativas tanto à variações na composição, inerentes aos produtos naturais, como às diferentes condições de vazão do ar de secagem, os modelos empíricos reproduziram de forma satisfatória os valores da queda de pressão de jorro estável e eficiência de produção de pó na secagem de polpas de frutas em leito de jorro;

22- O ensaio de secagem da polpa com a composição otimizada atingiu 70% de eficiência de produção de pó. Conclui-se portanto, que é possível melhorar o desempenho da secagem de polpas de frutas no leito de jorro, mediante ajuste das composições que favorecem a performance do processo. Entretanto, o ajuste da composição está sujeito a todas as restrições relativas à qualidade de um produto alimentício, sobre o ponto de vista das propriedades organolépticas e nutricionais.

5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

Com relação ao desempenho do leito de jorro, sugere-se:

1 - Analisar modificações no sistema experimental visando melhorar o desempenho do equipamento:

Propor um sistema de alimentação que propicie uma distribuição de gotas uniforme sobre o leito;

Desenvolver um sistema que minimize as perdas de material disperso sobre as paredes do equipamento, facilitando a sua remoção e arraste e melhorando, conseqüentemente, a eficiência de produção de pó. Propõe-se a instalação de um sistema do tipo vibratório;

2 - Utilizar metodologias de monitoramento do regime fluidodinâmico, visando identificar a instabilidade ou colapso do leito, em diferentes níveis de saturação inicial do leito, modificando-se as condições operacionais relativas a vazão do ar e ou carga de inertes. Com base nestes resultados propor uma faixa de condições operacionais mais favorável à manutenção da estabilidade do leito;

3 - Ampliar os estudos relativos à otimização do processo, mediante avaliação das condições operacionais e ajuste das composições das polpas naturais, principalmente em relação à concentração de amido e pectina, visando uma maior eficiência sem comprometimento da qualidade do produto, em relação às características organolépticas e a preservação das propriedades nutricionais;

Com base nos resultados obtidos, sugere-se:

- 1 - Aprofundar os estudos sobre o grau de saturação de polpa no leite, ampliando a faixa de saturação inicial. Para isto é imprescindível a determinação das propriedades físicas das polpas em estudo para diferentes níveis de umidade e temperatura, incluindo-se a caracterização do produto desidratado;
- 2 - Correlacionar o grau de saturação e estabilidade com o ângulo de repouso do leite;
- 3- Acompanhar a evolução do grau de saturação em ensaios com alimentações intermitentes de polpas, de forma que seja possível obter dados que venham a ser utilizados na modelagem e otimização de processos de secagem de polpas de frutas em leite de jorro, com alimentação intermitente, levando em consideração as pontes sólidas, a composição e as propriedades físicas das polpas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

ABDELRAZEC, I.D. An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds. Citado por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N. *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974, 304 p.

ALMEIDA, M. M. *Desidratação de polpa de umbu*. Campina Grande, 1991, 45 p., relatório interno, UFPB.

ALSINA, O. L. S., LIMA, L. M. R., MORAIS, V. L. M. Estudo das variáveis fluidodinâmicas na secagem de polpa de acerola em leito de jorro convencional. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP*. Uberlândia, v. 1, p. 289-294, 1996.

ALSINA, O. L. S., LIMA, L. M. R., MORAIS, V. L. M., NÓBREGA, E. S. Estudo da circulação de sólidos num leito de jorro convencional para secagem de pasta de acerola. *Anais do 1º Congresso Ibero-Americano de Engenharia d e Alimentos*. Campinas, v. 1, p. 01-09, 1995.

ALSINA, O. L. S., MORAIS, V. L. M., LIMA, L. M. R., SOARES, F. H. L. Studies on the performance of the spouted bed dryer for the dehydration of west indian cherry pulp. *Drying' 96*, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, p. 867-872, 1996.

ALSINA, O. L. S., SOARES, J. Propriedades Fluidodinâmicas de Polpa de Umbu, *Anais do XVI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, ENEMP*, Petrópolis, v.2, pp.592-601, v.2, 1988.

BARRET, N., FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. *Drying' 89*, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, p. 415-420, 1990.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. *Planejamento e Otimização de Experimentos*, Campinas, Editora da UNICAMP, 2ª edição, 1996, 299p.

BERRUTI, F., MUIR, J. R., BEHIE, L. A. Solids circulation in a spouted-fluid-bed with draft tube. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.66, p. 919-923, 1988.

BOBBIO, A. P. e BOBBIO, F. O. *Química do Processamento de Alimentos*, São Paulo, Livraria Varela, 2º edição, 1992.

BOBBIO, A. P. e BOBBIO, F. O. *Introdução a Química dos Alimentos*, São Paulo, Livraria Valera, 1º edição, 1995.

BOX, G.E.P., HUNTER, W. G., HUNTER, J.S. *Statistics for Experimenters*, New York, John Wiley & Sons, 1978

CHATTERJEE, A. Spout-fluid bed technique. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.* 9, 340, 1970

CARVALHO, R.I.N. e MANICA, I. Composição e armazenamento de Frutos. *Caderno de Horticultura UFRGS*, n.1, p.1-7,1993

CHEFTEL, J. C. e CHEFTEL, H. *Introduction a la bioquímica e tecnologia de los alimentos*, Zaragoza – Espanha, Editorial Acrébia, v. I e v. II, 1983.

CLAFLIN, J. K., FANE, A. G. Gas distribution and heat transfer in a draft-tube spouted bed. *A. I. Ch. E. J.*, v.80, n. 241, p. 17, 1984.

CLAFLIN, J. K., FANE, A. G. Spouting with a porous draft-tube. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 61, p. 356-364, 1983.

CUNHA, F. O. *Contribuições à Análise da Secagem de Pastas em Leito de Jorro com Partículas Inerte*, São Carlos: PPG-EQ/UFSCAR, 103p., 1999 (Dissertação).

DA MATA, A. L. M., MAGALHÃES, M. M. A., LIMA, M. F. M. Desidratação de cebola branca e roxa em leito de jorro. *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*. Rio de Janeiro, v. 1, p. 301-306, 1996. CD Rom

FRANCO, G. *Tabela de Composição Química dos Alimentos*, Rio de Janeiro, Editora Atheneu, 9ª edição, 1997, 306p.

GOMES, R.P. *Fruticultura Brasileira*, Rio de Janeiro, Editora Nobel, 9ª edição, 1983, 440p.

GOMES, R.P. Umbuzeiro. *Mundo Agrícola*, v.14, n.159, p.95-98, 1968

GUERRERO, S., GERSCHENSON, L. N. & ALZAMORA, S. M. Propriedades físicas de los alimentos. Reologia de pures de frutas tropicales y su relacion con distintos factores de conservacion. *Anales del I Congreso Ibero-Americano de Ingenieria de Alimentos*, Campinas, v.1 p.92-104, 1995.

HUFENUSSLER, M. e KACHAN, G. C. Secagem de purê de banana em um secador de leito de jorro. *Anais do XIII Encontro sobre Escoamento em meios porosos – ENEMP*, São Paulo, v.2, p.350-354, 1988

IBGE – FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Anuário Estatístico do Brasil*, Rio de Janeiro, 1996, v.56.

ITAL-INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. *Manga: da cultura ao processamento e comercialização*. Campinas, 1981, 399p. (Revista de frutas tropicais nº8)

ITAL-INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. *Alguns aspectos tecnológicos das frutas tropicais e seus produtos*. Campinas, 1980, 295p. (Revista de frutas tropicais nº12)

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz – *Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos*. São Paulo, 1976, v.1, 316p.

JERÔNIMO, C. E. M., LIMA, M. F. M., DA MATA, A. L. M., ROCHA, S. C. S., ALSINA, O. L. S. Secagem de Polpas de Frutas em Leito de Jorro. Influência dos teores de gordura, açúcares e fibras nas variáveis fluidodinâmicas do leito. *Anais do 3º Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica – COBEQ –IC*, Belo Horizonte, 1999, CD Rom.

JERÔNIMO, C. E. M. *Secagem de Polpas de Frutas Tropicais em Leito de Jorro* Natal, 1998, 39 p., relatório interno, UFRN.

KACHAN, G. C. e CHIAPPETA, E. Desidratação da pasta de tomate em um secador de leito de jorro. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ*, São Paulo, v.2, p.510-523, 1988

KACHAN, G. C., TAQUEDA, M. E. e GÜNTHER, P. A. S.. Características do pó de tomate obtido por desidratação da pasta de tomate em um secador de leito de jorro. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ*, São Paulo, v.2, p.524-531, 1988

LEFROY, G.A. e DAVIDSON, J.F. The mechanics of spouted beds. *Transf. Int. Chem.*,v.47, t.120, 1969.

