

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**ANÁLISE DE UM PROCESSO DE  
RECOBRIMENTO DE COMPRIMIDOS EM UM  
SISTEMA VIBRO-JORRADO BIDIMENSIONAL**

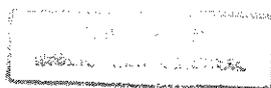
Aluno: Célio Augusto Gomes de Souza  
Orientador: Theo Guenter Kieckbusch

Tese apresentada à comissão de Pós-Graduação em Engenharia Química como requisito exigido para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, na área de concentração de Engenharia de Processos.

Campinas - São Paulo - Brasil

Fevereiro - 1997

2.



UNIDADE	BC
N.º DE ENCADENAMENTO	T/UNICAMP
V.	20.89.02
TÍTULO	30018
PREÇO	281/97
	0 <input type="checkbox"/> 0 <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	06/05/97
N.º CPD	

CM-00099463-2

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

So89a Souza, Célio Augusto Gomes de  
Análise de um processo de recobrimento de comprimidos em um sistema vibro-jorrado bidimensional / Célio Augusto Gomes de Souza.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Theo Guenter Kieckbusch.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processos de leito de jorro - Vibração.  
2. Partículas - Vibração. I. Kieckbusch, Theo Guenter.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

À minha mãe Reneé, pela fé e incentivo.  
À minha esposa Socorro, pelo amor e  
compreensão, e a meus filhos Alyne e  
Alan, pelos seus carinhos, e a todos que  
me são próximos, com amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch, pela sua amizade, dedicada orientação, incentivo e compreensão no desenvolvimento em todas as etapas deste trabalho.

À Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha do DTF da FEQ/UNICAMP, que no início do trabalho, cedeu materiais bibliográficos e matérias primas, além de emprestar diversos equipamentos, como também ajudou com esclarecimentos que solidificaram o desenvolvimento desta tese.

Ao Engenheiro Pedro Raggio ( Mestre Pedro) do Depto da Física/Unicamp, pela amizade e auxílio no projeto e construção do detetor de partículas e da instalação elétrica da unidade experimental.

Ao amigo e Prof. Dr. Roberto Nunhez do DPQ da FEQ/UNICAMP, pela valiosa contribuição no tratamento do Método Spline Modificado.

Aos professores, colegas e funcionários do DTF da Unicamp, pela amizade, sugestões, incentivos e trocas de idéias que colaboraram para este trabalho.

Aos técnicos Celso Camargo, Fábio Vilalba e Levi Madeira, pela amizade e ajuda na construção e montagem dos equipamentos, bem como no auxílio da coleta dos dados experimentais.

Ao Fernando Matos e Celso Camargo pelo auxílio na elaboração dos esquemas e tabelas que compõem a edição da tese.

Aos funcionários da oficina da FEQ/UNICAMP, pela convivência amigável e ajuda no equipamento experimental.

Ao meu irmão Carlos Felipe pelo incentivo e amizade.

Aos meus irmãos de coração Augusto, Paulo, Jorge, Roberto, Fátima, Alcimar, Regina e Elita pela dedicada amizade e carinho.

Ao Departamento de Termofluidodinâmica da FEQ/UNICAMP, pelo uso de suas instalações.

À Universidade Federal do Pará, através do Departamento de Engenharia Química pelo afastamento integral, fato fundamental para a conclusão desta tese.

À CAPES (PICD), pelo apoio financeiro.

Ao Instituto de Química da UNICAMP pelo empréstimo do moinho coloidal.

À Fátima minha irmã de fé pelo incentivo e preciosa ajuda.

Aos amigos Carlos e Helenice pela grande solidariedade e ajuda no final deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp pelo uso do medidor de fluxo de ar calibrado

À Fábrica Cristália de Itapira-SP, pela doação dos comprimidos utilizados neste trabalho.

À todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iii
<b>SUMÁRIO</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	ix
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1- ASPECTOS GERAIS DE RECOBRIMENTO DE COMPRIMIDOS.....	2
1.1.1- Considerações Gerais.....	2
1.1.2 - Processos de Recobrimento de Comprimidos.....	4
a- Processos em Drageadeiras.....	4
b- Processos em Leito Fluidizado e de Jorro.....	6
1.2- OBJETIVOS DO TRABALHO.....	7
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	9
2.1- INTRODUÇÃO.....	10
2.2- LEITOS VIBRO-FLUIDIZADOS E VIBRO-JORRADOS.....	10
2.2.1- Conceitos de Movimento Oscilatório.....	10
2.2.2- Classificação do Tamanho da Partícula.....	15
2.2.3- Velocidade Mínima de Fluidização.....	16
2.2.4- Regimes de Comportamentos Vibracionais em Leitos.....	18
2.3- PARÂMETROS DE LEITOS VIBRACIONAIS.....	20
2.3.1- Dinâmica do Leito.....	20
2.3.2- Descrição do Movimento do Leito.....	21
2.3.3- Velocidade Incipiente de Vibro-fluidização ( $V_{mvf}$ ).....	26
2.3.4- Queda de Pressão ( $\Delta P$ ) em Leitos com Vibração.....	28
2.3.5- Porosidade do Leito.....	31
2.4- TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM LEITOS VIBRADOS.....	32
2.4.1- Transferência de Calor Gás-Partícula.....	32
2.4.2- Transferência de Calor Aquecedor Submerso-Leito.....	35
2.4.3- Transferência de Massa.....	38
2.5- PROCESSOS EM LEITO DE JORRO.....	39

2.6- SISTEMA DE ATOMIZAÇÃO.....	47
2.7-DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DE PARTÍCULAS EM LEITOS MÓVEIS.....	50
a- Distribuição de Tempo de Ciclo (DTC).....	50
b- Distribuição do Número de Ciclos (DNC) e da Massa Depositada por Ciclo.....	53
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>57</b>
3.1- MATERIAIS.....	58
3.1.1- Suspensão de Recobrimento.....	58
3.1.2- Caracterização das Partículas.....	59
a- Massa Específica da Partícula Inerte.....	60
b- Diâmetro das Partículas.....	62
c- Esfericidade das Partículas.....	62
d- Massa Específica Aparente e Porosidade.....	63
3.2- EQUIPAMENTOS.....	64
3.2.1- Secador de Leito Vibro-Jorrado Bidimensional (LVJ-BD).....	64
3.2.2- Leito de Jorro.....	67
3.2.3- Sistema de Alimentação e Controle da Vazão de Ar.....	69
3.2.4- Sistema de Alimentação da Suspensão de Recobrimento.....	70
3.2.5- Sistema de Vibração.....	72
3.2.6- Dispositivo de Retirada de Amostras.....	74
3.2.7- Medidas de Temperatura.....	74
3.2.8- Medidas de Distribuição de Tempo de Ciclo.....	74
3.3- METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	78
3.3.1- Ensaios de Fluidodinâmica do Leito Bidimensional.....	78
3.3.2- Ensaios de Distribuição do Tempo de Ciclo.....	79
3.3.3- Ensaios de Recobrimento.....	79
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>82</b>
4.1- OBSERVAÇÕES GERAIS.....	83
4.2- FLUIDODINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO BIDIMENSIONAL.....	84
4.2.1 - Perdas de Carga do Equipamento Sem Partículas.....	84
4.2.2 - Parâmetros Hidrodinâmicos.....	85
4.3- DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE CICLO.....	90
4.3.1- Introdução.....	90
4.3.2- Efeito da Amplitude e da Frequência de Vibração no Tempo Médio de Ciclo dos Comprimidos.....	93
4.3.3- Distribuição de Tempo de Ciclo ( $f = 10 \text{ Hz}$ e $A = 8 \text{ mm}$ ).....	97

4.4.1- Desenvolvimento Matemático.....	108
4.4.2- Desenvolvimento Experimental.....	110
4.4.3- Cinética de Crescimento dos Comprimidos.....	111
a- Efeito da Vibração.....	114
b- Efeito da Área da Placa da Base.....	115
c- Efeito do Tamanho dos Comprimidos.....	115
d- Eficiência de Recobrimento.....	115
4.4.4- Qualidade do Produto.....	118
4.4.5- Influência da Vazão da Solução de Recobrimento.....	120
4.4.6- Condições de Encharcamento do Leito.....	121
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>124</b>
5.1- CONCLUSÕES.....	125
a- Com Relação ao Desenvolvimento do Sistema Experimental.....	126
b- Com Relação a Fluidodinâmica do Leito.....	126
c- Com Relação ao Recobrimento.....	126
5.2-SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	127
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>128</b>
APÊNDICE A- Rotâmetro para medir a vazão de ar de expansão no leito vibro-jorrado bidimensional.....	129
APÊNDICE B- Queda de pressão e velocidade do gás no leito, com os comprimidos C1, C2 e C3, sem e com vibração.....	132
APÊNDICE C- Listagem do programa utilizado para obtenção dos dados de distribuição de tempo de ciclo.....	142
APÊNDICE D- Método Spline Modificado.(MSM).....	147
APÊNDICE E- Tabelas e gráficos de tempo médio de ciclo e a percentagem de ocorrência dos ensaios dos comprimidos C1, C2 e C3, usando as placas distribuidoras (6x4) cm <sup>2</sup> e (8x4) cm <sup>2</sup> .....	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182
ABSTRACT.....	189

## RESUMO

Palavras-chave: leito vibro-jorrado bidimensional, velocidade mínima de jorro, queda de pressão, tempo médio de ciclo

Desenvolveu-se uma unidade experimental para o estudo do revestimento de comprimidos em um leito de jorro bidimensional que usa a vibração da base perfurada para incrementar a circulação das partículas.

O vaso construído em acrílico com uma seção retangular de 4x32 cm, dotado de *draft plates* fixos (4x4 cm), era ajustável sobre 3 diferentes seções convergentes (inclinação 50°) com bases distribuidoras do ar, 4x4 cm, 4x6 cm e 4x8 cm e contendo 800g, 1100g e 1300g de comprimidos. Ar forçado (0,8 a 1,6 m<sup>3</sup>/min) pelo soprador de 7,5 cv, era arrefecido até 55°C promovia o jorro do leito.

Os comprimidos de formato lenticular (0,120; 0,250 e 0,440 gramas) foram recobertos por uma suspensão polimérica aquosa (11% de sólidos). O atomizador do tipo duplo fluido (pressão de ar 82,7 kPa) foi montado lateralmente, na parte angulada, bem próximo a base do leito e mostrou não influir sobre a movimentação das partículas.

Ênfase foi dada a caracterização experimental da taxa de circulação dos comprimidos no leito, utilizando-se de um magneto (0,4062 g) que acompanhava as partículas e atuava sobre uma bobina colocada na parte superior dos *draft plates*. Os pulsos elétricos eram processados em um sistema de aquisição de dados e as curvas de distribuição dos tempos de ciclo foram ajustadas pelo Método Spline Modificado

Em todos os ensaios equivalentes o tempo médio de ciclo cresce com o aumento da carga inicial do leito e com o tamanho dos comprimidos. A vibração (10 Hz, 8 mm de amplitude) reduz o tempo médio de ciclo em cerca de 10% e diminui a dispersão de sua distribuição.

A vibração também afeta a queda de pressão máxima (redução de 40%) e a velocidade mínima de fluidização.

O leito vibro-jorrado apresentou maior eficiência de adesão (73 a 88%) do que o não-vibrado (66 a 79%) e o recobrimento completo dos comprimidos menores exigiu menor tempo de operação devido a maior taxa de circulação de área total.

## ABSTRACT

An experimental set up for the study of tablets coating in a two-dimensional spouted bed that uses vibration of the perforated base to enhance the circulation of the particles was developed.

An acrylic rectangular upper section (4x32 cm) with fixed 4x4 cm draft plates was adjusted over 3 different convergent sections (inclination 50°) with 4x4 cm, 4x6 cm or 4x8 cm bases and contained 800g, 1100g or 1300g of tablets. Air (0,8 to 1,6 m<sup>3</sup>/min) forced by a 7,5 cv blower, was cooled down to 55°C and spouted this bed.

The lenticular tablets (0,12g; 0,25g; 0,44g) were coated with a polymeric aqueous solution (11% solids). A two-fluid atomizer (air pressure 82,7 kPa) was used, inserted laterally, near the bed base, and showed no influence on the movement of the particles.

The experimental characterization of the tablets circulation rates was emphasized, using a magnet (0,4062 g) that followed the particles, activating a bobbin located at the upper end of the draft plates. The electric pulses were processed by a data acquisition system and the cycle time distribution curves were adjusted by the Modified Spline fit technique.

The mean of the cycle time distribution increased with an increase of the bed load and the size of the tablets in all comparative tests. The vibration (10 Hz, 8 mm amplitude) reduced the mean of the cycle time distribution by more than 10%, and also decreased its variance.

The vibration also affected the maximum pressure drop (40% reduction) and the minimum spouting velocity

The vibro spouted bed showed higher adhesion efficiency (73 to 88%) than the non-vibrated spouted bed (66 to 79%) in all equivalent situations and the complete coating of the smaller tablets demanded less processing time due to higher surface area circulation rate.

## NOMENCLATURA

A	amplitude de vibração; [L]
$c_s$	concentração em peso de sólidos na suspensão; _____
d	diâmetro; [L]
$d_p$	diâmetro da partícula; [L]
f	freqüência de vibração; [T <sup>-1</sup> ]
$F_a$	força atuante sobre uma partícula devido ao atrito com o gás; [MLT <sup>-2</sup> ]
$F_i$	força de inércia; [MLT <sup>-2</sup> ]
$F_v$	força atuante sobre uma partícula devido a vibração; [MLT <sup>-2</sup> ]
$F_a$	força atuante sobre uma partícula devido ao atrito com o gás; [MLT <sup>-2</sup> ]
g	aceleração da gravidade; [LT <sup>-2</sup> ]
$H_o$	altura estática do leito; [L]
k	coeficiente angular da equação [4.7]; [T <sup>-1</sup> ]
$m_p$	massa de uma partícula; [M]
$m_r$	$m_{p,i}/m_{p,o}$ ; _____
$M_o$	massa inicial de partículas no leito; [M]
n	número de partículas; _____
$n_p$	número de comprimidos conhecido; _____
P	pressão total; [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$P_{max}$	pressão máxima; [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
Q	vazão de ar; [L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$Q_{jm}$	vazão de jorro mínimo; [L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
t	tempo; [T]
$t_i$	tempo de processo; [T]
$t_m$	tempo médio de ciclo; [T]
$t_{mc}$	tempo médio de ciclo calculado pelo método spline modificado; [T]
T	temperatura; [θ]
$T_g$	temperatura do gás; [θ]

$\Delta T$	média logarítmica das diferenças de temperatura na entrada e na saída do ar da equação [2.31]; [ $\theta$ ]
$v_g$	velocidade do ar de operação; [ $LT^{-1}$ ]
$v_{jm}$	velocidade mínima de jorro; [ $LT^{-1}$ ]
$v_{mf}$	velocidade mínima de fluidização; [ $LT^{-1}$ ]
$V$	massa de sólidos no leito; [M]
$W_s$	vazão mássica da suspensão de recobrimento; [ $MT^{-1}$ ]

### Letras Gregas

$\Delta$	diferença
$\Gamma$	relação entre aceleração vibracional e gravitacional; _____
$\epsilon$	porosidade do leito; [ $L^3L^{-3}$ ]
$\epsilon_{mf}$	porosidade mínima de fluidização; [ $L^3L^{-3}$ ]
$\eta$	eficiência de adesão; _____
$\theta$	ângulo da base inclinada do leito;
$\mu$	média de tempo de ciclo; [T]
$\rho$	densidade; [ $ML^{-3}$ ]
$\phi$	esfericidade; _____
$\omega$	frequência angular de vibração; [ $cicloT^{-1}$ ]

### Grupos Adimensionais

Ar	Número de Arquimedes
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds

## **CAPÍTULO 1**

## INTRODUÇÃO

### 1.1- ASPECTOS GERAIS DE RECOBRIMENTO DE COMPRIMIDOS

#### 1.1.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS

O recobrimento é tido como uma operação unitária que visa revestir de uma forma contínua a superfície de partículas, com uma solução ou camada de recobrimento chamada também de substrato.

O recobrimento de sólidos granulares é utilizado no processamento de uma grande variedade de produtos em diversos ramos industriais. Na indústria de alimentos, pode ocorrer recobrimento em balas e confeitos, e em ração de peixes. Na área da agricultura, inclui-se o recobrimento de sementes com material polimérico e de fertilizantes para controle da velocidade de dissolução do produto no solo. Na área nuclear, o processo é utilizado para revestir material de combustível nuclear com carbono pirolítico. Aqui será dado ênfase ao recobrimento de comprimidos para fins farmacêuticos.

O recobrimento de drogas para fins medicinais com soluções à base de açúcar, traz registros em publicações francesas datadas do século XXVII, que o descrevem como o modo de mascarar o gosto geralmente amargo dos remédios. A aceitação deste tipo de produto expandiu-se tanto no mercado europeu como nos Estados Unidos. A partir daí, houve um maior desenvolvimento em termos de produção deste produto com o aparecimento de equipamentos denominados de drageadeiras. Rocha (1992), e Freire e Oliveira (1992) fazem uma revisão dos tipos convencionais de drageadeiras ou "painéis de recobrimento ou rotatórias". Este equipamento de recobrimento manteve-se até meados dos anos 50, quando o Dr. Dale Wurster patenteou um equipamento recobridor que utiliza suspensão a ar quente, que mostrou-se eficiente no recobrimento de filmes poliméricos em comprimidos. Este processo foi chamado de recobrimento em leito fluido ou leito móvel.

A Figura 1.1, ilustra o mecanismo de recobrimento. Quando a solução de recobrimento é atomizada, as gotículas produzidas retêm suficiente fluidez para umedecer a superfície a ser recoberta, e a partir desse contato com a superfície, difunde-se e coalesce.

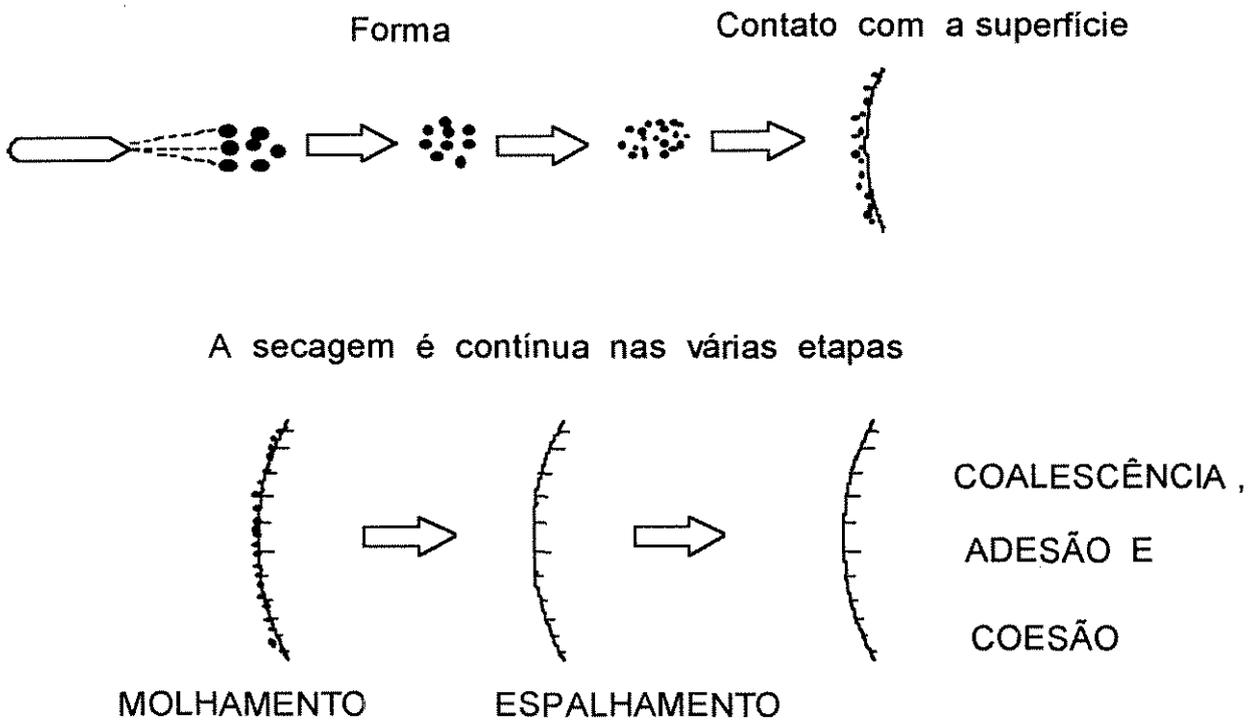


Figura 1.1- Mecanismo do recobrimento de comprimidos, ( Ayub, 1993).

A aplicação de recobrimento em comprimidos, apesar de ser um custo adicional ao processo, é baseada nas seguintes finalidades: mascara o sabor, odor e a cor indesejável da droga; protege a droga de fatores ambientais como a luminosidade, a umidade e o calor excessivo; protege a droga do suco gástrico do estômago; facilita a manipulação do comprimido e reduz ao mínimo a contaminação do produto; melhora a estética do produto; e possibilita a adição de outra substância na fórmula através do recobrimento a fim de evitar problemas de incompatibilidades químicas e garantir a dissolução seqüencial das drogas.

As características físicas dos comprimidos que sofrem recobrimento também são importantes, pois influenciam na qualidade de recobrimento. No decorrer do recobrimento há um forte atrito entre as partículas, e portanto os comprimidos devem possuir uma boa resistência mecânica, suportar a presença do calor e não devem ser afetados pela composição da solução de recobrimento.

## 1.1.2-PROCESSOS DE RECOBRIMENTO DE COMPRIMIDOS

Uma variedade de equipamentos já foi desenvolvida para o processo de recobrimento de comprimidos. O princípio básico é a aplicação de uma solução de recobrimento a um leito móvel de comprimidos, usando ar aquecido, que facilita a evaporação do solvente.

Têm-se de uma forma geral três tipos de equipamentos: 1) a panela ou drageadeira padrão, 2) a drageadeira ou panela perfurada e 3) os leitos móveis ou leitos fluidos. Estes equipamentos têm em comum a câmara, onde as partículas sofrerão recobrimento e secagem nas condições operacionais.

### a) Processos em drageadeiras

A drageadeira padrão (ver Figura 1.2) é um recipiente metálico esférico, montado de forma angular, provido de um motor que dá movimento de rotação à panela. Uma abertura na drageadeira permite a alimentação dos comprimidos e da solução ou suspensão de recobrimento. O recobrimento pode ser aplicado de forma manual ou com bicos atomizadores, sendo que com estes últimos obtém-se uma cobertura rápida e homogênea, evitando encharcamento e aglomeração dos comprimidos. A secagem é realizada pela presença de ar aquecido e a exaustão é feita por meio de tubos posicionados na parte frontal da panela. Este processo exige um tempo longo para o recobrimento e o controle do processo é difícil.

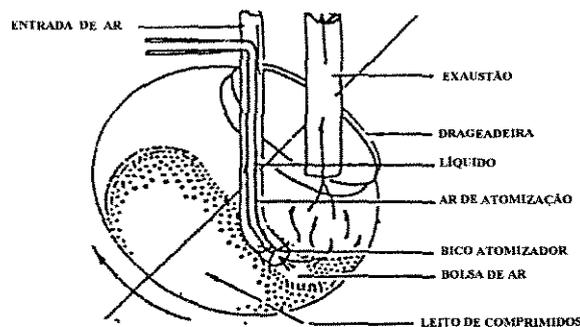


Figura 1.2- Diagrama de uma drageadeira padrão com tubo de imersão

A drageadeira perfurada consiste de uma panela parcialmente perfurada que gira sobre um eixo horizontal ou inclinado. O ar de secagem é direcionado para o interior do equipamento, que passa pelo leito de comprimidos e sai pelas perfurações do mesmo, como montado na Figura 1.3.

Este equipamento, em termos de eficiência de secagem, é superior à drageadeira convencional, porém o tempo de processo ainda é grande.

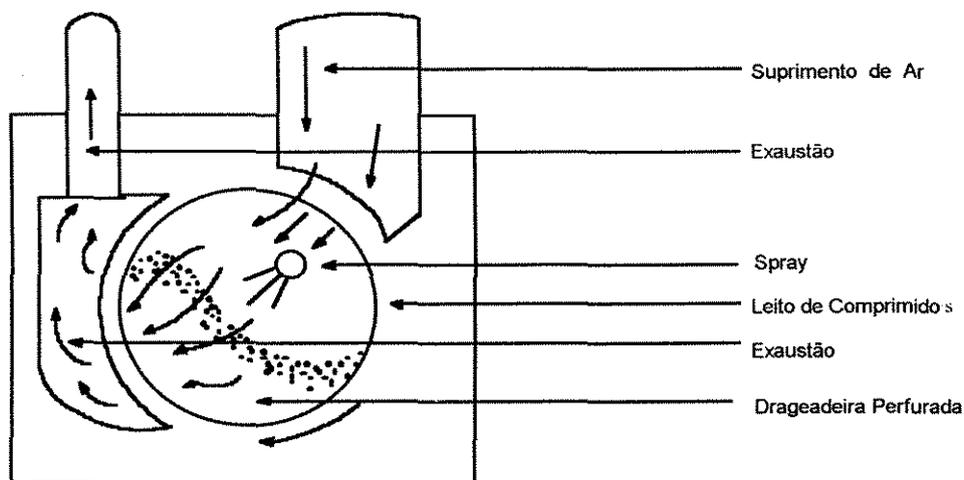


Figura 1.3- Diagrama de uma drageadeira perfurada

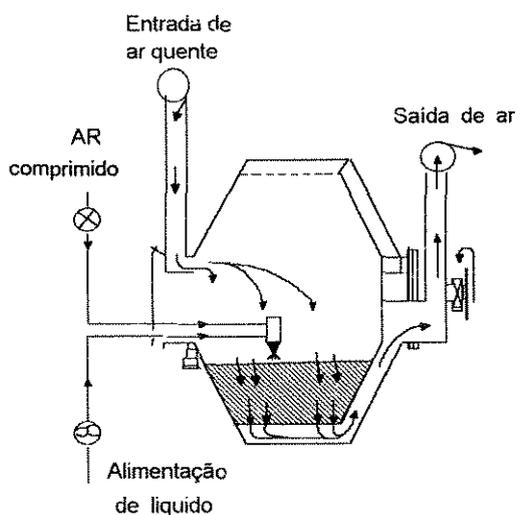


Figura 1.4- Diagrama do Hi-Coater

A Figura 1.4 mostra o equipamento de recobrimento, *Hi-Coater*, uma variação das drageadeiras perfuradas produzido pela Vector-Freund, USA. Observa-se que o ar de secagem é admitido diretamente na abertura frontal e não no compartimento circundante, como é no caso da panela perfurada.

### b) Processos em leito fluidizado e de jorro

O passo inicial para o processo de recobrimento que utiliza os princípios básicos de leito fluidizado, que até então eram usados para secagem de pós e grânulos, foi introduzido pelo Dr. Wurster na década de 50 e foi chamado de processo Wurster (1953). A Figura 1.5 mostra um desenho da câmara em atividade. O equipamento é um recipiente cilíndrico, no qual um leito móvel de comprimidos ascende continuamente pela coluna central e ao alcançar uma câmara de expansão, desacelera e cai numa região de fase densa que, por gravidade, move-se em direção à base do leito. A solução é atomizada por um bico disposto no fundo do leito e a circulação provocada pelo fluido aquecido permite boa homogeneização e secagem da solução sobre os comprimidos.

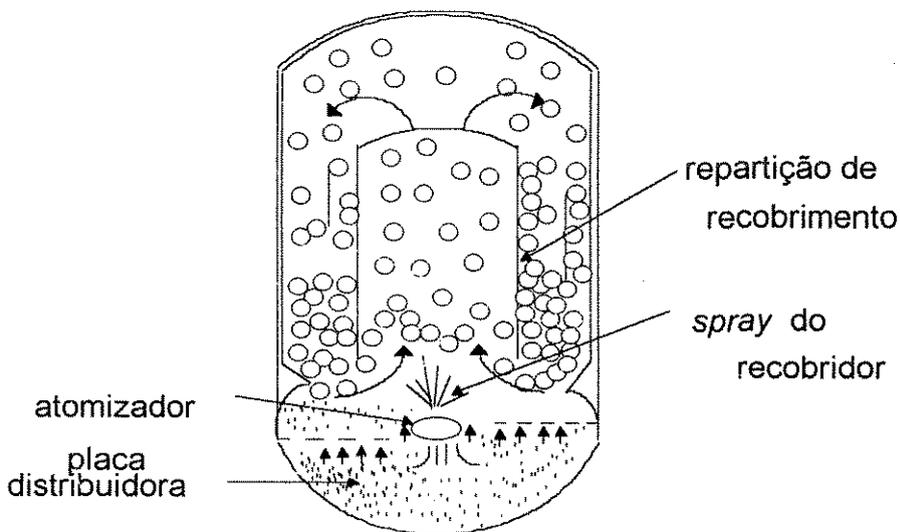


Figura 1.5- Diagrama esquemático da câmara de Wurster (1953).

O recobrimento por suspensão a ar feito no equipamento Wurster traz várias vantagens sobre as drageadeiras, entre elas: redução de custos, menor tempo de processo, menor espaço para instalação do equipamento, maior uniformidade do produto recoberto, ampliação da variedade de

produtos a serem recobertos, flexibilidade quanto ao uso de solventes pois o sistema é totalmente fechado, diminuindo os perigos de explosão e permitindo uso de solventes tóxicos.

A partir deste protótipo, começaram a surgir diversas modificações no projeto original do processo Wurster, com o objetivo de melhorar a eficiência do processo. Caldwell e Rosen (1964), avaliaram um equipamento patenteado com modificações do modelo Wurster. O equipamento não continha suporte de sustentação para o material, que era suspenso pelo ar de jorro, e a parte inferior da câmara era cônica, e nela os bicos atomizadores foram instalados lateralmente. Nele foram recoberto comprimidos e cápsulas com suspensão lipídica. Singiser et alii (1966), também adaptaram uma parte inferior cônica na câmara de recobrimento. Isto permitiu a caracterização do movimento dos comprimidos como sendo de jorro. Os autores observaram entretanto dificuldades na estabilidade do jorro com partículas pequenas e pesadas, achatadas ou finas, bem como atrito e quebra de partículas, assim como limitações no aumento do diâmetro da coluna.

## 1.2- OBJETIVOS DO TRABALHO

Os pesquisadores da área de desenvolvimento de processos em sistemas particulados da Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, vem desde o início da década de 90, realizando pesquisas ligadas ao recobrimento de partículas em leitos de jorro e afins. Os resultados têm confirmado que a eficiência do processo, isto é, a fração dos sólidos contidos na solução de recobrimento que efetivamente impregna as partículas no fim do processo é influenciada pela posição relativa entre o atomizador e o fluxo de partículas, e pela elutriação das gotículas promovida pelas altas velocidade do ar.

A alta velocidade do ar aquecido necessária para produzir o jorro, é o fator que mais contribui para reduzir a eficiência térmica nos secadores de jorro. Para superar essa deficiência, Finzer (1989) desenvolveu, na Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, um secador de leito vibro-jorrado, impondo uma vibração vertical à base cônica de um leito de jorro clássico.

O desenvolvimento normal das pesquisas com recobrimento e que pode ser considerado como uma inovação introduzida nesta tese, é aplicar a vibração ao processo de recobrimento de comprimidos em leito de jorro. A expectativa era conseguir aprimorar a capacidade de recobrimento devido a menor vazão de ar, a maior taxa de recirculação das partículas e à possibilidade de obter um escoamento mais denso no jorro, conforme Finzer (1989).

Para uma melhor visualização do processo, optou-se pelo leito bidimensional. Pesquisas com essa forma geométrica do leito tem sido incentivadas porque facilitam o processo de ampliação de escala. Para o levantamento de dados foi necessário projetar e construir o leito bidimensional, bem como desenvolver a montagem experimental, que consistiu basicamente de um leito, do soprador, de um sistema de arrefecimento, de medidores de vazão de ar, do bico atomizador, da bomba peristáltica, do compressor de ar, de termopares, e de um sistema de vibração.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica que enfatiza os aspectos da vibração e suas consequências. No Capítulo 3 descreve-se o desenvolvimento do equipamento e de métodos experimentais. Especial consideração foi dada a determinação das características de recirculação do leito e para tanto desenvolveu-se um dispositivo inovador que mede os pulsos elétricos de um magneto colocado na carga dos comprimidos em movimento.

A fim de facilitar a leitura, os dados coletados estão listados em Apêndices. Resultados típicos obtidos foram selecionados, apresentados e discutidos no Capítulo 4.

## **CAPÍTULO 2**

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- INTRODUÇÃO

Uma visão cronológica do desenvolvimento dos processos de recobrimento de comprimidos já foi apresentada no Capítulo 1. Sistemas de leitos circulantes aplicados ao recobrimento foi tema de diversas teses na Faculdade de Engenharia Química que revisaram conceitos e condições de funcionamento do leito de jorro. Duas importantes revisões sobre esse assunto também estão disponíveis em português ( Rocha, 1992; Freire e Oliveira, 1992).

Nesta revisão bibliográfica pretende-se enfatizar conceitos básicos e aspectos da influência da vibração sobre o processo, uma vez que essa tecnologia é menos conhecida e não se tem conhecimento de sua aplicação no revestimento de comprimidos. A vibração tem sido muito usada para auxiliar o processo de secagem em leitos fluidizados, sobretudo nos países do leste europeu (Pakowski et alii, 1984). Uma revisão recente sobre o assunto (Finzer e Kieckbusch, 1992) serviu de base para o texto abaixo. Consideração também é dada à medições do tempo de ciclo e suas conseqüências.

### 2.2- LEITOS VIBRO-FLUIDIZADOS E VIBRO-JORRADOS

#### 2.2.1- CONCEITOS DE MOVIMENTO OSCILATÓRIO

O estudo da vibração diz respeito ao movimento oscilatório de corpos e às forças que estão associadas a ele. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração e o seu projeto requer um exame do seu comportamento oscilatório.

As vibrações classificam-se de um modo geral em livre e forçada; a vibração é livre quando um sistema oscila sob a ação de forças que são inerentes a ele mesmo, ou seja, na ausência de qualquer força externa. Por exemplo, quando um peso preso a uma mola é deslocado da sua posição de equilíbrio e em seguida é solto, ocorrerão oscilações, podendo esse sistema vibrar em uma ou mais de suas frequências naturais. A vibração é forçada quando ela ocorre sob excitação de forças externas; neste caso o sistema é forçado a vibrar na frequência da excitação. Caso essa frequência de excitação coincidir com uma das frequências naturais do sistema, diz-se que se formou uma condição no sistema chamada de *ressonância*. Nessa condição o sistema vibra com uma amplitude máxima, pois há a absorção máxima de energia do sistema excitador, podendo com isso resultar em amplas e perigosas oscilações. Por exemplo, a ressonância pode ser a causa de

rupturas em estruturas como as de edifícios, pontes e asas de avião. Os sistemas de vibração estão sujeitos a um grau de amortecimento devido à dissipação de energia pelo atrito e outras resistências, sendo que o amortecimento modifica as frequências naturais do sistema. Quanto maior for o amortecimento no sistema, menor será a amplitude de vibração na frequência de ressonância, (Thomson, 1978).

Quando o movimento oscilatório se repete em intervalos iguais de tempo, é chamado de movimento periódico. O tempo de repetição,  $T$ , é denominado *período da oscilação*, e o seu recíproco,  $f = 1/T$  é chamado de *frequência*.

A forma mais simples de movimento periódico é o Movimento Harmônico. A Figura 2.1 mostra este movimento com o exemplo de uma massa suspensa em uma mola. Levantando-se a massa de sua posição de equilíbrio e soltando-a, ela oscilará para cima e para baixo. Dotando a massa com uma pequena fonte luminosa, o seu movimento pode ser registrado numa tira de filme sensível à luz que se move a uma velocidade constante.

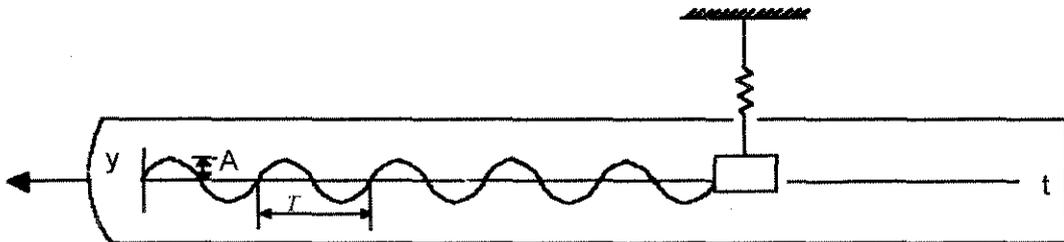


Figura 2.1-Registro de um movimento periódico, (Thomson, 1978).

O movimento registrado na tira do filme é expresso pela equação [2.1].

$$y = A \operatorname{sen} 2\pi \frac{t}{T} \quad [2.1]$$

onde  $A$  é a amplitude de oscilação, medida a partir da posição de equilíbrio da massa e  $T$  é o período da oscilação. O movimento é repetido na situação  $t = T$ , a cada  $2\pi$  radianos e a *freqüência angular*  $\omega$  é expressa por:

$$\omega = 2\frac{\pi}{T} = 2\pi f \quad [2.2]$$

Assim, o deslocamento  $y$  pode ser expresso por:

$$y = A \text{ sen } \omega t \quad [2.3]$$

onde  $\omega$  é medida em radianos por segundo.

A velocidade e a aceleração do movimento harmônico são determinadas pela diferenciação da equação [2.3]. Usando a notação ponto para a derivada, obtém-se:

$$\dot{y} = \omega A \cos \omega t = \omega A \text{ sen}(\omega t + \pi/2) \quad [2.4]$$

$$\ddot{y} = -\omega^2 A \text{ sen } \omega t = \omega^2 A \text{ sen}(\omega t + \pi) \quad [2.5]$$

Observa-se na Figura 2.2 que a velocidade e a aceleração são também harmônicas e com as mesmas freqüências de oscilação, porém à frente do deslocamento por  $\pi/2$  e  $\pi$  radianos, respectivamente.

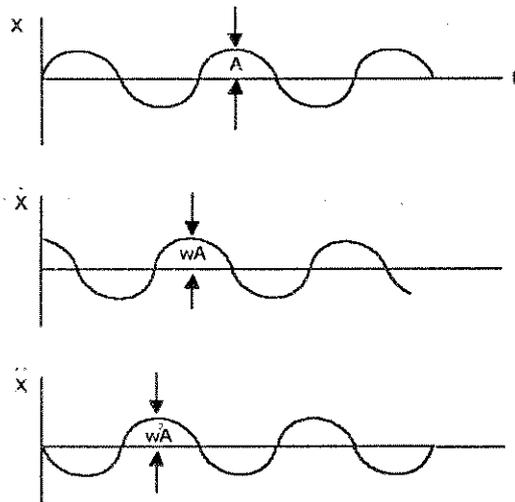


Figura 2.2- No movimento harmônico, a velocidade e a aceleração estão à frente do deslocamento por  $\pi/2$  e  $\pi$ .

Nos equipamentos de secagem que usam vibração, a movimentação das partículas é realizada por dispositivos que geram ação vibracional. Os tipos mais gerais são (Finzer e Kieckbusch, 1992):

a) Vibrador Mecânico de Inércia: este produz uma força de excitação mediante a rotação de massas desequilibradas. A Figura 2.3 apresenta um sistema constituído por um disco perfurado. Nos orifícios do disco (2), solidário a um eixo (1), são inseridas uma ou mais barras (3):

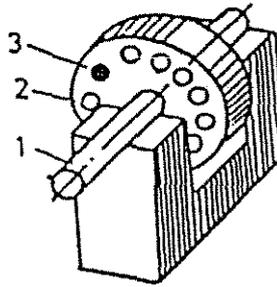


Figura 2.3- Vibrador mecânico de inércia.

b) Vibrador Excêntrico: é utilizado quando se necessita de forças de excitação elevadas e de baixa frequência. A Figura 2.4 mostra o sistema constituído por dois eixos (1), acoplados às excêntricas (2). O vibrador é suportado por quatro molas helicoidais na base.

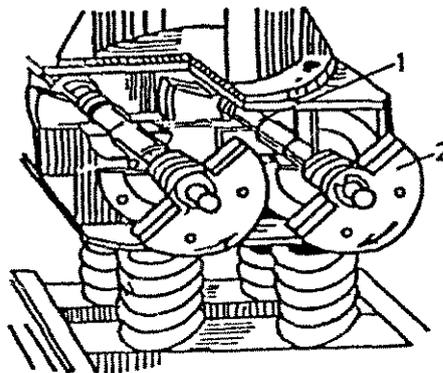


Figura 2.4 - Vibrador excêntrico

c) Vibrador Pneumático ou Hidráulico: são usados para proporcionar alta frequência de vibração. Na Figura 2.5 o ar da linha entra pelo canal (1) e movimenta o pistão para a direita. Quando o pistão ficar totalmente postado à direita, o ar da linha é admitido pelo canal (2) e então o

movimento do pistão segue para a esquerda. Quando o fluido de trabalho é um líquido ao invés de ar, tem-se um vibrador hidráulico.

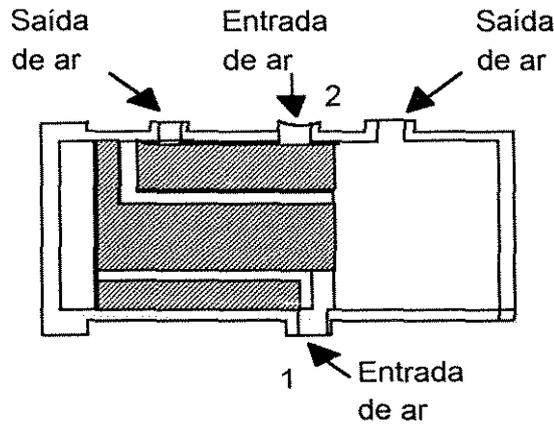


Figura 2.5- Vibrador pneumático.

d) Vibrador Eletromagnético: é usado para sistemas que trabalham com alta frequência de vibração. A Figura 2.6 mostra o princípio de funcionamento deste vibrador formado pelo indutor (1), pelo induzido (2) e pelo sistema elástico (3). O indutor é carregado pela rede elétrica; ao aumentar o fluxo magnético, o induzido é atraído pelo indutor; quando o fluxo diminui, o induzido retrocede pela ação do sistema elástico.

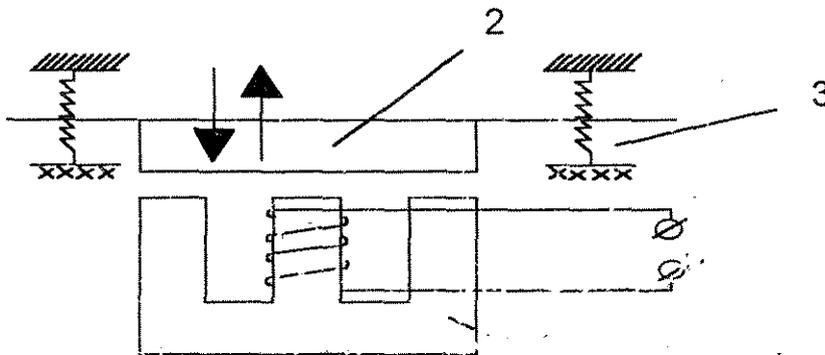


Figura 2.6- Vibrador eletromagnético.

2.2.2- CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DA PARTÍCULA

Um grande número de pesquisas tem sido realizado com uma variedade de materiais particulados. As partículas tem um comportamento diferenciado, que foi classificado por Geldart, citado por Erdész (1990) e apresentado na Figura 2.7.

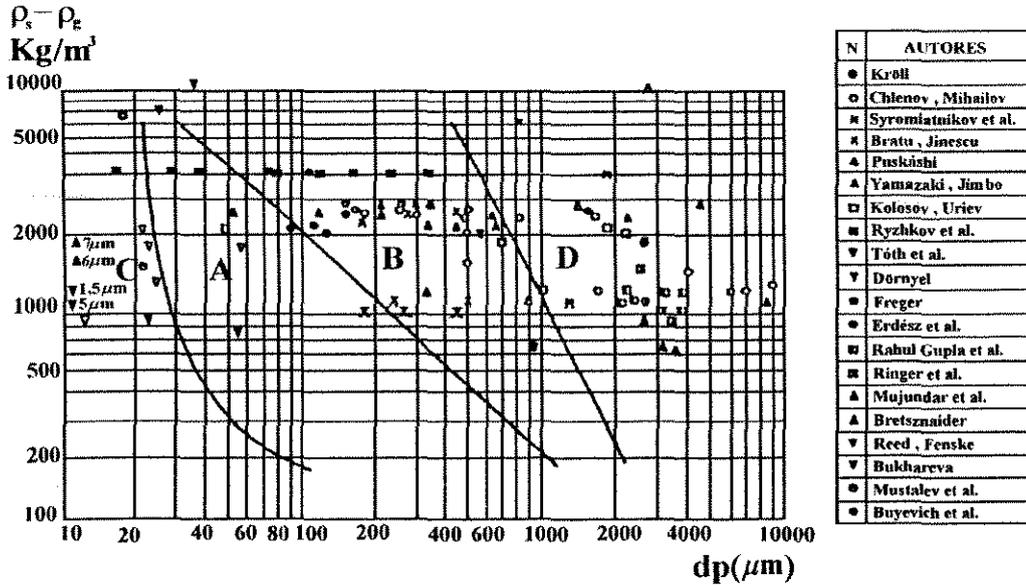


Figura 2.7- Classificação de materiais usados em estudos experimentais de leitos vibrados e vibro-fluidizados, (Erdész, 1990).

Observa-se que um pequeno número de experimentos tem sido feitos com materiais C e A por serem partículas muito finas e geralmente coesivas. Um número maior de pesquisas foi feito com materiais B, pois além de serem fáceis de fluidizar, eles melhoram suas características fluidodinâmicas quando submetidos a uma vibro-fluidização. As partículas do material D são de dimensões maiores e, portanto, desaconselháveis para uso em um leito fluidizado convencional, mas numerosos experimentos em leitos vibro fluidizados, (LVF), tem sido realizados com eles, apresentando bons resultados no processo de secagem. Elas também são utilizadas em leito de jorro ou leito pneumático. Vê-se portanto que a vibração facilita sobremaneira a fluidização das partículas B e D. Esta classificação do tamanho da partícula é o primeiro passo para se estabelecer o modelo aerodinâmico, o qual levará a escolha adequada do tipo de equipamento.

Uma aplicação dos secadores LVF reside na secagem final e aglomeração de pós, obtidos pelo *spray-dryer*, bem como de tortas saídas de filtro-prensa. A Tabela 2.1 lista uma variedade de produtos que são secados por LVF, em aplicações industriais, (Reay e Baker, 1985).

Tabela 2.1- Aplicações industriais para secadores em leitos vibro-fluidizados, (Reay e Baker, 1985)

QUÍMICAS	ALIMENTÍCIAS	MINERAIS	PLÁSTICOS
Cloreto de potássio	Milho	Areia	Acetato de polivinila
Sal comum	Amendoim	Carvão	Cloreto de polivinila
Sulfato de sódio	Açúcar	Quartzo	Polipropileno
Uréia	Nozes	Argila	Nylon
Detergentes em pó e granulados	Soja		
Pesticidas granulares	Produtos lácticos		
Produtos farmacêuticos	Café solúvel (aglomerado)		

### 2.2.3- VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO

Quando se tem leitos contendo partículas pequenas de tamanho uniforme e um fluido percolando no sentido ascendente, o comportamento do sistema é função da velocidade do fluido.

Para baixas velocidades do ar de secagem, as partículas permanecem estacionárias. O leito tem uma porosidade  $\epsilon$ , e a queda de pressão no mesmo varia diretamente com a velocidade superficial do gás, conforme a parte inicial da curva na Figura 2.8.

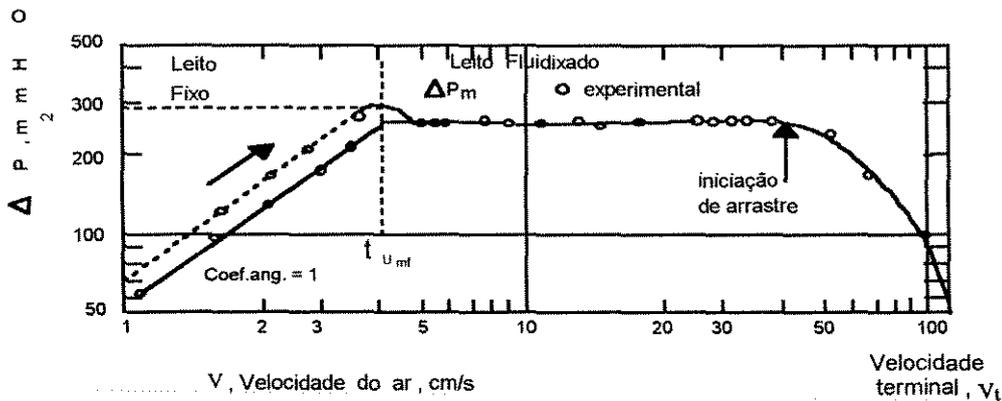


Figura 2.8- Perda de pressão em função da velocidade do ar em um leito formado por partículas de areia, (Kunii e Levenspiel, 1969).

Aumentando a velocidade, a porosidade do leito aumenta até um valor  $\epsilon_{mf}$ , que corresponde a porosidade do leito na condição menos compacta possível, quando existe apenas um ponto de contato entre as partículas. Essa situação corresponde a uma velocidade mínima de fluidização das partículas pelo gás, chamada de  $v_{mf}$ . Se a velocidade do gás,  $v_g$ , é maior que  $v_{mf}$ , o leito expande-se e as partículas adquirem um comportamento típico de um líquido em ebulição; nessa situação diz-se que o leito é fluidizado. Caso haja redução de  $v_g$  após a fluidização, abaixo de  $v_{mf}$ , a queda de pressão corresponderá a de um leito fixo, porém de magnitude diferente (Kunii e Levenspiel, 1969).

Ao iniciar a fluidização, a força de arraste do fluido,  $F_a$ , iguala-se ao peso das partículas sólidas,  $F_w$ ; para o caso de uma esfera, a força de arraste atuante será dada por McCabe e Smith (1976):

$$F_a = f\left(\pi \frac{d_p^2}{4}\right) \frac{\rho_f}{2} \cdot (v_{mf})^2 \tag{2.6}$$

onde:  $f$  = coeficiente de arraste;  $d_p$  = diâmetro da partícula; e  $\rho_f$  = densidade do gás.

Se,

$$F_w = m_p \cdot g \tag{2.7}$$

sendo:  $m_p$  = massa da partícula e  $g$  = aceleração da gravidade.