LIMA, C. A. P. *Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro - Estudos do desempenho de um leito convencional*. Campina Grande, 1995, 78 p., dissertação, UFPB.

LIMA E. M. Propriedades reológicas Aplicáveis à tecnologia de formas farmacêuticas sólidas. *Fármacos & Medicamentos*, p.20-30, 2001

LIMA, L. M. O., SANTOS, C. I., COSTA, F. A., LIMA, M. F. M., SANTO, E. M. B. D., CARVALHO, L. P. Desidratação de Polpas de Frutas Tropicais em Leito de Jorro. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química – Iniciação científica, COBEQ IC, São Carlos, 1995*.

LIMA, M. F. M. *Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos e térmicos*. Campina Grande, 1993, 128 p., dissertação, UFPB.

LIMA, M. F. M., ALSINA, O. L. S. Drying of umbu pulp in spouted bed: characteristic curves. *Drying' 92, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp.*, New York, v. B, p. 1508-1515, 1992.

LIMA, M. F. M., DA MATA, A. L. M., LIMA, L. M. F., MORENO, M. T. S. Desidratação da beterraba (*beta vulgaris l.*) em leito de jorro. *XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ*. Porto Alegre, 1998. CD Rom

LIMA, M. F. M., LIMA, L. M. O., SANTOS, E. M. B. D., SANTOS, C. I. Influência das variáveis operacionais na desidratação da polpa de seriguela em leito de jorro. *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP*. Maringá, v. 1, p. 147-152, 1995.

LIMA, M. F. M., LIMA, L. M. O., SANTOS, E. M. B. D., SANTOS, C. I. Secagem de cajá em Leito de Jorro. *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*. Rio de Janeiro, v. 1, p. 307-312, 1996.

LIMA, M. F. M., SANTOS, E. M. B. D., GASPARETTO, O. C. P., COSTA, F. A. e ROLEMBERG, M. P. Propriedades fluidodinâmicas de polpas de frutas. *Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em meios Porosos – ENEMP*, Florianópolis, v.II, p.528-535, 1995

LIMA, M. F. M., ROCHA, S. C. S., ALSINA, O. L. S., JERÔNIMO, C. E. M. e DA MATA, A. L. M. Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro. *XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*, Campinas, 2000. CD Rom.

LISBOA, O. O umbuzeiro. *Boletim de Agricultura, Zootecnia e veterinária*. v.5, n.7, p.35-37, 1932.

MARTINEZ, O.L. A., BRENNAM, J. G. e NIRAJAM, K., Estudio del secado de alimentos en um secador de fuente com partículas inertes. *Anais do I Congresso Ibero Americano de Alimentos*, Campinas, p.73-81, 1995.

MARTINEZ, O.L. A., BRENNAM, J. G. e NIRAJAM, K. Spouted bed dryer for liquid foods. *Food Contrl.*, v.4, n.1, p.41-45, 1993.

MALEK, M.A., MADONNA, L.A. e LU, B.C.Y. Estimation of spout diameter in a spouted bed. *Ind. Eng. Process. Des. Develop.*, v.2, p.30, 1963

MARKOWSKI, A. S. Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 70, p. 938-944, 1992.

MARKOWSKI, A. S. Quality interaction in a jet spouted bed dryer for bio-products. *Drying Technology*, v. 11, n. 2, p. 369-387, 1993.

MARKOWSKI, A. S., KAMINSY, W. Hidrodinamic characteristics of jet-spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 61, p. 377-381, 1983.

MATHUR, K. B., EPSTEIN, N. *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974, 304 p.

MATHUR, K. B., GISHLER, P. E. A technique of contacting gases with coarse solids particles. *A. I. Ch. E. J.*, v. 1, p. 157-171, 1955.

MELLO, V. D., GUBULIN, J. C. Estudo de parâmetros de projeto de um leito de jorro utilizando como fluido a água. *Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. Ouro Preto, v. 1, p. 125-133, 1993.

MOREIRA, S. A. *Processamento da Polpa de Umbu em Leito de Jorro – Estudo da Temperatura de Secagem*. Campina Grande, 1991, 45 p., relatório interno, UFPB.

MUJUMDAR, A. S. Spouted beds: Principles and recent developments. *Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. São Carlos, v. 1, p. 03-13, 1989.

OLIVEIRA, W. P. *Estudo da Secagem de Pastas em Leito de Jorro Cônico*. São Carlos, 1996. 202p, tese, UFSCar

OLIVEIRA, I. M., PASSOS, M. L. Simulation of drying suspension in a conical spouted-bed. *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 593-604, 1997.

OLIVEIRA, J. M., PASSOS, M. L. Modelagem da dinâmica do leito de jorro cônico. *Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. Ouro Preto, v. 1, p. 149-165, 1993.

PASSOS, M. L. & MUJUMDAR, A. S. *Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles*. *Powder Technology*, v. 110, p. 222-238, 2000.

PASSOS, M. L., MASSARANI, G., FREIRE, J. T., MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modeling. *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997.

PATEL, K., BRIDGWATER, J., BAKER, C. G. J., SCHNEIDER, T. Spouting behaviour of wet solids. *Drying' 86*, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, p. 183-189, 1986.

PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 61, n. 3, p. 426-434, 1983.

PHAM, Q. T., POOLEY, E. J. A spouted bed dryer using inert particles. Australasian Chem. Eng. Conf. 9th, *Proceedings...*, Christchurch, New Zealand, 1981, p. 57.

POVRENOVIC, D. S., HADZISMAJLOVIC, D. E., GRBAVCIC, Z. B., VUKONVIC, D. V., LITTMAN, H. Minimum fluid flowrate, pressure drop and stability of a conical spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 70, p. 216-222, 1992.

RAMOS, C. M. P. *Polpas de frutas tropicais desidratadas em leito de jorro. Influência da composição química no desempenho do processo e análise do produto final obtido*. Natal, 1997, 51 p., relatório interno, UFRN.

RÉ, M. I., FREIRE, J. T. Drying of pastelike materials in spouted beds. *Anais of Sixth Drying Symposium. Versailles*, p. 426-431, 1988.

RÉ, M. I., FREIRE, J. T. Secagem de sangue animal em leito de jorro. *Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios porosos - ENEMP*, Campinas, v. 1, p.85-98, 1986.

REYES, A. E. *Secagem de suspensões em leito de jorro cônico*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993. 169 p. Tese.

REYES, A. E., DIAZ, G., BLASCO, R. Experimental study of slurries on inert particles in spouted bed and fluidized bed dryers. *Drying' 96, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp.*, New York, v. A, p. 605-612, 1996.

REYES, A. E., DIAZ, G., BLASCO, R. Experimental study of slurries drying on inert particles in fluid-particles contact equipment. Inter-American Drying Conference (IADC). *Proceedings...*, ITU-SP, BRAZIL, p. 150-157, 1997.

REYES, A. E., MASSARANI, G. Evoluacion del secado de pastas en un lecho de chorro cônico. *Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. Ouro Preto, v. 2, p. 479-487, 1993.

REYES, A. E., MASSARANI, G. Hidrodinâmica e Evaporação de água en un lecho de chorro cônico. *Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. São Carlos, v. 1, p. 55-65, 1992.

REYES, A. E., MASSARANI, G. Secado de pastas en lecho de chorro - II parte. *Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. São Carlos, v. 1, p. 67-77, 1992.

REYES, A. E., MASSARANI, G. Secado de pastas en lecho de chorro. *Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP*. Campinas, v. 2, p.406-418, 1991.

ROMANKOV, P.G. e RASHKOVSKAYA, N.B. Drying in a suspended state. Citado por MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N. *Spouted beds*. New York, Academic Press, 1974, 304 p.

SANTANA, J. D. A. M., CHARBEL, A. C. C., PASSOS, M. L. e MASSARANI, G., Analysis of cohesion forces in conical spouted beds, Belo Horizonte, i1996, 50p, internal report, UFMG. Citado por PASSOS, M. L., MASSARANI, G., FREIRE, J. T., MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modeling. *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 605-624, 1997

SANTOS, C. I. , RAMOS, C. M. P., LIMA, L. M. O., LIMA, M. F. M. Secagem de polpa de manga em leito de jorro. *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, - COBEQ IC*, Uberlândia,. p.321-325, 1998.

SCHNEIDER, T., BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted beds. *Drying' 89*, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, p. 421-425, 1990.

SCHNEIDER, T., BRIDGWATER, J. The stability of wet spouted beds. *Drying Technology*, v. 11, n. 2, p. 277-301, 1993.

SOUZA, F. M. F. *Efeito da altura do leito de inerte*. Campina Grande, 1992, 28 p., relatório interno, UFPB.

SOUZA, E. M. B. D., LIMA, M. F. M., SOUZA, J. S. e TOLEDO, M. T. Efeitos da Temperatura e dos Teores de Umidade e de Sólidos Solúveis Propriedades Termofísicas de Polpas de Frutas Tropicais. *XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*, Campinas, 2000. CD Rom

SPITZNER NETO, P. I., FREIRE, J. T. Estudo da secagem de pastas em leito de jorro; influência da presença da pasta no processo. *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP*. São Carlos, v. 1, p. 185-190, 1997.

SPITZNER NETO, P. I., FREIRE, J. T. Medida do grau de saturação de pasta em um leito de jorro. *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados- ENEMP 2000*. Teresópolis, p.149-156, 2001

SPITZNER NETO, P. I., FREIRE, J. T. Volume residual de pasta em um secador de leito de jorro, *XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ*, Campinas, 2000. CD Rom

TIA, S., TANGSATITKULCHAI, C., DUMRONGLAOHAPUN, P. Continuous drying of slurry in a jet spouted bed. *Drying Technology*, v. 13, n. 8-9, p. 1825-1840, 1995.

THORLEY, B., SAUNBY, J.B., MATHUR, K.B., OSBERG, G.L. An analysis of air and solid flow in a spouted wheat bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.37, p.184-192, 1959.

TIGRE, C.B. Estudos de silvicultura especializada do Nordeste. *II Congresso Brasileiro de Frutas Tropicais*, v.4, Coleção Mossoroense, 1976

ZWIDEMA, H. H. e WATERS, G. W. Ring Method for the Determination of Interfacial Tension. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 13, n.5, p.312-313, 1941.

APÊNDICE I

FORMULAÇÃO DAS POLPAS MODIFICADAS

Considerando-se como limites mínimos de concentração a composição da polpa de manga espada, e como limites máximos as concentrações máximas médias em relação a composição de açúcares redutores, gorduras, fibras, amido e pectina presentes nas polpas de frutas tropicais, foi elaborada inicialmente, de acordo com as combinações previstas pelo planejamento experimental, a matriz de composições apresentada na Tabela I.1

Tabela I.1- Composições originais

Ensaio	X _{açu} (%)	X _{gor} (%)	X _{fib} (%)	X _{ami} (%)	X _{pec} (%)	X _{aci} (%)	X _{out} (%)	X _{água} (%)
1	5,77	0,6	0,38	0,39	1,5	0,314	13,026	78,02
2	15	0,6	0,38	0,39	0,5	0,314	4,796	78,02
3	5,77	5	0,38	0,39	0,5	0,314	14,026	73,62
4	15	5	0,38	0,39	1,5	0,314	3,796	73,62
5	5,77	0,6	1,5	0,39	0,5	0,314	14,026	76,9
6	15	0,6	1,5	0,39	1,5	0,314	3,796	76,9
7	5,77	5	1,5	0,39	1,5	0,314	13,026	72,5
8	15	5	1,5	0,39	0,5	0,314	4,796	72,5
9	5,77	0,6	0,38	3,5	0,5	0,314	10,916	78,02
10	15	0,6	0,38	3,5	1,5	0,314	0,686	78,02
11	5,77	5	0,38	3,5	1,5	0,314	9,916	73,62
12	15	5	0,38	3,5	0,5	0,314	1,686	73,62
13	5,77	0,6	1,5	3,5	1,5	0,314	9,916	76,9
14	15	0,6	1,5	3,5	0,5	0,314	1,686	76,9
15	5,77	5	1,5	3,5	0,5	0,314	10,916	72,5
16	15	5	1,5	3,5	1,5	0,314	0,686	72,5

As composições desta matriz foram expressas em relação a concentração de água presente em cada polpa, conforme mostra a Tabela I.2.

Tabela I.2 - Composições originais parametrizadas em relação à composição da água

Ensaio	$X_{a\acute{c}u}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{gor}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{fib}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{ami}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{pec}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{aci}/X_{\acute{a}gua}$ (%)	$X_{out}/X_{\acute{a}gua}$ (%)
1	7,40	0,77	0,49	0,50	1,92	0,40	16,70
2	19,23	0,77	0,49	0,50	0,64	0,40	6,15
3	7,84	6,79	0,52	0,53	0,68	0,43	19,05
4	20,37	6,79	0,52	0,53	2,04	0,43	5,16
5	7,50	0,78	1,95	0,51	0,65	0,41	18,24
6	19,51	0,78	1,95	0,51	1,95	0,41	4,94
7	7,96	6,90	2,07	0,54	2,07	0,43	17,97
8	20,69	6,90	2,07	0,54	0,69	0,43	6,62
9	7,40	0,77	0,49	4,49	0,64	0,40	13,99
10	19,23	0,77	0,49	4,49	1,92	0,40	0,88
11	7,84	6,79	0,52	4,75	2,04	0,43	13,47
12	20,37	6,79	0,52	4,75	0,68	0,43	2,29
13	7,50	0,78	1,95	4,55	1,95	0,41	12,89
14	19,51	0,78	1,95	4,55	0,65	0,41	2,19
15	7,96	6,90	2,07	4,83	0,69	0,43	15,06
16	20,69	6,90	2,07	4,83	2,07	0,43	0,95

Calculou-se então os valores médios correspondentes aos limites máximos e mínimos de cada constituinte. A partir destes dados foi gerada a nova matriz experimental, conforme ilustra a Tabela I.3.

Tabela I.3 – Matriz experimental com composições parametrizadas em relação à composição da água – Planejamento Fatorial

Ensaio	$X_{açú}/X_{água}$ (%)	$X_{gor}/X_{água}$ (%)	$X_{fib}/X_{água}$ (%)	$X_{ami}/X_{água}$ (%)	$X_{pec}/X_{água}$ (%)	$X_{aci}/X_{água}$ (%)	$X_{out}/X_{água}$ (%)
1	7,67	0,78	0,50	0,52	1,82	0,42	15,92
2	19,95	0,78	0,50	0,52	0,67	0,42	3,65
3	7,67	6,84	0,50	0,52	0,67	0,42	15,92
4	19,95	6,84	0,50	0,52	1,82	0,42	3,65
5	7,67	0,78	2,00	0,52	0,67	0,42	15,92
6	19,95	0,78	2,00	0,52	1,82	0,42	3,65
7	7,67	6,84	2,00	0,52	1,82	0,42	15,92
8	19,95	6,84	2,00	0,52	0,67	0,42	3,65
9	7,67	0,78	0,50	4,66	0,67	0,42	15,92
10	19,95	0,78	0,50	4,66	1,82	0,42	3,65
11	7,67	6,84	0,50	4,66	1,82	0,42	15,92
12	19,95	6,84	0,50	4,66	0,67	0,42	3,65
13	7,67	0,78	2,00	4,66	1,82	0,42	15,92
14	19,95	0,78	2,00	4,66	0,67	0,42	3,65
15	7,67	6,84	2,00	4,66	0,67	0,42	15,92
16	19,95	6,84	2,00	4,66	1,82	0,42	3,65
17,18,19	13,81	3,81	1,25	2,59	1,25	0,42	9,79

Convertendo-se as concentrações parametrizadas em relação a água, novamente em frações mássicas, obteve-se a matriz das composições a ser utilizada nos balanços materiais efetuados para determinação das quantidades adicionadas de cada constituinte na preparação das polpas modificadas, Tabela I.4 .