Igualando as equações [2.6] e [2.7], e explicitando  $(v_{mf})^2$ , teremos:

$$(v_{mf})^2 = \frac{m_p \cdot g}{f(\pi \frac{d_p^2}{4}) \cdot \frac{\rho_f}{2}} \quad [2.8]$$

## 2.2.4- REGIMES DE COMPORTAMENTOS VIBRACIONAIS EM LEITOS

Quando há uma vibração em leitos de partículas, estes comportam-se de forma diferente, existindo diversos tipos de regime de comportamento. Os parâmetros mais importantes são:

**A:** Amplitude de vibração do vaso;

**w:** frequência angular de vibração;

**$Aw^2$ :** aceleração vibracional;

**$F_a$ :** força atuante sobre a partícula devido ao atrito com o gás;

**$F_v$ :** força atuante devido à vibração;

**$v_{mf}$ :** velocidade mínima de fluidização sob ação do fluxo de gás e do componente vertical da força vibracional;

**$v_g$ :** velocidade do ar de operação na entrada do leito.

Bratu e Jinescu (1971), apud Gupta e Mujumdar (1980), definiram três regimes em um leito vibro-fluidizado, dependente da força de fluidização do ar ( $F_a$ ), relacionada com a força de vibração ( $F_v$ ):

**A.** Regime de leito vibrado:  $F_a > F_v$ ;

**B.** Regime de leito vibro-fluidizado:  $F_a \cong F_v$ .

**C.** Regime de leito vibrado por fluidização:  $F_a < F_v$ .

Para o regime A, as partículas se comportam como um leito fluidizado convencional, sendo que a vibração contribui para melhorar a estabilidade e homogeneidade do leito. Quanto ao regime B, tanto a vibração como o escoamento do ar, contribuem para a fluidização e, finalmente, no regime C, as forças de vibração deslocam as partículas para o alto num movimento ascendente, sendo que o ar é utilizado apenas como um meio de transferência de calor e massa.

Como a operação de secagem necessita de um fluxo de ar considerável e situa-se de um modo geral no regime intermediário, a classificação dos regimes nos leitos que está se popularizando é a de Strumillo e Pakowski (1980), a qual é baseada no adimensional  $\Gamma$  ( $\Gamma = Aw^2/g$ ), que relaciona a aceleração vibracional e a da gravidade:

- a) Regime do Leito vibrado: o leito sofre a vibração, sem escoamento do ar, para  $\Gamma > 1$ ;
- b) Regime de Leito vibro-fluidizado: é um leito aerado no qual o ar escoava com velocidade inferior à velocidade mínima de fluidização, ou seja,  $v_g < v_{mf}$ , e a vibração produz  $\Gamma < 1$ ;
- c) Regime de Leito fluidizado vibrado: é formado em condições tais que  $v_g > v_{mf}$ .

Para o regime vibro-fluidizado, o ar escoava a velocidades baixas, e não teria condições de movimentar as partículas do leito. As partículas são fluidizadas devido a um efeito redutor exercido pela vibração sobre a velocidade mínima de fluidização. Assim, Bratu e Jinescu, denominaram de Regime Vibro-fluidizado para  $v_{mvf} < v < v_{mf}$ , onde  $v_{mvf}$  é definida como velocidade incipiente de vibro-fluidização, observando que para  $v < v_{mvf}$ , tem-se o leito vibrado.

Neste ponto é conveniente mencionar que esses regimes podem ser também aplicados a um leito de jorro submetido à vibração, tendo-se: leito vibrado (a), leito vibro-jorrado (b) e leito de jorro vibrado (c).

Os conceitos fundamentais inerentes aos leitos vibro-fluidizados, como a dinâmica e a descrição do movimento do leito, são dados por Pakowski et alii (1984) e Strumillo e Kudra (1986). Quando o leito é vibro-jorrado, Ratkai e Toros (1986), observaram o movimento de partículas num sistema não-aerado, vibrado com membrana flexível, enquanto que Finzer (1989) analisou o comportamento de partículas em leito vibro-jorrado aerado com vibração induzida por um pistão, usando a técnica de partículas marcadas.

Parâmetros físicos concernentes à secagem em leitos sujeitos à vibração, tais como: velocidade incipiente de vibro-fluidização, queda de pressão, porosidade do leito, etc., bem como da mistura e as propriedades de escoamento no leito, a transferência de calor e massa, e secagem nesses leitos (por condução, convecção e radiação), foram revistos de modo abrangente por Gupta e Mujumdar (1980), Strumillo e Pakowski (1980), Mujumdar (1981), Pakowski et alii (1984) e Erdész (1990).

## 2.3- PARÂMETROS DE LEITOS VIBRACIONAIS

A seguir serão apresentados parâmetros comportamentais e matemáticos concernentes à secagem em leitos sujeitos à vibração.

### 2.3.1- DINÂMICA DO LEITO

Para avaliar a dinâmica das partículas vamos considerar o leito como uma fina camada sobre um prato horizontal que vibra de forma senoidal na direção vertical. A equação do movimento do prato é dado pela equação [2.9]. Esta vem ser o balanço de forças em leitos vibrados na direção vertical, dada por Pakowski et alii (1984) e por Strumillo e Kudra (1986).

$$-m_b (a_t + a_w) - m_b g + N + \Sigma R = 0 \quad [2.9]$$

onde:  $m_b$  é a massa das partículas no leito,  $a_t$  e  $a_w$  são os componentes verticais da aceleração do leito relativo ao prato do mesmo e do prato relativo a um sistema de coordenadas estacionárias,  $N$  é a força normal vertical ao fundo do leito e  $\Sigma R$  é o somatório de todas as forças de resistência (por exemplo: atrito, arraste, etc).

Quando o leito movimentar-se no sentido ascendente, há um tempo  $t_s$ , em que o leito perde o contato com o prato, sem ter modificado sua posição (ver Figura. 2.9). Nesta condição teremos  $N = 0$  e  $a_t = 0$ . Para uma vibração senoidal, a aceleração do sistema é dada pela derivada segunda da equação [2.3], que substituindo na equação [2.9], dá:

$$-m_b a_w - m_b g + \Sigma R = 0 \quad [2.10]$$

$$-m_b (Aw^2) - m_b g + \Sigma R = 0 \quad [2.11]$$

$$Aw^2 = g - \frac{\Sigma R}{m_b} \quad [2.12]$$

ou,

$$\Gamma = \frac{Aw^2}{g} = 1 - \frac{\Sigma R}{m_b g} \quad [2.13]$$

onde  $\Gamma$  é definido como intensidade de vibração:  $\Gamma = Aw^2/g$ .

Observa-se que para o leito ser separado do suporte, a condição a ser cumprida é que  $\Gamma \geq 1$ .

Na prática, com o resultado de interação de outras forças, por exemplo, a de fricção, o valor de  $\Gamma$  para separação do leito é diferente quando comparado com o calculado pela equação [2.13]. A diferença aumenta com o aumento da altura do leito e com a diminuição do diâmetro da partícula.

### 2.3.2- DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO DO LEITO

Tem-se na Figura 2.9 uma forma simplificada do movimento relativo entre um leito de partículas e o vaso de secagem que está submetido a uma vibração senoidal. Partindo de um tempo  $t_0$ , as partículas acompanham a trajetória do vaso até que no instante  $t_s$ , elas projetam-se como um só corpo, separando-se assim do suporte. Já no tempo  $t_c$ , elas tornam a atingir o suporte do vaso, (Pakowski et alii, 1984).

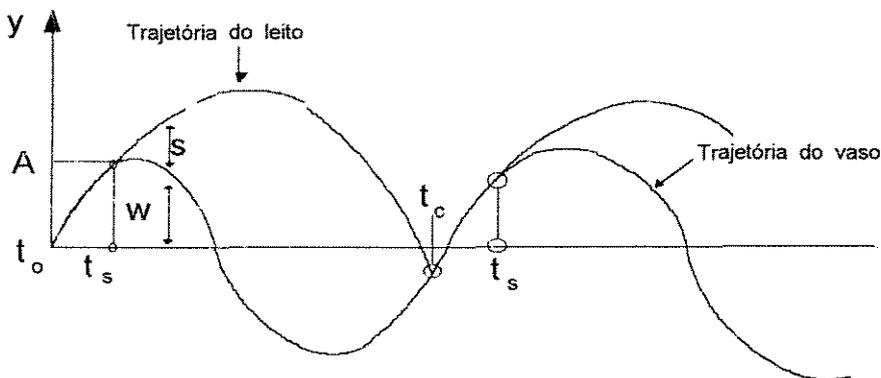


Figura 2.9- Trajetória do leito e do vaso durante o período de vibração.

Assim, quando o leito é lançado para cima e se separa do suporte, surge uma região livre de partículas, que se situa entre a base do leito e o suporte do vaso. Este espaço vazio cresce em uma parte do ciclo, atinge um valor máximo e decresce novamente, até ocorrer a colisão do leito com o vaso. A variação da pressão absoluta no espaço vazio é típica. No instante da sua expansão, cria-se um "vácuo" e a pressão é menor que nas regiões adjacentes; com isso, o ar escoo através do leito em direção ao vazio, revertendo-se o sentido de escoamento. Quando o leito se desloca novamente para o suporte do vaso, a pressão no espaço vazio aumenta e o gás é novamente forçado a um deslocamento para cima, através do leito.

Esta reversão do escoamento do ar no leito várias vezes por segundo, exerce uma influência considerável sobre a circulação de sólidos no leito.

Existem diversos modelos que descrevem a posição do leito durante o ciclo de vibração e que são divididos em dois grupos:

- a) Modelos onde as propriedades do leito são independentes do tempo;
- b) Modelos onde as propriedades dependem do tempo, ou seja, quando se considera a expansão e a contração do leito durante o ciclo de vibração.

Estes modelos matemáticos podem ser úteis para o cálculo de parâmetros, como queda de pressão no leito e velocidade gás-partícula, (Strumillo e Pakowski, 1980).

Vale ressaltar que a expansão do leito, assim como a taxa de circulação dos sólidos e os coeficientes de troca de calor superfície-leito, são medidas temporais, sendo estas grandezas medidas durante um longo período de tempo, quando comparadas com o período de vibração.

Quando se tem equipamentos de grande escala, há a necessidade de informações sobre a mistura em leitos vibracionais, necessárias por exemplo, para estimar a distribuição do tempo de residência das partículas. A Figura 2.10 mostra observações em leitos vibrados ou leitos vibrofluidizados, quando o tipo de escoamento é circulatório. Este movimento é induzido por esforços cisalhantes nas paredes do vaso e a circulação é maior nos equipamentos onde apenas o suporte do vaso vibra, (Strumillo e Pakowski, 1980; Finzer e Kieckbusch, 1992).

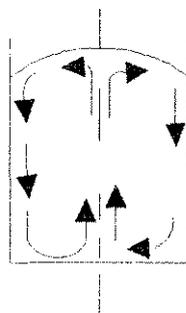


Figura 2.10- Escoamento circulatório de partículas em LV e LVF.

Finzer e Kieckbusch (1992), trabalhando num leito formado por anéis de cebola, vibrado a 18 Hz e percolado com ar no sentido ascendente, à velocidade de 34 cm/s observaram circulação idêntica a da Figura 2.10, para amplitudes de 4,3 e 5,6 mm. Para amplitude de 2,6 mm, porém, este tipo de movimento não ocorreu, mostrando que o efeito da vibração é dependente da amplitude. Este escoamento circulatório tem grande efeito, tanto na cinética da secagem, como também na uniformidade das partículas em todo o leito, evitando com isso a sobre-secagem. A Figura 2.11 mostra os resultados de Finzer e Kieckbusch (1992), onde amostras de cubos de batatas foram extraídos do topo e do fundo do leito vibro-jorrado. A secagem sem vibração (caso B), indicou um comportamento bastante irregular, devido à existência de canais de circulação preferencial do ar e ao efeito de adesão partícula-parede e partícula-partícula. A saturação do ar de secagem fez com que a taxa de secagem do produto do fundo fosse bem maior do que no topo. Quanto ao comportamento da secagem em LVJ, as curvas mostram-se quase coincidentes, comprovando as características de secagem uniforme em todo o leito, devido o movimento circulatório dos sólidos.

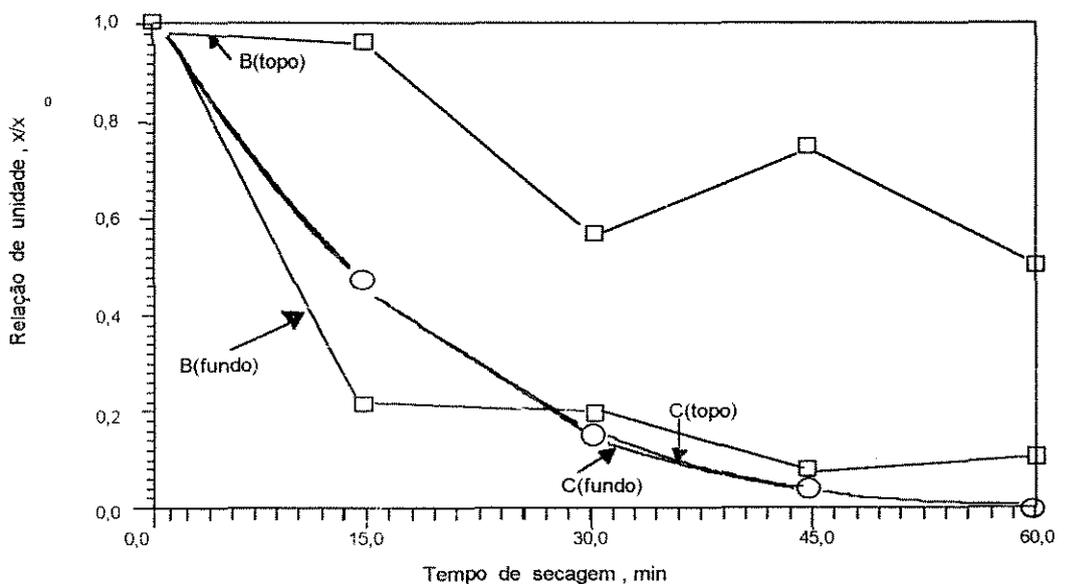


Figura 2.11-Variação da unidade com o tempo de secagem, em diferentes posições do leito de jorro. B sem vibração ; C com vibração, (Finzer e Kieckbusch, 1982).

Outra maneira de promover escoamento de partículas com vibração consiste em vibrar apenas o suporte do leito, que se conecta ao vaso por meio de uma membrana flexível.

As Figuras 2.12 e 2.13 mostram o movimento das partículas sólidas no leito. O equipamento foi denominado leito vibro-jorrado "LVJ" (*Vibro Spouted Bed*), por Ratkai e Toros

(1986) e Finzer (1989). Ratkai e Toros (1986), relatam que o LVJ produz um adequado efeito de mistura em materiais particulados. Na Figura 2.12, o suporte do leito atinge uma amplitude máxima determinada pelo mecanismo de vibração. O movimento de vibração do suporte do leito sofre uma maior amplitude no centro do leito e diminui ao longo do raio. Isso faz com que a superfície livre do leito apresente forma convexa. Como há a redução do atrito entre as partículas sólidas por efeitos vibracionais, a pequena inclinação da superfície livre do leito é suficiente para as partículas rolarem para o nível inferior. As partículas no espaço anular deslocam-se vagarosamente para baixo. Ao atingir o fundo do leito, as partículas movem-se em direção ao centro do mesmo e pela ação vibracional do suporte, ascendem ao longo do jorro interno.

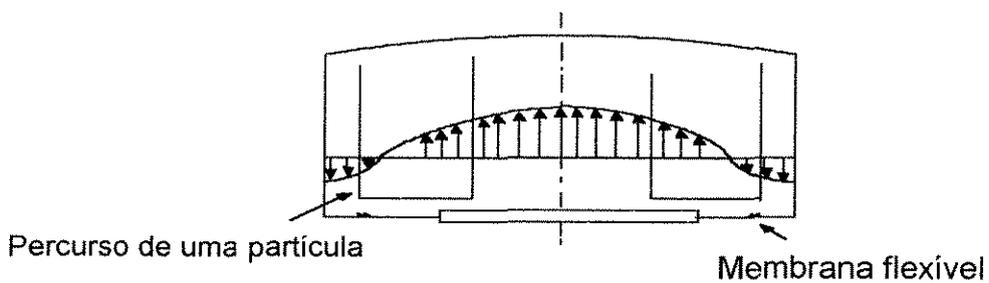


Figura 2.12- Esquema de um leito vibro-jorrado não aerado com membrana flexível, (Ratkai e Toros, 1986).

Na Figura 2.13, no sistema pistão-cilindro, um movimento ocorre no interior do tubo central, conforme esquematizado.

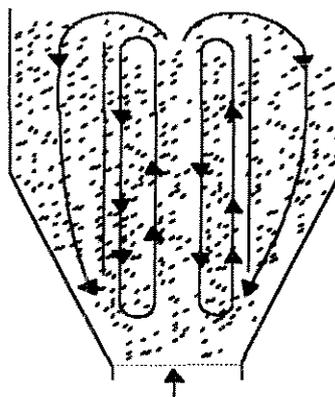


Figura 2.13- Comportamento das partículas no leito vibrojorrado aerado com vibração induzida por um pistão, (Finzer, 1989).

Uma característica no LVJ é que o mesmo tende a uma uniformização da porosidade em todo o leito, isto mesmo quando o ar não percola o mesmo ou então o faz à baixa velocidade. Desta forma, a porosidade no jorro central não é superior em 5% a do espaço anular. Isto significa que todo o escoamento ocorre em regime de fase densa, (Finzer, 1989).

Finzer (1989), usando a técnica de partículas marcadas (feijão), mediu o tempo gasto em circulações completas em um leito do tipo da Figura 2.13. Os resultados na Figura 2.14, para praticamente os mesmos valores de  $\Gamma$  mostram que o tempo de circulação é menor quando se opera com maiores amplitudes de vibração.

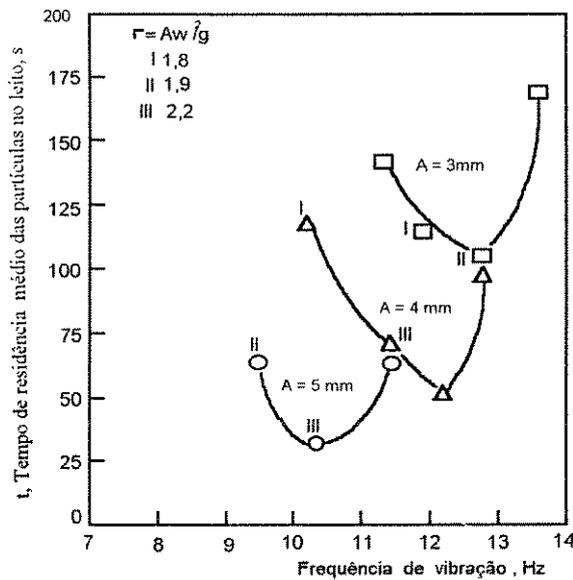


Figura 2.14- Variação do tempo de residência médio de grãos de feijão com a frequência e amplitude de vibração. Carga de feijão = 1800 g, (Finzer, 1989).

A frequência de vibração exerce influência de características periódicas sobre a taxa de circulação dos sólidos em leitos vibrados. Finzer (1989) fez ensaios com esferas de vidro em um LVF, e a Figura 2.15 mostra a taxa de circulação dessas esferas variando com a frequência de vibração, mantendo-se constante a amplitude de vibração.

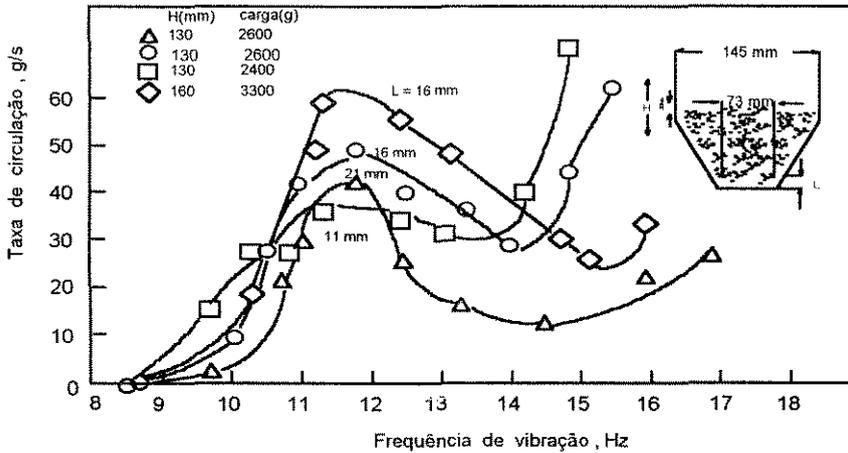


Figura 2.15- Variação da taxa de circulação de esferas de vidro com a vibração: A = 4mm; U<sub>ar</sub> = 30 cm/s ; ρ<sub>s</sub> = 2,5 g/cm<sup>3</sup> ; dp = 3,8 mm, (Finzer, 1989).

Observa-se em todas as curvas uma variação periódica da taxa de circulação com a frequência de vibração. Em torno de 9 Hz não ocorre circulação; à medida que aumenta a frequência, a taxa de circulação aumenta até um máximo e torna a diminuir, passando por um mínimo e então aumenta novamente. A periodicidade da taxa de circulação com a frequência, ilustrada na Figura 2.15, é consequência de condições de ressonância, pois um comportamento semelhante é encontrado na vibração de corpos simples.

Finzer (1989) observou também que mantendo as proporções geométricas constantes e variando o afastamento entre o tubo interno e o topo do pistão (L), há uma posição ótima na qual a taxa de circulação das partículas é máxima. Isto ocorre porque ao afastar o tubo interno do pistão, a influência da vibração vertical atenua-se, e quando fica próximo do pistão, o movimento das partículas sólidas é prejudicado pela diminuição da área disponível para o escoamento de sólidos na região cônica do vaso.

**2.3.3. VELOCIDADE INCIPIENTE DE VIBRO-FLUIDIZAÇÃO (V<sub>mvf</sub>)**

Quando se tem a força gravitacional atuando sobre a partícula igual à soma das forças de arraste e o componente vertical da força vibracional, diz-se que há um estado vibro-fluidizado ocorrendo no leito, então:

$$F_w = F_a + F_v \tag{2.14}$$

ou

$$m_p g = f \left( \frac{\pi d \rho^2}{4} \right) \cdot \frac{\rho f}{2} v_{mf}^2 + m_p \cdot A \cdot w^2 \quad [2.15]$$

explicitando  $V_{mf}^2$ , teremos:

$$V_{mf}^2 = \frac{m_p \cdot g \left[ 1 - \left( \frac{Aw^2}{g} \right) \right]}{\left[ f \left( \pi \frac{\rho_p^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{\rho_f}{2} \right) \right]} \quad [2.16]$$

substituindo a equação [2.8] na [2.16], fica:

$$V_{mf}^2 = V_{mf}^2 \left[ 1 - \left( \frac{Aw^2}{g} \right) \right] \quad [2.17]$$

Observa-se na equação [2.17], que o efeito de vibração é no sentido de diminuir a velocidade mínima de fluidização. Na prática porém, esta redução é ainda menor do que prevê a equação [2.17], pois tem-se que levar em consideração o amortecimento de vibração pela influência da altura do leito, (Gupta e Mujumdar, 1980).

Há algumas correlações na literatura para a determinação de  $V_{mf}$ , (Gupta e Mujumdar, 1980 e Erdész, 1990). Uma equação simples e disponível para a avaliação de  $V_{mf}$  (m/s) é a de Mushtayev (1973), citada por Gupta e Mujumdar (1980), e dada por:

$$V_{mf} = 52,4 \left[ \frac{\rho_p}{\rho_g} \right]^{0,63} \cdot \left[ \frac{1}{\nu_g} \right]^{0,33} \cdot d_p^{0,88} \left( 1 - c \frac{Aw^2}{g} \right) \quad [2.18]$$

onde:  $\rho_p$  e  $\rho_g$  são as densidades da partícula e do gás, respectivamente;  $\nu_g$  é a viscosidade cinemática do gás, em  $m^2/s$ ;  $d_p$  é o diâmetro da partícula, em m;  $\ln c = 0,0007f^{1,28}(H/d_p)^{1/2}$ ;  $f$  é a frequência de vibração, em Hertz e  $H$  é a altura do leito, em m.

2.3.4- QUEDA DE PRESSÃO ( $\Delta P$ ) EM LEITOS COM VIBRAÇÃO

Para analisar o efeito da vibração sobre a queda de pressão faz-se uso das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial do gás. Os resultados experimentais realizados indicam que a forma da curva de fluidização é dependente dos parâmetros de vibração. A Figura 2.16 mostra as curvas de leitos agitados por vibração, (Strumillo e Pakowski, 1980).

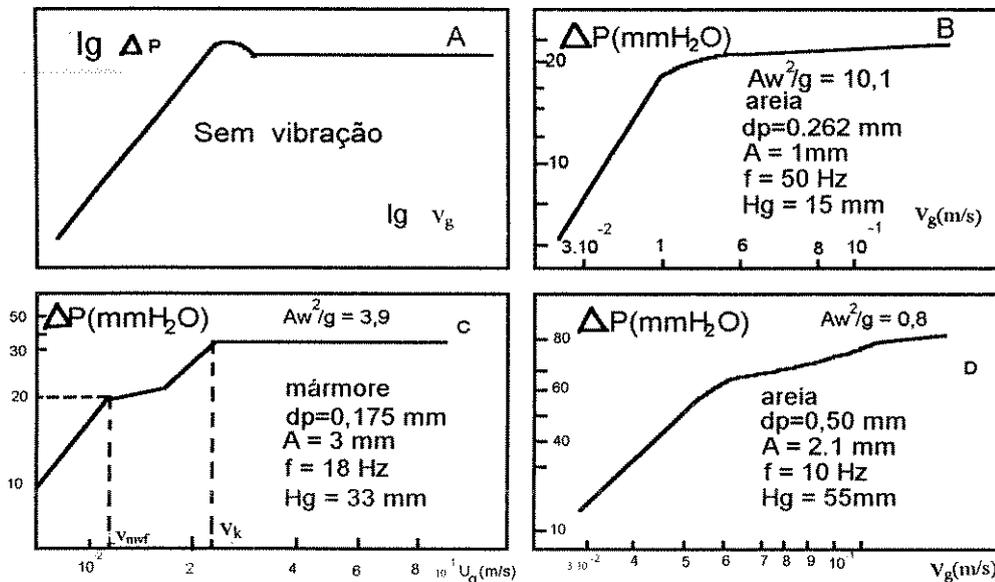


Figura 2.16- Curvas de fluidização, com e sem vibração, (Strumillo e Pakowski, 1980).

A curva A da Figura 2.16 caracteriza a fluidização convencional, sem vibração. Nos leitos vibrados, a forma da curva é independente da relação entre as forças de vibração e a aerodinâmica ( $F_v/F_a$ ), atuantes no leito. Quando a aceleração de vibração ( $Aw^2$ ) é alta, é o caso da curva B, o pico de pressão não é observado. Para valores intermediários de aceleração vibracional, tem-se as curvas C e D. Na curva C, a velocidade incipiente de vibro-fluidização,  $v_{mvf}$ , representa o limite de velocidade do ar que promove o início da movimentação do leito, correspondente à extremidade do primeiro patamar da curva. Não há uma interpretação física para o segundo patamar da curva C, que se inicia na velocidade do ar,  $v_g$ ; porém, quando a frequência aumenta, mantendo constante a amplitude e o valor de  $v_k$  tende à velocidade mínima de fluidização e a curva C torna-se similar à curva B, (Strumillo e Pakowski, 1980). A curva D mostra uma situação especial de vibração do leito sob baixa aceleração de vibração, com um leito de maior altura ( $H_g$ ) e formado por partículas maiores. Portanto, a comparação da curva D com as outras torna-se difícil, porque nestas condições

de vibração, tem-se  $Aw^2/g < 1$ , ocorrendo a compactação do leito e a maior altura do leito faz com que haja perda de pressão mais intensa no mesmo.

Em um leito vibrofluidizado, a queda de pressão é 20-30% menor do que em um leito fluidizado e depende da intensidade vibracional ( $\Gamma$ ). Vários métodos de queda de pressão tem sido usados e correlações diferentes tem sido obtidas. Uma equação típica tem a forma da Equação de Bratu e Jinescu citado por Pakowski et alii (1984).

$$\Delta P_{mf} = \Delta P_{mf} \left( \frac{Aw^2}{g} \right)^m = \Delta P_{mf} (\Gamma)^m \tag{2.19}$$

onde o exponencial m pode ser expresso pela equação de Mushtayev et alii, citada por Strumillo e Kudra (1986):

$$m = 0,41 + 19,6 d_p \rho_p \tag{2.20}$$

Dellatonia et alii (1989), apresentam curvas características de queda de pressão em leito constituído por painço em função da vazão de ar obtidas e realizadas com e sem efeito das vibrações impostas ao sistema. Observa-se na Figura 2.17 que a curva A é típica de fluidização convencional, ou seja, sem a vibração.

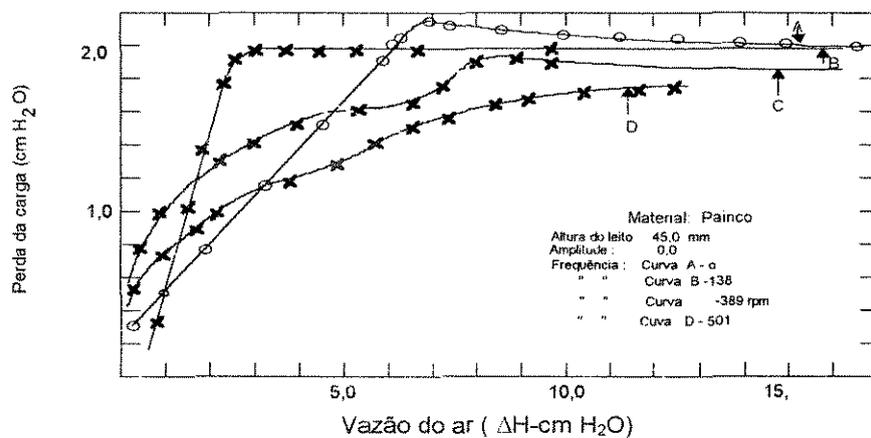


Figura 2.17- Curvas características de fluidização, ( Dellatonia et alii, 1989).

A curva B é análoga à curva D da Figura 2.16. A curva C é análoga à curva C da Figura 2.16, apresentando os dois patamares. Quanto à curva D, ela pode ser tipicamente quebrada em três distintos segmentos em linha reta.

As curvas apresentadas na Figura 2.17 representam uma boa reprodução das curvas de fluidização da Figura 2.16. Observa-se também que a velocidade mínima de fluidização, bem como a perda de carga no início da vibrofluidização, são menores quando comparadas com a fluidização convencional.

A Figura 2.18 apresenta o comportamento de um leito aerado e vibrado obtido por Malhotra et alii (1984). Observa-se de imediato que as curvas dos leitos vibrados estão situadas acima do leito fluidizado sem vibração ( $\Gamma = 0$ ), para  $v_g/v_{mf} < 0,6$  a  $0,7$ . Para velocidade de ar maior, a queda de pressão torna-se menor para os leitos vibrados. Esse fato está relacionado com os efeitos de expansão e compactação dos leitos vibracionais.

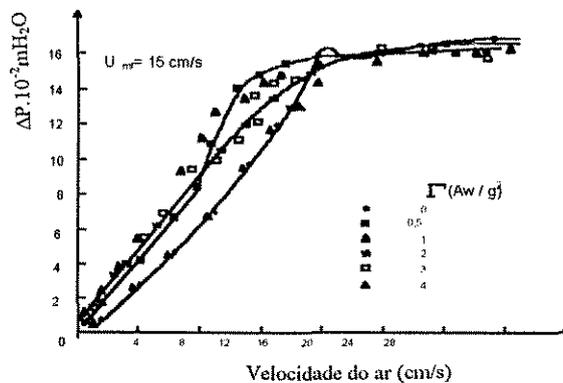


Figura 2.18-Efeitos da aceleração vibracional sobre um leito formado por esferas de vidro ;  $d_p=0,353 \text{ mm}$  e  $H = 120 \text{ mm}$ , (Malhotra et alii, 1984).

Erdész e Mujumdar (1986) fizeram experimentos com partículas de diâmetro duas vezes maior que os de Malhotra et alii (1984), e também obtiveram uma queda de pressão no leito vibrado menor que no leito sem vibração, para uma ampla faixa de velocidade, até  $\Gamma > 2$ . Isto sugere que a compactação do leito é menor para partículas maiores e havendo menor compactação, ocorre menor resistência ao escoamento. O comportamento das curvas da Figura 2.17 é análogo ao da Figura 2.18.

A Figura 2.19 apresenta o comportamento de um LVJ (Finzer e Kieckbusch, 1992) formado por esferas de sagú, em função da velocidade do ar, e dois regimes de escoamento dos sólidos são observados. O regime de escoamento I, em fase densa, é típico de baixas velocidades de ar de secagem. O regime II, em fase diluída, é associado à velocidades do ar inferiores à mínima de jorro.

Observa-se que o formato geral da curva de pressão da Figura 2.19 é parecida com a dos leitos fluidizados e de leito de jorro. O ponto C geralmente não existe nos sistemas vibrados, (Malhotra et alii, 1984; Strumillo e Pakowski, 1980).

Para a configuração estudada, sem escoamento do ar, a taxa de circulação das partículas é máxima; mas à medida que aumenta a velocidade do ar, nota-se uma redução desta circulação. Tudo indica, portanto, que o ar em escoamento exerce uma ação resistiva sobre a movimentação descendente das partículas do espaço anular.

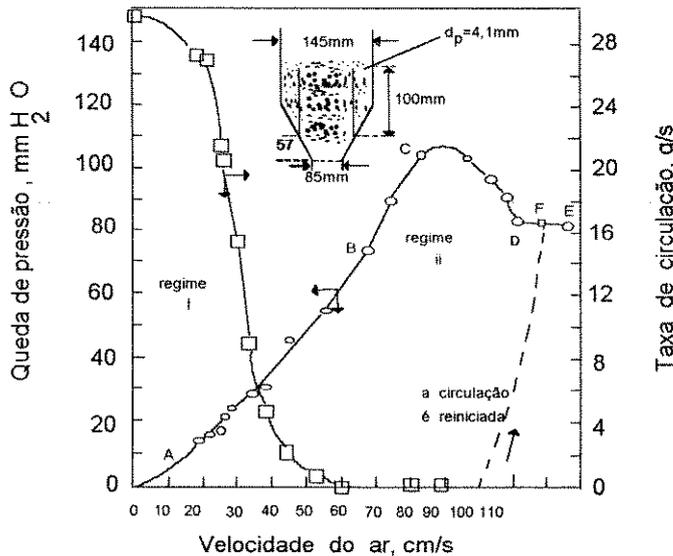


Figura 2.19-Queda de pressão no leito e taxa de circulação de esferas de 4,1 mm de diâmetro. Condições de vibração: A = 4mm e f = 11,8 Hz, (Finzer e Kieckbusch, 1992).

Para a velocidade do ar de 0,6 m/s (ponto B), cessa toda a circulação. É provável que nesta velocidade ocorra uma pequena compressão das partículas na base do leito, formando uma cavidade no mesmo, logo acima da entrada do ar. Isto também foi observado nos leitos de jorro convencionais. Os trechos B-C, C-D, e D-E são análogos aos de jorros convencionais. Com velocidades de ar acima de 110 cm/s a circulação recomeçava, mas de forma instável.

As observações indicam que a intensidade vibracional deve ser o fator predominante, em termos de movimentação das partículas, quando a velocidade do ar é baixa e diminui sua influência quando a velocidade de operação do ar é aumentada.

### 2.3.5. POROSIDADE DO LEITO

Para um leito vibrado, a porosidade está intimamente ligada com a intensidade de vibração. A Figura 2.20, mostra este comportamento. A equação de Mushtayev et alii, citada por Strumillo e Kudra (1986), é proposta para o seu cálculo:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = 1 - \exp[-0,54(K_f - 1)\left(\frac{Aw^2}{g}\right)^{\frac{0,75}{K_f}}] \quad [2.21]$$

onde  $K_f$  é chamado de número de fluidização e definido por:

$$K_f = \frac{V_g}{V_{gmf}} \quad [2.22]$$

onde  $V_{gmf}$  é a velocidade incipiente de fluidização, e  $\varepsilon_0$  é a porosidade do leito estático.

Observa-se ainda na Figura 2.20, que quando  $\Gamma < 1$ , ocorre compactação do leito e quando  $\Gamma > 1$ , a porosidade do leito aumenta. Nos ensaios foi utilizada areia de quartzo e altura inicial do leito igual a 4 cm.

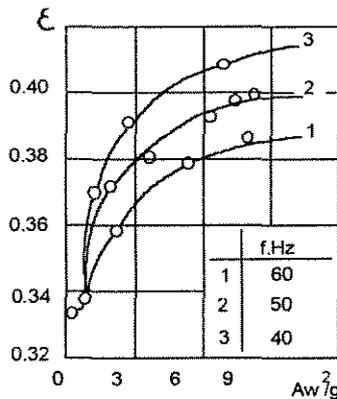


Figura 2.20 . Influência da intensidade vibracional sobre a porosidade do leito, (Strumillo e Kudra, 1986).

## 2.4- TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA EM LEITO VIBRADOS

### 2.4.1- TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA

A vibração influencia o coeficiente de transferência de calor gás-partícula na operação em leitos de jorro. Esses efeitos são:

- 1º) Pertubações na camada limite das partículas ou de aglomerados;
- 2º) Recirculação de gás (*back mixing*), (efeito negativo na transferência de calor);
- 3º) Aumento da área de transferência de calor;
- 4º) Uniformização da temperatura do leito devido à mistura.

Estas contribuições na quantificação do valor de  $h_p$  (coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula) vão depender da faixa de aceleração vibracional e da velocidade do gás, bem como das propriedades do leito. As equações [2.23] a [2.30] apresentadas a seguir, estão citadas por Strumillo e Kudra (1986).

O efeito quantitativo do coeficiente de transferência de valor convectivo por vibração,  $h_p$ , pode ser calculado pela equação proposta por Choc (1976), para esferas de naftaleno.

$$h_p = h_f 14,0 \frac{A f^{0,65}}{V_g} \quad [2.23]$$

onde  $h_f$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo para leitos não vibrados para a mesma velocidade de gás  $V_g$ ,  $A$  é a amplitude de vibração e  $f$  é a frequência de vibração.

Para o cálculo de  $h_f$ , tem-se muitas correlações do número de Nusselt em função de Reynolds.

Vyletok e Mushtayev (1977) apresentaram uma equação para  $h_p$ , obtida com partículas de poliamida, onde a altura do leito,  $H = 20-100$  mm;  $A = 0-3$  mm;  $f = 0-50$  Hz e  $V_g = 0,5-2,0$  m/s.

$$h_p = 10,4 \frac{V_g}{(1 - \varepsilon)} \left( \frac{Aw}{g} \right)^{0,1} \quad [2.24]$$

onde  $Aw$  é a velocidade vibracional.

Chlenov e Mikhailov (1972), apresentam uma correlação para partículas de carvão, nas seguintes condições:  $d_p = 1-5$  mm;  $D_{\text{interno vaso}} = 78$  mm;  $f = 35-50$  Hz;  $A = 1,2-2,5$  mm;  $Re_p = 20-50$ .

$$Nu_p = 1,16 Re_p \left( \frac{H}{A} \right)^{-0,8} \left( \frac{V_g f}{g} \right)^{0,96} \quad [2.25]$$

Sbrodov (1967), apresenta uma correlação para diferentes grãos de cereais:

$$Nu_p = 0,142 Re_p \left( \frac{Aw^2}{g} \right)^{0,04} \quad [2.26]$$

Kavetskii et alii (1977), trabalhando com material polimérico na faixa de  $Aw^2/g = 0,18-9,4$ , apresentam uma correlação para  $Aw^2/g \cong 2,4$ .

$$Nu_p = 0,00136 Re_e Ar^{0,2} Pr^{0,32} \quad [2.27]$$

onde  $Re_e = Re_p/\varepsilon$ , chamado de número de Reynolds equivalente.

$$Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_p - \rho_g)}{\nu_f 2 \rho_p} \quad [2.28]$$

faixa  $3 \times 10^5 - 19 \times 10^5$

$$Re_e = \frac{V_g d_p / \nu_g}{\varepsilon} \quad [2.29]$$

faixa do  $Re_e = (150 - 460)$

Pakowski (1981), utilizando esferas de carbonato de cálcio, apresentou uma correlação para valores de  $Aw^2/g$  de aproximadamente 6:

$$Nu_p = 0,827 Re_p^{1,04} \left(\frac{d_p}{H}\right)^{1,17} \left(\frac{Aw^2}{g}\right)^{0,483} \quad [2.30]$$

sendo as condições:  $d_p = 0,25-2,0$  mm;  $\rho_p = 2660$  kg/m<sup>3</sup>;  $H = 20-100$  mm;  $f = 0-25$  Hz;  $A = 0,75-4,75$  mm;  $V_g = 0,08-0,35$  m/s;  $X_{inicial} = 0,02$  kg/kg.

Finalmente, a quantidade de calor pode ser calculada por:

$$Q_v = h_p \cdot A \cdot \overline{\Delta T} \quad [2.31]$$

A Figura 2.21, mostra que a transferência de calor para um leito de esferas de naftaleno é facilitada quando o leito é submetido à vibração,  $\Gamma > 1$ . As curvas demonstram que a influência da vibração sobre o número de Nusselt,  $Nu_p$ , é relevante para números de Reynolds inferiores a  $Re_{mf}$  (o qual corresponde a  $V_{mf}$ ).

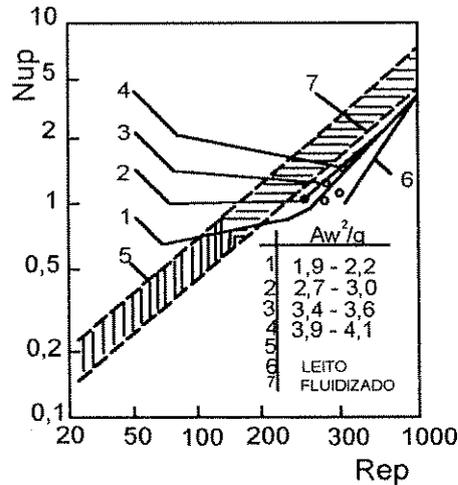


Figura 2.21- Transferência de calor gás-partícula para diferentes acelerações vibracionais, (Strumillo e Kudra, 1980).

Quando  $V_g > V_{mf}$ , a vibração exerce pouca influência sobre  $Nu_p$ , comparado com leitos fluidizados convencionais, (Pakowski et alii, 1984).

#### 2.4.2- TRANSFERÊNCIA DE CALOR AQUECEDOR SUBMERSO-LEITO

A técnica geralmente empregada para fornecer calor aos leitos vibrados é através de aquecedores submersos. Este método apresenta uma série de vantagens, tais como: uso de tubulações com menores diâmetros para condução do gás; equipamentos de coleta de pós com menores dimensões e diminuição do consumo global de energia operacional, (Malhotra e Mujumdar, 1987).

Há dois mecanismos que influenciam os coeficientes de transferência de calor por contato em leitos agitados por vibração: diminuição da espessura efetiva do filme do gás situado sobre a superfície aquecida devido ao contato com as partículas vibradas do leito e o transporte de calor da região de aquecimento devido à circulação dos sólidos, (Pakowski et alii, 1984).

A Figura 2.22, mostra o primeiro mecanismo. Na situação a tem-se o leito estático e a situação b, mostra a influência da vibração de uma partícula sobre a espessura do filme do gás no espaço chamado de  $d_r$ . Ao longo de  $d_r$ , a espessura da área hachurada diminui devido à ação vibracional, havendo um movimento para baixo e para cima, o que aumenta a transferência de calor.

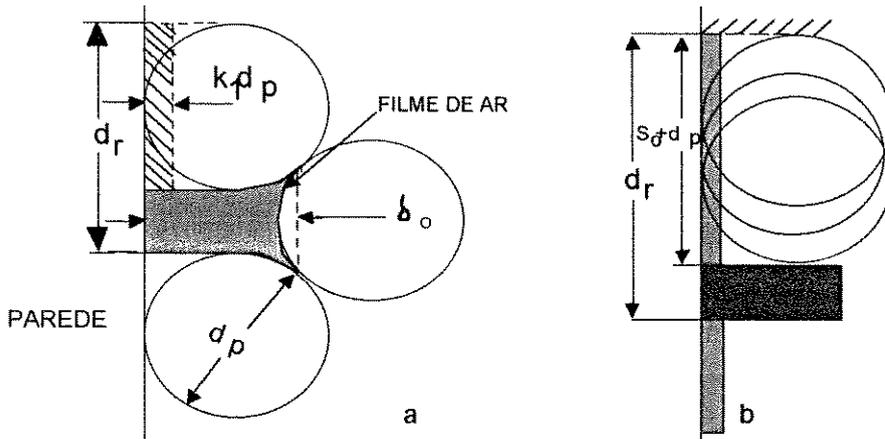


Figura 2.22- Esquema do modelo de Gutman de transferência de calor por contato, (Pakowski et alii, 1984).

Gutman (1976), apresentou um modelo para estimar o coeficiente de transferência de calor onde o aquecedor submerso ficou posicionado na direção vertical, dentro de um leito vibrado. O modelo é baseado na diminuição da espessura efetiva do filme de gás, situado junto à superfície aquecida conforme Figura 2.22. A equação é expressa:

$$h_{fv} = h_f \cdot \frac{l}{l - K_2 S_0} \quad [2.32]$$

onde:

$$K_2 = d_p \frac{(l - K_1 d_p h_f / kg)}{(d_r^2 - d_p^2)} \quad [2.33]$$

onde  $h_{fv}$  e  $h_f$  são os coeficientes de transferência de calor no leito vibracional e convencional ( $w/m^2K$ );  $K_g$  é a condutividade térmica da fase gasosa ( $w/mK$ );  $d_r$  é a distância vertical média entre as partículas;  $S_0$  é o incremento de distância máxima atingida pelo leito em um ciclo de vibração.

Resultados mostraram que  $K_1$  é uma constante de valor bem baixo, e sendo assim:

$$K_2 = \frac{d_p}{(d_r^2 - d_p^2)} \quad [2.34]$$

A literatura tem apresentado correlações para estimar o coeficiente de transferência de calor. Muitas delas utilizam o número de Reynolds da partícula,  $Re_p$ , que contém a velocidade superficial do gás, ou o número de Reynolds vibracional,  $Re_v$ , que utiliza a velocidade vibracional,  $Aw$ .

Montedo e Freire (1991) afirmam que quando um gás escoar através de um leito com vibração, nem  $Re_p$  e nem  $Re_v$  são parâmetros representativos do fenômeno da dinâmica do leito e sugerem um novo  $Re_{pv}$ , que incorpora tanto os efeitos dinâmicos gerados pela passagem do gás através do leito, quanto os gerados pela vibração, e definida por:

$$Re_{pv} = \frac{(V_g + Aw) \cdot \overline{d_p} \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad [2.35]$$

Utilizando  $Re_{pv}$  e  $P_r$ , eles encontraram uma correlação para representar os valores de  $Nu$ , na forma:

$$\log Nu_p = a \frac{(\log Re_{pv} \cdot \log P_r)^2}{[1 + (\log Re_{pv} \cdot \log P_r)^2]} \quad [2.36]$$

válido para  $3 < Re_{pv} < 80$ , e  $a$  é um parâmetro que é função da geometria do aquecedor submerso para um leito vibrofluidizado, sendo  $a = 2,0$ , para cilindro, e  $a = 2,4$ , para esfera.

Montedo e Freire (1992) concluíram que o coeficiente de transferência de calor de um corpo submerso em um leito vibrofluidizado é maior para o aquecedor imóvel em relação ao leito do que quando ele vibra solidário ao leito. Segundo eles, taxas mais altas de circulação das partículas são conseguidas quando somente a placa do fundo do leito vibra, permanecendo o vaso imóvel.

Os resultados apresentados por Pakowski et alii (1984), mostraram-se contraditórios com o trabalho de Montedo e Freire (1992), pois segundo eles, o coeficiente de transferência de calor aumenta quando o aquecedor submerso vibra junto com o leito, devido a uma mistura mais vigorosa no leito, e quando o aquecedor permanece imóvel em relação ao leito, o movimento relativo leito-aquecedor cessa. Isto faz com que o coeficiente de transferência de calor diminua.

**2.4.3- TRANSFERÊNCIA DE MASSA**

A transferência de massa em leitos vibrados tem sido menos estudada do que a transferência de calor. Valchar et alii, citado por Strumillo e Kudra (1986), sugerem que coeficientes de transferência de massa em leitos vibrofluidizados,  $K_{vf}$ , podem ser calculados por uma relação similar da equação [2.23], onde:

$$K_{vf} = K_f [14,0(\frac{A_f}{V_g})^{0,65}] \tag{2.37}$$

onde  $K_f$  é o coeficiente de transferência de massa para leito não-vibrado, para a mesma velocidade do gás  $V_g$ .

Chevilenko et alii, citado por Strumillo e Kudra (1986) também propõem uma relação para partículas poliméricas, dada por:

$$K_{vf} = 5,03 \cdot 10^{-5} \frac{D_{AB}}{d_{pe}^{0,6}} \left[ \frac{U_g}{(1 - \epsilon) v_g} \right]^{0,4} \cdot \frac{Aw^2}{g} \tag{2.38}$$

onde  $D_{AB}$  é o coeficiente de difusão;  $d_{pe}$  é o diâmetro da partícula equivalente e  $v_g$  é a viscosidade cinemática do gás.

Bretsznajder e Jaszczak (1959), citado por Pakowski et alii (1984), avaliaram a influência da vibração sobre a concentração de naftaleno de 2,6 mm de diâmetro, quando o ar passa através do leito com velocidade  $V_g = 0,13$  cm/s. A Figura 2.23 apresenta a concentração de naftaleno no ar efluente em função de  $2 Af$ , (Pakowski et alii, 1984).

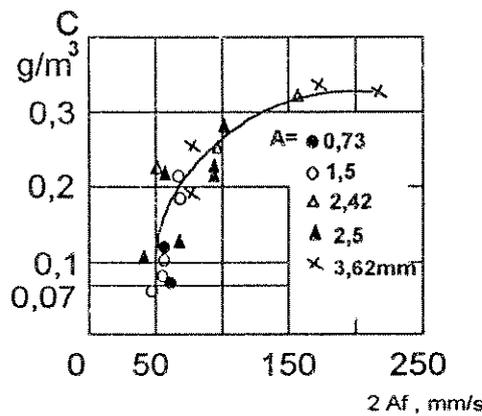


Figura 2.23- Concentração de naftaleno após o ar percolar um leito vibro fluidizado (Bretsznajder e Jaszczak, 1959).

Na Figura 2.23, observa-se que para  $2 Af = 200$  mm/s, o valor de  $C$  é máximo.

## 2.5- PROCESSOS EM LEITO DE JORRO

O princípio de operação do leito de jorro aplicado ao recobrimento de comprimidos é análogo ao do processo Wurster. O leito de jorro é constituído de duas regiões distintas: o gás penetra em alta velocidade em um único ponto no leito, de onde projeta os sólidos para uma região dispersa, que origina um jorro até chegar a uma fonte onde os sólidos sofrem desaceleração e caem numa fase densa chamada de região anular de sólidos, que ciclicamente se movem em direção à base do leito, conforme Figura 2.24.