Tabela I.4 - Matriz experimental com composições expressas em frações mássicas

Ensaio	$x_{açú}$ (%)	x_{gor} (%)	x_{fib} (%)	x_{ami} (%)	x_{pec} (%)	x_{aci} (%)	x_{out} (%)	$x_{água}$ (%)
1	6,01	0,61	0,39	0,41	1,43	0,33	12,47	78,35
2	15,77	0,61	0,40	0,41	0,53	0,33	2,88	79,06
3	5,79	5,16	0,38	0,39	0,51	0,32	12,01	75,45
4	14,92	5,12	0,38	0,39	1,36	0,31	2,73	74,79
5	6,00	0,61	1,56	0,41	0,52	0,33	12,44	78,14
6	15,45	0,60	1,55	0,40	1,41	0,32	2,82	77,44
7	5,68	5,06	1,48	0,38	1,35	0,31	11,78	73,97
8	14,88	5,11	1,49	0,39	0,50	0,31	2,72	74,60
9	5,87	0,60	0,38	3,57	0,51	0,32	12,19	76,56
10	15,14	0,59	0,38	3,54	1,38	0,32	2,77	75,89
11	5,57	4,97	0,36	3,38	1,32	0,30	11,55	72,55
12	14,59	5,01	0,37	3,41	0,49	0,31	2,67	73,16
13	5,76	0,59	1,50	3,50	1,37	0,31	11,95	75,03
14	15,10	0,59	1,51	3,53	0,51	0,32	2,76	75,69
15	5,55	4,95	1,45	3,37	0,48	0,30	11,52	72,37
16	14,32	4,91	1,44	3,34	1,31	0,30	2,62	71,77
17,18,19	10,39	2,87	0,95	1,95	0,94	0,31	7,36	75,24

A Tabela I.5 ilustra os resultados dos balanços materiais efetuadas para definição das quantidades utilizadas na preparação de 700g de polpa modificada, mantendo-se fixa as concentrações de ácido cítrico e de sólidos solúveis (°BRIX)

Tabela I.5 - Formulação das polpas modificadas

Ensaio	M _{AR} (g)	M _{gor} (g)	M _{fib} (g)	M _{ami} (g)	M _{pec} (g)	M _{água} (g)	M _{manga} (g)	Total (g)
1	4,5631	1,6333	0,4404	0,3092	6,7450	35,9355	650,1289	700
2	101,9751	3,5916	3,4941	2,3068	2,9574	439,2418	144,6115	700
3	4,3940	33,6278	0,4241	0,2978	0,3818	34,6037	626,0354	700
4	96,4629	35,1750	3,3052	2,1821	8,8580	415,4989	136,7947	700
5	5,4414	1,2760	13,5119	0,3927	0,5035	51,9706	626,7255	700
6	100,7528	3,1679	16,3775	2,3427	9,2780	446,1638	120,1980	700
7	5,1505	32,6309	12,7896	0,3717	6,4694	49,1928	593,2263	700
8	97,0610	34,7462	15,7774	2,2569	2,8935	429,8152	115,7937	700
9	4,4591	1,5960	0,4303	22,4698	0,3874	35,1160	635,3024	700
10	97,8783	3,4473	3,3537	24,1870	8,9879	421,5954	138,8018	700
11	4,2253	32,3363	0,4078	21,2917	6,2456	33,2748	601,9942	700
12	94,3607	34,4084	3,2332	23,3178	2,7366	406,4441	133,8135	700
13	5,2252	1,2254	12,9752	22,1014	6,5632	49,9064	601,8320	700
14	98,4814	3,0965	16,0083	24,2045	2,9358	436,1050	117,4882	700
15	5,0395	31,9275	12,5140	21,3158	0,4663	48,1324	550,4393	700
16	93,3737	33,4262	15,1780	22,9492	8,5984	413,4866	111,3947	700
17,18,19	51,1385	18,3066	8,1679	12,1787	4,6978	234,0084	370,5496	700

APÊNDICE II

PROPRIEDADES FÍSICAS DAS POLPAS MODIFICADAS

Tabela II.1- Medidas da densidade das polpas modificadas

Polpa	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão	Erro (%)
1	1,0636	1,0661	1,0553	1,0617	0,0057	0,53
2	1,0533	1,0536	1,0548	1,0539	0,0008	0,08
3	1,0271	1,0355	1,0422	1,0349	0,0076	0,73
4	1,0490	1,0547	1,0655	1,0564	0,0084	0,79
5	1,0551	1,0640	1,0615	1,0602	0,0046	0,43
6	1,0643	1,0669	-	1,0656	0,0018	0,17
7	1,0565	1,0542	1,0622	1,0576	0,0041	0,39
8	1,0526	1,0544	1,0512	1,0527	0,0016	0,16
9	1,0748	1,0489	1,0676	1,0636	0,0136	1,28
10	1,0943	1,0939	1,1082	1,0988	0,0082	0,74
11	1,0599	1,0703	1,0602	1,0635	0,0059	0,55
12	1,0460	1,0572	1,0355	1,0462	0,0109	1,04
13	1,0912	1,1073	1,1174	1,1053	0,0132	1,20
14	1,0753	1,0888	1,0931	1,0858	0,0093	0,86
15	1,0509	1,0511	1,0481	1,0500	0,0017	0,16
16	1,0593	1,0555	1,0505	1,0551	0,0044	0,42
17	1,0794	1,0810	-	1,0802	0,0011	0,10
18	1,0744	1,0944	1,0944	1,0878	0,0116	1,06
19	1,0881	1,0796	1,0807	1,0828	0,0046	0,43

Tabela II.2 - Medidas da tensão superficial das polpas modificadas

Polpa	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão	Erro (%)
1	64,5	66,0	63,0	63,8	64,3	1,27	1,98
2	51,7	53,0	53,5	52,9	52,8	0,76	1,45
3	64,3	63,4	64,2	64,7	64,2	0,54	0,85
4	53,0	54,0	55,0	54,5	54,1	0,85	1,58
5	51,0	46,6	45,6	47,4	47,7	2,35	4,94
6	62,0	63,2	64,7	62,5	63,1	1,17	1,86
7	59,0	60,0	62,0	60,0	60,3	1,26	2,09
8	60,0	59,0	58,9	57,8	58,9	0,90	1,53
9	51,0	52,5	49,0	50,1	50,7	1,48	2,92
10	56,0	57,5	58,0	57,4	57,3	0,86	1,50
11*	-	-	-	-	-	-	-
12	66,0	63,4	64,0	65,1	64,4	1,16	1,79
13*	-	-	-	-	-	-	-
14	53,4	54,1	55,0	54,3	54,2	0,66	1,21
15*	-	-	-	-	-	-	-
16*	-	-	-	-	-	-	-
17	62,1	61,1	63,8	62,0	62,2	0,98	1,57
18	63,0	63,1	62,8	62,6	62,9	0,22	0,35
19	63,1	62,2	62,8	62,3	62,4	0,51	0,82

* Não foi possível medir

Tabela II.3 - Dados reológicos das polpas modificadas - medidas da viscosidade aparente e torque para $\omega = 60$ rpm

Polpa	ω decrescente (rpm)		ω crescente (rpm)		ω decrescente (rpm)		Médias e Desvios		
	μ (cp)	τ (dyn.cm)	μ (cp)	τ (dyn.cm)	μ (cp)	τ (dyn.cm)	Valor Médio	Desvio Padrão	Erro (%)
1	2268	4890	2285	4928	2266	4890	2273	10,44	0,46
2	218	940	232	1010	196	846	215	18,15	8,44
3	1372	2965	1317	2841	1306	2817	1332	35,36	2,66
4	529	2286	526	2267	480	2075	512	27,47	5,36
5	1980	4213	1850	3973	1917	4138	1916	65,01	3,39
6	-	-	1267	2728	1217	2625	1242	35,36	2,84
7	2623	5658	2475	5337	2451	5283	2516	93,15	3,70
8	1063	4580	981	4224	906	3906	983	78,53	7,99
9	1354	2919	1235	2663	1236	2660	1275	68,42	5,37
10	423	1825	438	1892	406	1752	422	16,01	3,79
11	2200	4747	2224	4785	2185	4712	2203	19,67	0,89
12	230	992	229	987	231	961	230	1,00	0,43
13	2850	3070	2925	3146	2900	3127	2892	38,10	1,32
14	821	1768	688	1485	667	1434	725	83,51	11,52
15	2420	2609	2325	2507	2313	2500	2353	58,62	2,49
16	1950	4192	1790	3860	1686	3630	1806	132,98	7,36
17	760	3380	801	3091	812	3101	791	27,40	3,46
18	911	3927	883	3421	794	3421	863	61,09	7,08
19	990	4267	882	3801	870	3740	914	66,09	7,23

APÊNDICE III

ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS

Tabela III.1 - Medidas do ângulo de repouso das partículas molhadas e após a secagem

Polpa	θ_m	θ_m	Desvio Padrão	Erro (%)	θ_s	θ_s	Desvio Padrão	Erro (%)
1	40/40/39/38	39,3	0,96	2,40	23/25/25,5/24,5	24,5	1,08	4,54
2	36/36/37/37	36,5	0,58	1,59	30,5/31/31/31,5	31,0	0,41	0,94
3	30/29/30/30	29,8	0,50	1,68	22,5/23/23/22,5	22,8	0,29	1,26
4	28/29,5/29,5/27/27,5/27	28,0	1,16	4,14	21/20/20,5/20	20,4	0,48	2,35
5	36/34/36/37	35,8	1,26	3,51	32/32/30,5/31	31,4	0,75	2,39
6	39/40/38/40	39,3	0,96	2,44	26/28/25/26,5	26,3	1,25	4,73
7	32/30/30/30/29/29/28	29,7	1,25	4,22	20/22/21,5/21	21,1	0,85	4,04
8	29/33/33/32	31,8	1,89	5,95	21/19,5/19/19,5	19,8	0,87	4,37
9	28/29/28/29/30/30,5/30,5	29,3	1,08	3,67	22/21/22/22/19/19	20,8	1,47	7,08
10	28,5/29/28/29	28,6	0,48	1,67	25/25/27/27/27	26,2	1,10	4,18
11	27/29/28/27,5	27,9	0,85	3,06	26/26/24,5/24	25,1	1,03	4,11
12	35/33/34/35	34,3	0,96	2,79	23/23,5/22/22	22,6	0,75	3,31
13	32,5/32/30/31	31,4	1,11	3,53	27/27,5/28/27	27,4	0,48	1,75
14	30,5/32/32,5/32,5	31,9	0,95	2,97	27/28,5/27/26,5	27,3	0,87	3,17
15	29/28,5/28/28	28,4	0,48	1,69	22/22,5/20/22	21,6	1,11	5,13
16	24/24/23,5/23	23,6	0,48	2,03	20/20/19/18,5	19,4	0,75	3,87
17	30,5/30/28/28,5/28	29,0	0,93	3,21	23,5/22,5/22,5/23	22,9	0,48	2,09
18	27/25,5/27/26,5	26,5	0,70	2,64	23/21,5/22,5/21	22,0	0,91	4,15
19	27/27,5/27/27,5	27,3	0,29	1,06	20/19/19,5/21	19,9	0,85	4,29
Médias	-	30,97 ± 4,30	0,89	2,86 ± 1,18	-	23,8 ± 3,64	0,83	3,57 ± 1,50

APÊNDICE IV

ENSAIOS DE SECAGEM

Tabela IV.1 - Medidas das umidade dos pós obtidos nos ensaios de secagem com polpas modificadas

Ensaio	U_{pó} (base úmida %)	Média	Desvio Padrão	Erro (%)
1	6,09	6,09	-	-
3	7,03 - 7,31	7,17	0,20	2,76
5	14,59	14,59	-	-
7	7,26 - 8,01	7,63	0,53	6,95
9	7,29 - 8,49	7,89	0,85	10,75
10	8,67	8,67	-	-
11	7,98 - 6,89 - 6,22	7,03	0,88	12,64
12	10,29	10,29	-	-
13	5,96 - 6,52	6,24	0,39	6,35
14	9,71	9,71	-	-
15	12,00 - 11,6	11,80	0,28	2,40
16	7,96 - 8,14	8,05	0,13	1,58
17,18,19	6,28 - 7,25 - 5,82	6,45	0,73	11,32

Tabela IV.2 - Medidas do material retido no leito nos ensaios de secagem

Ensaio	MR/MI (%)			Média	Desvio Padrão	Erro (%)	Mag/(MI+MR) (%)			Média	Desvio Padrão	Erro (%)
1	0,32	0,33	-	0,33	0,007	2,14	0,026	0,016	0,020	0,021	0,005	23,97
2	0,52	0,41	0,42	0,45	0,061	13,52	0,028	0,031	0,036	0,032	0,004	12,63
3	-	0,14	0,12	0,13	0,014	10,88	0,021	0,021	0,020	0,021	0,0006	2,75
4	0,12	0,12	0,13	0,12	0,006	4,81	0,005	0,008	0,006	0,006	0,0015	25,46
5	0,37	0,38	-	0,38	0,007	1,86	0,052	0,055	0,056	0,054	0,0021	3,85
6	0,64	-	0,46	0,55	0,127	23,11*	0,083	-	0,085	0,084	0,0014	1,68
7	0,10	0,09	0,10	0,10	0,006	5,77	0,054	0,041	0,056	0,050	0,0081	16,29
8	0,40	0,23	0,33	0,32	0,080	26,70*	0,019	0,023	0,016	0,019	0,0035	18,48
9	0,24	0,25	0,24	0,24	0,006	2,41	0,028	0,042	0,035	0,035	0,007	20,00
10	0,30	0,32	0,33	0,32	0,015	4,77	-	0,025	0,031	0,028	0,004	15,15
11	0,15	0,11	0,13	0,13	0,020	15,38	0,013	0,016	0,016	0,015	0,0017	11,55
12	0,21	-	0,19	0,20	0,014	7,00	0,018	0,024	0,021	0,021	0,003	14,29
13	0,23	0,23	0,22	0,23	0,006	2,51	0,047	0,036	0,057	0,047	0,0105	22,35
14	0,38	0,31	0,31	0,33	0,040	12,25	-	0,031	0,033	0,032	0,0014	4,42
15	0,12	0,12	0,12	0,12	0,000	0,00	0,047	0,049	0,046	0,047	0,0015	3,25
16	0,07	0,06	-	0,07	0,007	10,00	0,026	0,029	0,026	0,027	0,0017	6,42
17	0,14	0,13	0,13	0,13	0,006	4,44	0,032	0,048	0,037	0,039	0,0082	20,99
18	0,08	0,10	0,13	0,10	0,025	25,17	0,011	0,016	0,012	0,013	0,0026	20,35
19	0,08	0,11	0,07	0,09	0,021	23,13	0,022	0,028	0,023	0,024	0,0032	13,39
Médias				0,23 ± 0,14	0,0243	10,31 ± 8,67				0,032 ± 0,018	0,0037	13,54 ± 7,83

APÊNDICE V **TABELAS ESTATÍSTICAS**

Tabela V.1 - Estimativa dos efeitos para ΔP_{jes} - Planejamento fatorial 2^4

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados					
	ΔP_{jes}	θ_m	Efic	Rets	Perdas	θ_s
Média	580,516	31,132	15,678	41,427	42,895	23,921
$Y_{açú}$	-136,750	0,313	-19,413	18,974	0,439	-0,188
Y_{gor}	9,600	-4,813	8,610	-44,041	35,431	-5,188
Y_{ami}	77,500	-4,313	11,775	-25,861	14,086	-0,813
Y_{pec}	36,575	-1,188	6,988	-13,099	6,111	-1,063
$Y_{açú} \cdot Y_{gor}$	67,825	0,188	-4,718	-2,496	7,214	-1,813
$Y_{açú} \cdot Y_{ami}$	39,725	0,188	-0,383	-11,636	12,019	0,313
$Y_{açú} \cdot Y_{pec}$	-5,850	-2,438	-1,885	-7,074	8,959	-1,188
$Y_{gor} \cdot Y_{ami}$	-87,775	3,063	2,705	5,464	-8,169	2,063
$Y_{gor} \cdot Y_{pec}$	-21,150	-2,563	4,248	-6,094	1,846	0,563
$Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	-15,550	-1,813	5,103	7,371	-12,474	2,188
$Y_{açú} \cdot Y_{gor} \cdot Y_{ami}$	-20,500	0,313	1,188	-9,111	7,924	-0,563
$Y_{açú} \cdot Y_{gor} \cdot Y_{pec}$	7,375	1,063	-0,755	-8,999	9,754	0,188
$Y_{açú} \cdot Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	-5,625	1,313	0,000	3,586	-3,586	-2,438
$Y_{gor} \cdot Y_{ami} \cdot Y_{pec}$	72,125	0,063	3,298	10,251	-13,549	-1,938

Tabela V.2 - Estimativa dos efeitos para θ_m - Planejamento fatorial 2^4

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	31,132	0,289	29,890	32,374
Yaçú	0,313	0,629	-2,395	3,020
Ygor	-4,813	0,629	-7,520	-2,106
Yami	-4,313	0,629	-7,020	-1,606
Ypec	-1,188	0,629	-3,895	1,520
Yaçú . Ygor	0,188	0,629	-2,520	2,895
Yaçú . Yami	0,188	0,629	-2,520	2,895
Yaçú . Xpec	-2,438	0,629	-5,145	0,270
Xgor . Yami	3,063	0,629	0,356	5,770
Ygor . Ypec	-2,563	0,629	-5,270	0,145
Yami . Ypec	-1,813	0,629	-4,520	0,895
Yaçú . Ygor . Yami	0,313	0,629	-2,395	3,020
Yaçú . Ygor . Ypec	1,063	0,629	-3,770	1,645
Yaçú . Yami . Ypec	1,313	0,629	-4,020	1,395
Ygor . Yami . Ypec	0,063	0,629	-2,645	2,770