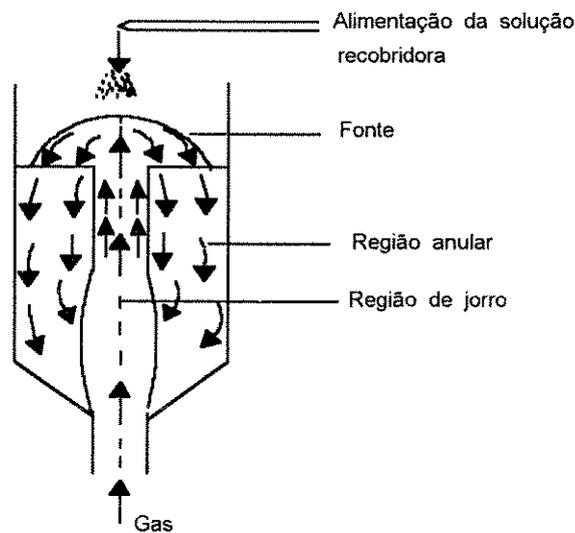


Figura 2.24 - Esquema do recobridor de leito de jorro

A aplicação do leito de jorro no processo de recobrimento de comprimidos possui certas vantagens, como: tempo curto de contato do material úmido com a placa distribuidora ou suporte do leito; o contato fluido-partícula propicia altas taxas de transferência de calor e massa; a secagem superficial é rápida (no jorro) e é complementada durante a permanência na região anular, evitando grande super-aquecimento, o movimento cíclico que ocorre nos comprimidos produz uma mistura eficiente no leito; e o mesmo equipamento pode servir para granular, secar e recobrir produtos farmacêuticos.

Quanto a operação de recobrimento no leito de jorro, o processo basicamente consiste em injetar o ar aquecido pelo leito dos comprimidos até produzir o jorro e então iniciar a atomização da solução de recobrimento, que geralmente é injetada na base ou no topo do leito. A regulação da vazão da solução no bico atomizador deve ser de modo a não prejudicar o jorro pela aderência resultante de excessiva umidade superficial dos comprimidos.

Uma ampla revisão sobre o leito de jorro, incluindo o recobrimento de partículas é apresentada por Mathur e Epstein (1974). A partir de 1974, diversos outros estudos foram realizados sobre o recobrimento de partículas em leito de jorro. A seguir serão apresentadas de forma resumida e em ordem cronológica as principais características dos trabalhos publicados a este respeito nestes últimos 22 anos.

#### **Weiss e Meisen (1983) - Uréia**

Recobriram uréia com enxofre fundido, utilizando um leito de jorro cônico. Estudaram as relações existentes entre a qualidade do produto com parâmetros experimentais. Os resultados indicaram que a qualidade sofre forte influência da temperatura; ela aumenta com a vazão de enxofre e diminui com a vazão do ar de atomização, mas não sofre influência da altura do leito estático.

#### **Kurcharski e Kmiéc (1983) - Placebo (Dimensões: 1<sup>o</sup> - 0,4 x 0,7 cm; 2<sup>o</sup> - 0,43 x 0,9 cm; Esfericidade $\phi$ : 1<sup>o</sup> - 0,978; 2<sup>o</sup> - 0,866 (Tabela 2.2)**

Iniciaram pesquisas sobre o recobrimento de comprimidos, estudando a fluidodinâmica, e a transferência de calor e massa durante o recobrimento em leito de jorro cone-cilíndrico. Os experimentos foram realizados só na parte cônica com e sem presença do atomizador na base do leito. A solução de recobrimento foi composta de açúcar e água. Concluíram que correlações de queda de pressão máxima sem recobrimento, equações [2.39], [2.40] e [2.41], apresentaram boa concordância com os dados experimentais com recobrimento e os coeficientes de transferência de calor e massa experimentais foram comparados com os valores estimados por correlações, equações [2.42] e [2.43] apresentando boa concordância, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Correlações utilizadas por Kurcharski e Kmiéc (1983), para recobrimento de comprimidos em leito de jorro cônico.

AUTOR (ES)	CORRELAÇÕES
Kmiéc (1980)	$\frac{\Delta P_{\max}}{H_0 \rho_b g} = [1 + 0,206 \exp(0,62 H_0 / r_c)]$ <p style="text-align: right;">[2.39]</p>
Mukhlenov e Gorshtein (1965)	$\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{\text{jorro}}} = 1 + 6,65 \left[ \frac{H_0}{d_0} \right]^{1,2} \cdot [\text{tg}(\gamma / 2)]^{0,5} \cdot Ar^{-0,2}$ <p style="text-align: right;">[2.40]</p>
Gelperin (1961)	$\frac{\Delta P_{\max}}{H_0 \rho_b g} = 1 + 0,062 \left[ \frac{d_c}{d_0} \right]^{2,54} \left[ \frac{d_c}{d_0} - 1 \right] \cdot [\text{tg}(\gamma / 2)]^{0,18}$ $d_c = d_0 + 2H \text{tg}(\gamma / 2)$ <p style="text-align: right;">[2.41]</p>
Kurcharski e Kmiéc (1983)	$Nu = 0,0451 \cdot Re_p^{0,644} \cdot Pr^{0,333} \cdot Ar^{0,226}$ $[\text{tg}(\gamma / 2)]^{-0,852} \left[ \frac{H_0}{d_p} \right]^{1,947} \left[ \frac{d_0}{d_p} \right]^{0,947} \cdot \Phi^{-1,922}$ <p style="text-align: right;">[2.42]</p>
Kurcharski e Kmiéc (1983)	$Sh = 0,01173 \cdot Re_p^{0,800} \cdot Sc^{0,333}$ $\cdot Ar^{0,229} \cdot [\text{tg}(\gamma / 2)]^{-0,961} \left[ \frac{H_0}{d_p} \right]^{1,446} \left[ \frac{d_0}{d_p} \right]^{1,036} \cdot \Phi^{-1,922}$ <p style="text-align: right;">[2.43]</p>

**Kurcharski e Kmiéc (1986) - Placebo**

Prosseguindo seus estudos, apresentaram um modelo matemático que descreve o processo simultâneo de recobrimento e secagem, tendo como base duas regiões no leito: a região central, onde ocorre o recobrimento e a secagem, e a região anular, onde ocorre a secagem da umidade residual e o transporte de comprimidos. O modelo permite analisar os efeitos das condições iniciais como: altura do leito estático, geometria do leito, diâmetro das partículas e vazões de ar e de líquido no processo, sendo que as correlações empregadas limitam-se às condições experimentais utilizadas.

**Kurcharski e Kmiéc (1988) - Placebo**

Analisaram a influência de parâmetros do processo na distribuição de massa nas partículas e eficiência do recobrimento. Definiram a eficiência de recobrimento ou coeficiente de granulação,  $\eta$ , como sendo a razão de massa de recobridor e a massa total adicionada ao leito. Propuseram uma correlação empírica para  $\eta$ , conforme equação [2.44], com auxílio de análise dimensional e tratamento estatístico dos resultados experimentais.

$$\frac{\eta}{\eta_i} = 0,3253 Re_p^{1,0887} \left(\frac{H_0}{d_{ps}}\right)^{-0,0646} \left(\frac{W_s}{W_g}\right)^{0,0393} (1-C_s)^{1,0074} \Phi^{-5,528} \quad [2.44]$$

onde:  $\eta_i$  é definido como eficiência de fixação das gotas de solução atomizada, sendo determinado empiricamente;  $d_{ps}$  é o diâmetro médio de Sauter das gotas atomizadas;  $H_0$  é a altura estática do leito;  $W_s$  e  $W_g$  vazão mássica de solução de recobrimento e do ar, respectivamente;  $C_s$  fração mássica de sólidos na solução e  $\phi$  esfericidade.

**Kurcharski e Kmiéc (1989) - Placebo**

Estudaram a cinética de crescimento das partículas, durante o processo de recobrimento de comprimidos em leito de jorro. Analisaram o efeito da velocidade média do gás, diâmetro médio de Sauter das partículas inertes, e altura do leito estático, via modelo matemático proposto em Kurcharski e Kmiéc (1988).

Verificaram que o tempo de processo no recobrimento é um fator importante que altera parâmetros como altura estática do leito, diâmetro e densidade da partícula e expansão do leito, causando com isso alteração desfavorável no tempo de residência das partículas, que leva em consideração as propriedades físicas do leito e da solução atomizada e a fluidodinâmica do gás.

#### **Kurcharski e Kmiéc (1991) - Placebo**

Utilizaram os dados experimentais de seus estudos anteriores, e ajustaram o número de Nusselt com o intuito de melhorar os resultados obtidos em Kurcharski e Kmiéc (1986). A nova correlação apresentou um desvio médio absoluto de 18,7% e máximo de 30%, segundo a equação [2.45].

$$Nu = 9,472 Re_p^{0,613} Pr^{\frac{1}{3}} Ar^{0,23} \left[ \frac{H_0}{d_p} \right]^{-1,031} \left[ \frac{W_s}{W_g} \right]^{0,814} (1-C_s)^{0,795} \Phi^{0,833} \quad [2.45]$$

**Santana et alii (1991) - Placebo**  $d_p = 0,7634\text{cm}$ ;  $\phi = 0,9318$ ;  $\rho_p = 1378 \text{ kg/m}^3$

Estudaram o recobrimento de comprimidos em leito de jorro cone-cilíndrico (ângulo de  $60^\circ$ ) e leito de jorro fluidizado. Verificaram de forma qualitativa a influência dos seguintes parâmetros no crescimento dos placebos: altura estática do leito, vazão de gás e vazão da solução. Correlações da literatura desenvolvidas para leito de jorro cônico foram utilizadas para o cálculo da queda de pressão máxima e vazão de jorro mínimo em leito cone-cilíndrico, obtendo-se resultados satisfatórios.

**Oliveira (1992) - Alumina**  $d_p = 0,39 \text{ cm}$   $\phi = 1$

Estudou o recobrimento de partículas de alumina porosa, com suspensão de sacarose, talco e água destilada em um leito de jorro cone-cilíndrico (ângulo de  $60^\circ$ ). O atomizador foi instalado na entrada do leito. Baseado em estudos de Kurcharski e Kmiéc (1988), foram avaliados a taxa de aumento de massa das partículas,  $k_1$ , sendo função da temperatura do ar de entrada, da razão entre a vazão mássica da suspensão pela vazão mássica total de ar  $w_s/w_g$  e da razão vazão do ar de jorro pela vazão na condição de jorro mínimo,  $Q/Q_{jm}$ . Foi utilizado um planejamento fatorial complexo para estudo paramétrico. O ajuste às equações [2.46] e [2.47], produziram valores de  $k_1$

e  $\eta$ , e o autor chega a conclusão que dentro da faixa estudada a temperatura não influencia  $k_1$  e  $\eta$ , e que eles aumentam com  $w_s/w_g$ ; entretanto  $k_1$  aumenta com  $Q/Q_{jm}$  e  $\eta$ , diminui com o mesmo.

Taxa de aumento de massa nas partículas,  $k_1$ .

$$k_1 = (-4,18 + 1,66 w_s / w_g^* + 2,17 Q / Q_{jm}) / 1000 \quad [2.46]$$

Coefficiente de adesão,  $\eta$ .

$$\eta = -334,0 + 9,4 \frac{W_s}{W_g^*} + 515,4 \frac{Q}{Q_{jm}} - 1,58 \frac{W_s}{W_g^{*2}} - 171,3 \frac{Q}{Q_{jm}^2} + 4,1 \frac{W_s}{W_g^*} \frac{Q}{Q_{jm}} \quad [2.47]$$

com  $W_s/W_g^* = W_s/W_g \times 10^{-3}$

faixa de valores das equações [2.46] e [2.47].

$$1,5 < Q/Q_{jm} < 1,7$$

$$67^\circ\text{C} < T_e < 83^\circ\text{C}$$

$$2,63 \times 10^{-3} < W_s/W_g < 4,71 \times 10^{-3}$$

**Taranto (1992)** - Placebos  $dp_1 = 0,649$  cm  $\phi_1 = 0,8567$ ;  $dp_2 = 0,747$  cm  $\phi_2 = 0,77$

Estudou a fluidodinâmica de um leito de jorro bidimensional aplicado ao recobrimento de comprimidos. Projetou e montou um leito em acrílico com possibilidade de variação do ângulo da base inclinada. A solução recobridora foi um polímero com uma mistura de água, etanol e acetona como solvente, a qual foi atomizada no topo do leito. Analisou a fluidodinâmica sem e com recobrimento, e estudando a queda de pressão máxima no leito, a vazão de jorro mínimo e a altura máxima de jorro estável, com base em correlações para leitos de jorro convencionais, adaptadas pela definição do diâmetro equivalente ao leito bidimensional. Foi feito um ajuste dos dados experimentais para obtenção de correlações próprias para os parâmetros citados acima. A equação [2.48], apresenta a queda de pressão máxima no leito, enquanto que a equação [2.49], mostra a vazão de jorro mínimo.

Correlação da queda de pressão máxima, Taranto (1992).

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H_0 \rho_b g} = 1 + 0,0006 \left[ \frac{(D_c)_{\text{eq}}}{(D_i)_{\text{eq}}} \right]^{5,04} \left[ \frac{d_p}{\phi(D_c)_{\text{eq}}} - 1 \right]^{-1,92} \cdot \text{tg} \left( \frac{\gamma}{2} \right)^{0,70} \quad [2.48]$$

Correlação da vazão de jorro mínimo.

$$Q_{jm} = 5,92 \cdot 10^{-5} \left[ \left( \frac{d_p}{\phi(D_c)_{eq}} \right)^{0,05} \left[ \frac{(D_i)_{eq}}{(D_c)_{eq}} \right]^{-2,6} \operatorname{tg} \left( \frac{\gamma}{2} \right)^{0,06} \right] \cdot [2gH_0 (\rho_s - \rho_g) / \rho_g]^{1/2} \quad [2.49]$$

sendo a faixa de valores das equações [2.48] e [2.49].

$$30^\circ < \gamma < 60^\circ$$

$$0,649\text{cm} < d_p < 0,747\text{cm}$$

$$5,0\text{cm} < D_c < 8,57\text{cm}$$

$$5,41\text{cm} < H_0 < 28\text{cm}$$

**Ayub (1993)** - Placebos  $d_{p1} = 0,7612 \text{ cm}$   $\phi_1 = 0,9510$ ;  $d_{p2} = 0,7804 \text{ cm}$   $\phi_2 = 0,9673$

Estudou a transferência de calor fluido-partícula, taxa de crescimento da partícula e eficiência do processo, no leito desenvolvido por Taranto (1992). Os dados experimentais quanto a transferência de calor foram correlacionados e foi obtida a equação [2.50]. Verificou que o número de Nusselt aumenta quando  $Re$  e  $w_s/w_g$  aumentam e quando  $H_0/\phi d_p$  e  $\operatorname{tg}(\gamma/2)$  diminuem. Verificou que a taxa de crescimento possui uma relação linear de crescimento da partícula com o tempo e a dependência da eficiência do processo,  $\eta$ , com os grupos  $w_s/w_g$  e  $w_g/w_{jm}$ , aumenta com o aumento de  $w_s/w_g$  e diminui com o aumento de  $w_g/w_{jm}$ . Os valores de  $k_1$ , foram ajustados pelo modelo de Oliveira (1992), bem como os valores de  $\eta$ , estimados pela equação [2.47].

$$Nu = 0,9892 Re^{1,6421} Pr^{1/3} \left[ \frac{H_0}{\Phi d_p} \right]^{-1,3363} \left[ \frac{W_s}{W_g} \right]^{0,7808} \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right)^{-0,1806} \quad [2.50]$$

válida para faixa de valores:

$$30^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ; 0,72117\text{cm} \leq d_p \leq 0,78039\text{cm}$$

$$10,65\text{cm} \leq H_0 \leq 24,56\text{cm}; 575 \leq Re \leq 844$$

$$7\text{ml/min} \leq W_s \leq 13\text{ml/min}; 70^\circ\text{C} \leq Tg_1 \leq 85^\circ\text{C}$$

Estudou um leito de jorro de seção quadrada acoplada a uma base tronco-cônica o qual empregou no recobrimento de partículas de alumina porosa, usando suspensão de açúcar, talco e água destilada. O atomizador pneumático foi instalado na parte inferior do leito. Com base no estudo desenvolvido por Oliveira (1992), variando o ângulo inferior da base cônica, a massa inicial das partículas introduzidas no leito e a vazão de ar, na forma da vazão de ar de jorro pela vazão de ar na condição de jorro mínimo ( $Q_{ar}/Q_j$ ), avaliou a influência desses parâmetros na taxa de aumento de massa das partículas ( $K_1$ ) e na eficiência de adesão ( $\eta$ ). Foi feito um planejamento fatorial  $3^3$  para a análise dos resultados foi feita uma regressão múltipla para os dados experimentais. As equações [2.51] e [2.52], forneceram os valores de  $K_1$  e  $\eta$  para as condições utilizadas.

Taxa de aumento nas partículas,  $K_1$ .

$$K_1 = 6,37 \cdot 10^{-2} - 4,83 \cdot 10^{-4} \theta - 1,79 \cdot 10^{-2} Q_{ar}/Q_{jm} - 3,10 \cdot 10^{-5} Mo + 2,59 \cdot 10^{-4} \theta \cdot Q_{ar}/Q_{jm} + 4,49 \cdot 10^{-8} \theta \cdot Mo + 7,89 \cdot 10^{-9} Mo^2 \quad [2.51]$$

Para  $\theta$  em graus e  $Mo$  em gramas.

Coefficiente de adesão,  $\eta$ .

$$\eta = 278,05 - 5,93\theta + 2,95\theta Q_{ar}/Q_{jm} + 8,80 \cdot 10^{-4} \theta Mo - 0,13 Q_{ar}/Q_{jm} Mo + 5,40 \cdot 10^{-5} Mo^2 \quad [2.52]$$

**Ataide (1996)** - Placebos:  $dp_1 = 0,5951$  cm;  $\phi_1 = 0,806$ ;  $dp_2 = 0,6533$  cm;  $\phi_2 = 0,856$   
 $dp_3 = 0,6957$  cm;  $\phi_3 = 0,890$ ;  $dp_4 = 0,7167$  cm;  $\phi_4 = 0,901$

Estudou um leito de jorro cone-cilíndrico, construído em uma coluna de vidro *Pyrex*, equipada com um sistema de injeção de ar auxiliar, junto a parede da seção cônica. Caracterizou a fluidodinâmica do sistema, em seguida analisou o processo de recobrimento dos comprimidos, bem como o efeito da injeção de ar na taxa de circulação das partículas com auxílio de um comprimido colorido. Foi feita a avaliação da homogeneidade do produto final, através da análise de distribuição de frequência de massa do comprimido recoberto em relação ao placebo original. Empregou um pacote numérico para descrever a cinética de crescimento dos comprimidos e os resultados obtidos foram comparados com os experimentais.

## 2.6- SISTEMA DE ATOMIZAÇÃO

O sistema de atomização da solução de recobrimento é constituído por um dispositivo de atomização e uma bomba. Os dispositivos mais usuais, são o hidráulico e o pneumático.

No dispositivo hidráulico, a atomização da suspensão é feita sem ar. Induz-se uma alta pressão no líquido que é forçado através de um pequeno orifício, o que acarreta altas velocidades locais de aplicação, e que pode transformar-se em desvantagem devido ao arraste de comprimidos. Este dispositivo é mais apropriado para os recobrimentos com aplicação de pós.

No dispositivo pneumático ou bocal de duplo fluido, a atomização é feita com ar. Ele é mais económico que o hidráulico e pode ser aplicado para uma ampla faixa de velocidade e é indicado no recobrimento com suspensões aquosas. O ar de atomização pode contribuir para a secagem das partículas em fase de recobrimento.

As bombas, que transportam a suspensão de recobrimento do tanque até o dispositivo de atomização, são classificados de uma forma geral em: bomba peristáltica, bomba de engrenagem e de pistão.

A bomba peristáltica é de fácil operação e limpeza mas de custo apreciável apresenta inconveniente no uso de líquidos viscosos, pois tem um fluxo pulsátil no bombeamento. As bombas de engrenagem, são construídas com materiais inertes e resistentes a corrosão. Permitem o uso de líquidos de alta viscosidade. Como desvantagens: são de alto custo, difícil limpeza, se a suspensão contiver alta concentração de sólidos, haverá desgaste das engrenagens e possibilidade de coagulação, se os produtos de recobrimento forem a base de látex. A bomba de pistão tem capacidade de deslocar fluidos altamente viscosos, além de propiciar uma alta pressão na linha. O custo é alto e a limpeza, difícil, podendo modificar a suspensão de recobrimento pelas altas tensões cisalhantes aplicadas.

Há três maneiras básicas de acoplamento do bico atomizador no leito: no topo, na base, e localização lateral.

A Figura 2.25 apresenta o equipamento e as diversas posições do bico atomizador. Olsen (1985), cita que estes equipamentos são geralmente aplicados para recobrimento de produtos farmacêuticos e alimentícios.

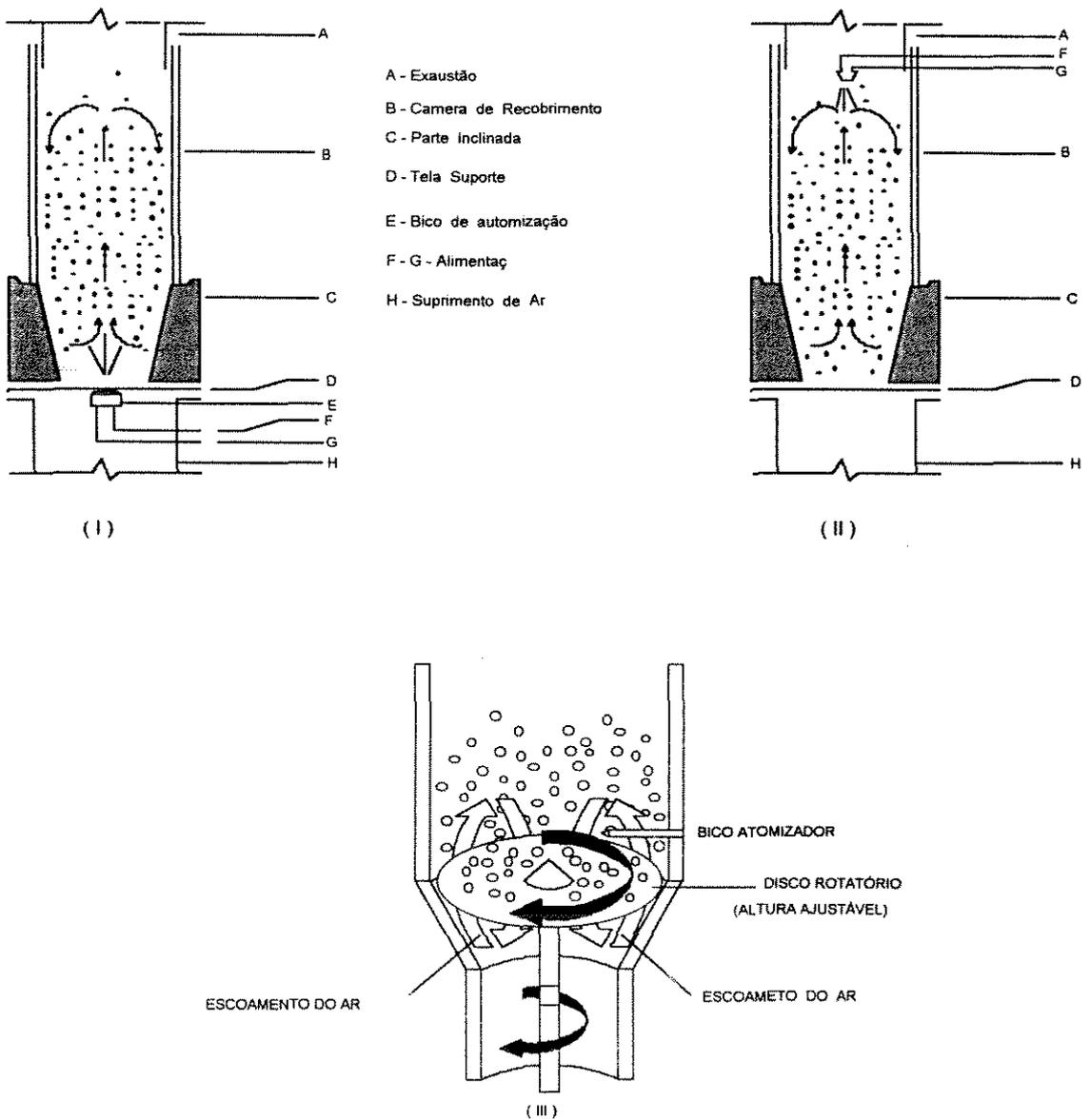


Figura 2.25 - Posições do bico atomizador, (Olsen, 1985).

Sistemas com bicos atomizadores no topo, na base e lateral, possuem a qualidade de distribuir uniformemente o filme polimérico. A escolha da posição deve entre outros, levar em consideração, o tipo do leito, do material a ser recoberto e das condições fluidodinâmicas. A Tabela 2.3, apresenta as vantagens e desvantagens da posição do bico atomizador.

Tabela 2.3- Características gerais dos três tipos de acoplamento em leitos fluidizados

Tipo de acoplamento do atomizador	Vantagens	Desvantagens
Topo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidade de operar grandes cargas;</li> <li>- Fácil de montar, ajustar, e acesso ao bico ;</li> <li>- O movimento das partículas não sofre interferência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pode ocorrer perda da suspensão por elutriação</li> </ul>
Base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Opera com cargas moderadas;</li> <li>- Qualidade de distribuir uniformemente o filme de revestimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acesso ao bico é difícil;</li> <li>-Por estar junto à placa distribuidora, pode perturbar o movimento das partículas favorecendo sua aglomeração e/ou encharcamento.</li> </ul>
Lateral	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Independe da carga a operar;</li> <li>- Fácil de montar, ajustar e acesso ao bico;</li> <li>- Trabalha-se com vazões elevadas de suspensão de recobrimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O produto é submetido à tensão mecânica.</li> </ul>

## 2.7- DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DE PARTÍCULAS EM LEITOS MÓVEIS.

### a) Distribuição de tempo de ciclo (DTC).

É comum caracterizar o escoamento de um fluido através de sistemas contínuos fazendo uso da distribuição do tempo de residência (DTR). Aplicações da DTR na modelagem de escoamentos não-ideais e sua influência na conversão em reatores químicos, por exemplo, é tema conhecido na literatura.

Um estudo experimental da distribuição de tempo de residência e características de secagem, em um secador de leito vibro-fluidizado contínuo é apresentado por Han et alii (1991). O prato distribuidor tinha 1,50 m de comprimento e 0,24 m de largura. Foram usados grãos de trigo e produtos farmacêuticos. A DTR foi medida por injeção de um traçador colorido do mesmo material em circulação. As amostras foram coletadas na saída do secador em intervalos fixos de tempo e a fração de massa das partículas traçadoras em cada amostra foi calculada. Os autores concluíram que entre as variáveis estudadas como taxa de escoamento, altura do leito, tamanho da partícula e intensidade de vibração, esta última foi a que apresentou maior influência sobre o tempo médio de residência, devido a um aumento da velocidade de transporte das partículas. Foi também observado que a vibração ajuda a desfazer os materiais pegajosos, resultando numa melhor fluidização.

Leitos de jorro são caracterizados pelo movimento cíclico de partículas sólidas entre o jorro e o ânulo do leito. A literatura ressalta que a taxa de circulação em muitos processos não é conhecida, enquanto que os tipos de escoamento são descritos somente de forma qualitativa. Isto é devido as dificuldades experimentais encontradas em medidas diretas destes parâmetros. Embora a operação dependa do tipo de escoamento dentro do equipamento, como no caso de um processo contínuo, não é possível caracterizá-lo pela DTR, pois as partículas permanecem dentro do sistema durante todo o processo. Para estas situações, Mann e Crosby (1974) desenvolveram formulações estatísticas em termos de distribuição de tempo de ciclo (DTC). O tempo de ciclo é definido como o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas de uma certa partícula por uma seção transversal específica do leito. Devido as diferentes possíveis trajetórias, sobretudo na região anular, o tempo de ciclo de uma partícula varia durante o decorrer do processo. Neste mesmo contexto, diferentes partículas podem ter tempos de ciclos distintos, caracterizando-se o tempo de ciclo como uma variável aleatória.

Usando analogias com conceitos da DTR, Mann e Crosby (1974) definem a função distribuição,  $H(t)$ , como a probabilidade do tempo de ciclo de uma determinada partícula não exceder um tempo definido,  $t$ . Por definição,  $H(t)$  é a DTC das partículas no leito de jorro, e normalmente tem uma variação sigmoideal com o tempo. Complementando tem-se a função distribuição de densidade,  $h(t)$ , dada por:

$$h(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad [2.53]$$

Segue-se que  $h(t)dt$  é a probabilidade que uma partícula complete um ciclo em um intervalo de tempo compreendido entre  $t$  e  $t + dt$ . A curva  $h(t)$  *versus* tempo tem o formato de uma curva de Gauss assimétrica.

Sob o ponto de vista da engenharia de processo de recobrimento é mais útil interpretar a DTC de uma forma alternativa. Em um leito de comprimidos pode-se assumir que as partículas são idênticas em forma, tamanho, massa e rugosidade e neste caso, todas irão circular de acordo com a mesma DTC. Como consequência  $H(t)$  pode ser interpretado como a fração do leito que tem um tempo de ciclo não superior do que  $t$ , e  $h(t)dt$  é a fração do material que completa um ciclo em um intervalo de tempo entre  $t$  e  $t + dt$ .

O tempo médio de um ciclo é dado por:

$$\mu = \int_0^{\infty} t dH(t) = \int_0^{\infty} t h(t) dt \quad [2.54]$$

e a variância é dada por:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 dH(t) = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 h(t) dt \quad [2.55]$$

Quando a distribuição de tempo de ciclo é conhecida, a taxa de circulação  $\omega$ , fica definida como sendo a taxa de escoamento das partículas no leito. Ela pode ser calculada por  $\omega = M_i/\mu$ , onde  $M_i$  é a capacidade do sistema, neste caso a massa das partículas e  $\mu$ , é a média do tempo de ciclo. Portanto medidas experimentais da distribuição de tempo de ciclo, vem ser um método para determinação de taxas de circulação e analisar tipos de escoamento do leito.

A literatura registra diversas avaliações experimentais da DTC em leitos de jorro, usando instrumental com maior ou menor grau de sofisticação. Finzer (1989), desenvolveu um secador de leito vibro-jorrado cone-cilindrico, e determinou experimentalmente o tempo de ciclo, para grãos de feijão, sendo utilizado como traçador um grão colorido. Seus ensaios indicaram que o escoamento interno dos grãos, seguia o modelo pistonado com baixo grau de dispersão e que a taxa de circulação dos mesmos tornava-se máxima sob condições de ressonância. As Figuras 2.14 e 2.15 são alguns dos resultados obtidos por Finzer (1989)

No mesmo contexto, Souza e Kieckbusch (1994), realizaram experimentos utilizando um comprimido colorido como traçador em um secador vibro-jorrado bidimensional, para determinação de tempo de ciclo. Os resultados indicaram a importância dessa avaliação para a uniformização do recobrimento de comprimidos no leito. Como as observações foram visuais houve dificuldades para o registro de tempos pequenos, necessitando para isso uma melhor técnica para mensurar o tempo de ciclo das partículas no leito bidimensional.

Um outro trabalho recente que utilizou como traçador um comprimido colorido foi de Ataíde (1996), que estudou a DTC em leitos de jorro e jorro-fluidizado cone-cilíndricos. Os cálculos para a distribuição de tempo de ciclo para as condições de operação empregadas, sem e com injeção auxiliar de ar junto a parede cônica do leito foram baseados nos estudos de Mann e Crosby (1975). Os resultados indicaram que a injeção de ar causa uma diminuição de cerca de 11% no tempo médio de ciclo das partículas, concedendo à configuração do tipo jorro-fluidizado uma vantagem considerável em relação ao jorro convencional uma vez que este aspecto parece ter influência direta na cinética de crescimento das partículas no leito.

Uma técnica experimental utilizada com êxito para a medida da distribuição de tempo de ciclo em unidades de recobrimento em leitos móveis é mostrada na Figura 2.26, (Mann e Crosby, 1975). O tubo central separando as regiões central e anular elimina o curto-circuito das partículas e ao mesmo tempo serve como suporte de uma bobina detetora, localizada no topo do leito.

Esta técnica é baseada no uso de uma partícula magnética ( $d = 0,952$  cm, e  $m = 0,926$  g) que se move na direção da bobina em alta velocidade, e induz uma força eletromotriz (fem) na bobina. Esta fem é amplificada e usada para disparar um regulador que mede o tempo decorrido entre duas aparições consecutivas da partícula magnética, o qual vem a ser o tempo de ciclo. Os autores utilizaram leito de partículas de poliestireno ( $d = 0,635$  cm, e  $m = 0,15$  g), para verificar a influência da taxa de circulação, com a injeção do ar auxiliar na zona anular do equipamento.

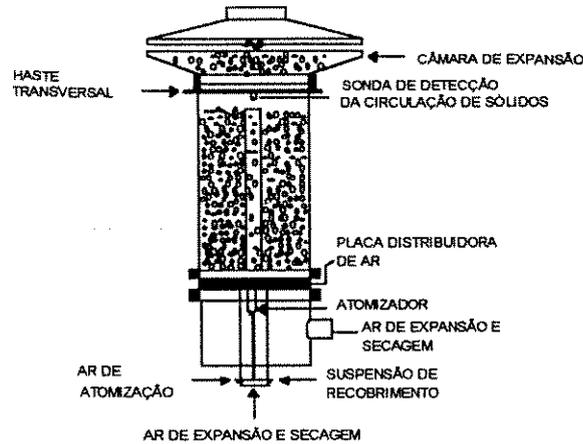


Figura 2.26- Descrição esquemática da unidade de recobrimento utilizada por Mann e Crosby.

Um trabalho mais refinado para determinação da distribuição de tempo de ciclo de sólidos (esferas de vidro,  $d = 3 \text{ mm}$ , e  $\rho = 2475 \text{ kg/m}^3$ ), em um leito de jorro cone-cilíndrico foi desenvolvido por Roy et alii (1994). O método utiliza uma partícula radioativa, sendo sua localização monitorada continuamente por um sistema de emissão de raios gama, ao longo do eixo axial do leito nas três dimensões. Os cálculos de tempo de ciclo foram baseados no trabalho de Mann e Crosby (1975). Obtem-se um registro tri-dimensional do escoamento, mas o custo deste equipamento é elevado e sua operação complexa.

#### **b) Distribuição do número de ciclos (DNC) e da massa depositada por ciclo.**

O conhecimento da DTC, apenas, não é suficiente para qualificar a eficiência do processo do recobrimento de comprimidos usando leito de jorro. A massa total de cobertura depositada em cada comprimido vai depender do número de vezes que essa partícula passa pela região de atomização durante todo o processo e da quantidade de cobertura depositada na mesma, por passagem (Mann, 1983).

Em um processo industrial, o tempo de operação é sempre superior a 30 min, podendo chegar a ser de várias horas. Durante esse tempo total de operação, uma determinada partícula completa um certo número de ciclos,  $N(t_{total})$ . Seguindo o mesmo raciocínio usado na definição de DTC, Mann et alii (1974) definem um função distribuição,  $G(n, t_{total})$  que pode ser interpretada como a fração do leito de partículas que completa não mais que  $n$  ciclos no tempo total,  $t_{total}$ . A probabilidade de uma partícula completar exatamente  $n$  ciclos no tempo  $t_{total}$ , é dada por:

$$g(n, t_{total}) = G(n, t_{total}) - G(n-1, t_{total}) \quad [2.56]$$

A média de  $N(t_{total})$  é dada por:

$$N(t_{total}) = \sum_{n=0}^{\infty} n g(n, t_{total}) \quad [2.57]$$

Uma estimativa do número de ciclos que uma partícula completa em um tempo total de processamento,  $t_{total}$ , é obtida através desse valor de  $N(t_{total})$

Com base na teoria da renovação elementar, Mann et alii (1974) afirmam que:

$$\lim_{t_{total} \rightarrow \infty} \frac{N(t_{total})}{t_{total}} = \frac{1}{\mu} \quad [2.58]$$

onde  $\mu$  já foi definido anteriormente em termos de DTC (Equação 2.54).

A equação [2.58] indica que à medida que  $t_{total}$  se torna muito grande, a expectativa do número de ciclos converge para o inverso da média da DTC. Trabalhando com situações assintóticas, isto é, condições de operação nos quais  $t_{total}$  é muito grande comparado a  $\mu$ , Mann et alii (1974) demonstram que  $N(t_{total})$  tende a uma distribuição normal, com média:

$$N(t_{total}) = \frac{t_{total}}{\mu} \quad [2.59]$$

e variância:

$$\tau_N^2 = \frac{t_{total} G^2}{\mu^3} \quad [2.60]$$

Essa tendência limite independe do formato (simetria) da DTC. Usando uma distribuição de Poisson para representar uma DTC, Mann et alii (1974) demonstraram que com um valor de  $t_{total}$  suficientemente alto, para possibilitar uma média,  $N$ , de no mínimo 20 ciclos, a distribuição de  $g$  é praticamente coincidente com uma distribuição normal. Esse valor está muito aquém das médias comumente encontradas em operações industriais, de maneira que a aproximação de DNC por uma curva de Gauss é justificável.

Em seu último trabalho sobre o assunto, Mann (1983) enfatiza uma terceira variável aleatória do processo e que tem recebido pouca, ou nenhuma atenção até hoje. Trata-se da distribuição da quantidade de massa de recobrimento depositada na partícula, a cada passagem.

A massa de recobrimento aderida à partícula na sua  $i$ -passagem,  $W_i$ , varia a cada ciclo e é necessário obter uma função distribuição,  $F(w)$ , nos mesmos moldes das funções definidas acima. Desta maneira,  $F(w)$  representa a probabilidade de uma partícula receber não mais do que  $w$  gramas de material de cobertura a cada passagem no ciclo, ou alternativamente, é a fração do leito que recebe não mais de  $w$  gramas em uma passagem.

O parâmetro que define a qualidade do acabamento no processo de recobrimento é a quantidade total de material de cobertura depositada na partícula:

$$C(t_{total}) = W_1 + W_2 + \dots + W_{N(t)} \quad [2.61]$$

Como  $W$  é uma variável aleatória (distribuição dada por  $F$ ) e  $N$  é outra variável aleatória (distribuição dada por  $G$ ), tem-se que  $C$  também será uma variável aleatória. A sua distribuição  $H(C, t_{total})$  será portanto uma função de  $t_{total}$  e de  $C$  e a natureza (formato) de  $H$  vai definir a capacidade de produção de um determinado equipamento sob condições fixas de operação. Quanto mais uniforme a distribuição  $H$ , menor tempo total será necessário a fim de garantir que todas as partículas tenham recebido uma massa  $W$  mínima de cobertura.

Utilizando relações da Teoria da Probabilidade, Mann (1983) consegue uma expressão de  $H$  em função de  $F$  e  $G$ , que ele assume independentes, e aplica em um exemplo prático. Apesar de afirmar que a distribuição  $F$  é fácil de ser levantada experimentalmente, não existem valores conhecidos. Mann (1983) assume para  $F$  e  $G$  a mesma distribuição de Poisson já

comentada, e o resultado para H acaba sendo uma distribuição gama. Mais importante é que H também tende a uma distribuição normal com o aumento do número de ciclos, embora com uma convergência menor do que a DTC, comentada no item a. Como valor conservativo, Mann (1983) indica que com um número médio,  $N$ , de 50 ciclos, a distribuição da massa de cobertura por partícula pode ser assumida como uma distribuição de Gauss.

## **Capítulo 3**

## MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

### 3.1- MATERIAIS

#### 3.1.1-SUSPENSÃO DE RECOBRIMENTO

Com o objetivo de trabalhar com parâmetros próximos aos utilizados pela indústria farmacêutica, foi elaborada uma suspensão cuja formulação é dada na Tabela 3.1., a qual foi desenvolvida a partir dos dados da literatura, Seitz et alii (1986).

Tabela 3.1- Composição da suspensão de recobrimento.

Reagentes	Função	% peso
Hidroxietil celulose (cellosize Q <sub>p</sub> 09 H <sup>R</sup> )	Filme Polimérico	3,50
Água Destilada	Solvente	89,0
Talco Neutro	Agente de Separação e Alisamento	1,50
Tween - 80	Emulsificante e Tensoativo	3,25
PEG 6000	Plastificante	1,00
TiO <sub>2</sub>	Opacificante	1,25
Corante	Cor	0,50

A preparação da suspensão de recobrimento é dividida em 3 etapas:

1<sup>a</sup> Etapa: Preparo da solução polimérica, que consiste na dissolução do polímero em metade da massa total do solvente, sob agitação contínua, durante 6,0 horas. Algumas gotas de NH<sub>4</sub>OH, foram adicionadas durante o processo uma vez que a dissolução do hidroxietil celulose é mais fácil e rápida num meio básico.

2<sup>a</sup> Etapa: Preparação da suspensão de pigmento. Inicialmente dispersa-se por agitação o TiO<sub>2</sub> no solvente remanescente por um tempo de 10 minutos. Transfere-se então a solução a um moinho coloidal (marca Brasil-modelo 56-RC-63321) e adiciona-se o talco neutro, gradativamente por um período de 35 minutos. Este modo de operação permite reduzir a granulometria das partículas a um valor inferior a 15µm, produzindo uma suspensão final de recobrimento mais uniforme e homogênea. Feita esta suspensão parcial no moinho coloidal, o material é devolvido ao tanque agitado, adiciona-se PEG 6000 e Tween-80, e mistura-se por um tempo de 20 minutos.

3ª Etapa: A solução polimérica e a suspensão de pigmento são misturadas sob agitação contínua por um período de 3 horas, obtendo-se finalmente a suspensão de recobrimento. Durante a mistura é adicionado o corante. Os corantes utilizados foram o amarelo de tartazina e o alaranjado de metila.

A massa específica da suspensão polimérica de recobrimento, ( $\rho_s$ ), foi determinada por picnometria, obtendo-se o valor de  $1,196 \text{ kg/m}^3$ , para uma temperatura de  $50^\circ \text{C}$ .

### 3.1.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas que foram recobertas nos experimentos são placebos, ou seja, núcleos inertes de comprimidos, de forma lenticular, de 3 tamanhos diferentes, produzidos pela Fabrica Cristália/Produtos Químicos Farmacêuticos Ltda, Itapira, Estado de São Paulo. Receberam a denominação de C1, C2 e C3, conforme a ordem crescente de massa. Segundo dados do fabricante, os comprimidos foram confeccionados com uma dureza de 10 - 12 stokes, o que diminui o desgaste por abrasão nos contatos partícula-partícula e partícula-parede do leito, durante sua circulação. Ensaio preliminares mantendo o produto por um tempo de 60 minutos no leito de jorro sob condições severas de vibração e fluxo de ar, confirmaram a boa resistência mecânica, não tendo sido observado alterações de massa, forma e aspecto da superfície dos comprimidos.

A Figura 3.1a, mostra a forma geométrica dos comprimidos utilizados. Os valores médios das dimensões são dados na Tabela 3.2. Na formulação da mistura do comprimido usou-se a seguinte composição: 92% de lactose, 6-7% de amido de milho e 1-2% de estearato de magnésio.

Na Figura 3.1b, tem-se uma fotografia dos 3 comprimidos.

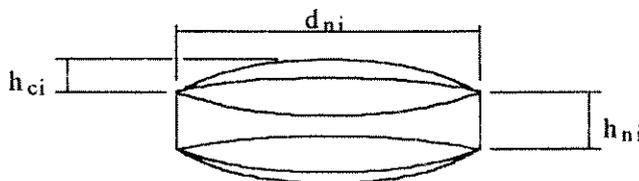


Figura 3.1a- Formato do núcleo inerte ( Placebo ).

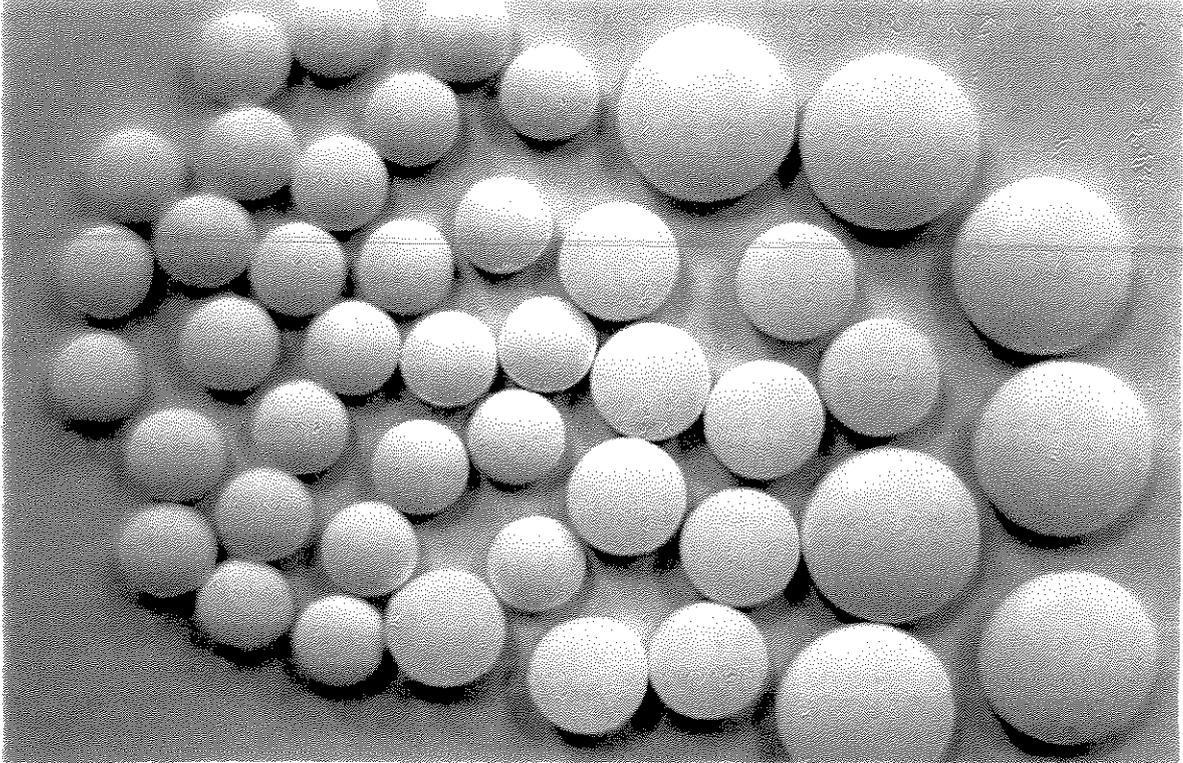


Figura 3.1b- Detalhes dos comprimidos C1, C2 e C3.

Para o estudo do recobrimento, é necessário o conhecimento da massa específica, ( $\rho_p$ ), o tamanho e a forma das partículas, que foram determinadas pelos procedimentos descritos a seguir:

**a) Massa Específica da Partícula Inerte**

A estimativa da massa específica da partícula inerte foi realizada, determinando-se primeiramente a massa média,  $m_{p,o}$ , de uma amostra de 250 partículas não recobertas. Em seguida com auxílio de um paquímetro foram feitas as medidas de  $d_{ni}$ ,  $h_{ni}$  e  $h_{ci}$ , de todas as partículas da amostra. De posse dessas medidas determinou-se o volume médio dos núcleos inertes,  $V_p$ , sendo considerado igual a soma do volume de um cilindro,  $V_{ci}$ , e duas vezes o volume de uma calota,  $V_{ca}$ , dado por:

$$V_p = V_{ci} + 2V_{ca} \tag{3.1}$$

sendo:

$$V_{ci} = \frac{\pi d_m^2 h_m}{4} \tag{3.2}$$

e

$$V_{ca} = \frac{\pi h_{ci}}{6} \left( \frac{3}{4} d_m^2 + h_{ci}^2 \right) \tag{3.3}$$

Rearranjando:

$$V_p = \frac{\pi d_m^2}{4} (h_{ci} + h_m) + \frac{\pi h_{ci}^3}{3} \tag{3.4}$$

assim:

$$\bar{V}_p = \frac{1}{250} \sum_{i=1}^{250} V_p \tag{3.5}$$

Finalmente, a massa específica média das partículas inertes é calculada por:

$$\rho_p = \frac{\bar{m}_{p,o}}{\bar{V}_p} \tag{3.6}$$

A Tabela 3.2., apresenta os valores das características da partícula utilizada.

Tabela 3.2- Características físicas dos comprimidos usados.

Comprimido	$d_{ni}$ [m] $\times 10^{-3}$	$h_{ni}$ [m] $\times 10^{-3}$	$h_{ci}$ [m] $\times 10^{-3}$	$m_{p,o}$ [kg] $\times 10^{-3}$	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]
C1	6,60	1,75	0,87	0,120	1330
C2	8,05	3,38	0,42	0,250	1188
C3	12,20	1,69	1,44	0,440	1193

### b) Diâmetro das Partículas

Utilizando-se o procedimento descrito em 3a., estimou-se o volume médio dos núcleos inertes ( $\bar{V}_p$ ). Considerando-se o volume médio dos núcleos inertes como sendo o volume de uma esfera ( $V_e$ ), pode-se estimar o diâmetro médio volumétrico da partícula,  $\bar{d}_p$  pela relação:

$$\bar{d}_p = \left( \frac{6 \bar{V}_p}{\pi} \right)^{1/3} \quad [3.7]$$

### c) Esfericidade das Partículas ( $\phi$ )

Foi utilizada a seguinte definição para o cálculo da esfericidade dos comprimidos, (Foust et alii, 1982).

$$\phi = \left[ \frac{\text{Area da esfera } (A_e)}{\text{Area da superfície da partícula } (A_p)} \right]_{\text{ambas de mesmo volume}} \quad [3.8]$$

onde  $A_p$ , foi determinada pela equação abaixo:

$$A_p = A_{ci} + 2A_{ca} \quad [3.9]$$

$A_{ci}$ , é a área lateral do cilindro e  $A_{ca}$  a área da calota, sendo:

$$A_{ci} = \pi d_{ni} h_{ni} \quad [3.10]$$

e:

$$A_{ca} = 2\pi h_{ci} \left[ \frac{(d_{ni}/2)^2 + h_{ci}^2}{2h_{ci}} \right] \quad [3.11]$$

Substituindo [3.10] e [3.11] em [3.9] e rearranjando, fica:

$$A_p = \pi \left( \frac{d_{ni}^2}{2} + 2h_{ci}^2 + d_{ni}h_{ni} \right) \quad [3.12]$$

A área da esfera de mesmo volume que a partícula é determinada por:

$$A_e = \pi \bar{d}_p^2 \quad [3.13]$$

onde,  $\bar{d}_p$ , é o mesmo obtido da equação [3.7].