Tabela V.3 - Estimativa dos efeitos para Efic - Planejamento Fatorial 2⁴

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	15,678	0,466	13,672	17,684
Yaçú	-19,413	1,016	-23,785	-15,040
Ygor	8,610	1,016	4,237	12,983
Yami	11,775	1,016	7,402	16,148
Ypec	6,988	1,016	2,615	11,360
Yaçú . Ygor	-4,718	1,016	-9,090	-0,345
Yaçú . Yami	-0,383	1,016	-4,755	3,990
Yaçú . Ypec	-1,885	1,016	-6,258	2,488
Ygor . Yami	2,705	1,016	-1,668	7,078
Ygor . Ypec	4,248	1,016	-1,125	8,620
Yami . Ypec	5,103	1,016	0,730	9,475
Yaçú . Ygor . Yami	1,188	1,016	-3,185	5,560
Yaçú . Ygor . Ypec	-0,755	1,016	-5,128	3,618
Yaçú . Yami . Ypec	0,000	1,016	-4,373	4,373
Ygor . Yami . Ypec	3,298	1,016	-1,075	7,670

Tabela V.4 - Estimativa dos efeitos para Rets - Planejamento fatorial 2⁴

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	41,427	0,899	37,560	45,294
Yacú	18,974	1,959	10,546	27,402
Ygor	-44,041	1,959	-52,469	-35,613
Yami	-25,861	1,959	-34,289	-17,433
Ypec	-13,099	1,959	-21,527	-4,671
Yacú . Ygor	-2,496	1,959	-10,924	5,932
Yacú . Yami	-11,636	1,959	-20,064	-3,208
Yacú . Ypec	-7,074	1,959	-15,502	1,354
Ygor . Yami	5,464	1,959	-2,964	13,892
Ygor . Ypec	-6,094	1,959	-14,522	2,334
Yami . Ypec	7,371	1,959	-1,057	15,799
Yacú . Ygor . Yami	-9,111	1,959	-17,539	-0,683
Yacú . Ygor . Ypec	-8,999	1,959	-17,427	-0,571
Yacú . Yami . Ypec	3,586	1,959	-4,842	12,014
Ygor . Yami . Ypec	10,251	1,959	1,823	18,679

Tabela V.5 - Estimativa dos efeitos para as Perdas - Planejamento fatorial 2⁴

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	42,895	0,449	40,963	44,827
Yacú	0,439	0,979	-3,772	4,649
Ygor	35,431	0,979	31,221	39,642
Yami	14,086	0,979	9,876	18,297
Ypec	6,111	0,979	-1,901	10,322
Yacú . Ygor	7,214	0,979	-3,003	11,424
Yacú . Yami	12,019	0,979	7,808	16,229
Yacú . Ypec	8,959	0,979	4,748	13,169
Ygor . Yami	-8,169	0,979	-12,379	-3,958
Ygor . Ypec	1,846	0,979	-2,364	6,057
Yami . Ypec	12,474	0,979	-16,684	-8,263
Yacú . Ygor . Yami	7,924	0,979	3,713	12,134
Yacú . Ygor . Ypec	9,754	0,979	5,543	13,964
Yacú . Yami . Ypec	-3,586	0,979	-7,797	0,624
Ygor . Yami . Ypec	-13,549	0,979	-17,759	-9,338

Tabela V.6 - Estimativa dos efeitos para θ_s - Planejamento fatorial 2^4

Variáveis Independentes	Efeitos Estimados	Desvio Padrão	Limite de Confiança -95%	Limite de Confiança +95%
Média	23,921	0,350	22,413	25,429
Yaçú	-0,188	0,764	-3,474	3,099
Ygor	-5,188	0,764	-8,474	-1,901
Yami	-0,813	0,764	-4,099	2,474
Ypec	-1,063	0,764	-4,349	2,224
Yaçú . Ygor	-1,813	0,764	-5,099	1,474
Yaçú . Yami	0,313	0,764	-2,974	3,599
Yaçú . Ypec	-1,188	0,764	-4,474	2,099
Ygor . Yami	2,063	0,764	-1,224	5,349
Ygor . Ypec	0,563	0,764	-2,724	3,849
Yami . Ypec	2,188	0,764	-1,099	5,474
Yaçú . Ygor . Yami	-0,563	0,764	-3,849	2,724
Yaçú . Ygor . Ypec	0,188	0,764	-3,099	3,474
Yaçú . Yami . Ypec	-2,438	0,764	-5,724	0,849
Ygor . Yami . Ypec	-1,938	0,764	-5,224	1,349

Tabela V.7 - Análise de variância - Queda de pressão de jorro estável

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	168854	5	33770,8
Resíduos	21244,4	13	1634,2
Falta de Ajuste	20520,7	11	1865,5
Erro Puro	723,7	2	361,9
Total	190098,4	18	_____

Tabela V.8 - Análise de variância - θ_M

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	204,5469	3	68,1823
Resíduos	127,3742	15	8,4916
Falta de Ajuste	124,2075	13	9,5544
Erro Puro	3,1667	2	1,5834
Total	331,9211	18	_____

Tabela V.9 - Análise de variância - Eficiência de produção de pó

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	2746,974	6	457,829
Resíduos	183,746	12	15,312
Falta de Ajuste	175,483	10	17,5483
Erro Puro	8,263	2	4,1315
Total	2930,72	8	_____

Tabela V.10 - Análise de variância - Retenção de sólidos

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	14178	8	1772,25
Resíduos	3250,33	10	325,03
Falta de Ajuste	3219,64	8	402,46
Erro Puro	30,69	2	15,35
Total	17428,31	18	_____

Tabela V.11 - Análise de variância - Perdas de sólidos no equipamento

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	8969,27	9	996,59
Resíduos	2630,40	9	292,27
Falta de Ajuste	2622,74	7	374,68
Erro Puro	7,66	2	3,83
Total	11599,67	18	_____

Tabela V.12 - Análise de variância - θ_s

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Número de Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	107,6406	1	107,6406
Resíduos	126,9910	17	7,4701
Falta de Ajuste	122,3243	15	8,1550
Erro Puro	4,6667	2	2,3334
Total	234,6316	18	_____

APÊNDICE VI

DADOS DAS POLPAS DE FRUTAS

Tabela VI.1 - Medidas da densidade das polpas de frutas tropicais

Polpa	Densidade (g/cm ³)		Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Manga	1,079	1,078	1,079	0,0007	0,07
Cajá	1,076	1,055	1,065	0,0148	1,39
Umbu	1,111	1,105	1,108	0,0042	0,38
Seriguela	1,112	1,127	1,120	0,0106	0,94
Pinha	1,127	1,134	1,131	0,0049	0,44
Abacate	1,051	1,057	1,054	0,0042	0,40
Acerola	1,071	1,072	1,072	0,0007	0,07

Tabela VI.2 - Reologia das polpas de frutas tropicais

Polpa	ω decrescente (rpm)		ω crescente (rpm)		ω decrescente (rpm)		Médias e Desvios		
	μ (Cp)	τ (dyn.cm)	μ (Cp)	τ (dyn.cm)	μ (Cp)	τ (dyn.cm)	Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Manga	1096	4725	1025	4400	1018	4380	1046	43,15	4,12
Cajá	1375	5910	1325	5700	-	-	1350	35,3	2,62
Umbu	750	3237	746	3218	-	-	748	2,83	0,38
Seriguela	515	2215	520	2207	545	2245	525	16,07	3,06
Pinha	2540	5475	2474	5345	2475	5351	2496	45,23	1,81
Abacate	1877	4049	1610	3460	1537	3315	-	-	-
Acerola	528	2280	507	2180	-	-	-	-	-

Tabela VI.3 - Medidas da tensão superficial das polpas de frutas tropicais

Polpa	Tensão Superficial dyn/cm ²								Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Manga	44,2	43,4	46,5	43,0	46,0	43,1	-	-	44,3	1,53	3,45
Cajá	66,3	62,4	66,3	61,9	61,4	57,9	60,3	-	62,3	3,06	4,92
Umbu	62,4	62,0	63,1	65,0	59,8	60,1	61,2	63,0	62,1	1,71	2,75
Seriguela	-	60,0	56,0	56,0	59,8	58,9	57,6	-	58,1	1,80	3,1
Pinha*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abacate*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acerola	-	54,0	55,4	54,4	53,9	-	-	-	54,4	0,69	1,26

* Não foi possível medir.

Tabela VI.4 - Caracterização físico-química da polpa de manga - Reprodutibilidade das análises

Análises Físico-Químicas	Medidas						Média	Desvio Padrão	Erro (%)
pH	4,15	4,17	4,16	-	-	-	4,16	0,01	0,24
Acidez (% ácido cítrico)	0,314	0,310	0,319	-	-	-	0,314	0,0045	1,43
Fibras (%)	0,367	0,374	0,387	-	-	-	0,376	0,0101	2,70
Matéria Graxa (%)	0,381	0,384	0,377	0,410	0,416	-	0,397	0,018	4,54
Sólidos Totais	21,13	21,31	21,06	-	-	-	21,17	0,129	0,61
Umidade (base úmida) (%)	78,87	78,69	78,94	-	-	-	78,83	0,129	0,16
Sólidos Solúveis (°Brix) (%)	17,5	17,7	17,6	-	-	-	17,5	0,100	0,57
Açúcares Redutores (AR) (%)	5,83	5,80	5,67	-	-	-	5,77	0,085	1,47
Açúcares Redutores Totais (ART) (%)	17,43	17,11	17,19	16,80	16,99	-	17,1	0,234	1,37
Pectina (% ácido pécico)	0,5218	0,4970	0,4907	-	-	-	0,503	0,0164	3,27
Amido (%)	0,412	0,388	0,388	-	-	-	0,396	0,0139	3,50
Proteínas (%)	0,489	0,476	-	-	-	-	0,483	0,0092	1,90

Tabela VI.5 - Medidas das umidades dos pós - Ensaios de secagem de polpas de frutas utilizando polietileno de alta densidade como material inerte

Polpa	U _{pó} (%) (base úmida)			Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Umbu	5,59	5,77	6,04	5,8	0,22	3,91
Umbu	11,24	12,17	12,90	12,1	0,83	6,88
Manga	7,21	7,66	7,86	7,58	0,33	4,39
Acerola	7,61	-	-	7,61	-	-
Seriguela	7,51	7,37	7,53	7,47	0,09	1,14
Cajá	7,07	7,80	7,60	7,49	0,38	5,04
Manga	9,48	10,47	-	9,98	0,7	7,01

Tabela VI.6 - Medidas do ângulo de repouso do leito de polietileno de alta densidade com adição de polpas de frutas (2%)

Polpa	Brix	U _{polpa} (%)	θ_m							Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Umbu	12	87,32	30	32	30	31	-	-	-	30,8	0,96	3,1
Umbu	10,8	88,69	30	32	30	29	-	-	-	30,3	1,26	4,15
Acerola	6,6	91,19	34	33	32	33	-	-	-	33,0	0,17	0,53
Seriguela	17,1	78,83	30	30	31	31	30	32	32	30,9	0,90	2,91
Cajá	10,8	86,01	32	31	30	-	-	-	-	31,0	1,0	3,23
Manga	17,5	78,87	31	31	32	30	31	30	32	31,0	0,82	2,63

Tabela VI.7 - Medidas do ângulo de repouso após secagem e do material retido no leito -
Ensaio com polpas de frutas

Polpa	Bateladas	M_R/M_I (%)			Média	Desvio Padrão	Erro (%)	θ_s				Média	Desvio Padrão	Erro (%)
Umbu 1	6 x 50	1,37	1,41	-	1,39	0,03	2,03	32	32	33	-	32,3	0,58	1,79
Umbu 2	4 x 50	0,96	0,89	0,97	0,94	0,04	2,14	30	31	31	30	30,5	0,58	1,89
Acerola	3 x 50	0,40	0,65	0,38	0,48	0,15	31,34	37	38	38	38	37,8	0,5	1,32
Manga	5 x 50 (57°C)	1,15	1,16	1,24	1,18	0,05	4,18	43	44	42	44	43,3	0,96	2,21
	4 x 50 (70°C)	1,28	1,31	1,35	1,31	0,04	2,68	40	41	40	-	40,3	0,58	1,43
	1 x 60 (70°C)	0,34	0,34	0,25	0,31	0,05	16,8	26	27	27,5	26	26,6	0,75	2,82
Cajá	6 x 50	1,31	1,19	1,20	1,23	0,07	5,41	35	35	32	34	34	1,41	4,16
Seriguela	6 x 50	1,40	1,35	-	1,38	0,04	2,56	30	30	29	-	29,7	0,58	1,94

Tabela VI.8 - Ensaio fluidodinâmico com polpas de frutas

Ensaio	Poliestireno de Baixa Densidade		Polietileno de Alta Densidade		SANGEL [®]	
	Q_{jm} (m ³ /s)x10 ³	ΔP_{jes} (Pa)	Q_{jm} (m ³ /s)x10 ³	ΔP_{jes} (Pa)	Q_{jm} (m ³ /s)x10 ³	ΔP_{jes} (Pa)
Umbu	16,1	497,4	15,9	548,8	-	-
Manga	14,5	531,7	18,6	463,0	14,9	720,3
Acerola	21,8	188,7	22,2	171,5	-	-
Seriguela	20,0	-	18,8	497,4	-	-
Cajá	16,7	377,3	16,9	514,5	-	-
Pinha	17,9	566,0	-	-	-	-
Cajá Manga	17,3	257,3	-	-	-	-
Sem Polpa	16,9	377,3	17,07	670,0	17,5	557,4

APÊNDICE VII

CÁLCULO DO VALOR ÓTIMO DA EFICIÊNCIA

A expressão da eficiência (Efic), equação (VII.1), em termos das variáveis $Y_{açu}$, Y_{gor} , Y_{ami} e Y_{pec} , respectivamente, teores de açúcar, gordura, amido e pectina, sujeita às restrições dos seus limites inferiores e superiores, representa um modelo de otimização não linear, posto que a função objetivo, Efic, possui os termos “ $2,36Y_{açu} \cdot Y_{gor}$ ” e “ $2,55Y_{ami} \cdot Y_{pec}$ ”, inviabilizando-se a utilização de métodos de resolução para modelos lineares, tal como o Simplex.

$$\begin{aligned} \text{MaxEfic} = & 15,68 - 9,71Y_{açu} + 4,32Y_{gor} + 5,89Y_{ami} + 3,96Y_{pec} \\ & - 2,36Y_{açu} \cdot Y_{gor} + 2,55Y_{ami} \cdot Y_{pec} \end{aligned} \quad (\text{VII.1})$$

sendo: $1,35 \leq Y_{açu} \leq 1,45$, $1,22 \leq Y_{gor} \leq 3,59$, $1,13 \leq Y_{ami} \leq 1,24$ e $2,07 \leq Y_{pec} \leq 2,68$

O modelo permite mais simplificações. Cada uma das variáveis independentes: $Y_{açu}$; Y_{gor} ; Y_{ami} ; e Y_{pec} , podem ser substituídas por outras variáveis: $X1$; $X2$; $X3$; e $X4$, de modo que os limites dos seus valores viáveis se situem no domínio dos números Reais não negativos. Isto requer uma transformação linear.

$$Y_{açu} = X1 - 1,35 \rightarrow X1 \leq 2,80 \quad (\text{VII.2})$$

$$Y_{gor} = X2 - 1,22 \rightarrow X2 \leq 4,81 \quad (\text{VII.3})$$

$$Y_{ami} = X3 - 1,24 \rightarrow X3 \leq 2,37 \quad (\text{VII.4})$$

$$Y_{pec} = X4 - 2,07 \rightarrow X4 \leq 4,75 \quad (\text{VII.5})$$

Substituindo as equações (VII.2) a (VII.5), a equação (VII.1) passa a ser:

$$\text{Max Efic} = 10,7 - 6,83X_1 + 7,51X_2 + 0,61X_3 + 0,8X_4 - 2,36X_1.X_2 + 2,55X_3.X_4 \quad (\text{VII.6})$$

sendo: $X_1 \leq 2,80$, $X_2 \leq 4,81$, $X_3 \leq 2,37$, $X_4 \leq 4,75$ e com $X_i \geq 0$, para todo i .

Apreciando-se o modelo simplificado, equação (VII.6), é notável a influência negativa da variável independente X_1 , na função objetivo. Por isso, na solução ótima para Efic, o valor ótimo de X_1^* será nulo, simplificando a otimização na equação (VII.7):

$$\text{Max Efic} = 10,7 + 7,51X_2 + 0,61X_3 + 0,8X_4 + 2,55X_3.X_4 \quad (\text{VII.7})$$

sendo: $X_1 = 0$, $X_2 \leq 4,81$, $X_3 \leq 2,37$, $X_4 \leq 4,75$ e com $X_i \geq 0$, para todo i .