Os valores de  $\bar{d}_p$  e  $\phi$ , obtidos estão dispostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Dimensão e esfericidade dos comprimidos.

Comprimido	$\bar{d}_p$ [m] x10 <sup>-3</sup>	$\phi$
C1	5,56	0,887
C2	7,18	0,859
C3	8,89	0,796

#### d) Massa Específica Aparente e Porosidade

A massa específica aparente ( $\rho_a$ ), foi determinada em função do empacotamento das partículas, ou da porosidade ( $\varepsilon$ ). O cálculo da porosidade do leito expandido foi feito através da equação:

$$\varepsilon = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad [3.14]$$

onde:  $V_t$  é o volume total e  $V_s$  o volume de sólidos. Quando se tem uma massa de partículas, o volume total é dado pelo volume que ela ocupa num recipiente. O volume de sólidos é obtido de forma direta da sua massa específica. A massa específica aparente é determinada por:

$$\rho_a = (1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g) \quad [3.15]$$

Os resultados obtidos da porosidade e da massa específica aparente, são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Porosidade ( $\varepsilon$ ) e massa específica aparente ( $\rho_A$ ) do leito de comprimidos.

Comprimido	$\varepsilon$	$\rho_A$ ( kg/m <sup>3</sup> )
C1	0,300	931,0
C2	0,250	891,0
C3	0,275	864,9

## 3.2 - EQUIPAMENTOS

### 3.2.1-SECADOR DE LEITO VIBRO-JORRADO BIDIMENSIONAL (LVJ-BD)

Com os objetivos de estudar a dinâmica do leito, a distribuição de tempo de ciclo das partículas e a cinética de recobrimento de comprimidos, foi projetada e executada a instalação descrita sucintamente a seguir e esquematizada na Figura 3.2 . As Figuras 3.3 e 3.4 são vistas do equipamento.

O sistema experimental utilizado permite a sequência das operações: O ar é insuflado pelo compressor (1), e um sistema de arrefecimento (3) permite controlar a temperatura do gás na entrada do rotâmetro (5) que mede a vazão de ar ajustável por uma válvula globo (2); o ar escoia até o leito (17) sendo que abaixo da placa distribuidora de ar (12), um manômetro diferencial acoplado à tomada de pressão (11) mede a queda de pressão no leito; as temperaturas do ar na linha antes do rotâmetro, na entrada do leito e acima da fonte de jorro, são medidas através de termopares (4); a solução de recobrimento é aquecida a 50 °C por um banho-maria (25) com controle de temperatura, em seguida é transportada do reservatório (26) por uma bomba peristáltica (24), que permite controle da vazão da solução; o compressor (23), alimenta o bico atomizador (20) com ar comprimido, cujas vazão e pressão são medidas pelo rotâmetro e válvula reguladora de pressão (21), respectivamente.

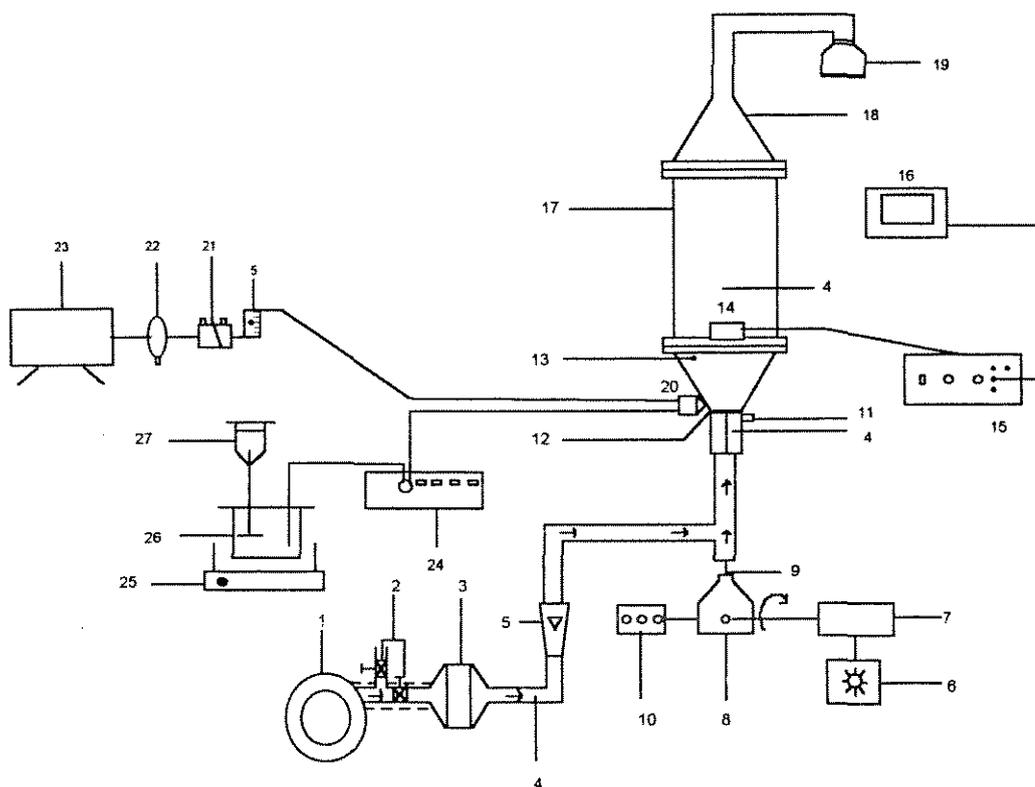


Figura 3.2: Esquema do sistema experimental utilizado: 1. Soprador; 2. Válvula; 3. Sistema de Arrefecimento; 4. Termopares; 5. Rotâmetros; 6. Variador Eletrônico de Velocidade; 7. Motor Elétrico; 8. Conjunto de Vibração; 9. Haste de Vibração; 10. Freqüencímetro; 11. Tomada de Pressão; 12. Placa Distribuidora de Ar; 13. Coletor de Amostras; 14. Bobina Detetora; 15. Detetor de Sinais Eletromagnéticos; 16. Microcomputador; 17. Leito Bi-Dimensional; 18. Tampa Móvel; 19. Frasco Coletor de Pó; 20. Bico Atomizador; 21. Válvula Reguladora de Pressão; 22. Filtro de Ar; 23. Compressor de Ar; 24. Bomba Peristáltica; 25. Banho-Maria; 26. Reservatório da Solução de Recobrimento; 27. Agitador.

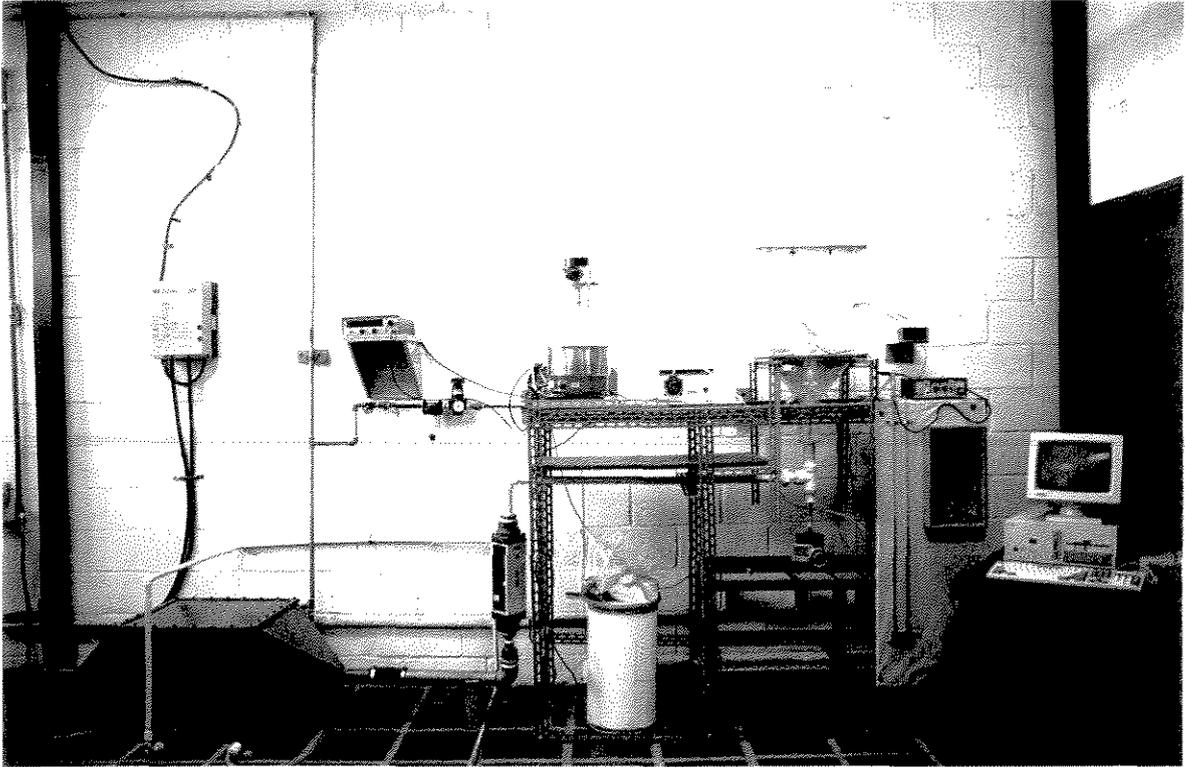


Figura 3.3 - Vista parcial da instalação experimental do leito vibro-jorrado bidimensional

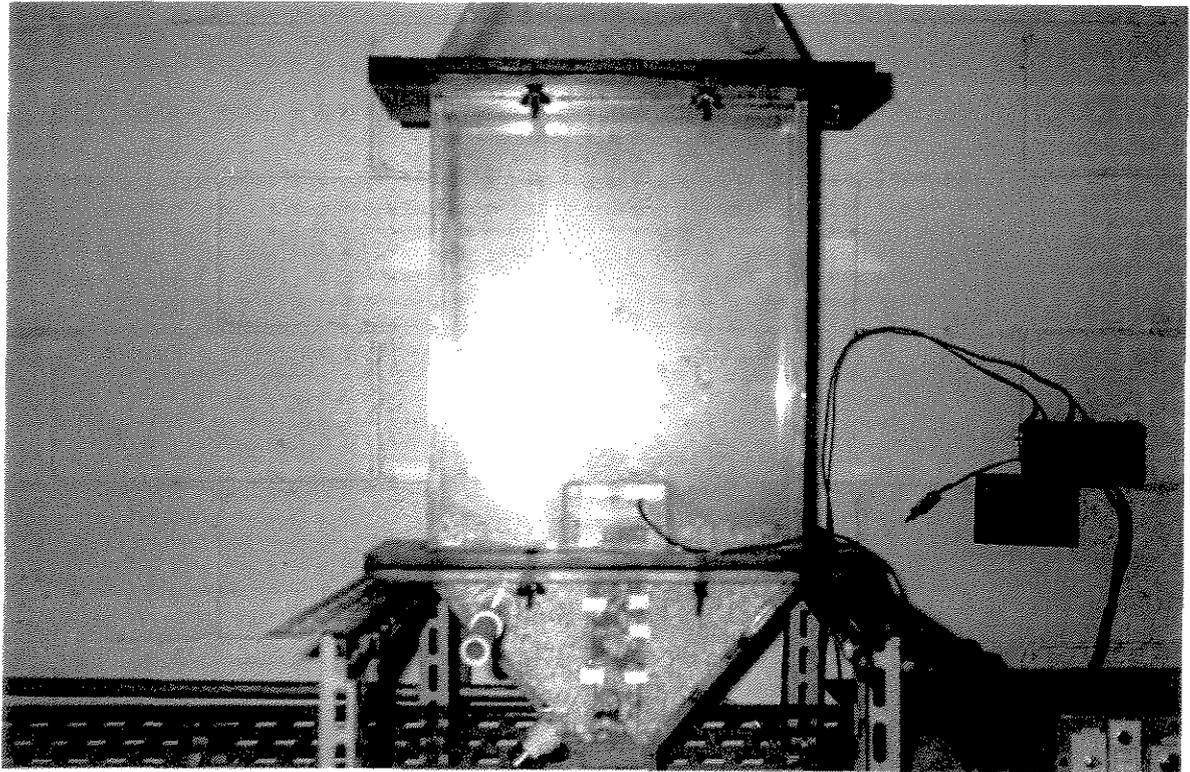


Figura 3.4 - Leito bidimensional com os comprimidos C2, submetidos a ação vibracional.

A instalação experimental é dotada de um sistema de vibração (8), acoplado a placa distribuidora por uma haste de vibração (9), que vibra na frequência desejada regulada por um variador eletrônico de velocidade (6); a frequência é medida por um freqüencímetro (10). O sistema também é dotado de uma bobina (14), ligada a um detetor de sinais eletromagnéticos (15), que mede os pulsos elétricos de um magneto colocado na carga dos comprimidos em movimento. O microcomputador (16), dotado de uma placa de aquisição de dados, está ligado ao detetor, permitindo a leitura dos pulsos, transformando-os em medidas de tempo de ciclo, através de um programa computacional.

### 3.2.2- LEITO DE JORRO

O leito vibro-jorrado projetado, permitiu avaliar o comportamento das partículas contidas em um espaço de forma retangular, chamado de leito bidimensional. Este leito contém uma passagem de ar no centro correndo paralelamente à sua largura, um sistema de amostras de partículas, termopares que fornecem as medidas de temperaturas, e uma entrada lateral para o bico atomizador, conforme mostrado na Figura 3.5.

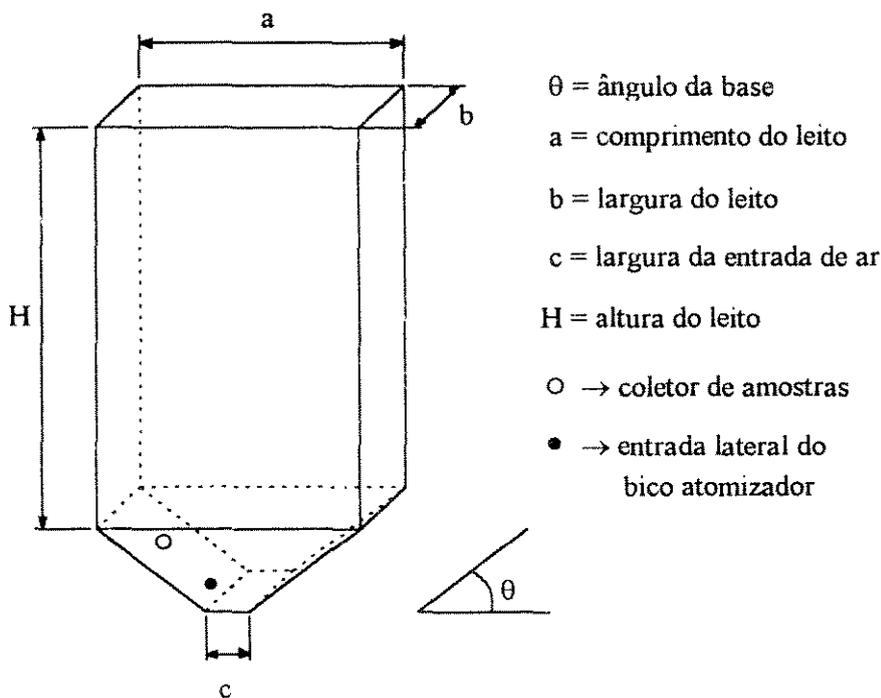


Figura 3.5- Desenho esquemático do leito bidimensional.

As dimensões na construção do leito seguiram as relações entre as dimensões indicadas por Kalwar et alii (1988), que recomendam um comprimento de entrada de ar igual a largura do leito, sendo que a largura de entrada de ar deve ficar compreendida no intervalo entre  $1/6$  a  $1/20$  do comprimento do leito. Com este tipo de geometria diminuí-se problemas de ampliação de escala e de capacidade de secagem encontradas nos leitos cone-cilíndrico. A relação entre as dimensões permite uma boa circulação dos sólidos.

O leito foi construído com chapas de acrílico (11 mm de espessura), com altura de 40 cm, comprimento de 32 cm e largura de 4 cm. Desta forma fica estabelecida uma relação de  $1/8$  de largura do leito com o comprimento do leito. Três opções para a largura  $c$ , na entrada de ar, eram disponíveis: 4, 6, e 8 cm.

A Figura 3.6, mostra as secções inclinadas do leito bidimensional utilizadas, construídas como módulos separados, podendo ser acopladas a secção retangular. Foram construídas três secções inclinadas, sendo suas áreas de base (  $4 \times 4$  ), (  $6 \times 4$  ) e (  $8 \times 4$  )  $\text{cm}^2$ . O ângulo de base de  $50^\circ$ , usado está de acordo com a literatura que estabelece uma faixa de 30 a 60 graus. O uso de diferentes secções inclinadas do leito possibilita variar a área da placa móvel de distribuição do ar de jorro, que por sua vez pode vibrar através do acoplamento com a haste de vibração. A espessura das placas é de 1,87cm e orifícios de 3,17 mm, distribuídos regularmente pelas mesmas, permitindo uma boa distribuição do ar na base do leito. As placas (  $4 \times 4$  ), (  $6 \times 4$  ) e (  $8 \times 4$  )  $\text{cm}^2$ , possuem 40,72 e 100 orifícios, respectivamente.

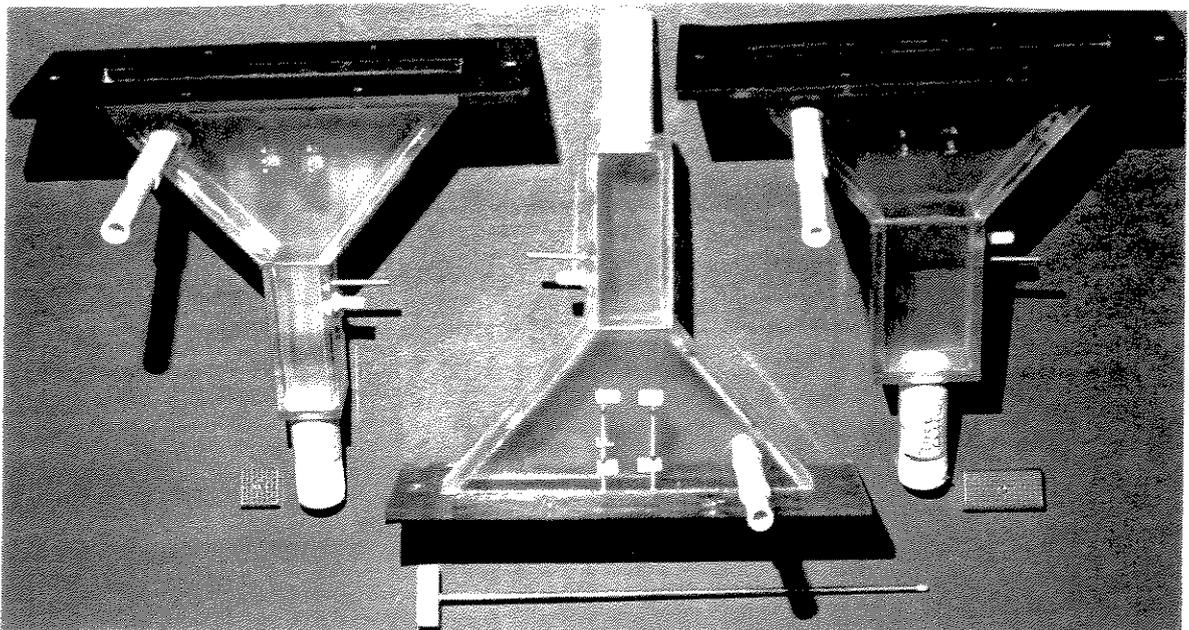


Figura 3.6 - Secção inclinada de áreas de base (  $4 \times 4$  ), (  $6 \times 4$  ) e (  $8 \times 4$  )  $\text{cm}^2$ , suas placas distribuidoras.

Ensaio preliminares (Souza e Kieckbusch, 1994) indicaram elevado grau de partículas em curto circuito se o sistema não usa uma partição central correspondendo ao *draft tube* dos leitos cônicos. Conforme as avaliações de Mann (1983) esse comportamento afeta negativamente a dispersão da distribuição de massa depositada (Função F, Secção 2.7) nas partículas em cada ciclo e preferiu-se então utilizar a partição central em todos os ensaios relatados neste trabalho. Ela consta de duas placas retangulares de acrílico (5mm de espessura), de mesma largura do leito, ou seja 4 cm e alturas de 12,7 cm, 12,2 cm e 11,2 cm, para as partes inclinadas de base (4x4), (6x4) e (8x4) cm<sup>2</sup>, respectivamente. A partição foi fixada no leito com parafusos de bronze, a uma distância de 5 cm em relação a sua base.

### 3.2.3- SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E CONTROLE DA VAZÃO DE AR

Um soprador da marca ELAM, modelo CRE-05 motor de 7,5 cv, foi utilizado com a finalidade de promover o jorro das partículas, fornecendo vazão máxima de 9 m<sup>3</sup>/min e pressão máxima de 4800 mmca.

O ar atmosférico é insuflado pelo soprador e o controle da vazão é obtido pelo posicionamento de uma válvula globo instalada na região de descarga do compressor. Também nessa região uma outra válvula globo possibilita uma descarga para o ambiente externo ao laboratório, de um possível excesso de ar insuflado pelo soprador, evitando um superaquecimento no mesmo.

Com a finalidade de se obter um maior controle da temperatura do ar de jorro, foi construído um sistema de arrefecimento desse ar, mostrado na Figura 3.7. O sistema é constituído por dois trocadores de calor do tipo colméia, (radiadores usados em automóveis da linha FIAT F-147), dispostos em série na secção retangular e separados entre si por uma distância de 30,0 cm. Esses trocadores foram colocados no interior de um duto feito com chapas de ferro de espessura de 2mm, de forma cúbica (largura de 54,0 cm, altura 47,0 cm e comprimento de 55,0 cm), com entrada e saída em forma piramidal para a tubulação. Um registro controla o fluxo de água que passa no interior dos trocadores, permitindo o controle de temperatura do ar na linha.

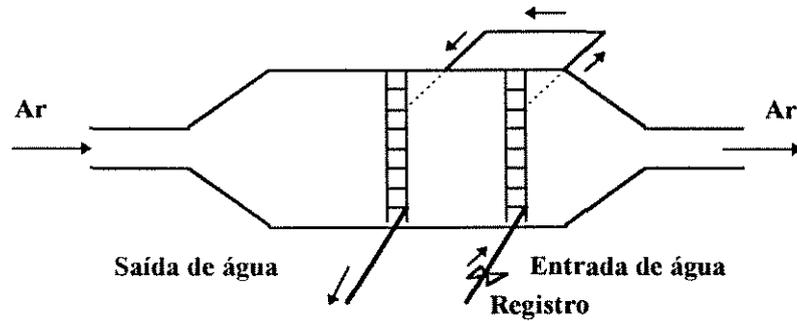


Figura 3.7- Esquema do sistema de arrefecimento do ar.

A medida da vazão do ar é obtida através de um rotâmetro da marca OMEL, localizado após o sistema de arrefecimento.

A seguinte equação representa a calibração do rotâmetro.

$$Q_m = 0,329013 + 0,058623.R^* \quad [3.16]$$

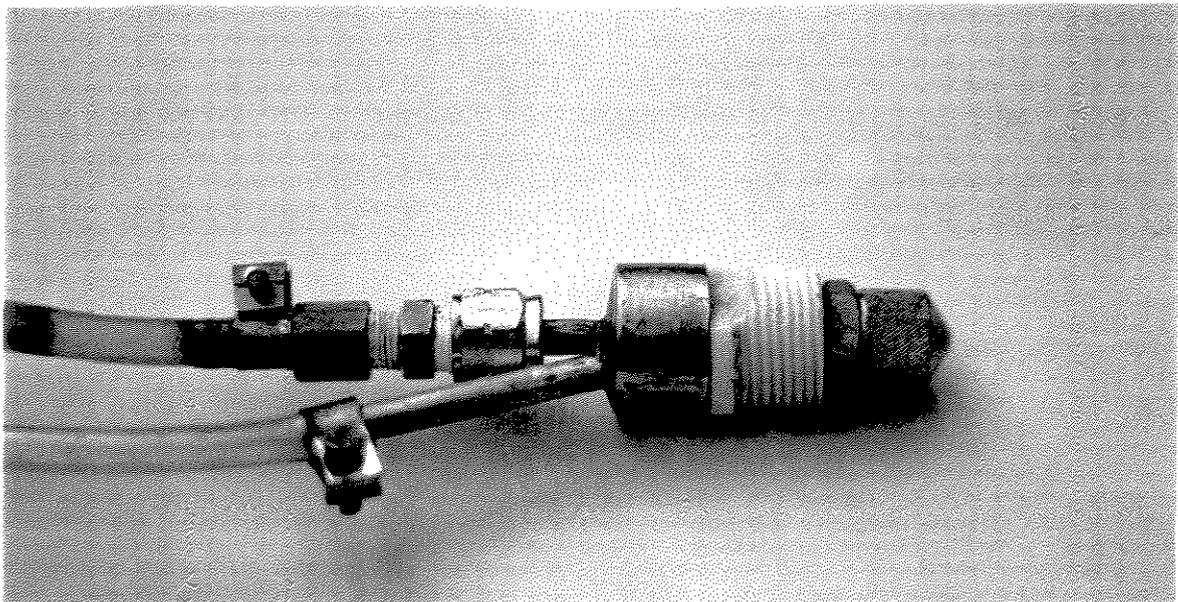
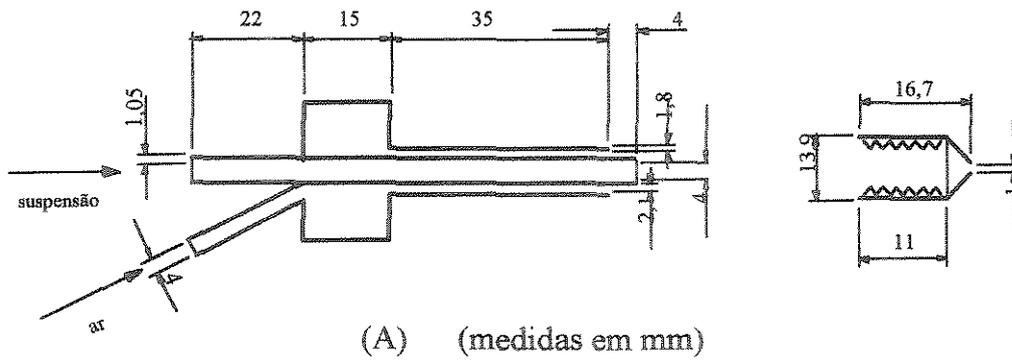
sendo  $Q_m$ , a vazão massica em kg/min e  $R^*$ , a leitura na escala do rotâmetro. Detalhes sobre a calibração do rotâmetro, estão disponíveis no Apêndice A.

### 3.2.4- SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DA SUSPENSÃO DE RECOBRIMENTO

A suspensão de recobrimento previamente elaborada conforme Secção 3.1.1, é mantida em um reservatório de dois litros de capacidade sob constante agitação, utilizando-se um agitador mecânico, marca FISATOM. O escoamento da suspensão é obtido por uma bomba peristáltica, marca COLE-PARMER INSTRUMENT COMPANY, modelo nº 7016-52 e vazão de até 80 ml/min. Ela alimenta um atomizador de duplo fluido a ar comprimido, com o corpo e o bocal construídos de aço inoxidável, similar ao utilizado por Oliveira (1992). A filtração, o controle da pressão e a leitura da vazão do ar de atomização a ser fornecido pela rede de ar comprimido, são feitos por um filtro coalescente da marca SCHRADER BELLOWS, série 3534-1000-F06, por uma válvula reguladora de pressão da marca SCHRADER BELLOWS, série 3564-2000S e um rotâmetro da OMEL previamente calibrado, respectivamente. O ar comprimido utilizado no atomizador é fornecido por um compressor com as seguintes especificações: potência do motor de 10 cv, deslocamento de 1,1 m<sup>3</sup>/min e

pressão máxima de  $12,3 \text{ kg/cm}^2$ . A vazão de ar comprimido e a pressão de ar de atomização foram mantidos em  $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $82,71 \text{ kPa}$ , respectivamente.

O acoplamento do atomizador ao leito, foi na parede inclinada, situado bem próximo a sua base, o que permitiu fácil acesso e ajuste, não interferindo no movimento dos comprimidos. Trabalhou-se com baixas vazões de suspensão de recobrimento (na faixa 4 a 6 ml/min) e também com vazões de ar de jorro próximas ao jorro mínimo. O sistema de alimentação de recobrimento pode ser visualizado na Figura 3.2. A Figura 3.8 ilustra o atomizador de duplo fluido.



(B)

Figura 3.8- Detalhes do atomizador pneumático.

### 3.2.5 - SISTEMA DE VIBRAÇÃO

O sistema de vibração é do tipo camo, com possibilidade de variação da frequência e amplitude de vibração. Detalhes do sistema de vibração são vistos na Figura 3.9. O equipamento gerador de vibração é o mesmo já utilizado por Finzer (1989).

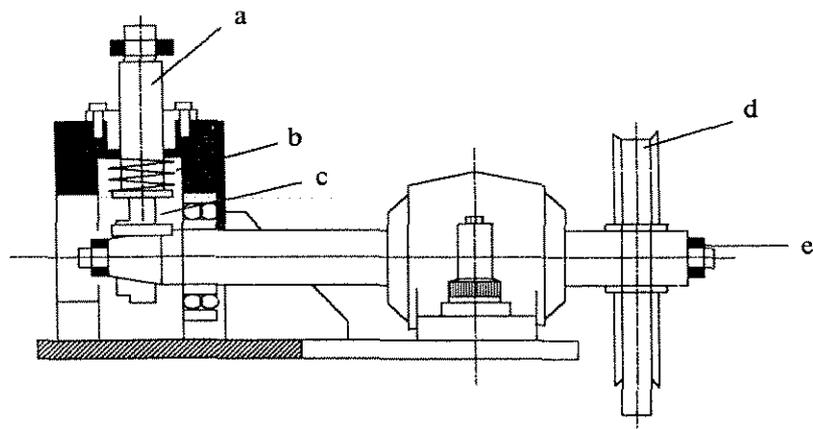


Figura 3.9 - Esquema do sistema de vibração: a - Seguidor da Haste de Vibração; b - Mola; c - Excêntrico; d - Polia e Correia; e - Motor Elétrico.

Por meio de uma correia, o camo é acoplado a um motor elétrico de corrente contínua marca PACIFIC SCIENTIFIC, potência de 1/3 cv, rotação 1800 rpm, e a velocidade de rotação é regulada por um variador eletrônico de velocidade da marca ASTEN & CIA LTDA- Série Beta.

A frequência do mecanismo de vibração é medida em Hertz, através de um freqüencímetro digital, marca ANALOG- Série F8 100A, conforme Figura 3.10.

Um dispositivo gerador de pulsos elétricos, foi construído e acoplado ao freqüencímetro por meio de um cabo elétrico como mostra a Figura 3.11. Quando o ímã contido no anel de nylon, acoplado no eixo do motor, passa próximo ao interruptor de lâminas (4), ocorre sua imantação, fazendo o contato entre as lâminas e proporcionando um sinal elétrico adequado através do divisor das resistências elétricas, (5) permitindo assim a leitura da frequência no medidor. O variador eletrônico possui um botão com escala de 0 a 10. Foram feitas medidas de frequência utilizando essa escala, apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Valores da frequência de acordo com a posição no variador eletrônico.

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f (Hz)	1,2	2,3	4,4	5,9	8,0	10,0	12,8	15,6	17,9	19,9

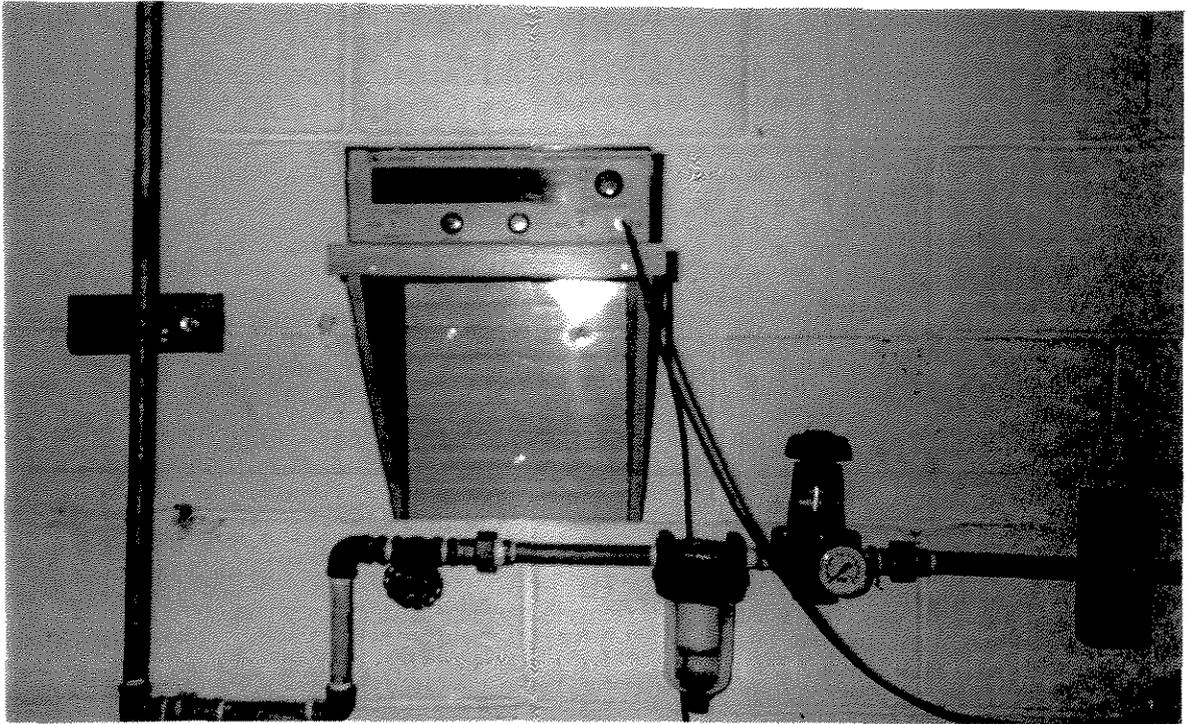


Figura 3.10- Freqüencímetro digital utilizado

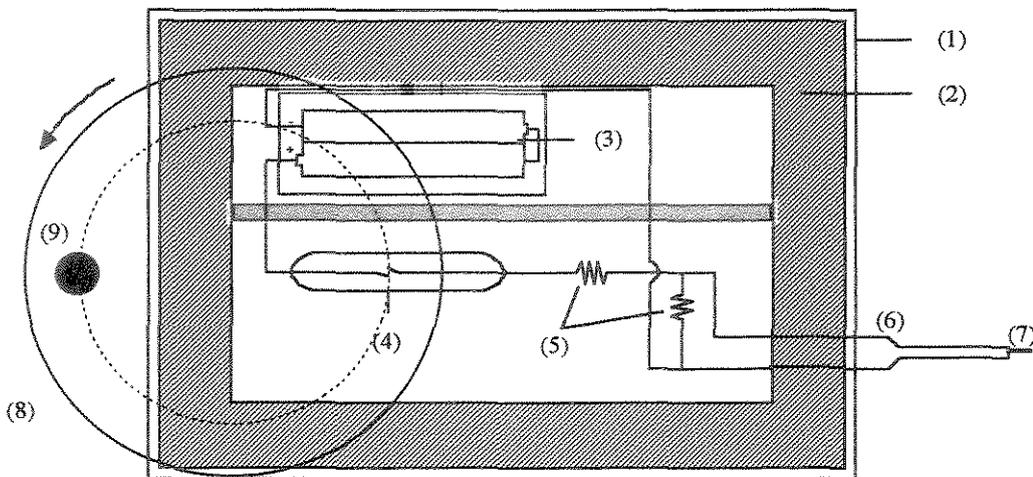


Figura 3.11 - Dispositivo gerador de pulsos elétricos: (1) Suporte de Alumínio; (2) Suporte de Nylon; (3) Pilhas; (4) Interruptor de Lâminas; (5) Resistências Elétricas; (6) Cabo; (7) Conector; (8) Anel de Nylon; (9) Imã.

### 3.2.6- DISPOSITIVO DE RETIRADA DE AMOSTRAS

As amostras foram retiradas em intervalos de tempos pré-estabelecidos através de um amostrador localizado na base cônica do leito como mostra a Figura 3.12, e já utilizado por Taranto (1992).

O amostrador é constituído de dois cilindros concêntricos de PVC, contendo uma abertura cada. O cilindro (1) fica fixo na parede do leito estendendo-se para fora e o cilindro (2), que contém a câmara de coleta das amostras (3), pode deslizar dentro do primeiro sem permitir vazamento de ar. No momento da amostragem, o cilindro (2) adentra ao leito com a abertura para cima para a coleta das amostras. Ao voltar gira-se o cilindro (2) até fazer coincidir as aberturas dos dois cilindros e o material coletado cai por gravidade e é recolhido.

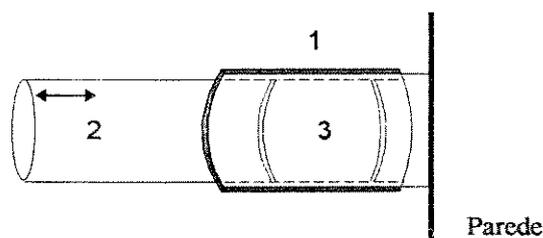


Figura 3.12- Coletor de amostras dos comprimidos: 1- Cilindro Fixo; 2- Cilindro Móvel; 3- Câmara de Coleta da Amostra, (Taranto, 1992).

### 3.2.7- MEDIDAS DE TEMPERATURA

As medidas das temperaturas do ar na saída do sistema de arrefecimento, abaixo da placa distribuidora e ligeiramente acima da região anular, foram feitas por meio de termopares do tipo K (Cromel-Alumel), e conectados a um indicador digital de temperatura, modelo T4WM- ROBERTSHAW.

### 3.2.8- MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE CICLO

Um dispositivo eletrônico foi construído para determinar experimentalmente as distribuições de tempo de ciclo nas diversas condições de operação de recobrimento, permitindo com isso uma melhor quantificação da circulação das partículas no leito vibro-jorrado bidimensional. A montagem é composta essencialmente de uma bobina, uma placa de

conversor analógico-digital, um módulo condicionador de sinais para interligação com a placa e o microcomputador e um programa de aquisição de dados.

A bobina localizada na parte superior do leito é, na realidade, uma extensão da partição central e induz uma força eletromotriz (fem) a cada passagem de uma partícula magnética. Esta fem é amplificada e aciona um regulador de tempo, que mede o tempo decorrido entre duas aparições consecutivas da partícula magnética. O sucesso desta técnica depende do disparo realizado pelo temporizador e das características da partícula magnética que passa pelo interior da bobina. A fem induzida na bobina é captada sob forma de pulso elétrico no detetor de partícula que será registrado pela placa de aquisição de dados contida no microcomputador.

A partícula magnética não deve diferenciar substancialmente em forma, tamanho e massa das outras partículas do sistema. O magneto utilizado nos experimentos possui massa de 0,4062 g, diâmetro de 0,7 cm e espessura de 0,23cm, e apresentou boa sensibilidade com a bobina detetora. A bobina foi enrolada em um formato quadrado com o lado interior da mesma dimensão da partição central, ou seja 4 cm, e o lado externo de 6 cm, sendo sua espessura de 1cm. Ela contém 22.000 espiras de fio de cobre número 38 e possui 42  $\mu$  mH de indutância, gerando um sinal elétrico em torno de 0,5mV. O fio foi enrolado de modo uniforme, tendo-se o cuidado de não ficar desalinhado e a cada camada foi passado verniz sobre o mesmo.

O detetor de sinais eletromagnéticos foi montado na Oficina Eletrônica da FEQ e, consiste basicamente em uma fonte, uma sonda (bobina), um pré-amplificador (CI1), um amplificador (CI2), 2 temporizadores (TI1 e TI2) e saídas de sinais TTL e sonoras conforme mostra a Figura 3.13.

O transformador da fonte foi colocado do lado externo da parede do aparelho detector, a fim de não induzir campos eletromagnéticos nos circuitos interno, e sua caixa utilizada como blindagem magnética.

Quando a chave (CH) da fonte é ligada, ocorre a transformação da voltagem de corrente alternada em corrente contínua de 5 V, e estabilizada por um estabilizador de tensão da fonte. Um osciloscópio comprovou que na saída de 5 V de corrente contínua não ocorre perturbação de campo.

O circuito de entrada formado por R1, C1, R2 e R3, tem por função gerar uma carga de entrada para a bobina e uma filtragem do sinal a fim de amortecer as oscilações secundárias, limitando o sinal de entrada, não permitindo que seja menor do que 0,7 Volts. O

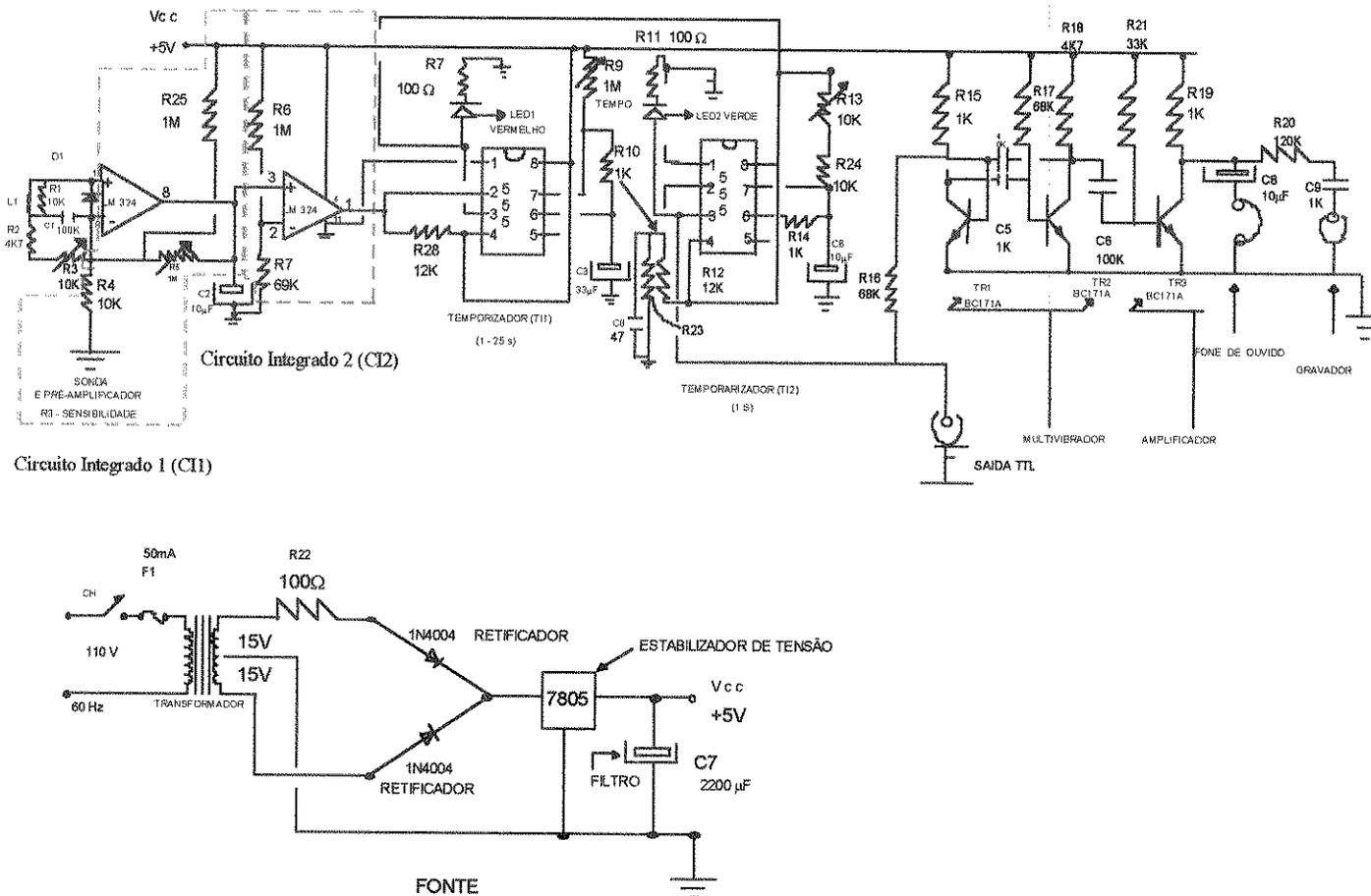


Figura 3.13: Esquema Elétrico do Detetor de Partículas Magnéticas.

circuito pré- amplificador é formado por um amplificador diferencial (circuito integrado CI1), em que o ganho é determinado pela relação  $R5/R4$  e o ponto ótimo de operação é polarizado por  $R25$ . Na saída do CI1, parte do sinal é armazenada por  $C2$  de forma a aumentar a duração do pulso o que ajuda a elevar a filtragem do sinal para as oscilações secundárias, cujo tempo é menor que o tempo de descarga do sinal. O  $R5$  é um potenciômetro que ajusta a variação de sensibilidade do pré-amplificador, de forma a só permitir a passagem do sinal de maior intensidade ignorando as oscilações secundárias que ocorrem na bobina. O  $R4$  ajusta o ponto ótimo do funcionamento do potenciômetro. No amplificador (circuito integrado CI2) o ponto de polarização é determinado por  $R6$  e  $R7$  cujo ganho tende para o infinito, ou seja é o máximo que este circuito integrado pode dar de forma a tornar o pulso em forma de onda quadrada, ou seja, o sinal agora é filtrado e conformado.

Este sinal filtrado que sai do CI2 entra no temporizador TI1 (pino 2), que tem a finalidade de detetar a frente de onda do primeiro pulso elétrico entregue por CI2. Quando isso ocorre, TI1 vai manter energizada a sua saída (pino 3), a qual alimenta o temporizador TI2 no seu pino 8. Nesse momento o TI2 liga o *led* verde pela sua saída (pino 3), e esse *led* desliga-se após 0,2 s. Esse intervalo de tempo pode ser regulado pelo  $R13$ , localizado no circuito interno do aparelho. Esta mesma saída de TI2 (pino 3), emite um pulso para a saída TTL que está acoplada à placa de aquisição de dados. Este pulso também pode ser usado para atuar em um sistema de saída sonoro.

Durante todos os experimentos possíveis os pulsos secundários gerados pela passagem da partícula magnética tanto na ascendente como na descendente (no caso de trajetória próxima a bobina), foram anulados pelo ajuste do potenciômetro ( $R9$ ) no painel, durante um intervalo de tempo de aproximadamente 1 segundo após cada sinal. Nesta situação o *led* vermelho do painel fica ligado.

Um microcomputador dotado de uma placa de conversor analógico-digital, ligada a um módulo condicionador de sinais que está conectado no detetor de sinais eletromagnéticos, processa com auxílio de um programa de aquisição de dados (Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda - São Paulo), os sinais eletromagnéticos em tempos de ciclo.

### 3.3- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo do desenvolvimento experimental foi estudar a fluidodinâmica do leito vibro-jorrado bidimensional, sem recobrimento, com partição, sem e com vibração; estudar a distribuição do tempo de residência dos comprimidos em um ciclo, sem e com vibração e estudar a cinética de crescimento de comprimidos, sem e com vibração.

#### 3.3.1- ENSAIOS DE FLUIDODINÂMICA DO LEITO BIDIMENSIONAL

A queda de pressão foi obtida através de um manômetro diferencial acoplado à base do leito e aberto à atmosfera. A vazão de ar que passa pelo leito, foi medida pelo rotâmetro calibrado, e os valores da vazão foram obtidas pela equação [3.16]. De posse da vazão obtinha-se a velocidade do gás na placa distribuidora.

Inicialmente introduzia-se no leito uma carga de comprimidos com massa conhecida. A vazão era aumentada gradativamente com a abertura da válvula situada na linha do sistema, observava-se os valores lidos no rotâmetro, a queda de pressão no leito e a temperatura do ar na saída. No início do ensaio o leito mantinha-se estático, mas à medida que a vazão aumentava começava a formação de uma cavidade junto a placa distribuidora. Aumentando-se mais a vazão, essa cavidade ia crescendo até chegar um ponto no qual ela desfazia-se, formando um jorro interno. Nesse momento ocorria queda de pressão máxima no leito. Com o aumento da vazão, esse jorro interno vai aumentando até romper, com a formação da fonte de jorro. A partir dessa situação observava-se que a queda de pressão praticamente não variava, ocorrendo assim a formação do jorro estável. Em seguida fazia-se o ensaio decrescente, ou seja, diminuía-se a vazão até ocorrer o colapso do jorro e chegar a vazão nula. O procedimento foi repetido para diferentes condições experimentais. Foram também levantados dados de queda de pressão no leito em função da vazão de ar para os leitos vazios, e os valores usados para corrigir curvas obtidas para os leitos com comprimidos. Nesta etapa foram realizados 54 ensaios experimentais, sendo 27 sem vibração e 27 com vibração, todas elas com partição central no leito.

### 3.3.2- ENSAIOS DE DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE CICLO

Os ensaios sem e com vibração no LVJ-BD, foram realizados para avaliar a distribuição de tempo de residência, utilizando os comprimidos C1, C2 e C3. No total foram 54 ensaios experimentais sendo 9 sem vibração e 9 em condições equivalentes, mas com vibração, para cada um dos comprimidos.

A técnica de uma partícula magnética descrita na Seção 3.2.8 foi usada. Estabelecia-se as condições de leito estável e ajustava-se o detetor de partículas, bem como o microcomputador. Os tempos eram selecionados em intervalos de 0,1 s, e registrava-se o número de pulsos correspondentes a cada intervalo e o total de pulsos. Foi estabelecido um tempo total de 25 minutos para todos os ensaios experimentais.

### 3.3.3- ENSAIOS DE RECOBRIMENTO

Os ensaios de recobrimento foram realizados na seguinte seqüência: A suspensão de recobrimento era colocada num reservatório de capacidade de 2 litros sob agitação constante e temperatura controlada de 50 °C; determinava-se a massa de comprimidos que eram introduzidos no leito; dava-se partida ao soprador e ajustava-se a vazão necessária, bem como a vazão de ar comprimido enviada ao bico atomizador; com a temperatura constante no leito iniciava-se a alimentação da suspensão de recobrimento com a vazão controlada pela bomba peristáltica. Retirava-se amostras de comprimidos durante o processo de recobrimento em tempos pré-estabelecidos de 0; 3 e 6 minutos. A partir desse último tempo, a coleta fazia-se em intervalos de 6 minutos. As amostras eram levadas para secar em estufa a 75 °C, até massa constante e determinava-se a massa novamente.

Foram realizadas 18 ensaios experimentais dispostas conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3.6- Número dos ensaios experimentais no processo de recobrimento.

Comprimido	Placa (4x4) cm <sup>2</sup>		Placa (6x4) cm <sup>2</sup>		Placa (8x4) cm <sup>2</sup>	
	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V
C1	1	2	7	8	13	14
C2	3	4	9	10	15	16
C3	5	6	11	12	17	18

A Figura 3.14 apresenta fotografia onde o ar de atomização está funcionando e mostra que a vazão desse ar não interfere na fluidodinâmica do leito.

A Figura 3.15 apresenta fotografia em que não há vazão de ar no bico atomizador. Observa-se pelas Figuras 3.14 e 3.15 que a região próxima ao bico são semelhantes e que os comprimidos neste local apresentam-se numa condição menos compacta do que em relação ao restante do leito.

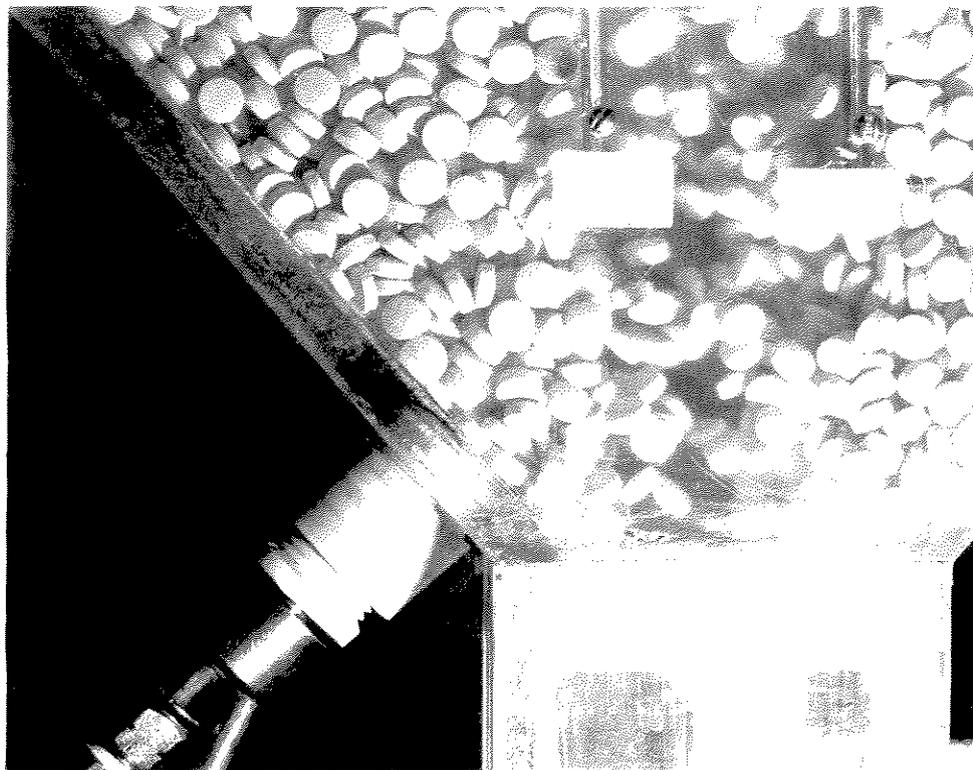


Figura 3.14 - Bico atomizador em pleno funcionamento. Comprimido C2.

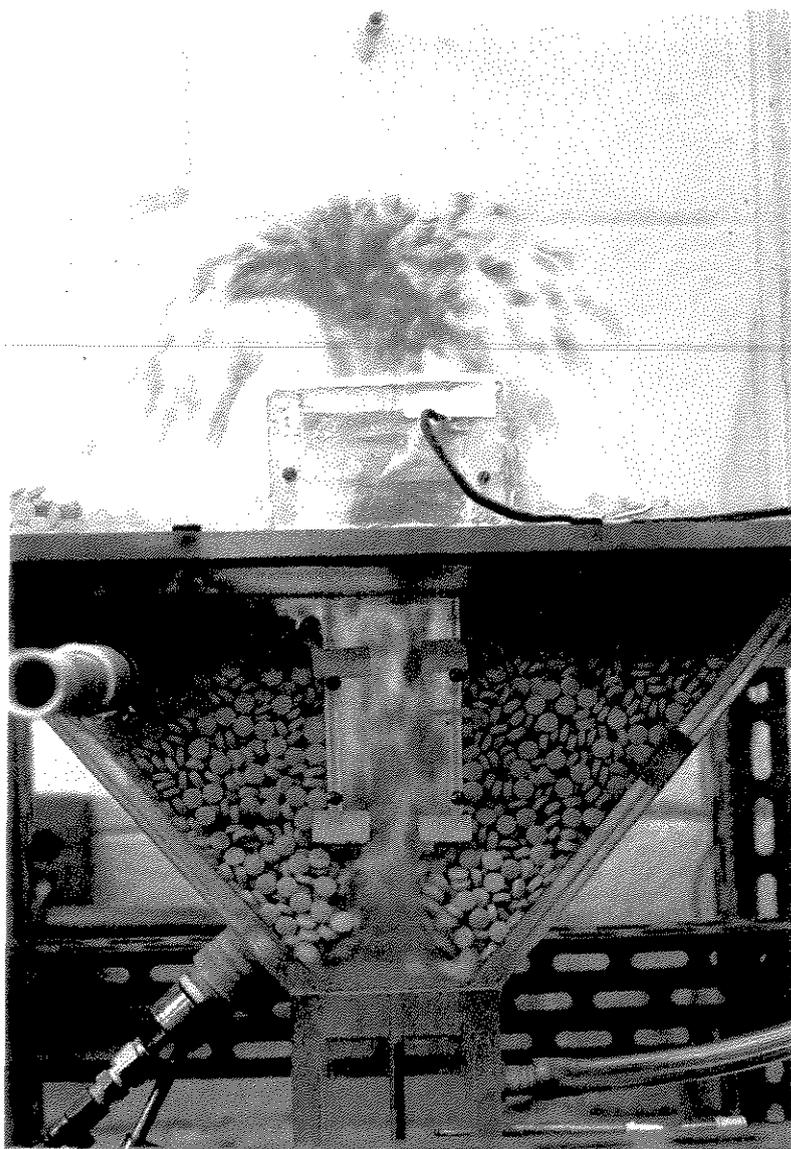


Figura 3.15 - Bico atomizador em pleno funcionamento. Comprimido C2.

## **Capítulo 4**

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 - OBSERVAÇÕES GERAIS

O vaso de secagem bidimensional com sua placa distribuidora (4x4) cm<sup>2</sup> conectada ao sistema de vibração (amplitude 5 mm) e a linha do ar ligando-o ao soprador foram os primeiros elementos a compor a instalação, e que, ao serem testados mostraram um desempenho plenamente satisfatório. Um jorro estável e simétrico foi obtido, confirmando que quando as partículas são grosseiras o sistema de distribuição de ar na base do leito com um número menor de orifícios de diâmetro apreciável tem desempenho superior ao distribuidor tipo vidro-sinterizado ou o que usa peneiras de malha fina (Tannous, 1993).

O sistema recebeu então o instrumental de medidas: rotâmetro, termopares, freqüencímetro e o manômetro em U. Quando o bico atomizador foi instalado, percebeu-se a necessidade de padronizar as condições do ar de atomização por meio de uma válvula reguladora de pressão e filtro coalescente.

O resultado mais surpreendente com relação as expectativas, entretanto, também se consolidou logo nos primeiros ensaios: o comportamento do leito vibrado se desenhou como o de um jorro convencional típico, com a região central em fase bem diluída. Mesmo aumentando a amplitude de vibração para 8mm, e duplicando a área da base que vibrava, não foi possível repetir, ou mesmo se aproximar do comportamento descrito por Finzer (1989), que obteve um jorro composto por uma fase densa de partículas, e uma taxa de circulação máxima quando a velocidade do ar era nula (veja Figura 2.19). No equipamento bidimensional ensaiado no presente trabalho a taxa de circulação dos comprimidos era nula quando a vazão do ar era interrompida. Na realidade Finzer (1989) não trabalhou com um leito de jorro com dimensões convencionais. A base do seu leito era grande em relação à secção do mesmo e havia maior área anular para levar as partículas ao fundo do que em um leito bidimensional. É possível que em um leito de jorro cilíndrico de base cônica, o efeito de vibração se intensifique.

Ao se iniciar os ensaios de recobrimento foi necessário instalar o sistema de arrefecimento do ar, pois este ao sair do soprador atingia temperaturas superiores a 90 °C, e trabalhar a esses níveis era inadequado sob o ponto de vista de um processo farmacêutico industrial. Além disso, o ar a alta temperatura chegou a trincar o vidro do rotâmetro, que teve de ser substituído.

Um outro ponto que causava certa apreensão dizia respeito ao funcionamento do bico atomizador, pois ao contrário dos outros trabalhos desenvolvidos na FEQ/UNICAMP, ele foi colocado na região concentrada e descendente do leito, o mais próximo possível a sua base. Desde o primeiro ensaio, entretanto, ficou demonstrado que seu comportamento era perfeito, não havendo interferência do bico sobre a movimentação do leito, e vice-versa. Procurou-se uma vazão adequada de líquido para um funcionamento estável do sistema que foi mantido em quase todos os ensaios (ver Secção 3.2.4).

O último dispositivo a fazer parte da instalação foi o sistema de aquisição de dados para levantar a distribuição do tempo de ciclo.

Até a concepção final do sistema experimental de recobrimento foram dispendidos oito meses em testes.

## 4.2 - FLUIDODINÂMICA DO LEITO VIBRO-JORRADO BIDIMENSIONAL

### 4.2.1 - PERDAS DE CARGA DO EQUIPAMENTO SEM PARTÍCULAS

Os valores de queda de pressão no leito *versus* vazão de ar obtidos no leito vazio são mostradas nas Figuras 4.1, para as placas distribuidoras (4x4), (6x4) e (8x4) cm<sup>2</sup>. A principal contribuição para essa perda estava localizada na placa distribuidora do fluxo de ar, na base do leito e a perda de pressão decresce à medida que o número de orifícios aumenta. Essa contribuição do leito vazio foi descontada na construção das curvas de perda de pressão para os leitos com carga.

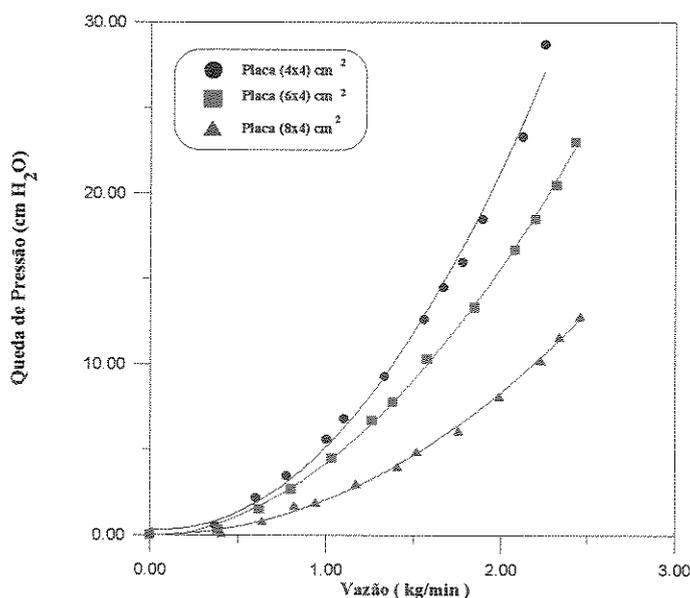


Figura 4.1- Curvas de queda de pressão em função da vazão do ar no leito vazio para as placas distribuidoras (4x4), (6x4) e (8x4) cm<sup>2</sup>, sem vibração.

## 4.2.2 - PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

Foram levantados os parâmetros de importância para o projeto do leito de jorro bidimensional ou seja, altura do leito ( $H_o$ ), queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ), vazão de jorro mínimo ( $Q_{jm}$ ) e sua correspondente velocidade de jorro mínimo ( $v_{jm}$ ). O conhecimento da altura do leito irá assegurar uma circulação adequada de partículas no leito, a queda de pressão máxima é a resistência a ser vencida pelo soprador, enquanto que a determinação da vazão de jorro mínimo, feita através de observação visual, fornece o valor da menor vazão que pode ser utilizada no ensaio, que permite que todas as partículas circulem no leito. Nos ensaios para levantamento de dados de recobrimento, partiu-se do leito com jorro estável, ou seja, com vazão acima da vazão de jorro mínimo, a fim de garantir uma maior circulação e uniformidade. Os resultados encontrados para cada situação experimental são mostrados na Tabela 4.1. Nos ensaios com vibração, a frequência foi de 10 Hz e a amplitude de 8mm, conforme será definido na Secção 4.3.2.

Para todos os ensaios sem vibração e com vibração, as curvas apresentaram o comportamento típico de um leito de jorro, (Mathur e Epstein, 1974). As Figuras 4.2 a 4.7, apresentam exemplos típicos de algumas das curvas obtidas experimentalmente. Os resultados de velocidade do gás na secção retangular ( $v_g$ ), de queda de pressão  $\Delta P_C$  (crescente), e  $\Delta P_D$  (decrecente), para cada ensaio realizado estão dispostos em tabelas no Apêndice B. Em todos os ensaios observou-se um comportamento semelhante: com o aumento da vazão de gás na linha, a queda de pressão no leito também aumenta até um valor máximo, e após esse valor, um pequeno aumento da vazão acarreta a diminuição brusca da queda de pressão até um nível relativamente baixo, a partir do qual permanecia praticamente constante.

Nos ensaios sem vibração, com o jorro estabelecido, observava-se que os comprimidos exibiam um certo grau de dificuldade para locomoverem-se próximo às paredes inclinadas do leito. Com a vibração, isto não ocorria, havendo uma circulação constante e homogênea em todo o leito.

A Tabela 4.1 mostra que a queda de pressão máxima aumenta com o aumento da altura do leito, e que a vibração auxilia na diminuição da queda de pressão comparando-se leitos de mesma altura. Os valores de  $v_{jm}$  com vibração são menores em cerca de 10% do que os valores sem vibração, enquanto que os dados de  $\Delta P_{max}$  com vibração são menores em cerca de 40% em média em relação aos dados sem vibração. Esta tendência geral também é relatada nos trabalhos em leitos vibro-fluidizados, segundo Erdész (1990) e Pakowski et alii (1984).

Tabela 4.1 -  $\Delta P_{max}$ ,  $Q_{jm}$  e  $v_{jm}$ , para os comprimidos C1, C2 e C3 em ensaios sem vibração (S/V) e com vibração (C/V) na frequência 10 Hz e amplitude de 8mm.

Placa	(4x4) cm <sup>2</sup>						(6x4) cm <sup>2</sup>						(8x4) cm <sup>2</sup>					
	S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
	$\Delta P_{max}$ kPa	$Q_{jm}$ $\frac{m^3}{min}$	$v_{jm}$ m/s															
C1 0,8	1,34	0,80	1,03	0,94	0,75	0,97	1,18	0,93	1,21	0,88	0,83	1,08	1,14	1,17	1,52	0,70	1,06	1,38
	Ho =14,0 cm						Ho =12,5 cm						Ho =12,0 cm					
C1 1,1	1,96	0,90	1,18	1,25	0,80	1,03	1,78	1,04	1,35	0,98	0,93	1,21	1,69	1,27	1,66	0,86	1,17	1,52
	Ho =16,4 cm						Ho =15,3 cm						Ho =14,3 cm					
C1 1,3	3,48	1,11	1,44	1,80	0,90	1,18	2,88	1,15	1,48	1,25	1,04	1,35	2,31	1,38	1,79	1,03	1,27	1,66
	Ho =18,6 cm						Ho =17,1 cm						Ho =16,8 cm					
C2 0,8	1,60	0,90	1,18	0,96	0,80	1,03	1,32	1,04	1,35	0,93	0,93	1,21	1,25	1,27	1,66	0,72	1,06	1,38
	Ho =15,2 cm						Ho =14,0 cm						Ho =13,2 cm					
C2 1,1	2,43	1,11	1,44	1,50	0,90	1,18	2,21	1,36	1,77	1,27	1,25	1,63	2,13	1,38	1,79	0,89	1,17	1,52
	Ho =18,2 cm						Ho =15,8 cm						Ho =14,8 cm					
C2 1,3	3,80	1,41	1,84	2,50	1,31	1,71	3,22	1,46	1,86	1,97	1,36	1,77	2,90	1,49	1,93	1,31	1,38	1,79
	Ho =19,0 cm						Ho =17,8 cm						Ho =17,1 cm					
C3 0,8	1,69	1,11	1,44	1,10	1,00	1,29	1,58	1,15	1,48	1,08	1,04	1,35	1,47	1,38	1,79	0,77	1,27	1,66
	Ho =15,7 cm						Ho =14,4 cm						Ho =13,8 cm					
C3 1,1	2,66	1,31	1,71	1,93	1,21	1,57	2,60	1,36	1,77	1,34	1,15	1,48	2,63	1,49	1,93	0,98	1,38	1,79
	Ho =18,4 cm						Ho =16,9 cm						Ho =16,1 cm					
C3 1,3	3,95	1,41	1,84	2,27	1,31	1,71	3,45	1,57	2,05	2,01	1,36	1,77	2,96	1,59	2,07	1,39	1,49	1,93
	Ho =20,9 cm						Ho =18,6 cm						Ho =18,2 cm					

Avaliando-se a percentagem de variação da velocidade mínima de jorro devido a vibração, não se constata nenhuma tendência específica devido ao tamanho e a carga de comprimidos, e nem mesmo devido a variação na área da base.

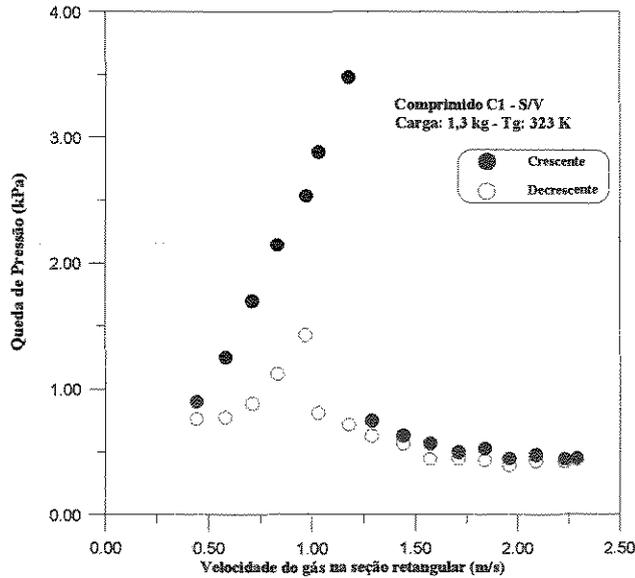


Figura 4.2- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 18,6$  cm, placa (4x4)  $\text{cm}^2$ . Sem vibração.

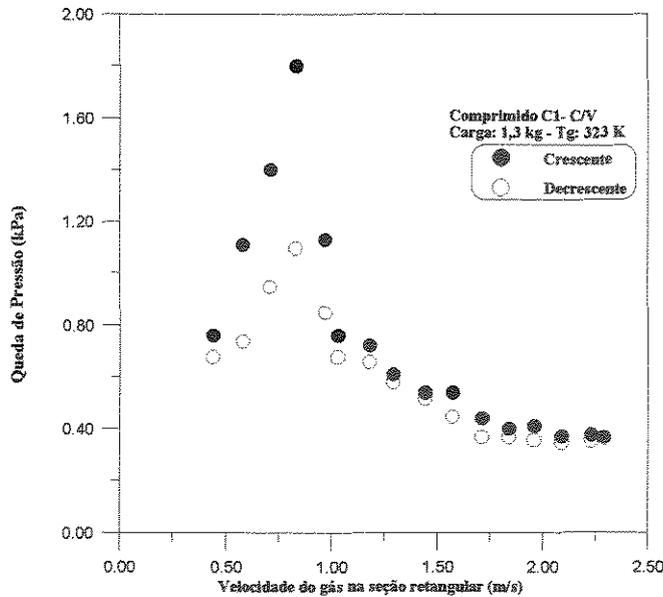


Figura 4.3- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 18,6$  cm, placa (4x4)  $\text{cm}^2$ . Vibração de frequência 10 Hz e amplitude de 8mm.

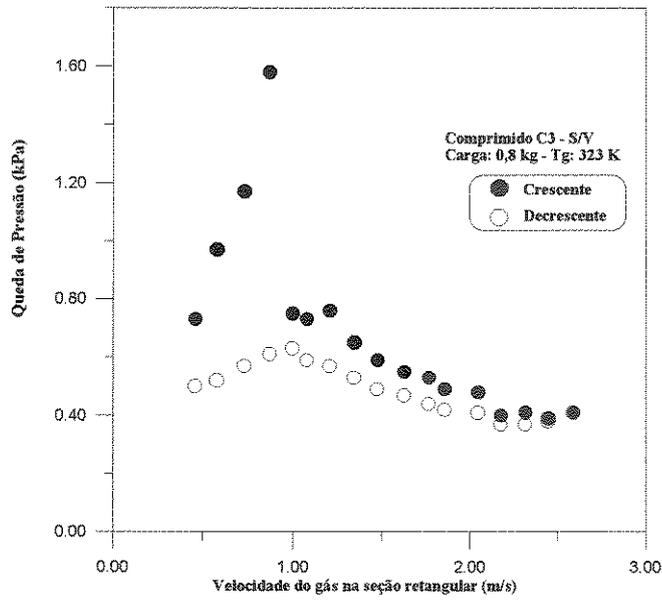


Figura 4.4- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 14,4$  cm, placa (6x4)  $cm^2$ . Sem vibração.

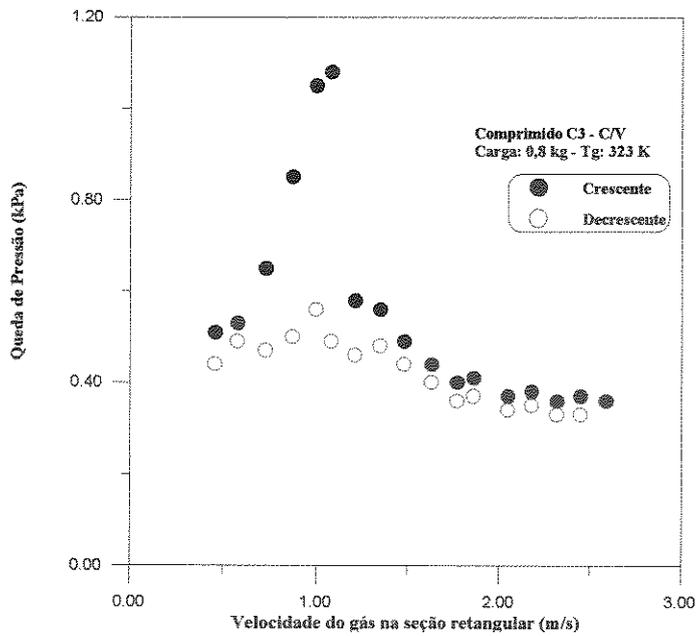


Figura 4.5- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 14,4$  cm, placa (6x4)  $cm^2$ . Vibração de frequência 10 Hz e amplitude 8 mm.

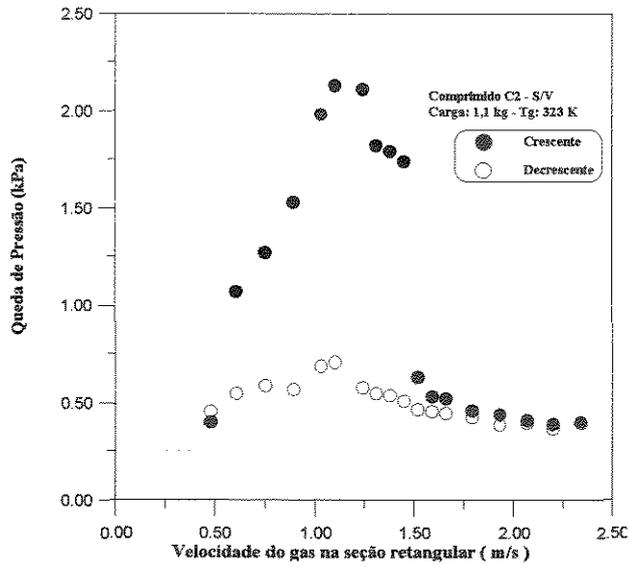


Figura 4.6- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 14,8$  cm, placa (8x4)  $\text{cm}^2$ . Sem vibração.

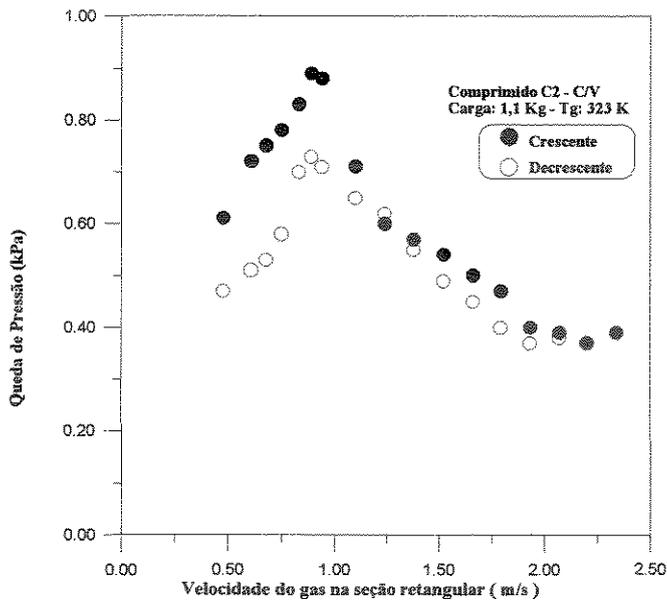


Figura 4.7- Queda de pressão em função da velocidade do gás,  $H_0 = 14,8$  cm, placa (8x4)  $\text{cm}^2$ . Vibração de frequência 10 Hz e amplitude 8mm.

### 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE CICLO

#### 4.3.1 - INTRODUÇÃO

Para caracterizar quantitativamente a circulação dos comprimidos C1, C2 e C3 no leito vibro-jorrado bidimensional, sem e com vibração, determinou-se experimentalmente a distribuição de tempo de ciclo, monitorando o movimento de uma partícula magnética, conforme descrito na Seção 3.2.8. Um programa computacional foi elaborado (listado no Apêndice C), para determinar a estatística dos pulsos, ou seja, classificar o número de vezes que o magneto passa em intervalos de tempo de 0,1 s. Uma análise estatística aplicada a esses valores, determinou o tempo médio no intervalo  $i$ , em intervalos de 1s e sua respectiva fração de ocorrência (será chamada de ocorrência), que relaciona o número de pulsos no intervalo pelo número total de pulsos. Esses dados foram ajustados utilizando o Método Spline Modificado, segundo Nunhez (1990) e Nunhez et alii (1993). É uma técnica que leva em conta os erros experimentais tanto da variável dependente (percentagem de ocorrência), como da variável independente (tempo médio no intervalo  $i$ ), por acoplar o Método da Máxima Verossimilhança ao Método Spline. Alguns pontos experimentais tiveram o desvio padrão da variável dependente modificado, para compensar desvios da determinação experimental. Detalhes sobre esse método estão disponíveis no Apêndice D.

Uma das preocupações básicas com o uso do traçador imantado, era atestar que o imã tinha o mesmo comportamento fluidodinâmico de um comprimido. Já nos ensaios iniciais observou-se, visualmente, que ele acompanhava as partículas circunvizinhas no seu movimento descendente, e que após sua rápida subida pela partição central, ele se distribuía aleatoriamente para qualquer um dos lados do vaso, atingindo distâncias variáveis do centro.

Para mensurar este comportamento foram realizadas medidas de distribuição do tempo de ciclo usando o comprimido C2, para uma mesma carga de 1,1 kg e vazão de ar de 1,67 m<sup>3</sup>/min. Essa situação representa condições médias de todos os ensaios. Utilizou-se o imã e um comprimido colorido com medidas simultâneas. A distribuição do tempo de ciclo do imã foi obtida através do sistema de aquisição de dados enquanto que o comportamento da partícula colorida foi monitorado por 2 observadores, após certo treinamento.

O tempo médio de um ciclo de comprimidos,  $t_m$ , foi determinado para intervalos de tempo de amostragem ou pulsos, da seguinte forma:

$$t_m = \sum_{i=0}^N t_i c_i \quad [4.1]$$

onde:  $t_i$  é o tempo médio no intervalo  $i$ ,  $N$  é o número de intervalos de amostragem e  $c_i$  é a probabilidade de ocorrência.

As curvas de distribuição obtidas estão apresentadas na Figura 4.8 (Sem vibração) e Figura 4.9 (Com vibração). A primeira impressão é de que não existe boa concordância entre as distribuições do imã e do comprimido colorido. Uma análise mais atenta, com ajuda dos valores da Tabela 4.2, entretanto, indica que os desvios são pequenos. Em termos de tempo médio, a diferença é de 1,68% (sem vibração) e 1,98% (com vibração) apenas.

Mais importante é que essa diferença é positiva para a operação com vibração e

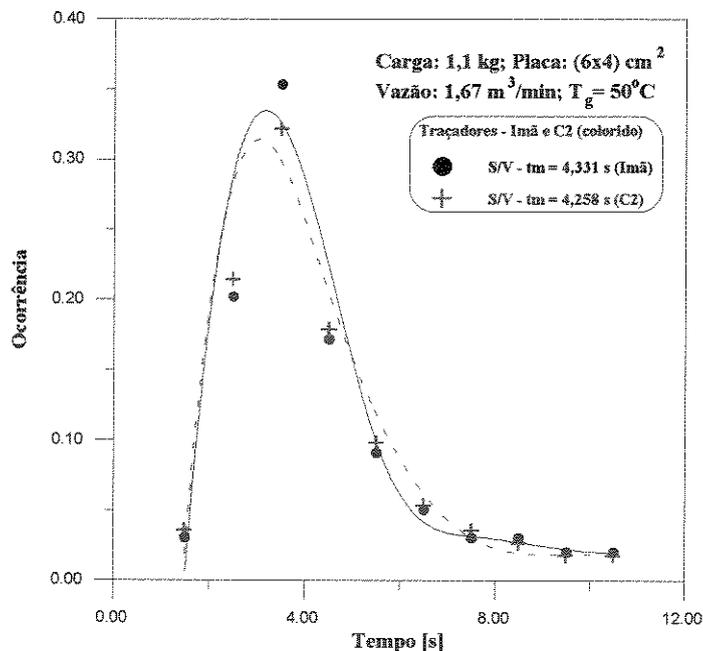


Figura 4.8 - Distribuição de tempo de ciclo *versus* fração de ocorrência para os traçadores C2 colorido e o imã, na placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup>, (S/V).

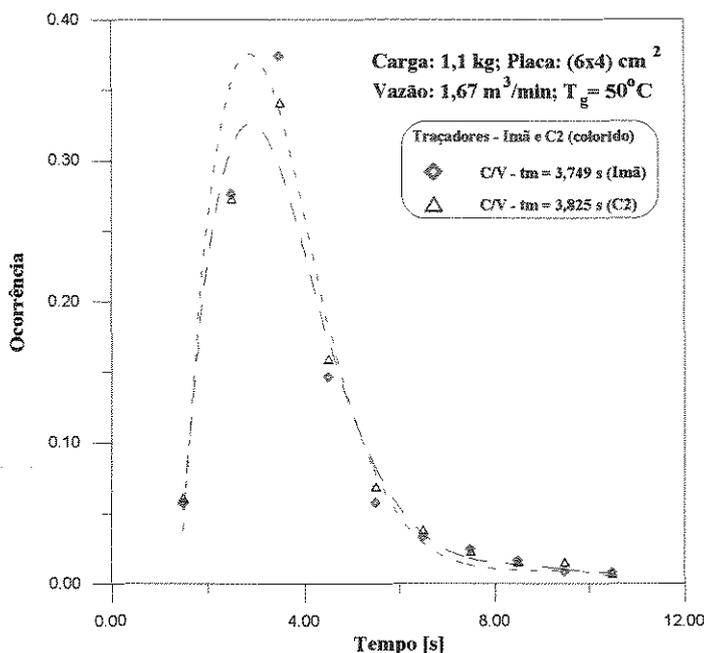


Figura 4.9- Distribuição de tempo de ciclo *versus* fração de ocorrência para os traçadores C2 colorido e o imã, na placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup>, (C/V).

negativa no caso em que não há vibração, indicativo que não existe um erro sistemático, consequência, por exemplo, do imã ter maior massa e menor volume e área do que o comprimido. A Tabela 4.2, apresenta os dados dos ensaios das Figuras 4.8 e 4.9.

Tabela 4.2- Tempo de ciclo *versus* fração de ocorrência para os traçadores C2 colorido e imã das Figuras 4.8 e 4.9. Carga: 1,1 kg; Placa distribuidora: (6x4)cm<sup>2</sup>; Vazão de ar: 1,67 m<sup>3</sup>/min; T<sub>g</sub>: 50°C.

Tempo (s)	Traçador: C2 (colorido)		Traçador: Imã	
	S/V	C/V	S/V	C/V
	Nº de pulsos:112	Nº de pulsos:132	Nº de pulsos:99	Nº de pulsos:123
	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência
1,5	0,036	0,061	0,030	0,057
2,5	0,214	0,273	0,202	0,276
3,5	0,321	0,341	0,354	0,374
4,5	0,179	0,159	0,172	0,146
5,5	0,098	0,068	0,091	0,057
6,5	0,054	0,038	0,051	0,033
7,5	0,036	0,023	0,030	0,024
8,5	0,027	0,015	0,030	0,016
9,5	0,018	0,015	0,020	0,008
10,5	0,018	0,007	0,020	0,008

Os valores numéricos da Tabela 4.2 são indicativos do grau de dificuldade em se fazer o levantamento manual. As diferenças encontradas no intervalo correspondente a mediana (tempo = 3,5 s), por exemplo, é de uma ocorrência apenas. Esse desvio pode ser perfeitamente imputado a falha humana, e é provável, portanto, que as pequenas diferenças encontradas são devido a limitações nos reflexos dos operadores e não a um comportamento diferenciado do imã.

#### **4.3.2 - EFEITO DA AMPLITUDE E DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO NO TEMPO MÉDIO DE CICLO DOS COMPRIMIDOS**

Com a finalidade de definir uma amplitude e uma frequência de trabalho para o levantamento de dados, foram realizados ensaios com carga de 1,2 kg de comprimidos C2, placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup> e vazão de ar de 1,70 m<sup>3</sup>/min medindo-se a distribuição do tempo de ciclo.

Foram utilizados excêntricos de 10 e 16 mm, que correspondem a metade das amplitudes de vibração de operação, ou seja, 5 e 8 mm, respectivamente.

O levantamento realizado está apresentado nas Figuras 4.10 e 4.11 e os parâmetros médios compilados na Tabela 4.3. Para cada uma das amplitudes de vibração foram feitos ensaios com a frequência variando de zero (S/V) até 12 Hz. Esse valor limite foi imposto por condições de ressonância e sua operação já causava grandes dificuldades e apreensões devido ao nível de ruído.

Os resultados indicam uma tendência em diminuir o tempo médio de ciclo assim como a dispersão dos pontos em torno da mediana à medida que a frequência aumenta. A situação mais favorável entre as estudadas corresponde a de maior frequência de vibração. Preferiu-se fixar uma frequência de trabalho de 10 Hz, como um ponto de equilíbrio entre uma boa circulação e um afastamento seguro das condições de ressonância. Esse mesmo problema foi mencionado por Finzer (1989), que, entretanto, encontrou uma variação periódica do tempo de ciclo com a frequência ( veja Figuras 2.14 e 2.15). É possível que frequências de vibração acima de 12 Hz tornem a diminuir o tempo médio de ciclo, mas elas não foram ensaiadas, como precaução pela integridade do equipamento.

Os tempos médios de ciclo para A= 5 mm são sensivelmente maiores que os valores para A= 8mm quando comparado na mesma frequência de vibração, conforme a Tabela 4.3. Essa diferença aumenta à medida que a frequência aumenta. Considerando que a frequência

está limitada pelas condições de ressonância, seria adequado usar a maior amplitude possível. Na presente pesquisa, devido a limitação na câmara do excêntrico, a amplitude utilizada foi a de 8mm. Isto indica que para uma maior movimentação das partículas no leito, o efeito da amplitude é mais importante que a frequência de vibração. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.4 e dispostos na Figura 4.10 para amplitude de 5 mm e na Figura 4.11 para amplitude de 8 mm, obtendo-se o mesmo formato. Observa-se na Tabela 4.4 que a intensidade de vibração,  $\Gamma$ , calculado pela equação [2.13] aumenta quando aumenta a frequência e a amplitude de vibração, o que condiz com o estudo de vários pesquisadores que observaram que a transferência de calor e massa ocorre com maior intensidade em um leito com vibração, com maiores frequências e amplitudes de vibração.

Tabela 4.3 - Valores de tempos médios de ciclo,  $t_m$ , e seus desvios relativos, D.R., em relação ao tempo médio sem vibração, para amplitudes de 5 mm e 8 mm.

<b>f (Hz)</b>	0,0		5,0		7,5		10,0		12,0	
<b>A (mm)</b>	5,0	8,0	5,0	8,0	5,0	8,0	5,0	8,0	5,0	8,0
<b><math>t_m</math> (s)</b>	5,344	5,344	5,211	5,126	5,027	4,894	4,998	4,763	4,827	4,536
<b>D.R.(%)</b>	0,00	0,00	2,48	4,08	5,93	8,42	6,47	10,87	9,67	15,12

Tabela 4.4 - Efeito da frequência (0,0; 5,0; 7,5; 10,0 e 12,0 Hz) e da amplitude de vibração (A=5 mm e 8 mm), sobre o tempo médio de ciclo, comprimido C2, carga: 1,2 kg, placa distribuidora: (6x4) cm<sup>2</sup>, vazão de ar: 1,70 m<sup>3</sup>/min e T<sub>g</sub>=50°C.

Tempo (t) (s)	Amplitude = 5 mm					Amplitude = 8 mm				
	f=0,0Hz	f=5,0Hz	f=7,5Hz	f=10,0Hz	f=12,0 Hz	f=0,0Hz	f=5,0Hz	f=7,5Hz	f=10,0Hz	f=12,0 Hz
	Γ=0,00	Γ=0,50	Γ=1,13	Γ=2,01	Γ=2,89	Γ=0,00	Γ=0,81	Γ=1,81	Γ=3,22	Γ=4,64
	Número de pulsos					Número de pulsos				
	148	172	176	186	198	148	153	155	160	161
ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência	ocorrência
2,5	0,027	0,035	0,068	0,064	0,101	0,027	0,039	0,058	0,106	0,093
3,5	0,216	0,226	0,221	0,236	0,237	0,216	0,222	0,225	0,243	0,279
4,5	0,290	0,302	0,315	0,323	0,333	0,290	0,307	0,354	0,356	0,360
5,5	0,196	0,192	0,181	0,167	0,136	0,196	0,202	0,174	0,113	0,136
6,5	0,101	0,293	0,086	0,086	0,075	0,101	0,091	0,071	0,063	0,055
7,5	0,067	0,064	0,058	0,054	0,055	0,067	0,058	0,064	0,050	0,037
8,5	0,040	0,035	0,034	0,027	0,032	0,040	0,032	0,026	0,031	0,024
9,5	0,027	0,023	0,019	0,016	0,016	0,027	0,019	0,012	0,018	0,006
10,5	0,020	0,017	0,012	0,016	0,010	0,020	0,019	0,006	0,013	0,006
11,5	0,013	0,012	0,007	0,011	0,006	0,013	0,007	0,006	0,006	-----

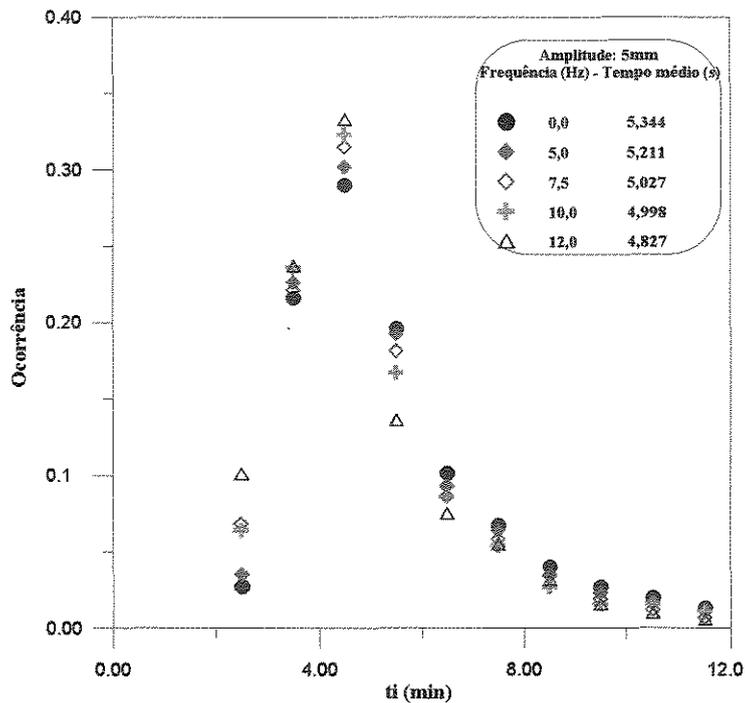


Figura 4.10 - Influência da frequência de vibração na distribuição de tempo de ciclo do comprimido C2, carga: 1,2 kg, placa distribuidora: (6x4) cm<sup>2</sup>, vazão de ar: 1,70 m<sup>3</sup>/min e T<sub>g</sub>: 50°C e A = 5 mm.

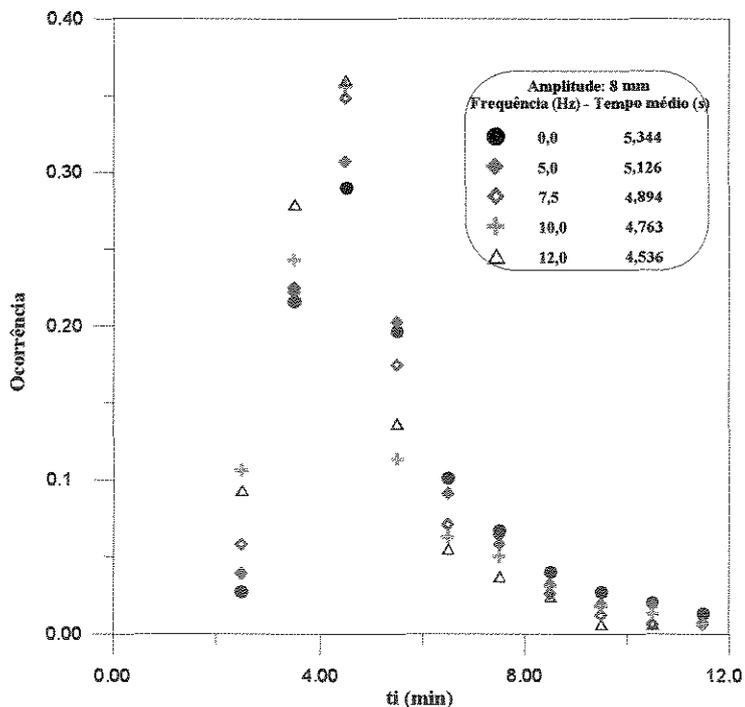


Figura 4.11 - Influência da frequência de vibração na distribuição de tempo de ciclo do comprimido C2, carga: 1,2 kg, placa distribuidora: (6x4) cm<sup>2</sup>, vazão de ar: 1,70 m<sup>3</sup>/min e T<sub>g</sub>: 50°C e A = 8 mm.

### 4.3.3 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE CICLO ( $f = 10$ Hz e $A = 8$ mm)

As Tabelas 4.5 a 4.13, apresentam tempos médios de ciclo e a fração de ocorrência, dos ensaios dos comprimidos C1, C2 e C3, usando a placa (4x4) cm<sup>2</sup>, determinados experimentalmente, e os valores calculados pelo Método Spline Modificado, enquanto que as Tabelas 4.5a a 4.13a, trazem os parâmetros de interpolação obtidos pelo método para cada ensaio. A partir desses parâmetros obtem-se as equações que dão a representação contínua da fração de ocorrência em função do tempo de ciclo, para todo o intervalo do ensaio. Um exemplo dessa equação também está incluído no Apêndice D. Este aspecto é muito conveniente, pois os pontos experimentais deixam de ser uma tabela ou um gráfico e passam a ser uma função contínua. Isso é particularmente desejável em etapas posteriores, por exemplo, em projetos de outros equipamentos. Os resultados dos ensaios para as placas distribuidoras (6x4) cm<sup>2</sup> e (8x4) cm<sup>2</sup>, estão dispostos em tabelas no Apêndice E. O efeito da utilização da vibração no tempo de ciclo dos comprimidos C1, C2 e C3, para as cargas 0,8 kg, 1,1 kg e 1,3 kg, na placa (4x4) cm<sup>2</sup>, pode ser melhor visualizado nas Figuras 4.12 a 4.20. As figuras para mesmos comprimidos e cargas, para as placas (6x4) cm<sup>2</sup> e (8x4) cm<sup>2</sup>, estão dispostas no Apêndice E. Para todos os ensaios, as tabelas mostram que os valores ajustados pelo método estão geralmente próximos aos valores experimentais, e que as curvas alisadas são uma boa representação contínua do comportamento dos pontos experimentais.

Os resultados indicam que o tempo médio de ciclo aumenta com o aumento do tamanho dos comprimidos assim como com a carga do leito. Uma comparação dos resultados com diferentes placas distribuidoras, indica que o aumento da área da placa aumenta o tempo médio de ciclo. Esses resultados são esperados pois envolvem a intensificação de fatores que tendem a suprimir a circulação do leito.

As figuras citadas mostram que a vibração induzida causa uma diminuição no tempo de ciclo e uma menor dispersão em torno da mediana. Esse resultado era esperado pois observou-se que a vibração propiciou uma melhor movimentação das partículas mais próximas às paredes inclinadas do leito, resultando numa melhor e maior uniformidade na taxa de circulação dos comprimidos, do que nos ensaios sem vibração. Individualmente não se constatou um efeito diferenciado da vibração com relação a variação de carga e as diferentes áreas da base vibratória sobre o tempo médio de ciclo. O efeito da vibração entretanto, foi menos pronunciado sobre a circulação dos comprimidos maiores (C3), do que sobre os outros,

o que é um resultado inesperado pois os leitos vibrados foram desenvolvidos justamente para serem utilizados com material de difícil fluidização.