Mesmo com a simplificação o modelo se manteve não linear. Assim, uma forma de se sondar a tendência dos valores de X_2 , X_3 e X_4 , que irão produzir o valor ótimo de Efic, poderá ser especulado via simulação, por cálculo direto de Efic para valores combinados das variáveis independentes. Desta forma, com conjuntos discretos de valores viáveis das variáveis, escolhidos, de início, no domínio dos números Inteiros e incluindo-se apenas, no domínio dos números Reais, os valores dos seus limites superiores das variáveis, pode-se fazer uma tabela com colunas X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e Efic, gerada à partir de modelo mais simplificado, equação (VII.7). Os conjuntos discretos iniciais adotados foram os seguintes:

para X_1 o conjunto $\{ 0 \}$, valor único

para X_2 o conjunto $\{ 0, 1, 2, 3, 4, 4,81 \}$

para X_3 o conjunto $\{ 0, 1, 2, 2,37 \}$

para X_4 o conjunto $\{ 0, 1, 2, 3, 4, 4,75 \}$

O número de linhas da tabela é dado pelo número de combinações dos valores inteiros viáveis de X_1 , X_2 , X_3 e X_4 , dentro do conjunto, acrescido da linha com os valores dos seus limites superiores combinados. Após a geração da tabela, faz-se o seu ordenamento com base nos valores crescentes de Efic. Desta forma é possível se verificar

dentro de quais limites das variáveis independentes se encontra o valor ótimo de Efic. Uma vez encontrado estes limites, dentro de intervalos $X_i^{\min}$ e $X_i^{\max}$, determinados na tabela inicial, pode-se discretizar novos valores para conjuntos a serem combinados, como no início, dentro dos limites agora conhecidos, podendo ser determinados no domínio dos reais, a partir do passo incremental da discretização inicialmente adotado. Por aplicações sucessivas deste refinamento, é possível se achar valores ótimos de $X1^*$, $X2^*$, $X3^*$ e $X4^*$, com uma precisão controlada pelo algoritmo adotado aqui, que determina o valor ótimo $Efic^*$ que se pretende alcançar.

No caso em estudo, o valor ótimo $Efic^*$ foi alcançado justamente no ponto dado pelos valores limites superiores das variáveis independentes. A tabela produzida inicialmente foi suficiente para se chegar aos valores ótimos de $X1^*$, $X2^*$, $X3^*$ e $X4^*$. Também, para melhor se observar o resultado obtido, foi produzido um gráfico com os valores crescentes de Efic, para as diversas combinações das variáveis independentes. Este desempenho pode ser explicado em virtude de função objetivo Efic ser crescente para cada uma das variáveis independentes $X2$, $X3$ e $X4$, e decrescente para valores de $X1$. Como $X1$ foi anulada logo na análise inicial, era de se esperar que $Efic^*$ se encontrasse na fronteira superior das outras variáveis.

Desta forma, os valores ótimos encontrados para as variáveis transformadas, e suas associações, foram os seguintes:

$$X1^* = 0 \quad \text{e} \quad Y_{acu}^* = -1,35$$

$$X2^* = 4,81 \quad \text{e} \quad Y_{gor}^* = 3,59$$

$$X3^* = 2,37 \quad \text{e} \quad Y_{ami}^* = 1,24$$

$$X4^* = 4,75 \quad \text{e} \quad Y_{pec}^* = 2,68$$

$$\text{E o valor ótimo de } Efic^* = 80,726\%$$

A seguir é apresentada a tabela ordenada e, na seqüência, o gráfico correspondente.

Tabela VII.1 - Valores ordenados da eficiência, calculadas para valores discretizados de X1, X2, X3 e X4, para a função objetivo Efic

Ordem	X1=	X2=	X3=	X4=	Efic=
1	0	0	0	0	10,7
2	0	0	1	0	11,3
3	0	0	0	1	11,5
4	0	0	2	0	11,9
5	0	0	0	2	12,3
6	0	0	0	3	13,1
7	0	0	0	4	13,9
8	0	0	1	1	14,7
9	0	0	2	1	17,8
10	0	0	1	2	18
11	0	1	0	0	18,2
12	0	1	1	0	18,8
13	0	1	0	1	19
14	0	1	2	0	19,4
15	0	1	0	2	19,8
16	0	1	0	3	20,6
17	0	0	1	3	21,4
18	0	1	0	4	21,4
19	0	1	1	1	22,2
20	0	0	2	2	23,7
21	0	0	1	4	24,7
22	0	1	2	1	25,3
23	0	1	1	2	25,5
24	0	2	0	0	25,7
25	0	2	1	0	26,3
26	0	2	0	1	26,5
27	0	2	2	0	26,9
28	0	2	0	2	27,3
29	0	2	0	3	28,1
30	0	1	1	3	28,9
31	0	2	0	4	28,9
32	0	0	2	3	29,6
33	0	2	1	1	29,7
34	0	1	2	2	31,2
35	0	1	1	4	32,2
36	0	2	2	1	32,8
37	0	2	1	2	33
38	0	3	0	0	33,2

Ordem	X1=	X2=	X3=	X4=	Efic=
39	0	3	1	0	33,8
40	0	3	0	1	34
41	0	3	2	0	34,5
42	0	3	0	2	34,8
43	0	0	2	4	35,5
44	0	3	0	3	35,6
45	0	2	1	3	36,4
46	0	3	0	4	36,4
47	0	1	2	3	37,1
48	0	3	1	1	37,2
49	0	2	2	2	38,7
50	0	2	1	4	39,7
51	0	3	2	1	40,4
52	0	3	1	2	40,5
53	0	4	0	0	40,7
54	0	4	1	0	41,4
55	0	4	0	1	41,5
56	0	4	2	0	42
57	0	4	0	2	42,3
58	0	1	2	4	43
59	0	4	0	3	43,1
60	0	3	1	3	43,9
61	0	4	0	4	43,9
62	0	2	2	3	44,6
63	0	4	1	1	44,7
64	0	3	2	2	46,3
65	0	3	1	4	47,2
66	0	4	2	1	47,9
67	0	4	1	2	48,1
68	0	2	2	4	50,5
69	0	4	1	3	51,4
70	0	3	2	3	52,2
71	0	4	2	2	53,8
72	0	4	1	4	54,8
73	0	3	2	4	58,1
74	0	4	2	3	59,7
75	0	4	2	4	65,6
76	0	4,81	2,37	4,75	80,8

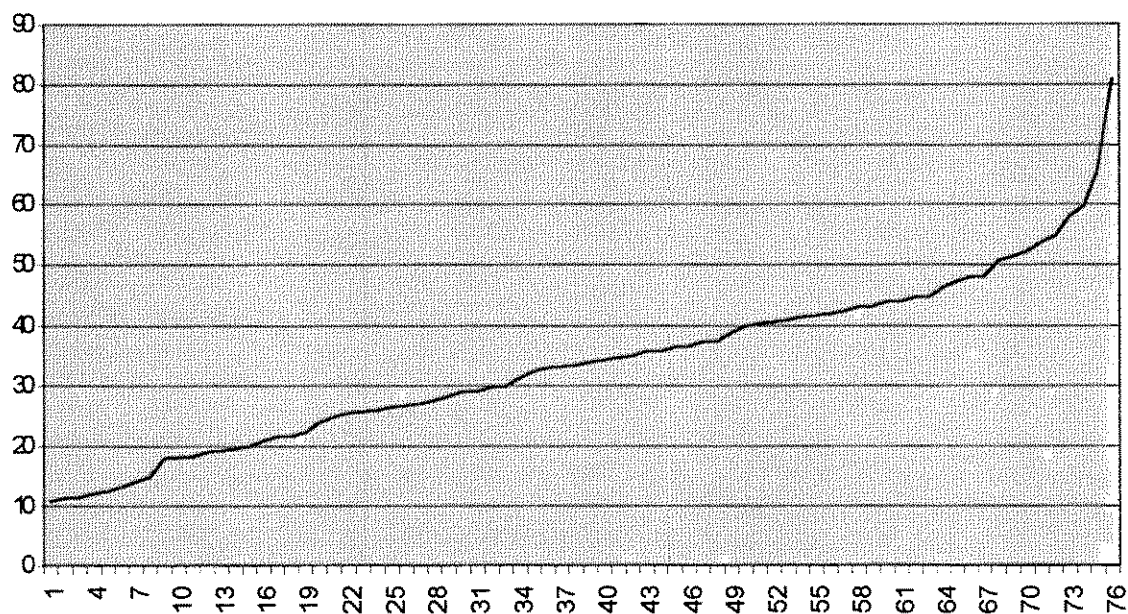


Figura VII.1 – Otimização - Gráfico referente aos dados da Tabela VII.1