Tabela 4.5- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura 4.12.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 305)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 391)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5006	0,0070	1,0000	0,0061	1,5027	0,0540	1,0000	0,0497
2,5000	2,4995	0,3800	1,0000	0,3837	2,4980	0,3710	1,0000	0,3897
3,5000	3,4991	0,3500	1,0000	0,3444	3,4946	0,3760	1,0000	0,3419
4,5000	4,5005	0,1600	1,0000	0,1632	4,5054	0,1230	1,0000	0,1554
5,5000	5,5000	0,0550	1,0000	0,0605	5,4992	0,0540	1,0000	0,0418
6,5000	6,5000	0,0300	1,0000	0,0285	6,4999	0,0130	1,0000	0,0058
7,5000	7,5000	0,0130	1,0000	0,0135	7,5000	0,0050	0,3000	0,0058
8,5000	8,5000	0,0050	1,0000	0,0049	8,4999	0,0030	1,0000	0,0010

Tabela 4.5a- Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura 4.12.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5006	0,0061	-0,6937	1	1,5027	0,4969	-0,6451
2	4,5005	0,1632	0,1350	2	4,5054	0,1554	0,1204
3	6,5000	0,0285	0,0064	3	8,4999	0,0010	-0,0482
4	8,5000	0,0049	0,0062	---	---	---	---

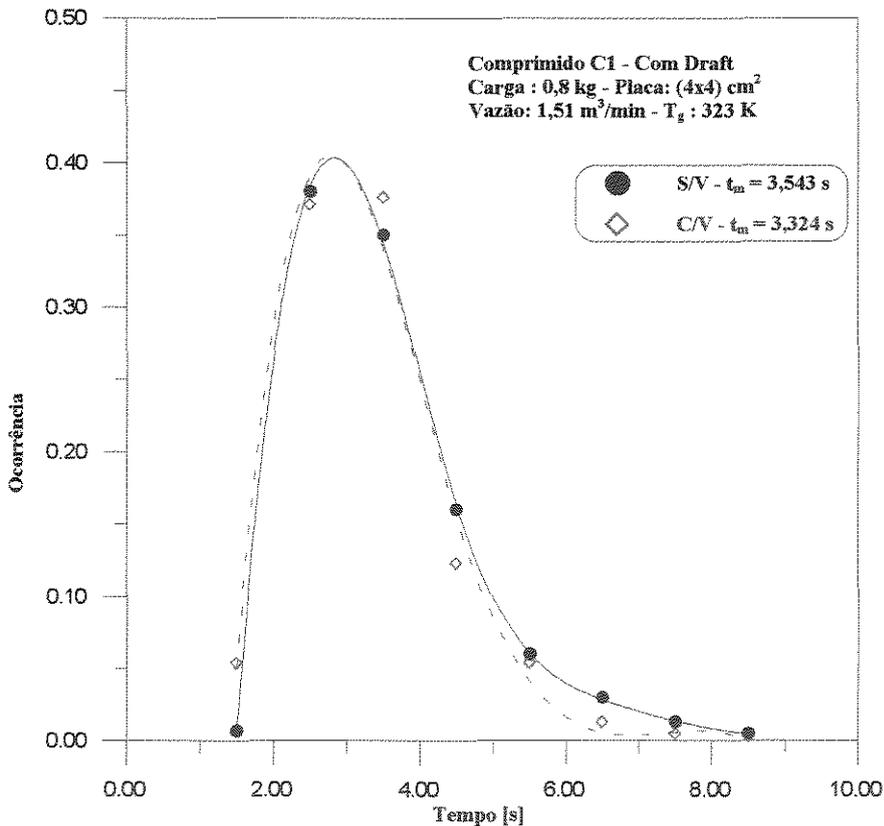


Figura 4.12 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.6- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura 4.13.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 336)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 398)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,4995	0,0830	1,0000	0,0838	2,5001	0,2370	1,0000	0,2369
3,5000	3,5002	0,3960	1,0000	0,3927	3,5001	0,4870	1,0000	0,4879
4,5000	4,5009	0,3000	1,0000	0,3048	4,4993	0,2000	1,0000	0,1974
5,5000	5,5000	0,1190	1,0000	0,1189	5,5002	0,0380	1,0000	0,0414
6,5000	6,4998	0,0590	1,0000	0,0513	6,5000	0,0250	1,0000	0,0234
7,5000	7,5002	0,0180	1,0000	0,0255	7,5000	0,0130	1,0000	0,0115
8,5000	8,5000	0,0090	1,0000	0,0098	8,5000	0,0000	0,3000	0,0020
9,5000	9,5000	0,0090	1,0000	0,0040	9,5000	0,0000	1,0000	0,0006
10,500	10,500	0,0030	1,0000	0,0054	10,500	0,0000	1,0000	0,0004
11,500	11,500	0,0030	1,0000	0,0027	11,500	0,0000	1,0000	0,0002

Tabela 4.6a- Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura 4.13.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,4995	0,0838	-0,6945	1	2,5001	0,2369	-1,3873
2	5,5000	0,1189	0,1997	2	4,4993	0,1974	0,3031
3	6,4998	0,0513	0,0102	3	6,5000	0,0234	-0,0275
4	9,5000	0,0040	0,0096	4	7,5000	0,0115	0,0092
5	11,5000	0,0027	-0,0182	5	11,5000	0,0002	-0,0027

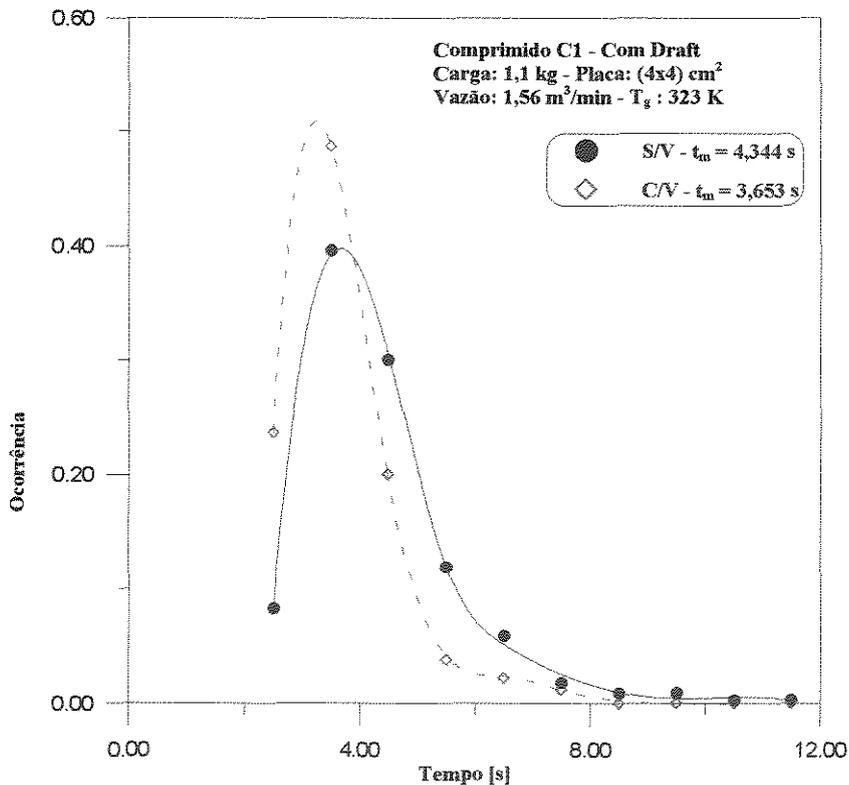


Figura 4.13 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.7- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura 4.14.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 288)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 299)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5005	0,0140	1,0000	0,0125	2,5003	0,0670	1,0000	0,0667
3,5000	3,4981	0,2430	1,0000	0,2551	3,5001	0,4780	1,0000	0,4801
4,5000	4,4990	0,3570	1,0000	0,3224	4,4984	0,2570	1,0000	0,2507
5,5000	5,5071	0,1700	1,0000	0,2178	5,5008	0,0770	1,0000	0,0860
6,5000	6,4973	0,1150	1,0000	0,0854	6,4998	0,0500	1,0000	0,0423
7,5000	7,5000	0,0420	1,0000	0,0421	7,5001	0,0230	1,0000	0,0273
8,5000	8,5001	0,0210	1,0000	0,0269	8,5000	0,0180	1,0000	0,0173
9,5000	9,5000	0,0140	1,0000	0,0163	9,5000	0,0130	1,0000	0,0105
10,500	10,500	0,0100	1,0000	0,0095	10,500	0,0040	1,0000	0,0065
11,500	11,500	0,0100	1,0000	0,0060	11,500	0,0060	1,0000	0,0052
12,500	12,500	0,0030	1,0000	0,0050	12,500	0,0060	1,0000	0,0060

Tabela 4.7a- Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura 4.14

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5005	0,0125	-0,1483	1	2,5003	0,0667	-1,5172
2	4,4990	0,3224	-0,2039	2	4,4984	0,2507	0,2287
3	6,4973	0,0854	0,1425	3	6,4998	0,0423	0,0122
4	7,5000	0,0421	0,0051	4	7,5001	0,0273	0,0035
5	12,5000	0,0050	-0,0021	5	12,5000	0,0060	0,0019

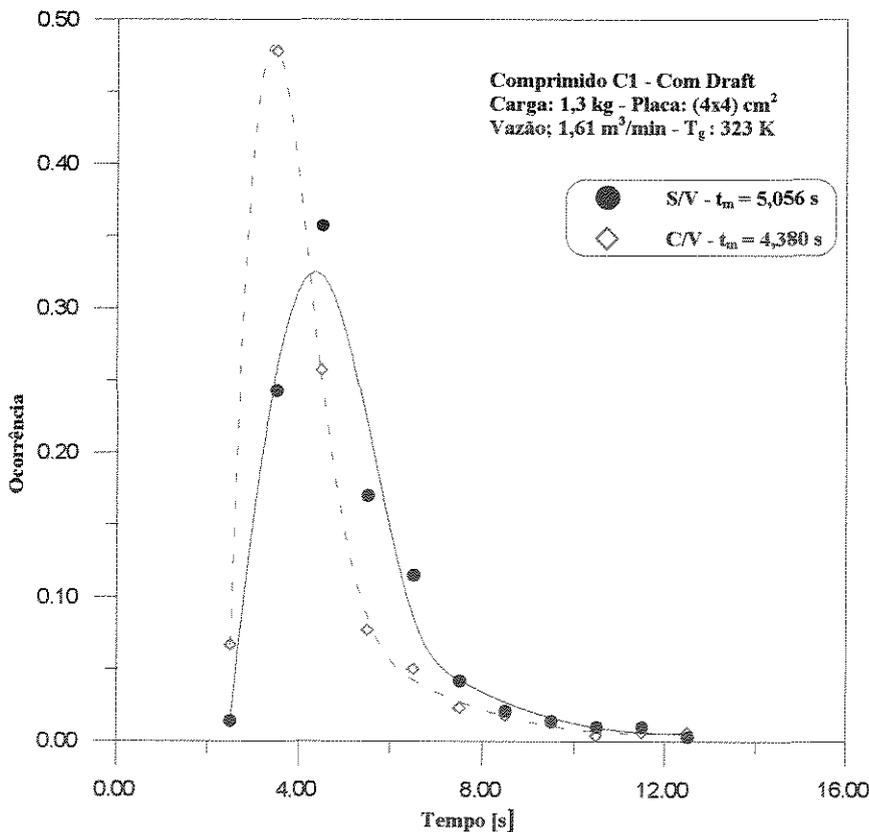


Figura 4.14 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>

Tabela 4.8- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura 4.15.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 331)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 354)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5002	0,0730	1,0000	0,0723	1,5003	0,1100	1,0000	0,1053
2,5000	2,4994	0,2600	1,0000	0,2654	2,5000	0,3700	1,0000	0,3738
3,5000	3,4994	0,3080	1,0000	0,2851	3,4984	0,2750	1,0000	0,2646
4,5000	4,5014	0,1960	1,0000	0,2086	4,5011	0,1300	1,0000	0,1408
5,5000	5,5006	0,0910	1,0000	0,0969	5,5000	0,0650	1,0000	0,0653
6,5000	6,4995	0,0450	1,0000	0,0320	6,4998	0,0340	1,0000	0,0253
7,5000	7,5000	0,0120	1,0000	0,0105	7,5000	0,0080	0,5000	0,0090
8,5000	8,5000	0,0090	0,1500	0,0092	8,5000	0,0050	1,0000	0,0054
9,5000	9,5000	0,0060	0,5000	0,0052	9,5000	0,0030	1,0000	0,0024

Tabela 4.8a- Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura 4.15.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5002	0,0723	-0,2096	1	1,5003	0,1095	-0,8082
2	3,4994	0,2935	-0,1208	2	3,4984	0,2646	0,0600
3	5,5006	0,0969	0,0663	3	5,5000	0,0653	0,0355
4	9,5000	0,0052	-0,0257	4	9,5000	0,0024	-0,0109

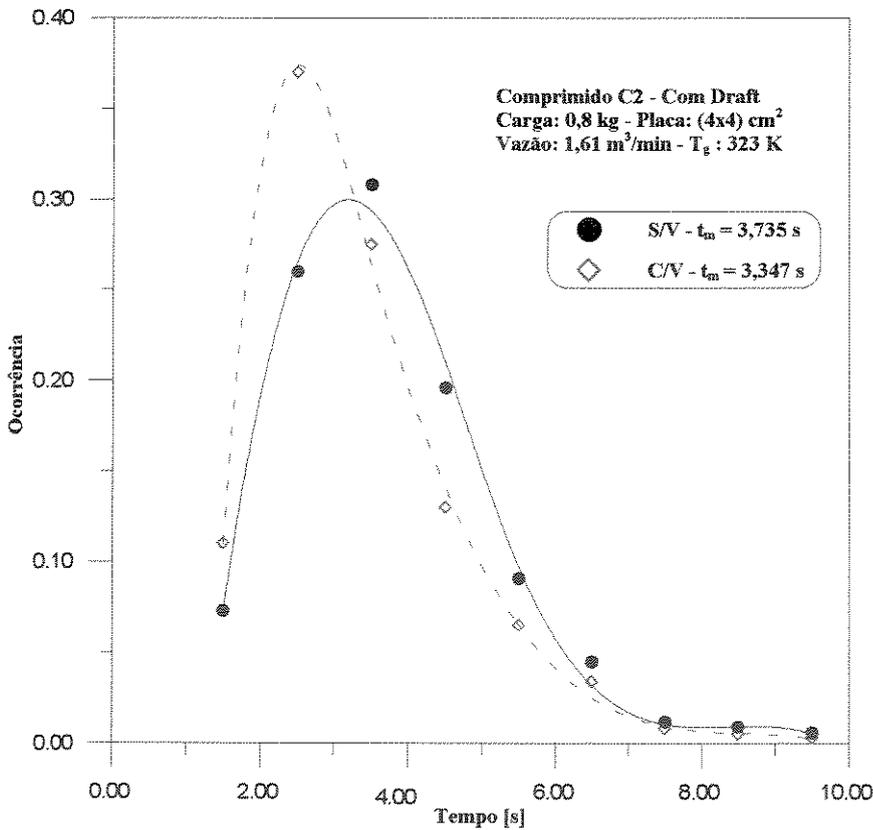


Figura 4.15 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.9- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura 4.16.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 249)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 283)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5000	0,0240	1,0000	0,0240	1,4960	0,0530	1,0000	0,0606
2,5000	2,5000	0,1010	1,0000	0,1018	2,5022	0,3460	1,0000	0,3168
3,5000	3,4997	0,2110	1,0000	0,2158	3,5069	0,1870	1,0000	0,2513
4,5000	4,4985	0,2530	1,0000	0,2191	4,5020	0,1480	1,0000	0,1596
5,5000	5,5032	0,1560	1,0000	0,1541	5,5000	0,0950	1,0000	0,0943
6,5000	6,5000	0,0840	1,0000	0,0964	6,4993	0,0710	1,0000	0,0560
7,5000	7,4999	0,0600	1,0000	0,0570	7,4996	0,0490	1,0000	0,0285
8,5000	8,4997	0,0360	1,0000	0,0336	8,4998	0,0210	1,0000	0,0124
9,5000	9,4998	0,0320	1,0000	0,0208	9,5000	0,0140	1,0000	0,0081
10,5000	10,5000	0,0160	1,0000	0,0154	10,5000	0,0070	0,3000	0,0073
11,5000	11,5000	0,0120	0,1500	0,0135	11,5000	0,0040	0,1500	0,0050
12,5000	12,5000	0,0120	0,1500	0,0113	12,499	0,0040	0,3000	0,0010

Tabela 4.9a- Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura 4.16.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5000	0,0240	0,2311	1	1,4960	0,0606	-0,6647,
2	3,4997	0,2158	-0,1583	2	3,5069	0,2513	0,0313
3	5,5032	0,1541	0,0227	3	12,4999	0,0010	-0,0100
4	12,5000	0,1127	-0,0042	----	----	----	----

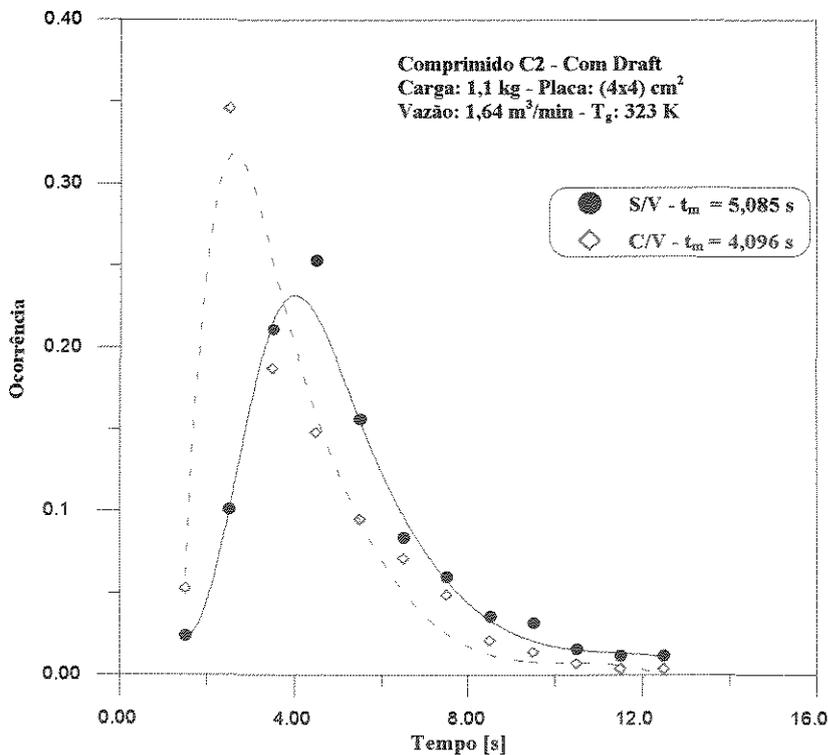


Figura 4.16 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>

Tabela 4.10- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura 4.17.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 262)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 295)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Porcentagem de ocorrência calculada
2,5000	2,5000	0,0680	1,0000	0,0671	2,4993	0,1290	1,0000	0,1308
3,5000	3,4991	0,1560	1,0000	0,1631	3,5000	0,3250	1,0000	0,3108
4,5000	4,5007	0,2780	1,0000	0,2577	4,5021	0,2130	1,0000	0,2325
5,5000	5,5023	0,1980	1,0000	0,2264	5,4995	0,1380	1,0000	0,1414
6,5000	6,4983	0,1580	1,0000	0,1359	6,4995	0,0940	1,0000	0,0808
7,5000	7,5002	0,0690	1,0000	0,0743	7,4997	0,0550	1,0000	0,0441
8,5000	8,5000	0,0380	1,0000	0,0388	8,5000	0,0240	1,0000	0,0246
9,5000	9,5000	0,0190	1,0000	0,0193	9,5001	0,0070	1,0000	0,0100
10,500	10,500	0,0110	1,0000	0,0098	10,500	0,0070	1,0000	0,0105
11,500	11,500	0,0040	1,0000	0,0044	11,500	0,0070	1,0000	0,0030

Tabela 4.10a- Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura 4.17.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5000	0,0671	0,1699	1	2,4993	0,1307	-0,5529
2	4,5007	0,2577	-0,1731	2	4,5021	0,2325	0,0374
3	6,4983	0,1359	0,0535	3	11,5000	0,0025	-0,0096
4	7,5002	0,0743	0,0216	---	---	---	---
5	11,5000	0,0044	-0,0015	---	---	---	---

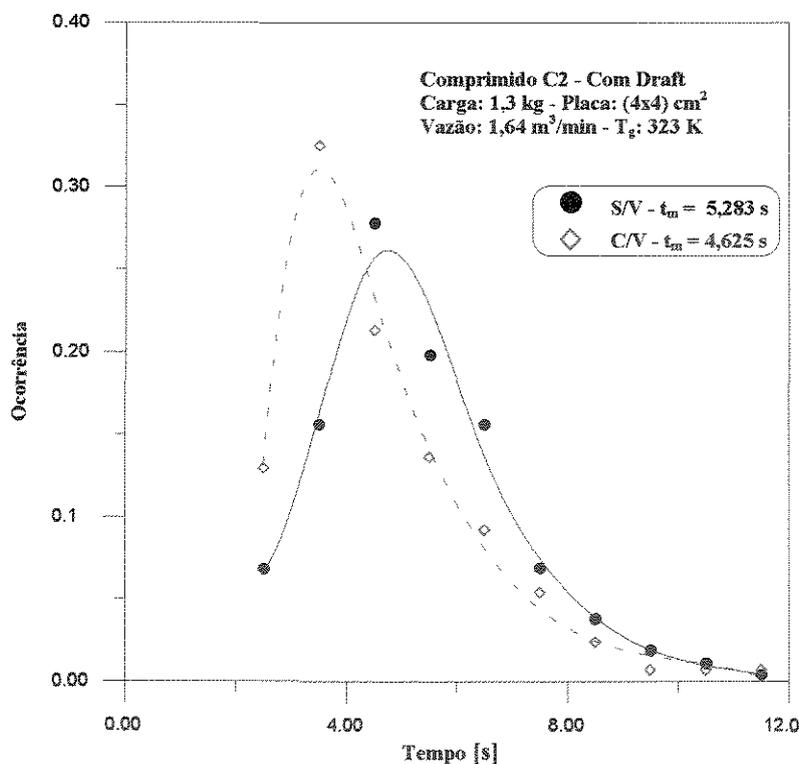


Figura 4.17 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.11- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura 4.18.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 249)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 269)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5026	0,0320	1,0000	0,0265	2,5005	0,1010	1,0000	0,0995
3,5000	3,4975	0,2770	1,0000	0,2999	3,4995	0,3080	1,0000	0,3143
4,5000	4,4971	0,3330	1,0000	0,2984	4,4991	0,3160	1,0000	0,3053
5,5000	5,5026	0,1610	1,0000	0,1839	5,5013	0,1710	1,0000	0,1802
6,5000	6,4993	0,1040	1,0000	0,0943	6,4995	0,0590	1,0000	0,0534
7,5000	7,5003	0,0360	1,0000	0,0448	7,5001	0,0110	1,0000	0,0152
8,5000	8,4999	0,0280	1,0000	0,0228	8,5000	0,0110	1,0000	0,0089
9,5000	9,5000	0,0160	1,0000	0,0148	9,5000	0,0110	1,0000	0,0092
10,500	10,500	0,0080	1,0000	0,0095	10,500	0,0070	1,0000	0,0094
11,500	11,500	0,0040	1,0000	0,0038	11,500	0,0040	1,0000	0,0032

Tabela 4.11a- Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura 4.18.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5026	0,0265	-4,4184	1	2,5005	0,0995	-0,3325
2	5,5026	0,1839	0,0518	2	5,5013	0,1802	-0,0072
3	9,5000	0,0148	0,0007	3	6,4995	0,0534	0,1320
4	11,5000	0,0038	-0,0017	4	7,5001	0,0152	0,1305
5	---	---	---	5	11,5000	0,0032	-0,1305

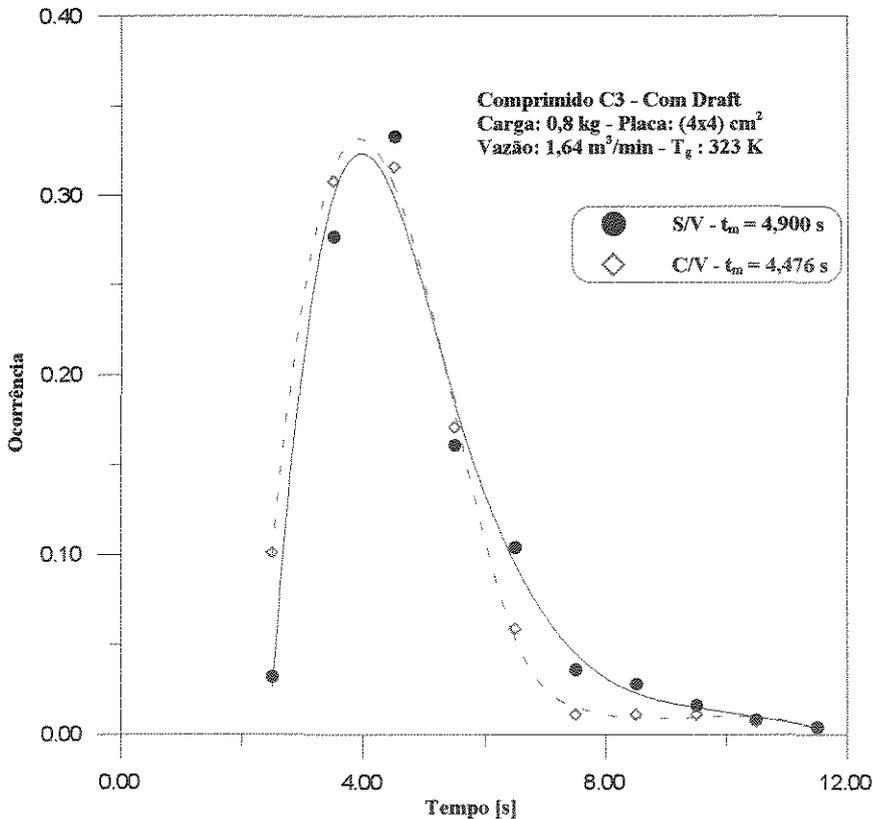


Figura 4.18 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 da placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.12- Tempo médio de ciclo versus fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura 4.19.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 196)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 232)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5000	0,0050	1,0000	0,0048	2,5002	0,0086	1,0000	0,0118
3,5000	3,4999	0,0408	1,0000	0,0421	3,5021	0,0905	1,0000	0,0764
4,5000	4,5004	0,1170	1,0000	0,1133	4,4965	0,2155	1,0000	0,2301
5,5000	5,4994	0,2240	1,0000	0,2295	5,4990	0,3100	0,5000	0,3049
6,5000	6,4997	0,2760	1,0000	0,2701	6,5015	0,1680	1,0000	0,1804
7,5000	7,5008	0,1530	1,0000	0,1596	7,4994	0,1160	1,0000	0,1048
8,5000	8,4997	0,0867	1,0000	0,0804	8,5004	0,0470	1,0000	0,0555
9,5000	9,5001	0,0460	1,0000	0,0483	9,5001	0,0170	1,0000	0,0207
10,5000	10,5000	0,0255	1,0000	0,0271	10,5000	0,0129	0,5000	0,0096
11,5000	11,5000	0,0150	1,0000	0,0131	11,5000	0,0086	0,3000	0,0094
12,5000	12,5000	0,0100	1,0000	0,0104	12,5000	0,0043	1,0000	0,0020

Tabela 4.12a- Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura 4.19.

SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO				
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5000	0,0048	-0,0101	1	2,5002	0,0118	0,2972
2	4,5004	0,1133	-0,0781	2	5,4990	0,3049	-0,2961
3	6,4997	0,2701	-0,2300	3	6,5015	0,1804	0,1468
4	7,5008	0,1596	0,0920	4	7,4994	0,1048	-0,0004
5	9,5001	0,0483	0,0027	5	9,5001	0,0207	0,0291
6	12,5000	0,0104	0,0157	6	12,5000	0,0020	-0,0255

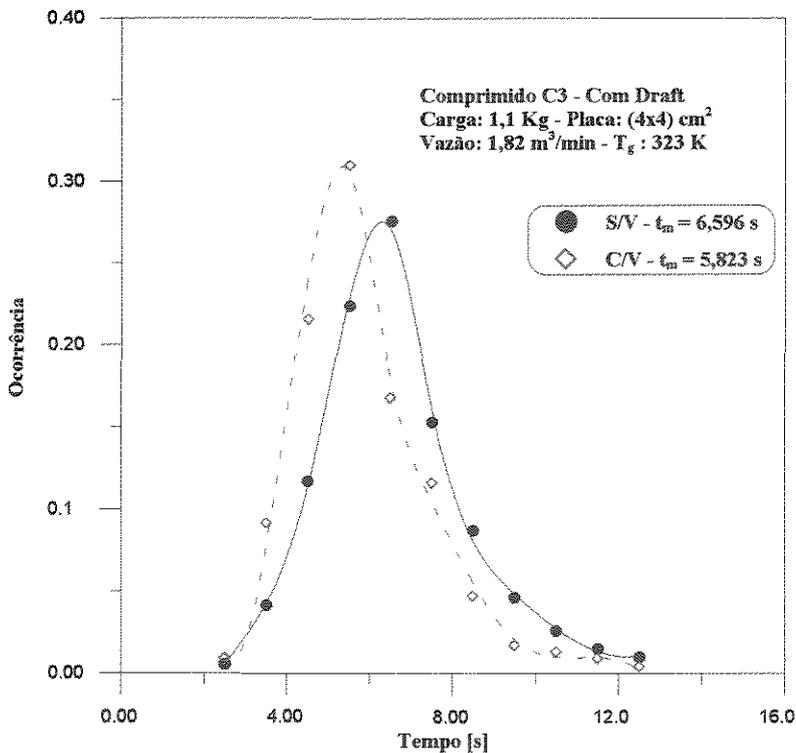


Figura 4.19 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 da placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela 4.13- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura 4.20.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 178)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 182)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
3,5000	3,5001	0,0110	1,0000	0,0139	3,5000	0,0550	1,0000	0,0553
4,5000	4,5010	0,0660	1,0000	0,0494	4,5000	0,0800	1,0000	0,0801
5,5000	5,4980	0,1220	1,0000	0,1451	5,5001	0,1230	1,0000	0,1282
6,5000	6,5003	0,2180	0,5000	0,2091	6,4999	0,1980	1,0000	0,1984
7,5000	7,5004	0,1740	1,0000	0,1823	7,5000	0,2420	1,0000	0,2406
8,5000	8,4998	0,1380	1,0000	0,1318	8,4998	0,1210	1,0000	0,1218
9,5000	9,5001	0,0930	1,0000	0,0914	9,5001	0,0600	1,0000	0,0644
10,500	10,500	0,0660	1,0000	0,0620	10,500	0,0430	1,0000	0,0425
11,500	11,500	0,0470	1,0000	0,0411	11,500	0,0310	1,0000	0,0286
12,500	12,500	0,0225	1,0000	0,0263	12,500	0,0180	1,0000	0,0196
13,500	13,500	0,0170	1,0000	0,0151	13,500	0,0120	1,0000	0,0129
14,500	14,500	0,0055	1,0000	0,0052	14,500	0,0060	1,0000	0,0055

Tabela 4.13a- Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura 4.20

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	3,5001	0,0139	0,1535	1	3,5000	0,0553	0,0202
2	6,5003	0,2091	-0,1253	2	6,4999	0,1984	0,0224
3	7,5004	0,1823	-0,0082	3	7,5000	0,2406	-0,2880
4	8,4998	0,1318	0,0146	4	8,4998	0,1218	0,1616
5	9,5001	0,0914	0,0108	5	9,5001	0,0644	0,0107
6	14,5000	0,0052	-0,0010	6	14,5000	0,0055	-0,0035

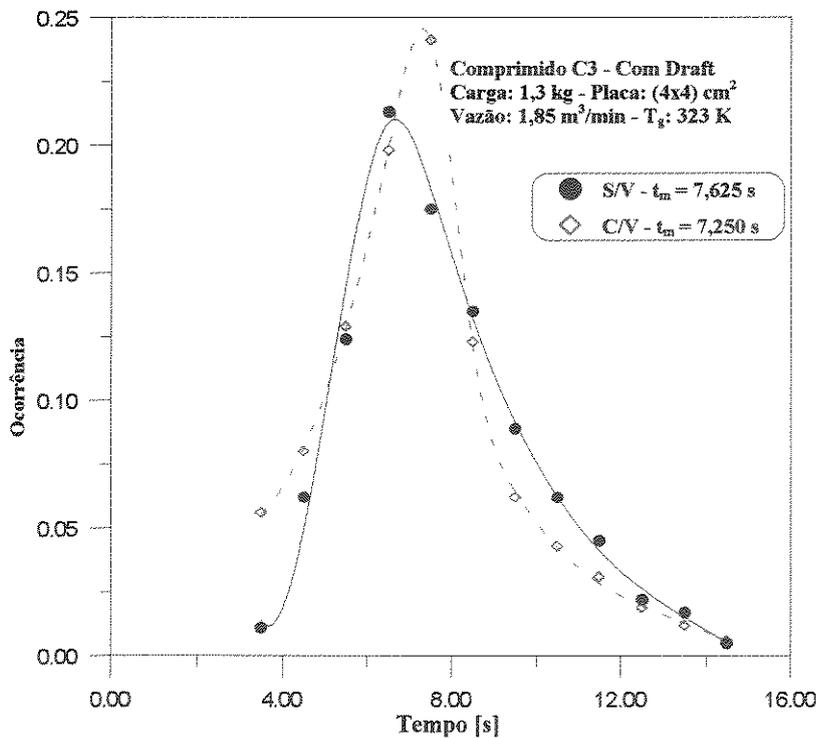


Figura 4.20 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 da placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

A Tabela 4.14, apresenta os tempos médios de ciclo experimental,  $t_m$ , e os tempos médios calculados pelo Método Spline Modificado (MSM),  $t_{mc}$ , dos comprimidos, para os ensaios sem e com vibração. Os desvios relativos dos tempos médios sem vibração,  $DR_{S/V}$ , e com vibração  $DR_{C/V}$ , mostram uma boa concordância e a qualidade do ajuste feito pelo MSM

Tabela 4.14 -Tempos médios, ( $t_m$ ), e o calculado, ( $t_{mc}$ ), usados no estudo do recobrimento.

Placa	$(4 \times 4) \text{cm}^2$		$(6 \times 4) \text{cm}^2$		$(8 \times 4) \text{cm}^2$	
	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V
Carga (kg)	$t_m$ (s)	$t_m$ (s)	$t_m$ (s)	$t_m$ (s)	$t_m$ (s)	$t_m$ (s)
	$t_{mc}$ (s)	$t_{mc}$ (s)	$t_{mc}$ (s)	$t_{mc}$ (s)	$t_{mc}$ (s)	$t_{mc}$ (s)
	$DR_{S/V}$ (%)	$DR_{C/V}$ (%)	$DR_{S/V}$ (%)	$DR_{C/V}$ (%)	$DR_{S/V}$ (%)	$DR_{C/V}$ (%)
C1 0,8	3,543	3,324	3,561	3,404	4,304	3,857
	3,567	3,258	3,634	3,408	4,295	3,700
	0,68	1,98	2,05	0,11	0,21	4,07
C1 1,1	4,344	3,653	4,602	3,952	4,733	4,261
	4,341	3,702	4,661	3,926	4,725	4,259
	0,07	1,34	1,28	0,66	0,17	0,05
C1 1,3	5,056	4,380	5,260	4,498	5,664	4,799
	5,053	4,373	5,263	4,273	5,659	4,619
	0,06	0,16	0,06	5,00	0,09	3,75
C2 0,8	3,735	3,347	3,807	3,504	4,024	3,552
	3,636	3,308	3,684	3,413	3,910	3,580
	2,65	1,16	3,23	2,59	2,83	0,78
C2 1,1	5,085	4,096	4,481	3,865	4,760	4,312
	4,875	3,909	4,537	3,865	4,755	4,348
	4,12	4,56	1,25	0,00	0,11	0,83
C2 1,3	5,283	4,625	5,500	4,923	5,438	4,710
	5,247	4,541	5,488	5,038	5,431	4,666
	0,68	1,81	0,22	2,33	0,13	0,93
C3 0,8	4,900	4,476	5,475	5,286	6,425	5,805
	4,893	4,470	5,460	5,271	6,407	5,799
	0,14	0,13	0,27	0,28	0,28	0,10
C3 1,1	6,596	5,823	6,685	5,972	7,242	6,645
	6,588	5,865	6,700	6,213	7,317	6,755
	0,12	0,72	0,22	4,03	1,04	1,65
C3 1,3	7,625	7,250	8,011	7,003	8,711	8,022
	7,510	7,269	8,004	6,950	8,972	8,076
	1,51	0,26	0,70	0,75	2,99	0,67

## 4.4 - ENSAIOS DE RECOBRIMENTO

### 4.4.1 - DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

A modelagem da cinética do recobrimento de comprimidos foi introduzida por Kurcharski e Kmiéc (1988) e (1989), e utilizada por Oliveira (1992), Ayub (1993) e Parada (1994), entre outros.

A metodologia está referenciada a uma carga inicial,  $M_0$ , de comprimidos a ser recoberta, contendo um número conhecido de comprimidos,  $n_p$ , e necessita de amostragem durante o processo de recobrimento, para se obter a massa média do comprimido,  $\bar{m}_{p,i}$ , para o correspondente tempo de recobrimento,  $t_i$ .

O tratamento desenvolvido a seguir é similar ao apresentado por Kurcharski e Kmiéc (1989), sendo assumidas as seguintes simplificações, dadas por Oliveira (1992): não ocorre quebra ou abrasão dos comprimidos; todas as partículas em qualquer tempo acham-se uniformemente recobertas; o número de comprimidos no leito permanece inalterado durante o processo; e a taxa de perdas de material de recobrimento permanece constante durante o processo.

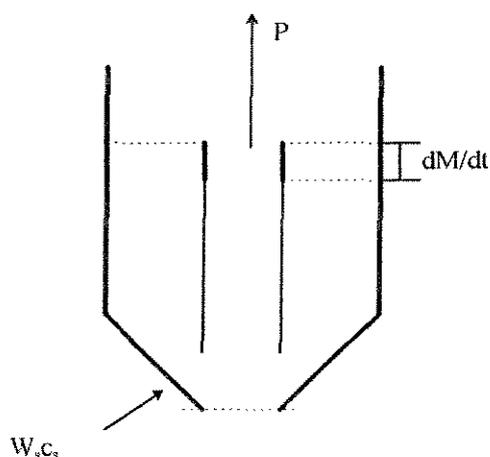


Figura 4.21 - Esquema do balanço de massa de sólidos no leito.

O balanço de massa dos sólidos da suspensão de recobrimento utiliza a nomenclatura da Figura 4.21, e assume que a variação de massa no leito ( $dM/dt$ ), corresponde a taxa de sólidos da solução de recobrimento injetados, menos a taxa de perda,  $P$ , ou seja:

$$W_s c_s - P = \frac{dM}{dt} \quad [4.2]$$

onde:  $W_s$  é a vazão mássica da suspensão de recobrimento;  $c_s$  é a concentração em peso de sólidos em suspensão.

Integrando a equação [4.2] nas condições da massa inicial de comprimidos,  $M_0$ , até a massa,  $M_i$ , para um tempo zero até um tempo,  $t_i$ , respectivamente, tem-se que:

$$M_i - M_0 = [W_s c_s - P] \cdot t_i \quad [4.3]$$

A eficiência de adesão de recobrimento,  $\eta$ , é definida por Kurcharski e Kmiéc (1988), como:

$$\eta = \frac{\text{Massa de sólidos aderida as partículas}}{\text{Massa total de sólidos adicionada ao leito}} = \frac{M_i - M_0}{W_s c_s t_i} = \frac{W_s c_s - P}{W_s c_s} \quad [4.4]$$

Substituindo a equação [4.4] na equação [4.3]:

$$M_i = M_0 + \eta W_s c_s t_i \quad [4.5]$$

Dividindo a equação [4.5] pelo número de comprimidos no leito e pela massa média inicial de cada comprimido, e sabendo que  $M_i = n_p \bar{m}_{p,i}$ , chega-se a:

$$\frac{\bar{m}_{p,i}}{\bar{m}_{p,0}} = 1 + \eta \frac{W_s c_s t_i}{n_p \cdot \bar{m}_{p,0}} \quad [4.6]$$

Chamando  $m_r = \bar{m}_{p,i} / \bar{m}_{p,0}$  tem-se a equação de uma reta:

$$m_r = 1 + K t_i \quad [4.7]$$

que é a expressão para a cinética de crescimento das partículas, para cada tempo de coleta,  $t_i$ . Essa equação indica que o crescimento dos comprimidos é linear e permite estimar a eficiência de adesão através de  $K$ , que é o coeficiente angular da equação [4.7], onde:

$$K = \eta \frac{W_s c_s}{n_p m_{p,0}} \quad [4.8]$$

A eficiência de adesão é portanto:

$$\eta = K \frac{\overline{n_p m_{p,0}}}{W_s c_s} \quad [4.9]$$

#### 4.4.2- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O ajuste da relação vazão de suspensão pela vazão de ar de atomização, foi conseguido realizando-se diversos ensaios preliminares, pois vários são os fatores que influenciam no desempenho de uma boa atomização das gotículas de recobrimento. A pressão na linha de ar de atomização em torno de 82,7 kPa e vazão de 0,72 m<sup>3</sup>/h, mostraram-se adequadas para os ensaios de recobrimento. Considerando a excelente homogeneidade de forma e de massa dos comprimidos utilizados, mostrada na Tabela 3.2, foi possível estudar a cinética dos comprimidos por simples amostragem. Todos os ensaios de recobrimento foram com carga de 0,8 kg, devido a limitada quantidade de comprimidos disponível.

Nos ensaios de recobrimento, dava-se partida ao equipamento e se estabelecia as condições fluidodinâmicas para o tipo e carga de comprimidos, para ensaios sem e com vibração. As condições operacionais da vazão de suspensão de recobrimento e do ar de atomização, bem como das temperaturas do leito e da suspensão eram ajustadas, e só então iniciava-se o processo de recobrimento. Depois de cada ensaio, pesava-se o material retido pelo coletor de pó, dando cêrca de 5% em relação a massa retida na carga dos comprimidos.

Em cada ensaio foram retiradas amostras em um número de 5 a 8 comprimidos, em tempos pré-estabelecidos. O total dessas amostras foi inferior a 1% da massa total inicial dos comprimidos no sistema, podendo então ser desprezado qualquer influência no comportamento do leito. O coletor de amostras usado não alterou as condições fluidodinâmicas do processo, pois a retirada exigia um tempo mínimo do coletor dentro do leito (menos de 2 segundos). Amostras colhidas durante os ensaios à temperatura média,  $T_g$ , de 55°C, foram pesadas e imediatamente colocadas em estufa a 75°C. Após 4 horas na estufa não se registrou alteração de massa. Conclui-se que a secagem da solução de recobrimento nas condições padrões usadas é portanto quase instantânea, e para as vazões de suspensão utilizadas, provavelmente exige um tempo menor do que o tempo médio de um ciclo. O pré-aquecimento da suspensão de

recobrimento saindo do bico atomizador em torno de 50°C, facilitou a secagem dos comprimidos, bem como evitou aglomeração dos mesmos, fazendo com que houvesse um jorro estável, tanto sem como com vibração.

#### 4.4.3 - CINÉTICA DE CRESCIMENTO DOS COMPRIMIDOS

A maior parte do levantamento de dados de cinética de crescimento dos comprimidos foi feita com uma vazão de suspensão de recobrimento de 4,22 ml/min, pois testes preliminares confirmaram que essa taxa de alimentação produzia um jorro estável em todas as situações a serem estudadas, além de um perfeito funcionamento do bico atomizador.

O sistema foi estabilizado da mesma forma como nos ensaios de medida de distribuição de tempo de ciclo.

Utilizando os valores calculados de  $m_r$ , que é a razão entre a massa média do comprimido recoberto,  $m_{pi}$ , para um tempo de recobrimento,  $t_i$ , e a massa média inicial do comprimido  $m_{p,0}$ , (tempo inicial zero de recobrimento), foram construídos gráficos, comparando dados experimentais de ensaios sem e com vibração, conforme as Figuras 4.22 a 4.24. As curvas das figuras apresentam um aumento linear de massa dos comprimidos em função do tempo de recobrimento, confirmando as hipóteses feitas na elaboração do modelo matemático.

A Tabela 4.15, apresenta resultados dos ensaios de recobrimento realizados para os três comprimidos investigados, tanto sem como com vibração. A eficiência de adesão no processo,  $\eta$ , foi calculada pela equação [4.9], com os valores de K obtidos pelo ajuste linear às curvas de crescimento.

Os valores da eficiência de adesão na Tabela 4.15, estão na faixa dentre os mais altos encontrados na literatura e são considerados satisfatórios, devido a complexidade do processo (Ayub, 1993).

Uma análise dos resultados, considerando a influência dos principais fatores envolvidos e investigados indica o seguinte:

Tabela 4.15 - Valores de eficiência de adesão de recobrimento e dos coeficientes de determinação,  $R^2$ , para uma carga de 0,8 kg

Placa	(4x4) cm <sup>2</sup>		(6x4) cm <sup>2</sup>		(8x4) cm <sup>2</sup>	
	S/V	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V
Tipo de Comprimido	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta$ (%)
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
	C1	73,73	78,21	72,95	88,14	76,05
	0,995	0,997	0,998	0,997	0,998	0,997
C2	66,07	77,26	70,24	83,08	73,02	87,54
	0,999	0,997	0,998	0,998	0,999	0,999
C3	68,13	73,96	72,35	77,97	79,08	83,55
	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998	0,998

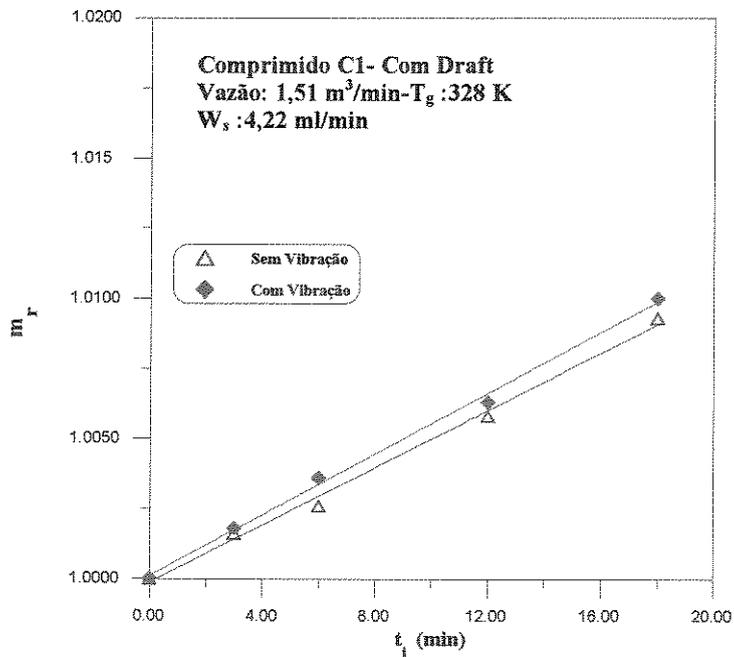


Figura 4.22-Aumento da massa dos comprimidos C1, em função do tempo de processo, placa (4x4) cm<sup>2</sup>.

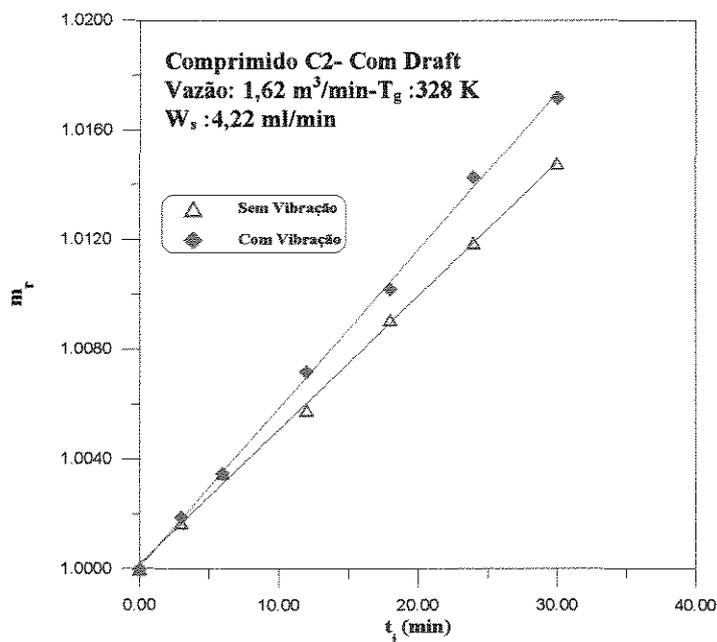


Figura 4.23- Aumento da massa dos comprimidos C2 em função do tempo de processo, placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

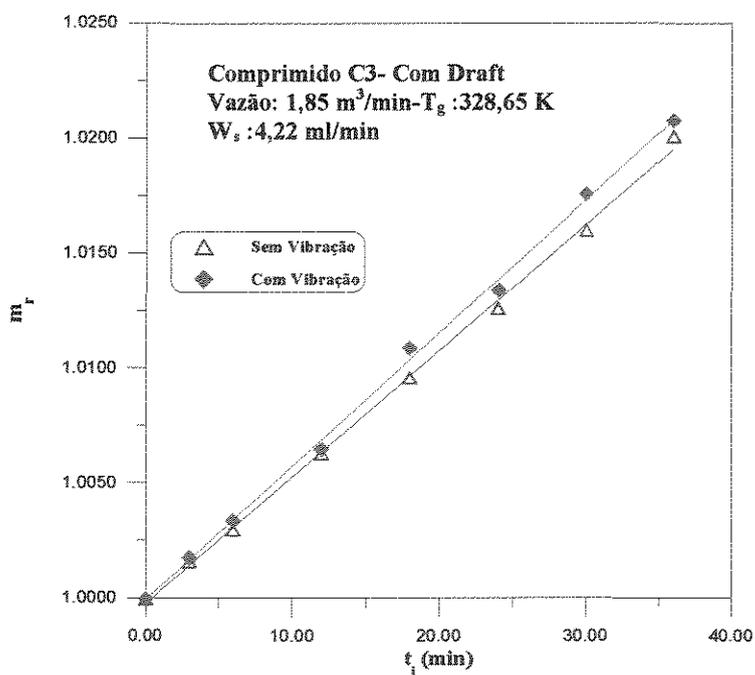


Figura 4.24- Aumento da massa dos comprimidos C3 em função do tempo de processo, placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

### a) Efeito da Vibração

O leito tipo vibro-jorrado apresentou-se mais eficiente do que o não-vibrado, para todos os comprimidos investigados, em todas as situações equivalentes. Este melhor desempenho deve-se ao efeito da vibração, que provoca uma maior taxa de circulação dos comprimidos na zona anular do leito, ou seja, menor tempo médio de ciclo, fazendo com que os comprimidos atinjam a zona de recobrimento, região próxima a base do leito, com maior frequência em um mesmo intervalo de tempo e oferecendo assim uma maior taxa de área para receber a solução de recobrimento. Como resultado ocorre uma distribuição mais uniforme na cobertura do comprimido, sem excessos locais de suspensão, que acabariam ficando nas paredes ou sendo elutriadas. Estes resultados comprovam que uma vibração incorporada ao equipamento pode ser utilizada como um recurso relativamente simples e de baixo custo para implementar o processo de recobrimento que usa leito de jorro.

Os valores de  $\eta$ , com vibração são maiores do que os sem vibração com uma diferença média superior a 10%. Esse incremento de eficiência é um pouco maior que o encontrado por Ataide (1996), que também conseguiu aumentar a taxa de circulação dos comprimidos, usando uma injeção radial de ar na região anular descendente.

Havia uma expectativa de incrementar o efeito da vibração com o aumento da área da base vibratória. Conforme já discutido anteriormente, esse efeito não se consolidou com relação ao  $\Delta P_{\max}$  e  $v_{jm}$  (ver Secção 4.2.2) e nem no tempo médio de ciclo (Secção 4.2.3).

O número de experimentos não foi suficiente para uma validação estatística da influência do aumento da área da placa distribuidora de ar no incremento da eficiência com a vibração. Os dados indicam entretanto, uma tendência para um efeito mais intenso da vibração sobre o fenômeno quando se aumenta essa área. O resultado entretanto, não é conclusivo. Assim como encontrado por Finzer (1989), o aumento da circulação de sólidos pode ter começado a ficar prejudicado por restrições ao acesso das partículas ao escoamento central do ar, no fundo do vaso. Como consequência, para o sistema usado, a placa (6x4) cm<sup>2</sup> mostrou ser a mais adequada em termos de circulação e eficiência, assim como em estabilidade e controles, tanto sem como com vibração.

Visualmente em todos os ensaios com vibração, a película de cobertura dos comprimidos apresentou melhor qualidade em relação aos ensaios sem vibração. O produto final não apresentou desgaste e nem pontos de quebra nas suas bordas.

A grande variação de  $\eta$  encontrada para os ensaios com vibração (de 73 a 88%) é um indicativo de que o processo deve ser avaliado e otimizado para cada situação e que nesses casos, correlações gerais são de pouca valia. É importante registrar que os ensaios comparativos, com e sem vibração, foram feitos mantendo a mesma vazão de ar. Como a vazão mínima de jorro é menor quando se usa vibração, tem-se ainda a perspectiva de avaliar a eficiência do processo aliada a economicidade, usando uma menor vazão de ar.

### **b) Efeito da Área da Placa da Base**

Observa-se uma tendência bem definida de aumento na eficiência de adesão à medida que a área da placa da base aumenta. Considerando que as paredes do equipamento apresentavam o mesmo grau de cobertura após cada ensaio, esse comportamento sem dúvida reflete o efeito do arraste das gotículas da suspensão de recobrimento que não aderiram aos comprimidos, e que deve ter sido intensificado devido a proximidade do bico de atomização à região de entrada do ar no leito. Considerando apenas os ensaios com comprimidos C2, tem-se as seguintes velocidades superficiais do ar, logo acima da placa distribuidora:

Placa distribuidora (4x4) cm <sup>2</sup>	$v_g = 15,55$ m/s
Placa distribuidora (4x6) cm <sup>2</sup>	$v_g = 10,18$ m/s
Placa distribuidora (4x8) cm <sup>2</sup>	$v_g = 7,96$ m/s

### **c) Efeito do Tamanho dos Comprimidos**

Os valores da Tabela 4.15 indicam que comprimidos de tamanhos diferentes tem eficiências de adesão variáveis. Elas geralmente decrescem com o aumento de massa das partículas, mas não existe uma tendência definida para essa variável. Tudo indica que o efeito dos ajustes necessários para cada comprimido (sobretudo a vazão de ar) tem maior influência do que os parâmetros geométricos associados ao tamanho da partícula.

### **d) Eficiência de Recobrimento**

A eficiência de recobrimento em um produto acabado pode ser definida como a área total de comprimidos coberta por massa de material de revestimento usada, após a operação completa de recobrimento.

O tempo total de recobrimento,  $t_{total}$ , foi determinado visualmente e portanto de maneira subjetiva, comparando-se a aparência da superfície do comprimido com amostras padrões, obtidas anteriormente em ensaios com prolongada exposição à solução de recobrimento. Esse  $t_{total}$  mostrou ser uma função muito importante do tamanho dos comprimidos e, por simplificação, o tempo no processo com vibração foi assumido igual ao do sem vibração e igual para todas as 3 placas distribuidoras. Os valores de  $t_{final}$ , foram os seguintes:

Comprimido C1 -  $t_{final} = 18$  min

Comprimido C2 -  $t_{final} = 30$  min

Comprimido C3 -  $t_{final} = 36$  min

A Tabela 4.16 apresenta o aumento final médio de massa dos comprimidos, durante o processo, calculado por:

$$M_s = kt_{final} \quad [4.10]$$

Tabela 4.16 - Massa total de recobrimento,  $M_s$ , número total de ciclos,  $N_{(total)}$  e circulação de comprimidos,  $\dot{A}$ , no processo de recobrimento.

Carga: 0,8 kg		Placa (4x4) cm <sup>2</sup>		Placa (6x4) cm <sup>2</sup>		Placa (8x4) cm <sup>2</sup>	
Parâmetros		S/V	C/V	S/V	C/V	S/V	C/V
C1	$M_s$ (g)	7,368	7,816	7,291	8,808	7,600	8,660
C2	$M_s$ (g)	11,004	12,869	11,700	13,838	12,163	14,580
C3	$M_s$ (g)	13,617	14,783	14,460	15,583	15,805	16,698
C1	$N_{(total)}$	305	325	303	317	251	280
C2	$N_{(total)}$	482	538	473	514	447	507
C3	$N_{(total)}$	441	483	567	616	537	608
C1	$\dot{A}$ (m <sup>2</sup> /min)	12,25	13,15	11,90	12,87	10,17	11,35
C2	$\dot{A}$ (m <sup>2</sup> /min)	10,52	11,75	10,33	11,22	9,77	11,08
C3	$\dot{A}$ (m <sup>2</sup> /min)	6,93	7,60	6,22	7,35	5,30	5,92

Observa-se que o aumento de massa foi da ordem de 1 a 2% da massa inicial. Esse valor é típico da literatura e confirma o excelente poder de cobertura do material usado. Esses baixos valores também validam a simplificação de que o efeito da massa de recobrimento é desprezível sobre os efeitos da fluidodinâmica, sobretudo porque a superfície mantinha a mesma rugosidade. Isto foi confirmado em ensaios de determinação de distribuição de tempo

de ciclo, antes e após o recobrimento, que apresentaram desvios da ordem de 1%, dentro dos limites do erro experimental, conforme discutido na Secção 4.3.

Um aspecto que merece consideração especial, é o fato dos comprimidos menores exigirem menor tempo de recobrimento e conseqüentemente menor massa de cobertura do que os maiores. Como a carga é a mesma (0,8 kg) e a área específica cresce com a diminuição do diâmetro equivalente, tem-se as seguintes áreas totais a serem recobertas:

Comprimido C1                      Área  $\hat{A}=0,7293 \text{ m}^2$

Comprimido C2                      Área  $\hat{A}=0,6556 \text{ m}^2$

Comprimido C3                      Área  $\hat{A}=0,5669 \text{ m}^2$

Isto significa que apesar dos valores da eficiência de adesão serem muito próximos, a eficiência de recobrimento é muito maior para os comprimidos menores.

Essa área total da carga, foi calculada com dados da Tabela 3.2 e deixa claro que apesar de uma diminuição de 22,3 % de área total de C1 para C3, o tempo necessário para um recobrimento satisfatório foi o dobro para os comprimidos C3 em relação ao C1.

Esse resultado inusitado parece não ter sido ainda constatado por outros pesquisadores. Uma interpretação para o fato poderia ser baseada nas medidas do tempo médio de ciclo. Na Secção 4.3.5 observou-se que o tempo médio de um ciclo, em todos os experimentos, aumenta na sequência C1, C2 e C3, e portanto, para um certo tempo total de processamento, os comprimidos menores passariam mais vezes pelo local de atomização.

Usando a equação [2.59], calculou-se o número total médio de ciclos para cada situação, e os valores também estão colocados na Tabela 4.16. Os resultados na tabela continuam favorecendo os comprimidos maiores sobre os menores, pois devido ao maior  $t_{total}$ , o número de ciclos nos tempos totais de processamento correspondentes é consideravelmente menor para C1 em relação aos outros dois.

A explicação para a maior eficiência no recobrimento está, sem dúvida, associada a maior taxa de circulação de área,  $\hat{A}$ , defronte ao bico atomizador. Esse valores também estão apresentados na Tabela 4.16, e foram calculados através da relação da área total de comprimidos pelo tempo médio de ciclo.

Observa-se que os valores de  $\hat{A}$  para os comprimidos C1, são quase o dobro dos comprimidos C3 e esse parâmetro tem grande influência sobre o que Mann (1983) chamou de função distribuição  $F(w)$ , isto é, a distribuição da quantidade de massa de recobrimento depositada na partícula (ver Secção 2.6.b). A maior velocidade em termos de área faz com que

a suspensão de recobrimento consiga se espalhar por uma maior fração de área do comprimido.

#### 4.4.4 - QUALIDADE DO PRODUTO

Através de observação visual, os comprimidos apresentaram-se uniformemente revestidos. Em todas as situações ensaiadas com os comprimidos recobertos e já secos, constatou-se que estes possuíam boa resistência mecânica. Devido aos cuidados na especificação do grau de dureza inicial dos comprimidos, não se observou nenhuma quebra dos mesmos durante o processo.

A Figura 4.25, apresenta fotografia acompanhando o crescimento do comprimido C2 para os intervalos de tempo de amostragem pré-fixados. Observa-se sobretudo analisando o aspecto da amostra com 3 minutos de tratamento, que a deposição da cobertura é um processo aleatório, dependendo da distribuição da fração de área do comprimido atingida a cada passagem pelo bico atomizador, conforme avaliado por Mann (1983). Para comprimidos do tamanho dos aqui usados portanto, não se aplica o modelo de crescimento tipo “casca de cebola” (Uhlemann, 1990) e sem o conhecimento da distribuição da fração de área coberta, as correlações dos parâmetros de transferência de calor e de massa que usam a área total do comprimido como referência ficam prejudicadas.

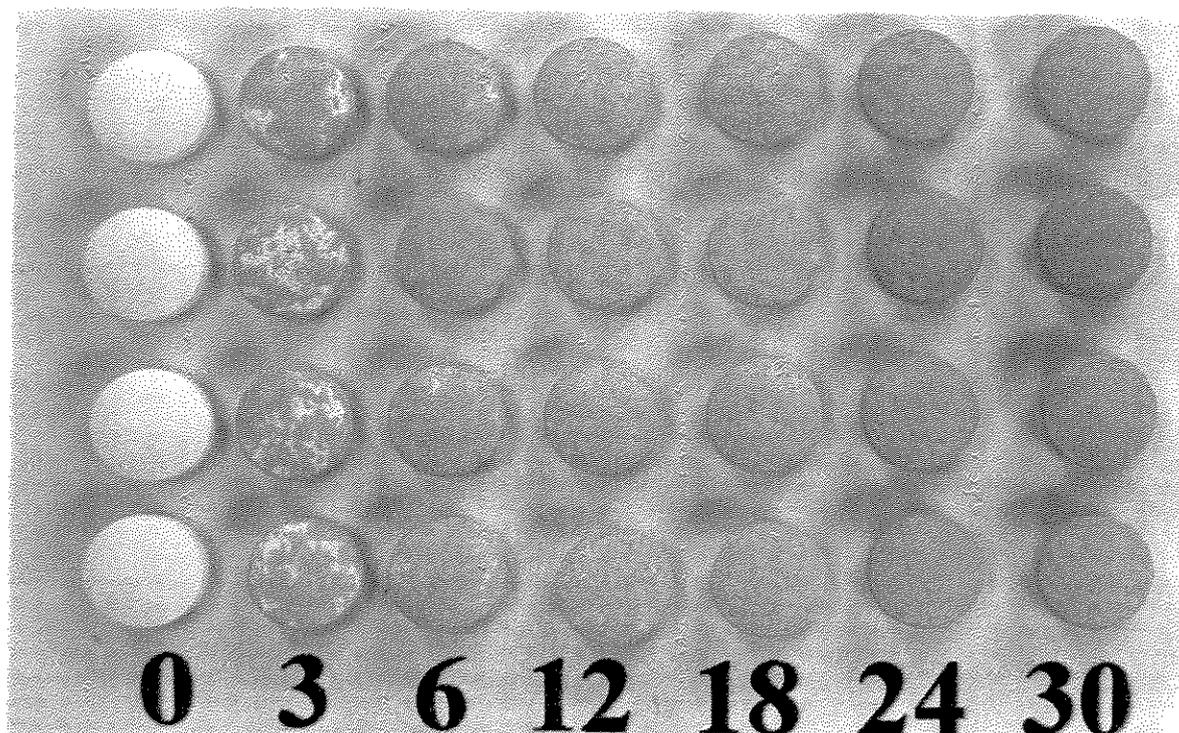


Figura 4.25 - Etapas do processo de recobrimento para o comprimido C2,  $W_s = 4,22$  ml/min e  $T_g = 55^\circ$  C, sem vibração.

A Figura 4.26, mostra os 3 tipos de comprimidos usados antes do recobrimento e a Figura 4.27, apresenta os comprimidos uniformemente recobertos..

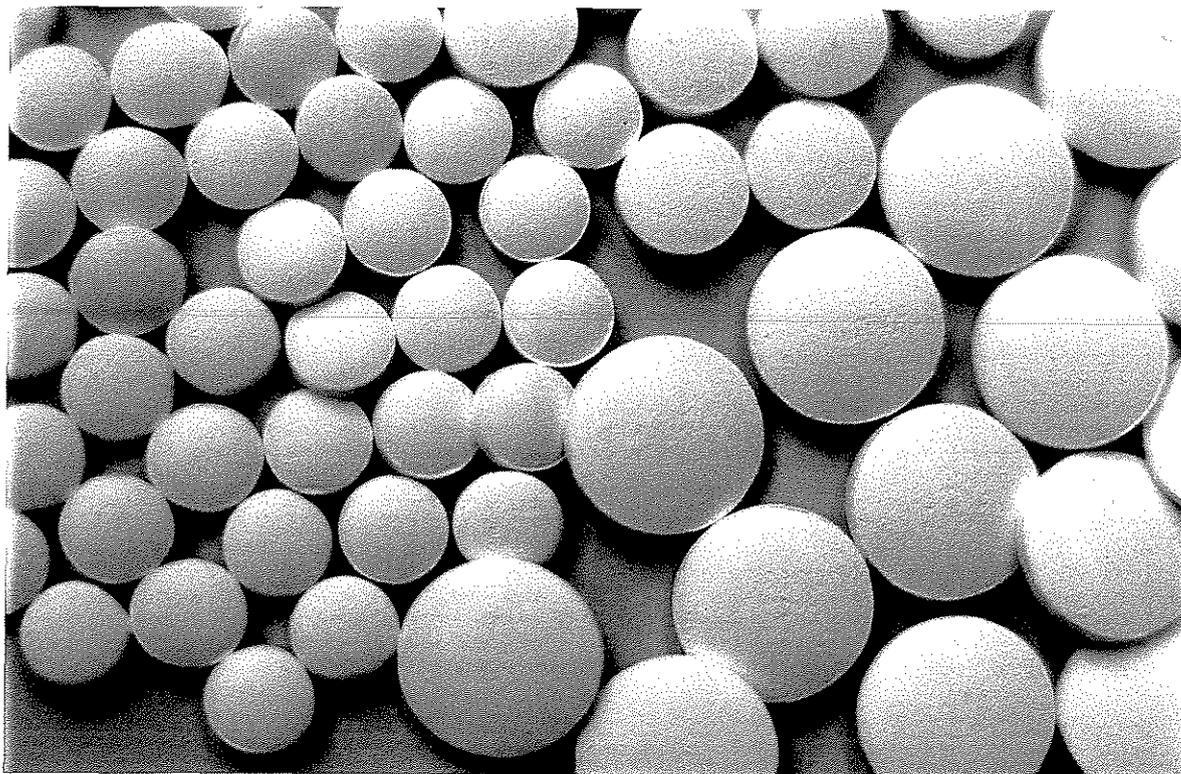


Figura 4.26 - Comprimidos C1, C2 e C3, antes do processo de recobrimento.

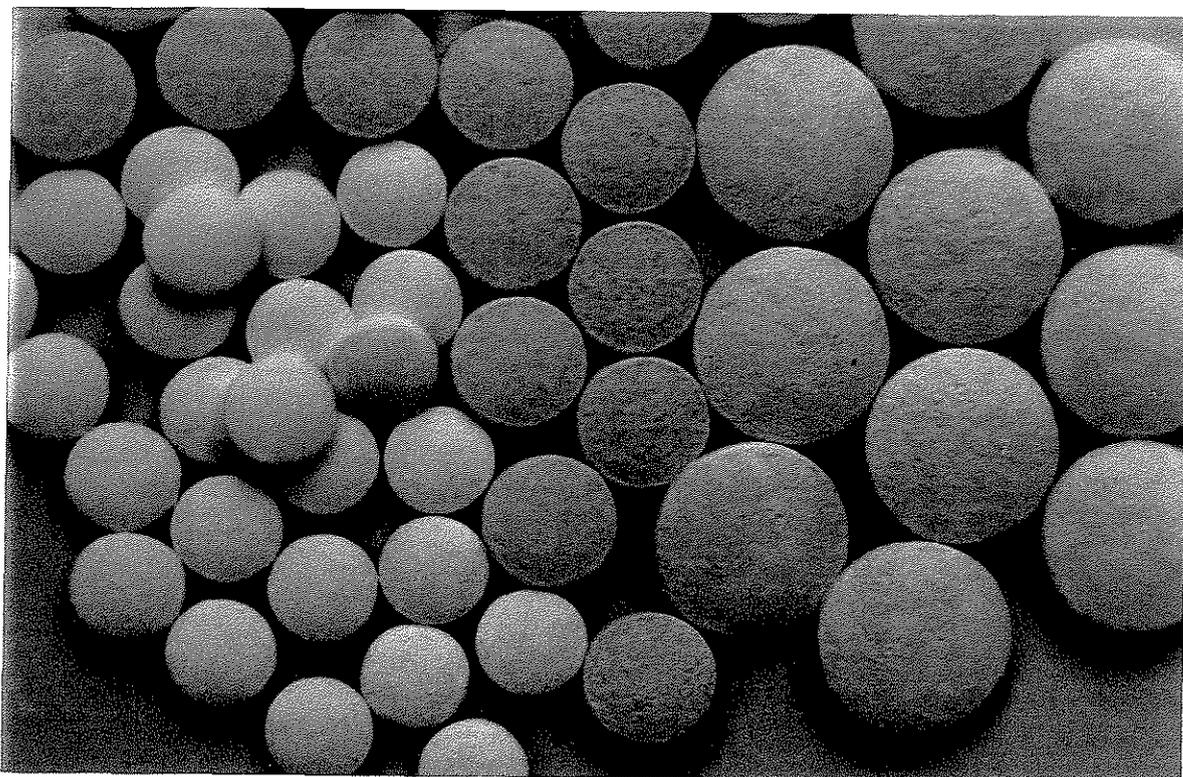


Figura 4.27 - Comprimidos C1, C2 e C3, após o processo de recobrimento.

#### 4.4.5 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DA SOLUÇÃO DE RECOBRIMENTO

Em um equipamento funcionando a contento, sob condições de operação bem definidas, o volume de produção (kg/h) de comprimidos recobertos é função direta da máxima quantidade de suspensão de recobrimento que pode ser injetada. Dentro dos limites de operacionalidade, maior vazão de suspensão promove maiores taxas de crescimento, e com isso, menor tempo total de processamento por batelada, desde que a eficiência mantenha o mesmo nível assim como a distribuição  $F(w)$ , discutida na Secção 4.4.3.

É de se esperar que aumentos na taxa de suspensão de recobrimento acima de um valor crítico devem vir acompanhados de redução de  $\eta$ , pois a superfície dos comprimidos não terá condições de receber e fixar todo o produto de recobrimento injetado. A literatura apresenta resultados concordantes, (Ayub, 1993), pois há uma faixa restrita de operação para  $W_s$ , em que o leito opera sem encharcamento ou aglomeração.

Os ensaios descritos na Secção 3.3.3 e realizados a uma vazão de solução de 4,22 ml/min, conforme apresentado na Secção 4.3.2, foram repetidos, mas com uma vazão de 5,88 ml/min. Usou-se uma carga de 0,8 kg de comprimidos C2, sem e com vibração ( $f = 10$  Hz e  $A = 8$  mm)

Com os dados experimentais obtidos da massa média de uma partícula,  $m_{ai}$ , no tempo de recobrimento,  $t_i$ , foi construído o gráfico da Figura 4.28, que também inclui os resultados obtidos com vazão de suspensão de recobrimento,  $W_s$ , de 4,22 ml/min. Observa-se neste gráfico e pelo ajuste realizado pelo método dos mínimos quadrados que a equação de uma reta também concorda com os dados experimentais e a equação [4.7] é satisfeita.

De posse dos valores de  $K$ , calculou-se a eficiência de adesão,  $\eta$ , obtida pela equação [4.9]. A Tabela 4.17, mostra a influência da vazão de suspensão no valor de  $K$  e de  $\eta$ . Os resultados obtidos com vazão de 5,88 ml/min seguem a mesma tendência dos já apresentado na Secção 4.3.2, isto é, são valores altos de eficiência, com um aumento significativo pelo uso da vibração. Observa-se que  $K$  aumenta com a vazão  $W_s$ , como era esperado, e que  $\eta$  tende a diminuir, embora o número limitado de experiências realizado não permite uma definição precisa.

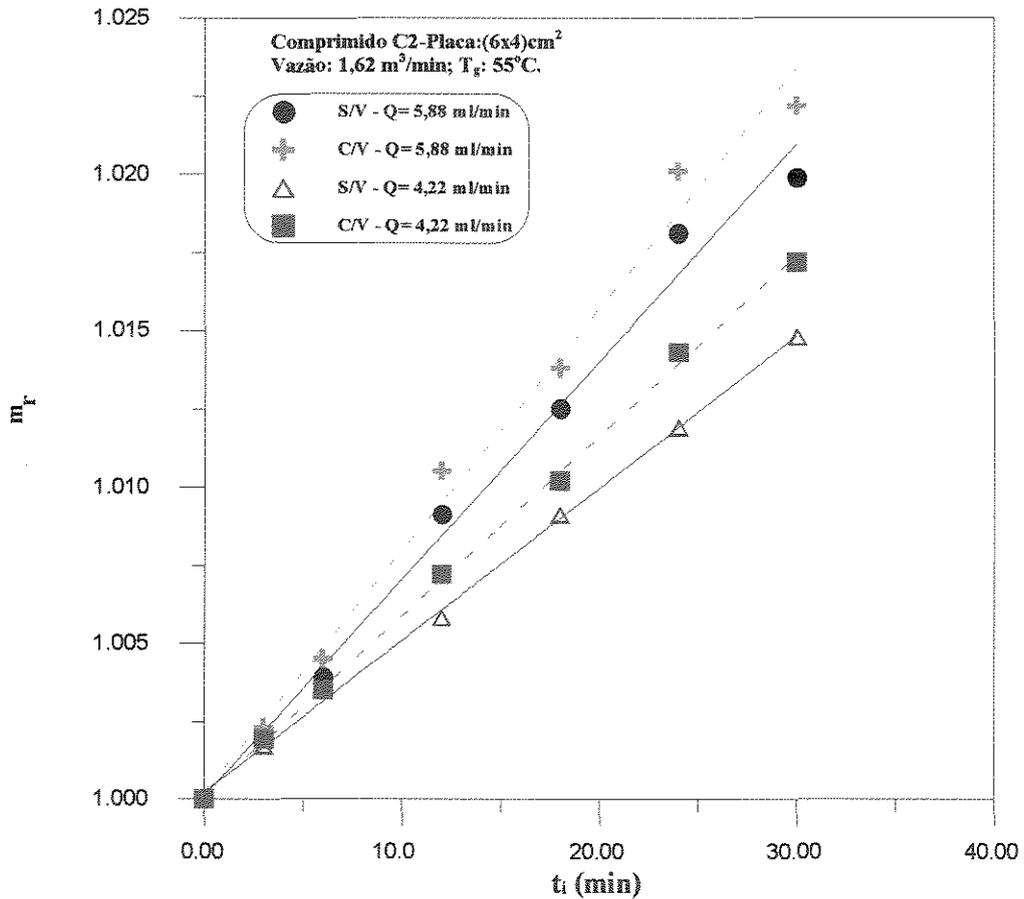


Figura 4.28 - Aumento da massa dos comprimidos C2 em função do tempo de processo.

Tabela 4.17 - Valores das taxas de recobrimento dos comprimidos, K (min<sup>-1</sup>) e da eficiência de adesão, η, para W<sub>s</sub> = 4,22 ml/min e 5,88 ml/min.

W <sub>s</sub> = 4,22 ml/min				W <sub>s</sub> = 5,88 ml/min			
S/V		C/V		S/V		C/V	
K.10 <sup>-4</sup>	η	K.10 <sup>-4</sup>	η	K.10 <sup>-4</sup>	η	K.10 <sup>-4</sup>	η
(min <sup>-1</sup> )	(%)	(min <sup>-1</sup> )	(%)	(min <sup>-1</sup> )	(%)	(min <sup>-1</sup> )	(%)
4,875	70,24	5,765	83,07	6,965	71,52	7,718	79,25

#### 4.4.6. - CONDIÇÕES DE ENCHARCAMENTO DO LEITO

À medida que se aumenta a vazão da solução de recobrimento, há o risco de se atingir o limite de capacidade de secagem do leito, e inicia-se um processo de encharcamento do mesmo, tornando-o inoperante. Para condições de leito de jorro estável, com uma vazão de ar constante, o fator que define o nível de secagem é a temperatura do ar.

Foram feitos ensaios em que se aumentou a vazão da suspensão de recobrimento, procurando atingir condições de operações críticas.

Os sintomas que antecedem o colapso de jorro devido ao encharcamento seguem um padrão típico. Nos primeiros instantes o movimento da carga no leito parece normal, mas à medida em que os comprimidos vão sendo recobertos, observa-se uma situação em que as partículas começam a frear seu movimento, embora o processo ainda seja operacional. Em dado instante, entretanto, percebe-se uma paralisação dos comprimidos junto as paredes laterais do leito. Neste mesmo momento, algumas partículas ao saírem pela fonte de jorro começam a aderir às paredes e finalmente toda a carga fica encharcada.

O amortecimento dos movimentos acontecia nas duas laterais do leito, e não apenas na posição junto ao atomizador. Em princípio, portanto o uso de 2 bicos atomizadores não deverá ser muito vantajoso em termos de aumento na vazão total da solução de recobrimento, mas é provável que a distribuição da fração de área coberta fique mais favorável.

Nos limites de encharcamento, portanto, a situação crítica não se define instantaneamente, mas leva alguns minutos para se estabelecer, e esse tempo pode servir de critério de estabilidade do leito.

Foram feitos ensaios para 4 níveis de temperatura do ar entre 40°C a 60°C, nos quais se mantinha vazões definidas de suspensão de recobrimento, e media-se o tempo necessário para atingir o encharcamento. Usou-se uma carga de 0,8 kg de comprimidos C2, e para estes casos, assumiu-se que o limite de 18 minutos indicava um processo permanentemente estável. Os ensaios foram feitos em duplicata.

A Tabela 4.18, apresenta valores de vazão da solução de recobrimento com o tempo de encharcamento,  $t_c$ , correspondendo ao tempo de paralização descrito acima.

Os resultados confirmam que para um mesmo sistema a temperatura do ar é a condição de operação que define a vazão máxima de suspensão de recobrimento e com isso a produção de comprimidos recobertos. À medida que se aumentava essa temperatura, a condição de operação estável era obtida com níveis mais altos de  $W_s$ . Observa-se também que a vibração dá maior estabilidade à operação, porque o tempo para o encharcamento é maior.

Infelizmente, devido as dificuldades no ajuste da vazão da bomba de suspensão, os valores limites de operação estável na Tabela 4.18 são conservativos. Não foi possível definir com maior precisão os limites reais de encharcamento para cada temperatura de ar, mas como primeira aproximação pode-se assumir uma relação linear entre o tempo e a vazão de encharcamento,  $Q_c$ . Os valores assim obtidos estão graficados na Figura 4.29 e indicam

claramente que a vibração pode ser um elemento importante para aumentar a capacidade de recobrimento do equipamento.

Tabela 4.18 - Vazão da solução de recobrimento,  $W_s$ , e tempo de encharcamento,  $t_e$ .  
 Carga: 0,8 kg; Comprimido C2; Vazão de ar de entrada:  $1,62 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $f = 10 \text{ Hz}$  e  $A = 8 \text{ mm}$ .

$W_s$ (ml/min)	$T_g$ (°C)	Tempo de encharcamento, $t_e$ (min)	
		S/V	C/V
3,08	40	18,00	18,00
4,22	40	5,75	8,25
5,88	40	1,78	2,87
5,88	50	18,00	18,00
6,68	50	9,27	13,35
9,65	50	1,55	2,75
5,88	55	18,00	18,00
6,68	55	11,42	15,93
9,65	55	2,60	4,07
5,88	60	18,00	18,00
6,68	60	18,00	18,00
9,65	60	5,67	10,10

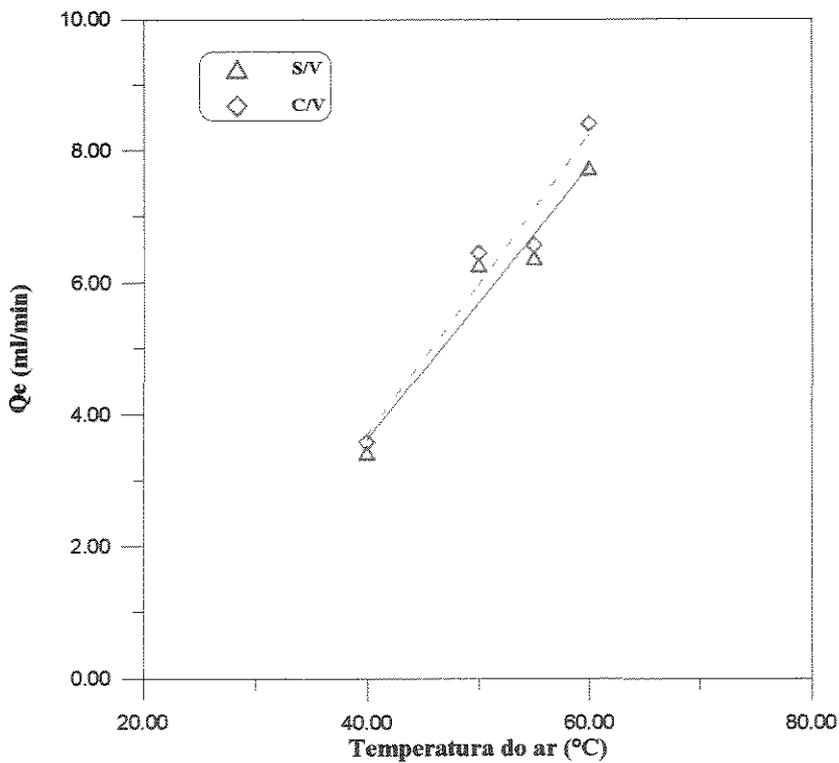


Figura 4.29 Variação da vazão limite da suspensão de recobrimento com a temperatura do gás.

## **CAPÍTULO 5**

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 - CONCLUSÕES

#### a - Com relação ao desenvolvimento do sistema experimental:

1 - A unidade experimental construída para o leito de jorro possibilitou visualizar, estudar e quantificar o efeito de parâmetros operacionais no recobrimento de partículas conseguindo-se uma boa movimentação dos comprimidos de forma e tamanho comerciais.

2 - A vibração da placa distribuidora do ar ( $f = 10$  Hz,  $A = 8$  mm), contribuiu para a movimentação do leito, mas não foi suficiente para produzir uma circulação dos sólidos sem o escoamento do ar.

3 - Verificou-se que das três bases inclinadas utilizadas, a que apresentou melhor uniformidade de movimento de sólidos sem e com vibração foi a placa distribuidora ( $6 \times 4$ ) cm<sup>2</sup>.

4 - Com as placas internas (*draft plates*), obteve-se um movimento uniforme de jorro para os três comprimidos estudados, e com isso evitou-se o problema de curto circuito, ou seja, garantiu-se que todos os comprimidos circulassem em ciclo no leito e se expusessem ao bico atomizador.

5 - O bico atomizador do tipo duplo fluido, mostrou-se eficiente na dispersão da suspensão de recobrimento a uma baixa pressão do ar. Sua instalação bem próxima a base do leito e com seu jato direcionado na região ascendente da zona de jorro não causou perturbação na dinâmica dos comprimidos.

6 - O uso do detetor de sinais de pulsos mostrou-se preciso para o levantamento dos dados experimentais da distribuição de tempo de ciclo em todos os ensaios estudados. O magneto comportou-se de maneira semelhante aos comprimidos ensaiados. Os resultados experimentais encontrados apresentaram boa concordância com os valores ajustados através do Método Spline Modificado.

7 - A formulação da suspensão de recobrimento (11% de sólidos) mostrou uma consistência adequada para o bombeamento e atomização, e grande eficiência de cobertura.

8 - Apesar do formato lenticular achatado dos comprimidos, obteve-se uma excelente situação de estabilidade no leito para todas as situações estudadas.

**b - Com relação a fluidodinâmica do leito:**

9 - A vibração agiliza a locomoção dos comprimidos junto as paredes inclinadas do leito.

10 - A vibração diminui a velocidade mínima de jorro em cerca de 10%, e o  $\Delta P_{\max}$  em cerca de 40%.

11 - Em todos os ensaios equivalentes o tempo médio de ciclo cresce com o aumento da carga inicial do leito e com o tamanho dos comprimidos e para uma mesma carga diminui em cerca de 10% com o auxílio da vibração.

12 - A área da base vibratória não influi no efeito da vibração sobre a velocidade mínima de jorro e sobre o tempo médio de ciclo se os *drafts plates* permanecerem na mesma posição.

13 - A amplitude de vibração é o parâmetro que mais influencia a fluidodinâmica do leito e a frequência de vibração deve ser próxima, mas inferior a da ressonância.

**c - Com relação ao recobrimento:**

14 - A eficiência de adesão cresce com o aumento da área da base distribuidora de ar.

15 - Não se observou efeito do tamanho do comprimido sobre a eficiência de adesão ,

16 - O leito vibro-jorrado é mais eficiente do que o não-vibrado, em todas as situações equivalentes. A vibração aumenta em mais de 10% a eficiência de adesão.

17 - A eficiência global de processo é maior para os comprimidos menores porque a taxa de circulação ( em área/tempo) é maior e a distribuição da fração da área do comprimido coberta em cada passagem é mais adequada

18 - O produto obtido apresentou uniformidade quanto ao recobrimento e boa resistência mecânica.

19 - A vazão da solução de recobrimento não afeta a eficiência de adesão, exceto próxima a vazão crítica de encharcamento quando a vibração dá maior estabilidade fluidodinâmica ao leito.

20 - A temperatura do ar foi o parâmetro de maior influência na vazão crítica limite da suspensão de recobrimento e portanto, na produção de comprimidos recobertos no equipamento.

## 5.2 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Esses estudos iniciais do processo de recobrimento de partículas em leito vibro-jorrado bidimensional apresentaram bons resultados. Assim o uso da vibração é promissor e acredita-se na necessidade de dar continuidade às pesquisas sobre este processo. Tem-se algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como:

- Ampliar os estudos fundamentais procurando maior conhecimento do processo e da técnica vibracional, visando uma transmissão mais eficiente da vibração ao leito.

- Realizar avaliações comparativas de desempenho de leitos com geometrias diferentes, por exemplo, leitos de base tronco-cônica ou cônica-cilíndrica, assim como estudos de ampliação de escala e processos contínuos multi-estágios.

- Utilizar mais de um bico atomizador posicionados junto a base do leito, com o objetivo de se obter maior eficiência de recobrimento.

- Aplicar o recobrimento em um leito misto jorro-fluidizado-vibrado como o de Finzer (1989).

- Realizar estudos com outras aplicações tecnológicas de processo, usando o leito vibro-jorrado bidimensional, tais como: revestimento em confeitos e balas; recobrimento de sementes e fertilizantes compostos assim como drageas homeopáticas, núcleos radioativos, etc.

- Nas avaliações comparativas determinar experimentalmente a distribuição da fração da área dos comprimidos coberta em um ciclo e usá-la como parâmetro fundamental para correlacionar dados de eficiência de recobrimento.

## APÊNDICES

## **APÊNDICE A**

**ROTÂMETRO PARA MEDIR A VAZÃO DE AR DE EXPANSÃO NO LEITO  
VIBRO-JORRADO BIDIMENSIONAL**

### A.1 - CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO DA LINHA DE CIRCULAÇÃO DE AR

O rotâmetro utilizado é da marca OMEL, modelo "T", constituído basicamente pelo tubo de vidro borossilicato e um flutuador de aço inoxidável. A sua escala é compatível aos limites de utilização nos experimentos.

Os valores da vazão no rotâmetro,  $Q_m$ , em kg/min, foram obtidos experimentalmente utilizando-se um medidor de fluxo de ar calibrado ( Meriam Laminar Flow Elements, USA modelo 50 M C2 ) colocado em série, a montante do rotâmetro, conforme Figura A.1.

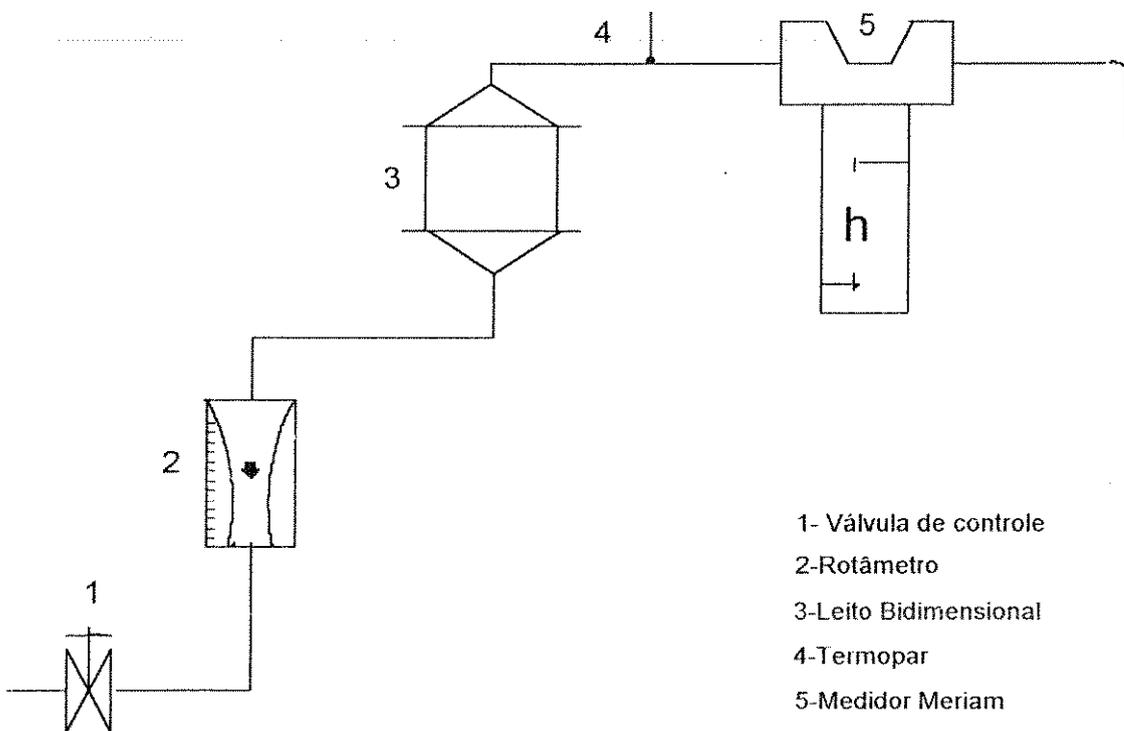


Figura A.1- Dispositivo utilizado para calibração do rotâmetro.

Para cada leitura  $R^*$ , no rotâmetro, ocorre uma queda de pressão no medidor Meriam e lê-se a vazão,  $Q_c^*$ , em  $m^3/min$ , pelo ábaco fornecido pelo fabricante do equipamento (condições padrões de  $21,1^\circ C$  e  $760\text{ mmHg}$ ).

A forma prática da equação recomendada pelo fabricante para o cálculo da vazão de ar experimental,  $Q_m$ , em kg/min, é a seguinte:

$$Q_m = Q_c^* \frac{760}{P_g} \frac{\bar{T}_g}{294,1} \frac{\bar{\mu}_g}{181,87} \rho_{ar} \quad [A.1]$$

onde:  $P_g$  é a pressão barométrica ( mmHg );  $\bar{T}_g$  é a temperatura média absoluta do ar de circulação ( K );  $\bar{\mu}_g$  é a viscosidade dinâmica média do ar em micropoise (  $\mu P$  ); e  $\bar{\rho}_{ar}$  é a massa específica média do ar nas condições experimentais (  $kg/m^3$  ).

O cálculo da viscosidade média do ar, foi através da equação apresentada por Mujumdar (1981):

$$\bar{\mu}_g = \left( \frac{(0,1458 + 10^{-5}) \bar{T}_g^{1,5}}{\bar{T}_g + 110,7} \right) 10^6 \quad [A.2]$$

O cálculo da massa específica média do ar, foi através da equação apresentada por Mujumdar (1981).

$$\bar{\rho}_{ar} = \left( 0,0028505 + \frac{340,9}{(\bar{T}_g + 273,15)} \right) 1,01325 \quad [A.3]$$

Com os valores de  $Q_m$ , correspondente a cada  $R^*$ , foi feita uma regressão, obtendo-se a equação [3.16], de coeficiente de determinação de 0,999.

$$Q_m = 0,329013 + 0,0586233.R^* \quad [3.16]$$

## **APÊNDICE B**

QUEDA DE PRESSÃO E VELOCIDADE DO GÁS NO LEITO,  
COM COMPRIMIDOS C1, C2 E C3, SEM E COM VIBRAÇÃO.

Tabela B1: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C1, sem e com vibração, placa distribuidora (4x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 14,0 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 16,4 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 18,6 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,44	0,92	0,61	0,44	0,63	0,57	0,44	0,92	0,61	0,44	0,73	0,61	0,44	0,90	0,77	0,44	0,76	0,68
0,58	1,11	0,68	0,58	0,84	0,71	0,58	1,33	0,68	0,58	1,05	0,81	0,58	1,25	0,78	0,58	1,11	0,74
0,71	1,34	0,73	0,71	0,94	0,78	0,71	1,96	0,82	0,71	1,25	0,93	0,71	1,70	0,89	0,71	1,40	0,95
0,83	0,92	0,84	0,83	0,79	0,70	0,83	1,28	0,87	0,83	0,84	0,76	0,83	2,15	1,13	0,83	1,80	1,10
0,97	0,66	0,61	0,97	0,69	0,65	0,97	0,90	0,68	0,97	0,71	0,65	0,97	2,54	1,44	0,97	1,13	0,85
1,03	0,64	0,59	1,03	0,67	0,64	1,03	0,67	0,62	1,03	0,67	0,63	1,03	2,89	0,82	1,03	0,76	0,68
1,18	0,59	0,55	1,18	0,61	0,54	1,18	0,59	0,56	1,18	0,63	0,60	1,18	3,48	0,72	1,18	0,72	0,66
1,29	0,51	0,49	1,29	0,49	0,46	1,29	0,56	0,49	1,29	0,56	0,49	1,29	0,75	0,63	1,29	0,61	0,58
1,44	0,54	0,43	1,44	0,39	0,40	1,44	0,53	0,49	1,44	0,46	0,42	1,44	0,63	0,57	1,44	0,54	0,52
1,57	0,44	0,40	1,57	0,40	0,36	1,57	0,49	0,42	1,57	0,40	0,38	1,57	0,57	0,45	1,57	0,54	0,45
1,71	0,38	0,35	1,71	0,34	0,30	1,71	0,50	0,44	1,71	0,38	0,33	1,71	0,50	0,45	1,71	0,44	0,37
1,84	0,35	0,33	1,84	0,34	0,27	1,84	0,42	0,39	1,84	0,39	0,34	1,84	0,53	0,44	1,84	0,40	0,37
1,96	0,32	0,29	1,96	0,27	0,25	1,96	0,45	0,38	1,96	0,35	0,34	1,96	0,45	0,40	1,96	0,41	0,36
2,09	0,31	0,26	2,09	0,26	0,24	2,09	0,37	0,35	2,09	0,37	0,33	2,09	0,48	0,43	2,09	0,37	0,35
2,23	0,32	0,28	2,23	0,25	0,24	2,23	0,38	0,36	2,23	0,36	0,34	2,23	0,45	0,43	2,23	0,38	0,36
2,29	0,31	0,27	2,29	0,26	0,26	2,29	0,37	0,37	2,29	0,35	0,35	2,29	0,46	0,46	2,29	0,37	0,37

Tabela B2: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C1, sem e com vibração, placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 12,5 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 15,3 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 17,1 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,46	0,64	0,58	0,46	0,60	0,52	0,46	1,15	0,68	0,46	0,72	0,65	0,46	0,84	0,74	0,46	0,68	0,62
0,58	0,97	0,72	0,58	0,78	0,70	0,58	1,55	0,78	0,58	0,93	0,80	0,58	1,24	0,94	0,58	0,82	0,72
0,73	1,18	0,91	0,73	0,88	0,76	0,73	1,78	0,89	0,73	0,98	0,86	0,73	2,24	0,99	0,73	0,89	0,79
0,87	0,95	0,88	0,87	0,73	0,68	0,87	0,87	0,79	0,87	0,85	0,78	0,87	2,88	0,80	0,87	1,25	0,86
1,08	0,68	0,63	1,08	0,65	0,61	1,08	0,78	0,72	1,08	0,75	0,70	1,08	0,85	0,71	1,08	0,79	0,76
1,21	0,66	0,62	1,21	0,59	0,50	1,21	0,74	0,68	1,21	0,71	0,64	1,21	0,77	0,69	1,21	0,70	0,65
1,35	0,64	0,59	1,35	0,52	0,48	1,35	0,64	0,60	1,35	0,63	0,59	1,35	0,75	0,65	1,35	0,64	0,63
1,48	0,63	0,58	1,48	0,52	0,45	1,48	0,59	0,53	1,48	0,53	0,48	1,48	0,64	0,56	1,48	0,63	0,56
1,63	0,59	0,56	1,63	0,51	0,46	1,63	0,59	0,53	1,63	0,50	0,45	1,63	0,57	0,51	1,63	0,55	0,45
1,77	0,53	0,50	1,77	0,47	0,43	1,77	0,54	0,48	1,77	0,48	0,45	1,77	0,53	0,48	1,77	0,50	0,44
1,86	0,46	0,44	1,86	0,42	0,39	1,86	0,51	0,40	1,86	0,43	0,39	1,86	0,50	0,46	1,86	0,46	0,40
2,05	0,45	0,43	2,05	0,41	0,39	2,05	0,47	0,41	2,05	0,40	0,36	2,05	0,48	0,43	2,05	0,42	0,38
2,18	0,45	0,45	2,18	0,42	0,42	2,18	0,43	0,40	2,18	0,36	0,34	2,18	0,51	0,43	2,18	0,43	0,36
----	----	----	----	----	----	----	----	2,32	0,44	0,40	2,32	0,37	0,33	2,32	0,50	0,44	2,32
----	----	----	----	----	----	----	----	2,45	0,43	0,43	2,45	0,36	0,36	2,45	0,47	0,47	2,45

Tabela B3: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C1, sem e com vibração, placa distribuidora (8x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 12,0 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 14,3 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 16,8 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,48	0,70	0,53	0,48	0,50	0,41	0,48	0,75	0,58	0,48	0,56	0,47	0,48	0,70	0,58	0,48	0,58	0,50
0,61	0,89	0,64	0,61	0,58	0,45	0,61	1,08	0,66	0,61	0,67	0,54	0,61	0,98	0,68	0,61	0,67	0,55
0,75	1,19	0,65	0,75	0,66	0,50	0,75	1,25	0,69	0,75	0,74	0,57	0,75	1,27	0,71	0,75	0,77	0,58
0,89	1,14	0,70	0,89	0,70	0,52	0,89	1,51	0,78	0,89	0,86	0,61	0,89	1,53	0,78	0,89	1,03	0,61
1,10	1,09	0,64	1,10	0,52	0,49	1,10	1,69	0,65	1,10	0,62	0,56	1,10	1,90	0,98	1,10	0,63	0,56
1,24	0,65	0,60	1,24	0,47	0,44	1,24	0,72	0,63	1,24	0,61	0,53	1,24	2,31	0,85	1,24	0,56	0,54
1,38	0,54	0,53	1,38	0,40	0,38	1,38	0,62	0,57	1,38	0,51	0,46	1,38	1,00	0,73	1,38	0,54	0,50
1,52	0,49	0,48	1,52	0,39	0,35	1,52	0,61	0,51	1,52	0,50	0,43	1,52	0,89	0,70	1,52	0,51	0,43
1,66	0,42	0,37	1,66	0,35	0,31	1,66	0,59	0,53	1,66	0,46	0,42	1,66	0,85	0,69	1,66	0,50	0,42
1,79	0,38	0,37	1,79	0,34	0,30	1,79	0,51	0,47	1,79	0,41	0,38	1,79	0,67	0,60	1,79	0,45	0,40
1,93	0,37	0,35	1,93	0,33	0,29	1,93	0,50	0,43	1,93	0,39	0,35	1,93	0,66	0,58	1,93	0,41	0,38
2,07	0,38	0,33	2,07	0,34	0,31	2,07	0,49	0,42	2,07	0,40	0,36	2,07	0,61	0,57	2,07	0,43	0,38
2,20	0,36	0,36	2,20	0,34	0,34	2,20	0,52	0,44	2,20	0,39	0,36	2,20	0,58	0,56	2,20	0,39	0,37
----	----	----	----	----	----	2,34	0,50	0,50	2,34	0,50	0,40	2,34	0,59	0,56	2,34	0,40	0,37
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	2,48	0,60	0,60	2,48	0,41	0,41

Tabela B4: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C2, sem e com vibração, placa distribuidora (4x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 15,2 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 18,2 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 19,0 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,44	0,58	0,54	0,44	0,70	0,61	0,44	0,81	0,65	0,44	0,70	0,63	0,44	0,90	0,60	0,44	0,80	0,60
0,58	0,90	0,62	0,58	0,79	0,67	0,58	1,10	0,81	0,58	0,72	0,65	0,58	1,53	0,80	0,58	1,20	0,81
0,71	1,29	0,65	0,71	0,81	0,73	0,71	1,40	0,93	0,71	0,85	0,72	0,71	1,90	0,90	0,71	1,60	0,85
0,83	1,60	0,56	0,78	0,96	0,77	0,83	1,80	0,96	0,83	1,10	0,74	0,83	2,30	0,95	0,83	2,00	0,90
0,97	0,76	0,53	0,83	0,83	0,72	0,97	2,43	0,93	0,97	1,50	0,81	0,97	2,60	1,00	0,97	2,20	0,92
1,03	0,61	0,49	0,91	0,76	0,70	1,03	1,80	0,90	1,03	1,00	0,76	1,03	2,90	1,10	1,03	2,30	0,95
1,18	0,54	0,46	0,97	0,71	0,66	1,11	1,10	0,87	1,11	0,81	0,67	1,18	3,10	1,20	1,11	2,40	0,97
1,29	0,51	0,44	1,03	0,68	0,62	1,18	0,80	0,72	1,18	0,72	0,61	1,29	3,50	1,30	1,18	2,45	0,98
1,44	0,41	0,31	1,18	0,63	0,58	1,24	0,65	0,60	1,24	0,64	0,56	1,44	3,80	1,00	1,24	2,50	1,05
1,57	0,25	0,22	1,29	0,51	0,46	1,29	0,60	0,55	1,29	0,60	0,51	1,57	2,80	0,50	1,29	2,50	1,07
1,71	0,22	0,20	1,44	0,31	0,27	1,37	0,51	0,43	1,37	0,58	0,34	1,71	1,40	0,40	1,37	2,20	1,10
1,84	0,18	0,15	1,57	0,24	0,20	1,44	0,46	0,40	1,44	0,56	0,3	1,84	1,20	0,39	1,44	0,70	0,50
1,96	0,19	0,16	1,71	0,16	0,15	1,51	0,41	0,37	1,51	0,53	0,28	1,96	0,40	0,35	1,57	0,50	0,35
2,09	0,18	0,18	1,84	0,14	0,13	1,57	0,37	0,34	1,57	0,40	0,26	2,09	0,35	0,30	1,71	0,30	0,24
----	----	----	1,96	0,15	0,13	1,64	0,32	0,30	1,64	0,32	0,24	2,23	0,38	0,32	1,84	0,28	0,18
----	----	----	2,09	0,16	0,16	1,71	0,29	0,27	1,71	0,20	0,18	2,37	0,38	0,38	1,96	0,25	0,20
----	----	----	----	----	----	1,77	0,25	0,23	1,84	0,16	0,15	----	----	----	2,09	0,27	0,18
----	----	----	----	----	----	1,84	0,20	0,19	1,96	0,15	0,14	----	----	----	2,23	0,28	0,22
----	----	----	----	----	----	1,96	0,19	0,19	2,09	0,15	0,14	----	----	----	2,37	0,28	0,28
----	----	----	----	----	----	2,09	0,2	0,18	2,23	0,16	0,15	----	----	----	----	----	----
----	----	----	----	----	----	2,23	0,18	0,18	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabela 4B5: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C2, sem e com vibração, placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 14,0 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 15,8 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 17,8 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,46	0,75	0,55	0,46	0,75	0,63	0,46	0,85	0,65	0,46	0,85	0,72	0,46	0,84	0,67	0,46	0,90	0,79
0,58	1,08	0,61	0,58	0,85	0,65	0,58	1,12	0,77	0,58	0,91	0,79	0,58	1,19	0,82	0,58	1,04	0,92
0,73	1,32	0,65	0,66	0,88	0,67	0,72	1,47	0,91	0,66	1,17	0,83	0,73	1,67	1,15	0,73	1,37	0,95
0,87	1,18	0,59	0,73	0,91	0,70	0,87	1,75	1,10	0,73	1,24	0,86	0,87	2,08	1,30	0,80	1,47	1,04
0,94	0,62	0,56	0,80	0,93	0,63	1,00	2,05	0,80	0,80	1,26	0,92	1,00	2,51	1,40	0,87	1,58	1,06
1,00	0,59	0,55	0,87	0,59	0,55	1,08	2,15	0,70	0,87	1,27	0,73	1,08	2,60	0,80	0,94	1,73	0,95
1,08	0,58	0,53	0,94	0,56	0,52	1,21	2,21	0,65	0,94	0,80	0,65	1,21	3,02	0,76	1,00	1,84	0,80
1,21	0,54	0,49	1,08	0,54	0,49	1,28	2,00	0,61	1,08	0,60	0,58	1,28	3,22	0,73	1,08	1,97	0,77
1,35	0,49	0,45	1,21	0,49	0,45	1,35	1,60	0,58	1,21	0,58	0,55	1,35	3,20	0,68	1,14	0,91	0,75
1,48	0,42	0,39	1,35	0,47	0,41	1,42	1,40	0,52	1,35	0,57	0,53	1,42	0,88	0,64	1,21	0,90	0,72
1,63	0,41	0,37	1,48	0,46	0,40	1,48	0,87	0,38	1,48	0,53	0,49	1,48	0,83	0,61	1,35	0,85	0,69
1,77	0,35	0,30	1,63	0,38	0,32	1,63	0,57	0,35	1,63	0,50	0,46	1,63	0,77	0,57	1,48	0,79	0,67
1,86	0,28	0,26	1,77	0,29	0,26	1,77	0,41	0,32	1,77	0,41	0,39	1,77	0,56	0,55	1,63	0,77	0,64
2,05	0,27	0,25	1,86	0,30	0,27	1,86	0,37	0,31	1,86	0,32	0,30	1,86	0,39	0,37	1,77	0,66	0,60
2,18	0,26	0,26	2,05	0,27	0,26	2,05	0,33	0,30	2,05	0,29	0,27	2,05	0,37	0,34	1,86	0,47	0,42
----	----	----	2,18	0,28	0,28	2,18	0,32	0,29	2,18	0,29	0,27	2,18	0,38	0,35	2,05	0,35	0,33
----	----	----	----	----	----	2,32	0,31	0,31	2,32	0,30	0,30	2,32	0,36	0,36	2,18	0,32	0,30
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	2,32	0,34	0,34

Tabela B6: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C2, sem e com vibração, placa distribuidora (8x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 13,2 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 14,8 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 17,1 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,48	0,50	0,41	0,48	0,55	0,47	0,48	0,40	0,46	0,48	0,61	0,47	0,48	0,59	0,44	0,48	0,49	0,54
0,61	0,92	0,49	0,55	0,62	0,49	0,61	1,07	0,55	0,61	0,72	0,51	0,61	0,99	0,65	0,61	0,61	0,65
0,68	1,13	0,56	0,61	0,65	0,53	0,75	1,27	0,59	0,68	0,75	0,53	0,75	1,22	0,72	0,75	0,87	0,69
0,75	1,18	0,57	0,68	0,67	0,56	0,89	1,53	0,57	0,75	0,78	0,58	0,89	1,52	0,75	0,83	1,12	0,78
0,89	1,25	0,59	0,75	0,69	0,62	1,03	1,98	0,69	0,83	0,83	0,70	1,03	1,85	0,77	0,89	1,15	0,83
0,96	1,22	0,63	0,82	0,70	0,59	1,10	2,13	0,71	0,89	0,89	0,73	1,10	2,21	0,78	0,94	1,18	0,85
1,03	1,12	0,59	0,89	0,72	0,57	1,24	2,11	0,58	0,94	0,88	0,71	1,24	2,45	0,70	1,10	1,31	0,96
1,10	0,97	0,56	1,03	0,72	0,55	1,31	1,82	0,55	1,10	0,71	0,65	1,31	2,67	0,70	1,24	0,85	0,75
1,24	0,78	0,51	1,10	0,63	0,51	1,38	1,79	0,54	1,24	0,60	0,62	1,38	2,75	0,68	1,38	0,70	0,63
1,38	0,65	0,48	1,24	0,55	0,48	1,45	1,74	0,51	1,38	0,57	0,55	1,45	2,86	0,65	1,52	0,65	0,59
1,52	0,50	0,44	1,38	0,52	0,45	1,52	0,63	0,47	1,52	0,54	0,49	1,52	2,90	0,63	1,66	0,60	0,54
1,66	0,47	0,41	1,52	0,51	0,43	1,59	0,53	0,46	1,66	0,50	0,45	1,66	0,75	0,61	1,79	0,51	0,44
1,79	0,43	0,40	1,66	0,48	0,39	1,66	0,52	0,45	1,79	0,47	0,40	1,79	0,61	0,54	1,93	0,49	0,41
1,93	0,37	0,34	1,79	0,42	0,35	1,79	0,46	0,43	1,93	0,40	0,37	1,93	0,49	0,45	2,07	0,39	0,36
2,07	0,35	0,32	1,93	0,34	0,30	1,93	0,44	0,39	2,07	0,39	0,38	2,07	0,45	0,43	2,20	0,37	0,34
2,20	0,34	0,32	2,07	0,32	0,31	2,07	0,41	0,40	2,20	0,37	0,37	2,20	0,43	0,41	2,34	0,38	0,35
2,34	0,34	0,34	2,20	0,30	0,29	2,20	0,39	0,37	2,34	0,39	0,39	2,34	0,44	0,42	2,48	0,37	0,37
---	----	----	2,34	0,31	0,31	2,34	0,40	0,40	----	----	----	2,48	0,44	0,44	----	----	----

Tabela B7: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C3, sem e com vibração, placa distribuidora (4x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 15,7 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 18,4 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 20,9 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,44	0,51	0,40	0,44	0,46	0,40	0,44	0,58	0,51	0,44	0,53	0,48	0,44	0,60	0,45	0,44	0,63	0,59
0,58	0,59	0,44	0,58	0,58	0,43	0,58	0,73	0,55	0,58	0,56	0,53	0,58	0,75	0,55	0,58	0,71	0,61
0,71	0,87	0,48	0,71	0,73	0,51	0,71	1,00	0,59	0,71	0,72	0,49	0,71	1,06	0,68	0,71	0,84	0,64
0,83	1,01	0,53	0,83	0,86	0,59	0,83	1,07	0,65	0,83	0,94	0,57	0,83	1,34	0,76	0,83	0,92	0,67
0,97	1,17	0,59	0,97	0,95	0,63	0,97	1,85	0,73	0,97	1,37	0,62	0,97	1,76	0,85	0,97	1,02	0,71
1,03	1,43	0,68	1,03	1,10	0,60	1,03	2,66	0,72	1,03	1,65	0,55	1,03	2,04	0,91	1,03	1,70	0,73
1,18	1,69	0,63	1,18	0,60	0,52	1,18	0,81	0,66	1,18	1,93	0,53	1,18	2,34	0,86	1,18	2,27	0,67
1,29	0,70	0,61	1,29	0,56	0,49	1,29	0,73	0,58	1,29	0,71	0,50	1,29	3,95	0,81	1,29	0,85	0,62
1,44	0,66	0,58	1,44	0,51	0,45	1,44	0,65	0,52	1,44	0,66	0,46	1,44	0,86	0,77	1,44	0,72	0,56
1,57	0,61	0,53	1,57	0,44	0,40	1,57	0,60	0,50	1,57	0,63	0,42	1,57	0,79	0,72	1,57	0,65	0,52
1,71	0,56	0,50	1,71	0,38	0,35	1,71	0,56	0,47	1,71	0,59	0,41	1,71	0,74	0,68	1,71	0,59	0,54
1,84	0,48	0,44	1,84	0,35	0,30	1,84	0,53	0,43	1,84	0,52	0,40	1,84	0,69	0,59	1,84	0,53	0,47
1,96	0,43	0,37	1,96	0,32	0,28	1,96	0,51	0,41	1,96	0,47	0,42	1,96	0,63	0,56	1,96	0,49	0,45
2,09	0,38	0,36	2,09	0,30	0,27	2,09	0,46	0,42	2,09	0,40	0,38	2,09	0,58	0,55	2,09	0,45	0,42
2,23	0,39	0,37	2,23	0,31	0,28	2,23	0,44	0,40	2,23	0,41	0,37	2,23	0,55	0,53	2,23	0,46	0,40
2,29	0,38	0,34	2,29	0,31	0,28	2,29	0,45	0,42	2,29	0,39	0,37	2,29	0,54	0,53	2,29	0,44	0,42
2,49	0,39	0,39	2,49	0,30	0,30	2,49	0,44	0,42	2,49	0,40	0,36	2,49	0,55	0,52	2,49	0,46	0,42
—	—	—	—	—	—	2,75	0,44	0,44	2,75	0,40	0,40	2,75	0,55	0,55	2,75	0,45	0,45

Tabela B8: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C3, sem e com vibração, placa distribuidora (6x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 14,4 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 16,9 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 18,6 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,46	0,73	0,50	0,46	0,51	0,44	0,46	0,79	0,70	0,46	0,46	0,4	0,46	1,08	0,77	0,46	0,61	0,51
0,58	0,97	0,52	0,58	0,53	0,49	0,58	0,89	0,72	0,58	0,58	0,49	0,58	1,36	0,79	0,58	0,66	0,52
0,73	1,17	0,57	0,73	0,65	0,47	0,73	0,96	0,76	0,73	0,73	0,51	0,73	1,65	0,83	0,73	0,81	0,55
0,87	1,58	0,61	0,87	0,85	0,50	0,87	1,10	0,81	0,87	0,87	0,58	0,87	2,07	0,89	0,87	1,00	0,57
1,00	0,75	0,63	1,00	1,05	0,56	1,00	1,80	0,87	1,00	1,03	0,71	1,00	2,40	0,93	1,00	1,17	0,60
1,08	0,73	0,59	1,08	1,08	0,49	1,08	2,60	0,80	1,08	1,13	0,63	1,08	2,50	0,96	1,08	1,55	0,64
1,21	0,76	0,57	1,21	0,58	0,46	1,21	0,87	0,64	1,21	1,34	0,57	1,21	2,84	0,68	1,21	2,01	0,57
1,35	0,65	0,53	1,35	0,56	0,48	1,35	0,9	0,62	1,35	0,68	0,59	1,35	3,45	0,63	1,35	0,60	0,50
1,48	0,59	0,49	1,48	0,49	0,44	1,48	0,75	0,56	1,48	0,64	0,54	1,48	0,94	0,59	1,48	0,63	0,52
1,63	0,55	0,47	1,63	0,44	0,40	1,63	0,73	0,58	1,63	0,57	0,49	1,63	0,83	0,55	1,63	0,56	0,45
1,77	0,53	0,44	1,77	0,40	0,36	1,77	0,67	0,53	1,77	0,52	0,43	1,77	0,74	0,58	1,77	0,49	0,43
1,86	0,49	0,42	1,86	0,41	0,37	1,86	0,57	0,48	1,86	0,55	0,47	1,86	0,78	0,54	1,86	0,46	0,38
2,05	0,48	0,41	2,05	0,37	0,34	2,05	0,59	0,44	2,05	0,47	0,40	2,05	0,65	0,59	2,05	0,48	0,41
2,18	0,40	0,37	2,18	0,38	0,35	2,18	0,53	0,46	2,18	0,42	0,38	2,18	0,57	0,53	2,18	0,43	0,35
2,32	0,41	0,37	2,32	0,36	0,33	2,32	0,48	0,45	2,32	0,42	0,36	2,32	0,53	0,48	2,32	0,40	0,37
2,45	0,39	0,38	2,45	0,37	0,33	2,45	0,45	0,43	2,45	0,44	0,39	2,45	0,55	0,51	2,45	0,42	0,34
2,59	0,41	0,41	2,59	0,36	0,36	2,59	0,47	0,47	2,59	0,42	0,42	2,59	0,54	0,54	2,59	0,43	0,43

Tabela B9: Queda de pressão e velocidade do gás para o leito com comprimidos C3, sem e com vibração, placa distribuidora (8x4) cm<sup>2</sup>.

Carga = 0,8 kg ; H <sub>0</sub> = 13,8 cm						Carga = 1,1 kg ; H <sub>0</sub> = 16,1 cm						Carga = 1,3 kg ; H <sub>0</sub> = 18,2 cm					
S/V			C/V			S/V			C/V			S/V			C/V		
v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa	v <sub>g</sub> m/s	ΔP <sub>C</sub> kPa	ΔP <sub>D</sub> kPa
0,48	0,53	0,43	0,48	0,46	0,40	0,48	0,50	0,47	0,48	0,64	0,54	0,48	0,64	0,57	0,48	0,53	0,48
0,61	0,75	0,45	0,61	0,50	0,42	0,61	0,62	0,55	0,61	0,68	0,56	0,61	0,73	0,61	0,61	0,58	0,54
0,75	1,05	0,50	0,75	0,53	0,45	0,75	0,69	0,63	0,75	0,74	0,61	0,75	0,84	0,66	0,75	0,64	0,59
0,89	1,29	0,53	0,89	0,59	0,51	0,89	0,80	0,74	0,89	0,81	0,67	0,89	1,05	0,72	0,89	0,70	0,64
1,03	1,47	0,55	1,03	0,77	0,57	1,03	0,98	0,78	1,03	0,87	0,70	1,03	1,16	0,79	1,03	0,76	0,69
1,10	0,77	0,61	1,10	0,57	0,50	1,10	1,90	0,84	1,10	0,98	0,56	1,10	1,44	0,83	1,10	0,90	0,74
1,24	0,73	0,57	1,24	0,53	0,47	1,24	2,63	0,81	1,24	0,63	0,57	1,24	1,98	0,88	1,24	1,39	0,80
1,38	0,66	0,52	1,38	0,51	0,45	1,38	0,86	0,78	1,38	0,58	0,52	1,38	2,96	0,83	1,38	0,69	0,72
1,52	0,65	0,53	1,52	0,49	0,42	1,52	0,84	0,64	1,52	0,60	0,54	1,52	0,91	0,78	1,52	0,63	0,67
1,66	0,61	0,48	1,66	0,44	0,37	1,66	0,77	0,60	1,66	0,57	0,50	1,66	0,83	0,72	1,66	0,67	0,61
1,79	0,54	0,51	1,79	0,46	0,38	1,79	0,68	0,53	1,79	0,53	0,47	1,79	0,79	0,75	1,79	0,61	0,54
1,93	0,48	0,45	1,93	0,41	0,36	1,93	0,72	0,56	1,93	0,55	0,49	1,93	0,74	0,70	1,93	0,64	0,58
2,07	0,51	0,41	2,07	0,37	0,33	2,07	0,65	0,51	2,07	0,51	0,44	2,07	0,77	0,63	2,07	0,59	0,53
2,20	0,45	0,37	2,20	0,34	0,30	2,20	0,58	0,47	2,20	0,46	0,43	2,2	0,69	0,58	2,20	0,55	0,48
2,34	0,43	0,39	2,34	0,35	0,32	2,34	0,53	0,45	2,34	0,43	0,38	2,34	0,63	0,55	2,34	0,51	0,46
2,48	0,41	0,36	2,48	0,36	0,33	2,48	0,51	0,48	2,48	0,44	0,42	2,48	0,60	0,57	2,48	0,54	0,49
2,63	0,43	0,43	2,63	0,36	0,36	2,63	0,53	0,53	2,63	0,45	0,45	2,63	0,61	0,61	2,63	0,54	0,54

## **APÊNDICE C**

**LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DOS  
DADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE CICLO.**

```

{*****}
{
  Lynx Tecnologia Eletronica Ltda.
  (C) 1994,1995
  Projeto : AqDados 4.08
  Modulo  : Realiza estatistica de intervalo para distribuição de tempo de ciclo
  ABR/95
{*****}
{$I-}
uses
  Crt,
  Acesso;

const
  NumClasses = 200;
  Resolucao = 0.1; { em segundos }

var
  Histogram: array [0..NumClasses] of integer;
  Limiar : real;
  Histerese: real;
  TotalPulsos: longint;
  S : string;
  DataHora: string;
  ArqAqd : string;
  ArqD : text;
  I,K : integer;
  Ch : char;
  x,y : integer;
  R : real;

(* ----- *)

procedure Aborta;
begin
  Writeln;
  Writeln('----- Erro -----');
  Writeln;
  Halt;
end; (* of Abort *)

(* ----- *)

procedure Wr(S : string);

```

```

begin
  Write(ArqD,S);
  if IOResult<>0 then Aborta;
end; (* of Wr *)

(* ----- *)

procedure Ajusta(var S : string);
begin
  if Length(S)=1
  then
    S:= '0'+S;
end; (* of Ajusta *)

(* ----- *)

procedure CalculaEstatist (Limiar: real);
var NumCanais : integer;
    DtHrL      : TpDtHr;
    DataHora   : string[30];
    Kr         : real; { constante p/ calcular instante de amostragem}
    NovoPulso  : boolean;
    UmPulso    : boolean; { ja ocorreu um pulso ? }
    TempoAnter: real; { tempo anterior }
    DeltaT     : real;

procedure Classifica (DT: real);
var
  i: longint;
begin
  i:= trunc (DT/Resolucao);
  if i>=NumClasses then
    i:= NumClasses;
  inc (Histogram [i]);
  inc (TotalPulsos);
end;

begin
  PrimDado(0.0);
  if ErroAqd then Aborta;

  with TemDadosAD do
  begin
    NumCanais:= NoCnAtivos;
    DtHrL     := DtHr;
    Kr        := 1.0;
  end;

  Wr("Dados analisados do arquivo AqDados: '+ArqAqd+'###13#10);

```

```

(* -- Loop de análise estatística de intervalos -- *)

NovoPulso:= false;
UmPulso := false;
TotalPulsos:= 0;
while not FimDados do
begin
  (* -- Escreve instante -- *)
  if not NovoPulso and (DadoR (InvOffsetAD[1]) > Limiar)
  then begin
    NovoPulso:= true;
    if UmPulso
    then begin
      DeltaT:= Tempo - TempoAnter;
      TempoAnter:= Tempo;
      Classifica (DeltaT);
    end
    else begin
      TempoAnter:= Tempo;
      UmPulso := true;
    end;
  end;
  if NovoPulso and (DadoR (InvOffsetAD[1]) < (Limiar-Histerese))
  then begin
    NovoPulso:= false;
  end;
  ProxDado;
  if ErroAqd then Aborta;
end;
Writeln (ArqD,'Total de pulsos : ', TotalPulsos:10);
Writeln (ArqD, 'Classe Tempo(s) Contagem ');
for i:= 0 to NumClasses do
begin
  Writeln(ArqD, i: 7, i*Resolucao: 8:2, Histogram[i]:5);
end;
end; (* of CalculaEstat *)

(* ----- *)

begin
  Writeln;
  Writeln('---- Calcula estatística de intervalo entre pulsos ----');
  Writeln;
  ArqTpCnf := false;
  Write ('Nome do arquivo do AqDados : ');
  Readln(ArqAqd);
  AbreArquivo(ArqAqd);
  if ErroAqd then Aborta;

```

```
R:= TemDadosAD.NoAmostras;
if R = 0
then begin
  WriteLn('----- N,,o h dados a analisar ');
  Halt;
end;
Write ('Nome do arquivo com estatisticas, sem extensão (xxxxxxx.DAT) : ');
Readln(S);
Assign(ArqD,S+'.DAT');
Reset(ArqD);
if IOResult=0
then begin
  Write('----- este arquivo ja" existe; sobrep"e dados ? (S/N) : ');
  repeat Ch:= ReadKey until Ch in ['S','N','s','n'];
  if Ch in ['N','n'] then Halt;
  Close(ArqD);
  writeln;
end;
Rewrite(ArqD);
if IOResult<>0 then Aborta;

Write ('Qual o limiar para detecção do pulso :');
Readln ( Limiar);
Write ('Qual a histerese para detecção do pulso :');
Readln ( Histerese);
Writeln;
Writeln;
Writeln('---- Aguarde ...');
CalculaEstatist (Limiar);
if ErroAqd then Aborta;
Writeln('---- Ok ----');
Close(ArqD);
end.
```

## **APÊNDICE D**

### **MÉTODO SPLINE MODIFICADO ( MSM )**

## D - MÉTODO SPLINE MODIFICADO.

### D.1- CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO SPLINE CÚBICO.

O Método Spline iniciou com Schoenberg (1946) e desde então, tem-se encontrado várias formas de sua aplicação.

Em Desenho, um spline é uma régua flexível usada para desenhar uma curva através de um conjunto de pontos. Matematicamente, spline é um conjunto de funções dependentes entre si, onde cada função é definida entre pontos nodais consecutivos. Essa dependência das funções spline é expressa pela igualdade das derivadas em ambos os lados dos pontos nodais, exceto no primeiro e último. As funções passam pelos pontos experimentais que as definem. Com estas restrições, uma curva lisa é obtida. Assume-se que existe um número suficiente de pontos experimentais para representar adequadamente o fenômeno.

Determinação dos parâmetros das spline cúbicas.

Chamando  $f_k(x)$  a função cúbica que se refere ao elemento  $x_k \leq x \leq x_{k+1}$   
 $k = 1, \dots, N - 1$ , temos dos critérios da definição:

As funções splines devem passar pelos experimentais que as definem.

$$f_k(x_k) = Y_k \quad \text{e} \quad f_k(x_{k+1}) = Y_{k+1} \quad [\text{D.1}]$$

$$k = 1, \dots, N - 1.$$

A primeira e a segunda derivada das funções devem ser iguais em ambos os lados dos pontos nodais, exceto no primeiro e no último.

$$f'_{k-1}(x_k) = f'_k(x_k) \quad [\text{D.2}]$$

$$k = 2, \dots, N - 1$$

$$f''_{k-1}(x_k) = f'_k(x_k) \tag{D.3}$$

$$k = 2, \dots, N-1$$

Como as funções de interpolação são cúbicas, a segunda derivada das função é linear, logo:

$$f''_k(x) = C_k \left( \frac{x_{k+1} - x}{L_{k+1}} \right) + C_{k+1} \left( \frac{x - x_k}{L_{k+1}} \right), \text{ onde:} \tag{D.4}$$

$$L_{k+1} = x_{k+1} - x_k \qquad x_k \leq x \leq x_{k+1} \tag{D.5}$$

$$C_k = f''_k(x_k) \qquad k = 1, \dots, N-1 \tag{D.6}$$

Integrando-se duas vezes e fazendo  $A_k = Y_k = f_k(x_k)$ , obtém-se:

$$f_k(x) = \frac{C_k}{6L_{k+1}}(x_{k+1} - x)^3 + \frac{C_{k+1}}{6L_{k+1}}(x - x_k)^3 + \left[ \frac{A_{k+1}}{L_{k+1}} - \frac{C_{k+1}L_{k+1}}{6} \right] (x - x_k) \left[ \frac{A_k}{L_{k+1}} - \frac{C_kL_{k+1}}{6} \right] (x_{k+1} - x). \tag{D.7}$$

Rearranjando:

$$f_k(x) = \left( \frac{C_{k+1} - C_k}{6L_{k+1}} \right) (x - x_k)^3 + \frac{C_k}{2} (x - x_k)^2 + \left[ \left( \frac{A_{k+1} - A_k}{L_{k+1}} \right) - \left( \frac{C_{k+1} + 2C_k}{6} \right) L_{k+1} \right] (x - x_k) + A_k \tag{D.8}$$

A primeira derivada é:

$$f'_k(x) = \left( \frac{C_{k+1} - C_k}{2L_{k+1}} \right) (x - x_k)^2 + C_k (x - x_k) + \left( \frac{A_{k+1} - A_k}{L_{k+1}} \right) - \left( \frac{C_{k+1} - 2C_k}{6} \right) L_{k+1} \tag{D.9}$$

Da igualdade da primeira derivada nos pontos nodais, exeto no primeiro e no último, chega-se ao conjunto de restrições:

$$\phi_k = \frac{L_k}{6} C_{k-1} + \left( \frac{L_k + L_{k+1}}{3} \right) C_k + \frac{L_{k+1} C_{k+1}}{6} - \frac{A_{k-1}}{L_k} + \left( \frac{1}{L_k} + \frac{1}{L_{k+1}} \right) A_k - \frac{A_{k+1}}{L_{k+1}} = 0 \quad [D.10]$$

$$k = 2, \dots, N-1$$

Neste caso, tem-se  $N$  parâmetros  $C_k$  a determinar e  $N-2$  restrições  $\phi_k$ , de forma que o sistema linear apresenta dois graus de liberdade.

Estes dois graus de liberdade podem ser eliminados se for definido o comportamento da primeira ou da segunda derivada nos pontos nodais extremos. Normalmente não há informação do comportamento das derivadas nos pontos extremos, de forma que são criadas condições de contorno para estes pontos.

Assumindo que nos pontos nodais extremos a segunda derivada é nula, tem-se o Método Spline cúbico natural.

Considerando que no primeiro e no último elemento as funções spline são preferencialmente parabólicas, chega-se facilmente que  $C_1 = C_2$  e  $C_{N-1} = C_N$ .

Definindo a matriz tridiagonal  $\Phi_C$  e os vetores  $\hat{C}$  e  $F$ :

$$\Phi_C = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial \phi_1}{\partial C_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \phi_N}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial \phi_N}{\partial C_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{L_2}{6} & \left( \frac{L_2 + L_3}{3} \right) & \frac{L_3}{6} & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \frac{L_{N-1}}{6} & \left( \frac{L_{N-1} + L_N}{3} \right) & \frac{L_N}{6} \\ 0 & \dots & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad [D.11]$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_N \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Y_1}{L_2} - \left( \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) Y_2 + \frac{Y_3}{L_3} \\ \vdots \\ \frac{Y_{N-2}}{L_{N-1}} - \left( \frac{1}{L_{N-1}} + \frac{1}{L_N} \right) Y_{N-1} + \frac{Y_N}{L_N} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [D.12]$$

Temos que:

$$\Phi_C \cdot \hat{C} = F. \quad [D.13]$$

$$\hat{C} = \Phi_C^{-1} \cdot F. \quad [D.14]$$

## D.2- CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO SPLINE MODIFICADO

Além das restrições de alisamento do Método Spline, foi inserido um conjunto de restrições, as funções de convergências  $F_i = 0$ , o que além de proporcionar estabilidade na resolução do sistema não-linear do Método Spline Modificado, simplifica o desenvolvimento matemático do algoritmo.

Dado um conjunto de N pontos experimentais com erros sujeitos a distribuições normais com desvios padrão  $(\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i})$ , constroem-se intervalos com três ou mais pontos aplicando-se o Método Spline acoplado ao Método da Máxima Verossimilhança, que corresponde a minimização da função objetiva S, equação [D.15], aplicada a todos os pontos experimentais. Ao se trabalhar com dois pontos por intervalo, existirá somente uma curva spline cúbica, de forma que não são levados em consideração os desvios padrão das medidas neste intervalo.

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ W_{x_i} (X_i - x_i)^2 + W_{y_i} (Y_i - y_i)^2 \right] \quad [D.15]$$

onde,

$$W_{Y_i} = \frac{1}{\sigma_{Y_i}^2} \qquad W_{X_i} = \frac{1}{\sigma_{X_i}^2} \qquad i = 1, \dots, N. \quad [D.16]$$

$(X_i, Y_i)$  = pontos experimentais.

$(x_i, y_i)$  = pontos ajustados.

Definem-se as restrições de convergência abaixo aplicadas a todos os pontos experimentais:

$$F_i = y_i - f_k(x_i) = 0 \qquad [D.17]$$

$$i = 1, \dots, N.$$

$$k = 1, \dots, K.$$

$$x_{(k)} \leq x_i \leq x_{(k+1)},$$

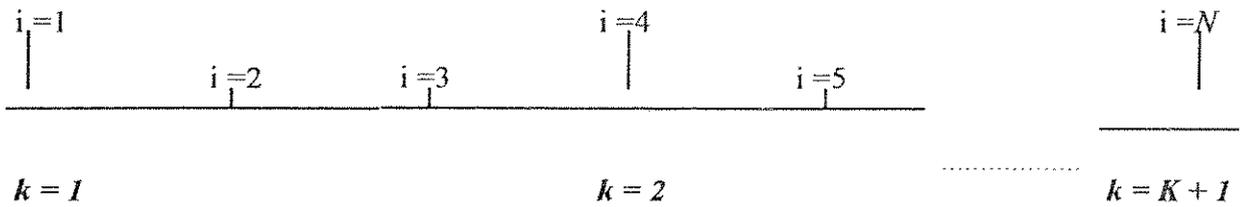
onde  $f_k(x_i)$  é a função spline cúbica, equação [D.8], e  $(x_i, y_i)$  são os valores médios das variáveis dependente e independente ajustados no ponto  $i$ . As funções spline cúbicas são reescritas:

$$f_k(x_i) = \left( \frac{C_{k+1} - C_k}{6L_{k+1}} \right) (x_i - x_{(k)})^3 + \frac{C_k}{2} (x_i - x_{(k)})^2 + \left[ \left( \frac{A_{k+1} - A_k}{L_{k+1}} \right) - \left( \frac{C_{k+1} + 2C_k}{6} \right) L_{k+1} \right] (x_i - x_{(k)}) + A_k \qquad [D.18]$$

$$A_k = f_k(x_{(k)}) \qquad C_k = f_k''(x_{(k)}) \qquad x_{(k)} \leq x_i \leq x_{(k+1)}$$

$$L_k = x_{(k)} - x_{(k-1)} \qquad i = 1, \dots, N \qquad k = 1, \dots, K.$$

Os valores  $x_{(k)}$  são escolhidos como sendo fronteiras dos intervalos conforme esquema abaixo:



O conjunto de equações de alisamento do Método Spline, é dado por:

$$\phi_k = \frac{L_k}{6} C_{k-1} + \left( \frac{L_k + L_{k+1}}{3} \right) C_k + \frac{L_{k+1}}{6} C_{k+1} - \frac{A_{k-1}}{K_k} + \left( \frac{1}{L_k} + \frac{1}{L_{k+1}} \right) A_k - \frac{A_{k+1}}{L_{k+1}} = 0 \quad [D.19]$$

$k = 2, \dots, K.$

O ajuste é feito pela minimização de [D.15] com as restrições [D.17] e [D.19] em relação aos parâmetros A e C e aos valores médios de  $(x_i, y_i)$ . Estas minimizações podem ser feitas utilizando-se multiplicações de Lagrange.

### D.3 - CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS

O Método Spline Modificado é um método de ajuste de curvas que envolve duas variáveis  $x^{(1)} = x$  e  $x^{(2)} = y$  ( $Q = 2$ ), sujeitas a duas restrições ou funções ( $M = 2$ ). Ele é representado por um modelo matemático composto por  $K$  funções  $f_k(x)$  relacionadas entre si.

De [D.17] nota-se que as restrições  $F_i = 0$  são definidas utilizando-se as funções spline cúbicas  $f_k(x)$ . Devido a isto, temos que nos pontos nodais, exceto o primeiro e o último, são duas funções que definem este ponto, ou seja :

Para  $x = x_{(k)}$  :

$$y(x_{(k)}) = f_{k-1}(x_{(k)}) = f_k(x_{(k)}) \quad [D.20]$$

Isto equivale a se acrescentar mais uma restrição nestes pontos nodais, pois as restrições  $F_i$ , neste caso, podem ser definidas de duas maneiras.

Para  $x = x_{(k)}$  :

$$F_i = y_i - f_{k-1}(x^{(k)}) = 0 \tag{D.21}$$

ou

$$F_i = y_i - f_k(x^{(k)}) = 0 \tag{D.22}$$

O problema é simplificado aplicando-se a condição abaixo a estes pontos:

$$f(x^{(k)}) = f_{k-1}(x^{(k)}) = f_k(x^{(k)}) = \frac{1}{2} [f_{k-1}(x^{(k)}) + f_k(x^{(k)})] \tag{D.23}$$

$k = 2, \dots, K.$

Desta forma, as funções de convergência  $F_i = 0$  são definidas agora por apenas uma função spline cúbica  $f_k(x)$ , independente do ponto ser, ou não, extremo de intervalo.

Minimização em relação aos parâmetros A:

$$\frac{\partial S}{\partial A_j} + \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial A_j} + \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = 0 \tag{D.24}$$

$j = 1, \dots, K+1$

onde  $\alpha_i, \lambda_k$  são multiplicadores de Lagrange.

Como  $S = S(x, y)$ :

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial A_j} + \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = 0 \tag{D.25}$$

$j = 1, \dots, K + 1.$

Como  $F_i = y_i - f_k(x_i)$ , tem-se que:

$$\frac{\partial F_i}{\partial A_j} = -\frac{\partial f_k(x_i)}{\partial A_j} \quad [\text{D.26}]$$

Para  $j = k - 1$  :

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = -\frac{1}{L_k} \quad [\text{D.27}]$$

Para  $j = k$  :

$$\frac{\partial F_i}{\partial A_j} = \frac{(x_i - x_{(k)})}{L_{k+1}} - 1 \quad [\text{D.28}]$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = \frac{1}{L_k} + \frac{1}{L_{k+1}} \quad [\text{D.29}]$$

Para  $j = k+1$  :

$$\frac{\partial F_i}{\partial A_j} = \frac{(x_i - x_{(k)})}{L_{k+1}} \quad [\text{D.30}]$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = -\frac{1}{L_{k+1}} \quad [\text{D.31}]$$

- Para  $j \neq k, k+1$  :

$$\frac{\partial F_i}{\partial A_j} = 0 \quad [\text{D.32}]$$

- Para  $j \neq k - 1, k, k + 1$  :

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial A_j} = 0. \quad [D.33]$$

Minimização em relação aos parâmetros C:

Analogamente aos parâmetros A:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial C_j} + \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{\partial \phi_k}{\partial C_j} = 0 \quad [D.34]$$

$$j = 1, \dots, K + 1.$$

Como  $F_i = y_i - f_k(x_i)$ , tem-se que:

$$\frac{\partial F_i}{\partial C_j} = - \frac{\partial f_k(x_i)}{\partial C_j}. \quad [D.35]$$

Para  $j = k - 1$  :

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial C_j} = \frac{L_k}{6}. \quad [D.36]$$

Para  $j = k$  :

$$\frac{\partial F_i}{\partial C_j} = \frac{(x_i - x_{(k)})^3}{6L_{k+1}} - \left( \frac{x_i - x_{(k)}}{2} \right) + \frac{L_{k+1}}{3}(x_i - x_{(k)}). \quad [D.37]$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial C_j} = \frac{L_k + L_{k+1}}{3}. \quad [D.38]$$

Para  $j = k + 1$ :

$$\frac{\partial F_i}{\partial C_j} = \frac{(x_i - x_{(k)})^3}{6I_{k+1}} + \frac{L_{k+1}(x_i - x_{(k)})}{6}. \quad [D.39]$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial C_j} = \frac{L_{k+1}}{6}. \quad [D.40]$$

Para  $j \neq k, k + 1$ :

$$\frac{\partial F_i}{\partial C_j} = 0 \quad [D.41]$$

Para  $j \neq k - 1, k, k + 1$ :

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial C_j} = 0 \quad [D.42]$$

Minimização em relação a  $x_i$ :

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial x_j} + \sum_{k=2}^K \lambda_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_j} = 0 \quad [D.43]$$

$$j = 1, \dots, N.$$

Como  $\Phi = \Phi ( A, C )$ ,

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial x_j} = 0 \quad [D.44]$$

$$j = 1, \dots, N.$$

- Para  $j = i$ :

$$\frac{\partial S}{\partial x_j} = -W_{x_i} (X_i - x_i). \quad [D.45]$$

$$\alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial x_j} = \alpha_i F_{x_i} \quad [D.46]$$

onde:

$$F_{x_i} = \frac{\partial (y_i - f_k(x_i))}{\partial x_i} = -\frac{\partial f_k(x_i)}{\partial x_i}. \quad [D.47]$$

- Para  $j \neq i$ :

$$\frac{\partial S}{\partial x_j} = \alpha_i \frac{\partial F_i}{\partial x_j} = 0. \quad [D.48]$$

logo:

$$-W_{x_i} (X_i - x_i) + \alpha_i F_{x_i} = 0. \quad [D.49]$$

$i = 1, \dots, N$ .

Temos que:

$$F_{xi} = -\left(\frac{C_{k+1} - C_k}{2L_{k+1}}\right)(x_i - x_{(k)})^2 - C_k(x_i - x_{(k)}) - \left(\frac{A_{k+1} - A_k}{L_{k+1}}\right) + \left(\frac{C_{k+1} + 2C_k}{6}\right)L_{k+1} \quad [D.50]$$

Minimização em relação a  $y_i$  :

Analogamente a  $x_i$  :

$$W y_i (Y_i - y_i) + \alpha_i F y_i = 0. \quad [D.51]$$

$$i = 1, \dots, N,$$

onde:

$$F y_i = \frac{\partial (y_i - f_k(x_i))}{\partial y_i} = 1, \quad [D.52]$$

logo:

$$- W y_i (Y_i - y_i) + \alpha_i = 0. \quad [D.53]$$

$$i = 1, \dots, N.$$

O sistema de equações formado por [D.17] , [D.19] , [D.25] , [D.34] , [D.49] e [ D.53] pode ser colocado na forma matricial compacta através da definição das seguintes matrizes:

$$\sum Y = \begin{bmatrix} \sigma_{Y_1}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{Y_N}^2 \end{bmatrix} \quad \sum X = \begin{bmatrix} \sigma_{Y_1}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_{Y_N}^2 \end{bmatrix} \quad [D.54]$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_{k+1} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_{k+1} \end{bmatrix} \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_k \end{bmatrix} \quad [D.55]$$

$$\epsilon_x = \begin{bmatrix} X_1 - x_1 \\ \vdots \\ X_N - x_N \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad \epsilon_y = \begin{bmatrix} Y_1 - y_1 \\ \vdots \\ Y_N - y_N \end{bmatrix} \quad [D.56]$$

$$F_{\Lambda} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial A_{k+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial A_{k+1}} \end{bmatrix} \quad F_C = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial C_{k+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial C_{k+1}} \end{bmatrix} \quad [D.57]$$

$$\Phi_{\Lambda} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_2}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial \phi_2}{\partial A_{k+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \phi_k}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial \phi_k}{\partial A_{k+1}} \end{bmatrix} \quad \Phi_C = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_2}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial \phi_2}{\partial C_{k+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \phi_k}{\partial C_1} & \dots & \frac{\partial \phi_k}{\partial C_{k+1}} \end{bmatrix} \quad [D.58]$$

Na forma matricial as equações [D.17] são reescritas:

$$F = y + F_{\Lambda} \cdot A + F_C \cdot C = 0 \quad [D.59]$$

De [D.19]:

$$\Phi = \Phi_{\Lambda} \cdot A + \Phi_C \cdot C = 0 \quad [D.60]$$

De [D.25]:

$$F'_{\Lambda} \cdot \alpha + \Phi'_{\Lambda} \cdot \lambda = 0 \quad [D.61]$$

De [D.34]:

$$F'_{C} \cdot \alpha + \Phi'_{C} \cdot \lambda = 0 \quad [D.62]$$

De [D.53]:

$$\epsilon_y - \Sigma_y \cdot \alpha = 0 \quad [D.63]$$

De [D.49]:

$$\epsilon_x - \Sigma_x \cdot F_x \cdot \alpha = 0 \quad \dots \quad [D.64]$$

As estimativas  $\hat{A}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  dadas pelo conjunto de equações [D.59 a D.64] dos parâmetros A e C e dos valores médios de x e y serão sempre estimativas viciadas devido a não linearidade do sistema.

**D.4 - EXEMPLOS PARA AS EQUAÇÕES DAS CURVAS ALISADAS DA FIGURA 4.14**

Tem-se a equação [D.8]:

$$f_k(x) = \left( \frac{C_{k+1} - C_k}{6L_{k+1}} \right) (x - x_k)^3 + \frac{C_k}{2} (x - x_k)^2 + \left[ \left( \frac{A_{k+1} - A_k}{L_{k+1}} \right) - \left( \frac{C_{k+1} + 2C_k}{6} \right) L_{k+1} \right] (x - x_k) + A_k \quad [D.8]$$

A partir dos valores dos extremos do intervalo do ajuste k, da Tabela 4.7a, Calcula-se as equações a seguir:

**a) SEM VIBRAÇÃO**

Para k = 1

$x_1 = 1,5006; C_1 = -0,6937; A_1 = 0,0061; L_2 = x_2 - x_1$

$x_2 = 4,5005; C_2 = 0,1350; A_2 = 0,1632; L_2 = 3,0000$

Substituindo os valores acima na equação[D.8], obtém-se:

$f_1(x) = 0,046x^3 - 0,66x^2 + 0,78x + 1,49$

Para k = 2

$x_2 = 4,5005; C_2 = 0,1350; A_2 = 0,1632; L_3 = x_3 - x_2$

$x_3 = 6,5000; C_3 = 0,0064; A_3 = 0,0285; L_3 = 1,9995$

Substituindo os valores acima na equação[D.8], obtém-se:

$f_2(x) = 0,011x^3 + 0,22x^2 - 1,44x + 3,29$

Para  $k = 3$

$$x_3 = 6,5000; C_3 = 0,0064; A_3 = 0,0285; L_4 = x_4 - x_3$$

$$x_4 = 8,5000; C_4 = 0,0062; A_4 = 0,0049; L_4 = 2,0000$$

Substituindo os valores acima na equação[D.8], obtém-se:

$$f_3(x) = -1,67 \cdot 10^{-5} x^3 - 3,53 \cdot 10^{-3} x^2 - 0,07x + 0,36$$

onde:

$$f_1(x) \text{ é válida em } x_1 < x < x_2$$

$$f_2(x) \text{ é válida em } x_2 < x < x_3$$

$$f_3(x) \text{ é válida em } x_3 < x < x_4$$

## b) COM VIBRAÇÃO

Para  $k = 1$

$$x_1 = 1,5027; C_1 = -0,6451; A_1 = 0,4969; L_2 = x_2 - x_1$$

$$x_2 = 4,5054; C_2 = 0,1204; A_2 = 0,1554; L_2 = 3,0027$$

Substituindo os valores acima na equação[D.8], obtém-se:

$$f_1(x) = 0,04x^3 - 0,52x^2 - 1,26x + 1,07$$

Para  $k = 2$

$$x_2 = 4,5054; C_2 = 0,1204; A_2 = 0,1554; L_3 = x_3 - x_2$$

$$x_3 = 8,4999; C_3 = -0,0482; A_3 = 0,0010; L_3 = 3,9945$$

Substituindo os valores acima na equação[D.8], obtém-se:

$$f_2(x) = -7,03 \cdot 10^{-3} x^3 - 0,16x^2 - 1,16x + 2,13$$

onde:

$$f_1(x) \text{ é válida em } x_1 < x < x_2$$

$$f_2(x) \text{ é válida em } x_2 < x < x_3$$

## APÊNDICE E

TABELAS E GRÁFICOS DE TEMPO MÉDIO DE CICLO E  
A PERCENTAGEM DE OCORRÊNCIA DOS ENSAIOS DOS  
COMPRIMIDOS C1, C2 E C3, USANDO AS PLACAS  
DISTRIBUIDORAS (6X4) cm<sup>2</sup> E (8X4) cm<sup>2</sup>

Tabela E.1- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.1.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO: (Nº PULSOS: 362)				COM VIBRAÇÃO: (Nº PULSOS: 371)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5000	0,0220	1,0000	0,0209	1,5000	0,0520	1,0000	0,0519
2,5000	2,5000	0,4530	1,0000	0,4530	2,5000	0,4910	1,0000	0,4920
3,5000	3,4997	0,2210	1,0000	0,2196	3,4999	0,2150	1,0000	0,2146
4,5000	4,5001	0,1160	1,0000	0,1177	4,5051	0,1050	1,0000	0,1062
5,5000	5,4999	0,0830	1,0000	0,0807	5,4999	0,0670	1,0000	0,0630
6,5000	6,5000	0,0520	1,0000	0,0508	6,5001	0,0300	1,0000	0,0355
7,5000	7,5000	0,0300	1,0000	0,0300	7,5000	0,0220	0,3000	0,0198
8,5000	8,5000	0,0220	1,0000	0,0206	8,5000	0,0170	1,0000	0,0175

Tabela E.1a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.1.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5006	0,2096	-1,6952	1	1,5000	0,0519	-1,8721
2	3,4997	0,2196	0,3628	2	3,4999	0,2146	0,4370
3	4,5001	0,1177	0,0048	3	4,5001	0,1062	-0,0166
4	8,5000	0,0206	0,0134	4	5,4999	0,0063	0,0206
---	---	---	---	5	8,5000	0,0174	0,0065

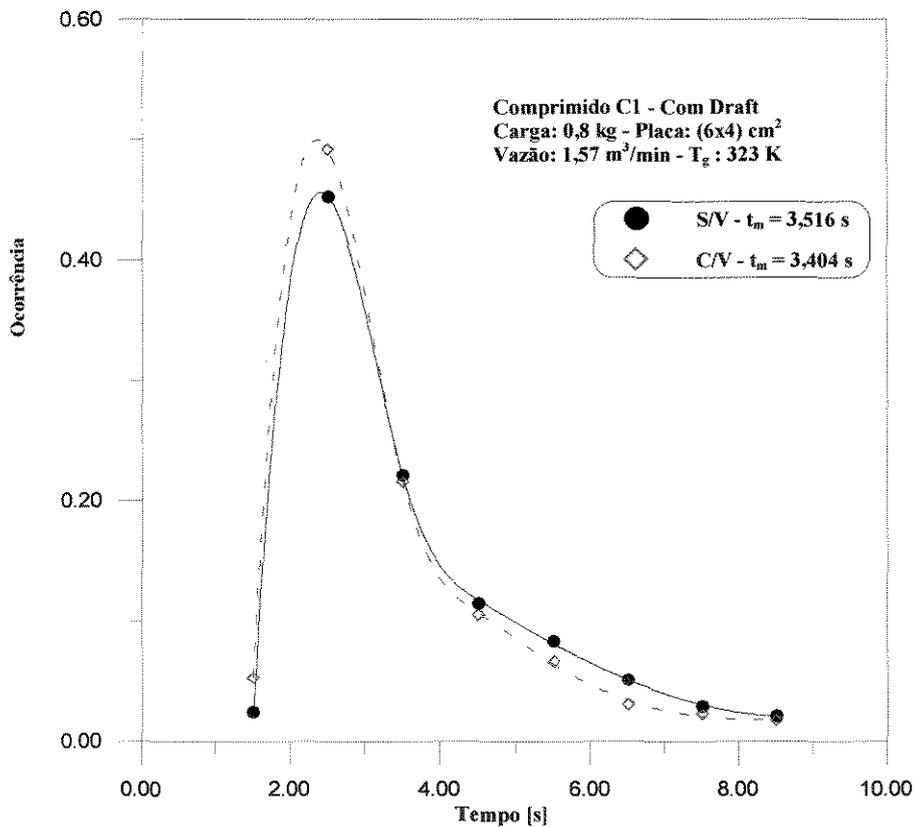


Figura E.1- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.2- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.2.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 283)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 348)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5008	0,0280	1,0000	0,0184	1,5000	0,0230	1,0000	0,0223
2,5000	2,4947	0,0950	1,0000	0,1343	2,5000	0,2580	1,0000	0,2581
3,5000	3,5052	0,3140	1,0000	0,2538	3,4999	0,4190	1,0000	0,3943
4,5000	4,5013	0,2540	1,0000	0,2757	4,5051	0,1290	1,0000	0,1857
5,5000	5,5036	0,1340	1,0000	0,1636	5,4999	0,0630	0,3000	0,0552
6,5000	6,5001	0,0710	1,0000	0,0728	6,5001	0,0430	5,0000	0,0306
7,5000	7,4990	0,0420	0,5000	0,0311	7,5000	0,0230	1,0000	0,0223
8,5000	8,5000	0,0210	1,0000	0,0202	8,5000	0,0170	1,0000	0,0144
9,5000	9,4999	0,0210	0,1500	0,0218	9,5000	0,0120	0,3000	0,0103
10,5000	10,5000	0,0180	0,1500	0,0176	10,5000	0,0120	0,5000	0,0138

Tabela E.2a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.2.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5008	0,0184	0,0995	1	1,5001	0,0223	0,3403
2	4,5013	0,2757	-0,1939	2	3,4986	0,3943	-0,5401
3	5,5036	0,0636	0,0676	3	4,5126	0,1857	0,2198
4	10,5000	0,0176	0,0242	4	6,5000	0,0306	-0,0031
---	---	---	---	5	10,5000	0,0138	-0,0109

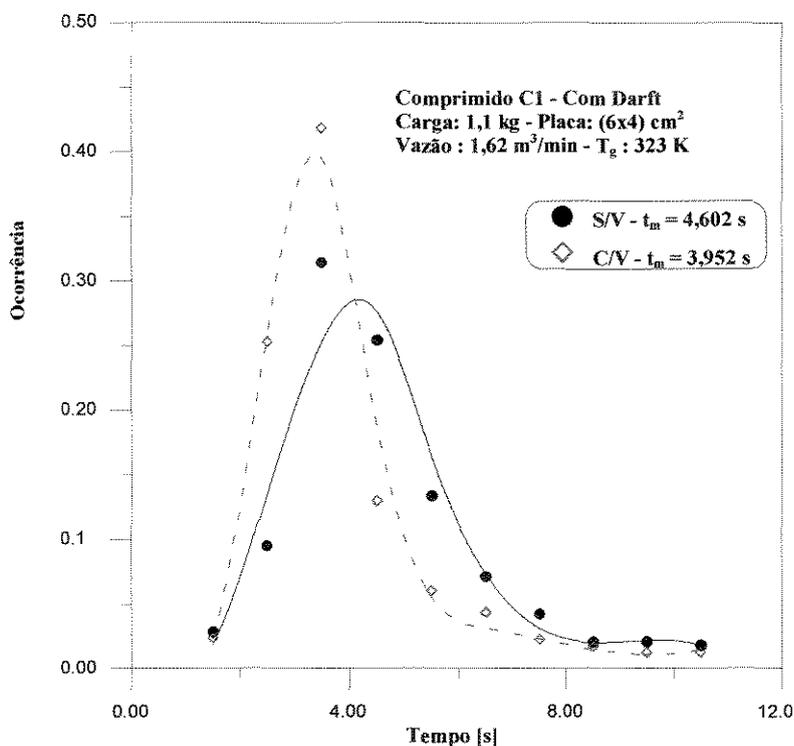


Figura E.2- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.3- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.3.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 257)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 299)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5312	0,0070	0,3000	0,0030	2,4948	0,0370	1,0000	0,0417
3,5000	3,4709	0,1910	1,0000	0,2740	3,4993	0,5320	1,0000	0,4932
4,5000	4,4637	0,3930	0,3000	0,3676	4,5179	0,2110	1,0000	0,2300
5,5000	5,5342	0,1550	0,4000	0,1913	5,5029	0,0770	1,0000	0,1032
6,5000	6,4949	0,0970	1,0000	0,0961	6,4956	0,0430	1,0000	0,0412
7,5000	7,5000	0,0660	1,0000	0,0672	7,5004	0,0330	0,1000	0,0330
8,5000	8,5009	0,0470	1,0000	0,0472	8,4996	0,0270	0,1000	0,0266
9,5000	9,4998	0,0280	1,0000	0,0264	9,4999	0,0270	1,0000	0,0162
10,5000	10,5000	0,0110	1,0000	0,0104	10,5000	0,0070	0,5000	0,0078
11,5000	11,5000	0,0040	1,0000	0,0052	11,5000	0,0070	1,0000	0,0076

Tabela E.3a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.3.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5312	0,0030	-0,6661	1	2,4948	0,0417	-1,4801
2	5,5342	0,1913	0,1200	2	4,5179	0,2800	0,1819
3	6,4949	0,0960	0,0798	3	7,5004	0,0330	-0,0100
4	7,5000	0,6717	-0,0066	4	11,5000	0,0076	-0,0141
5	11,5000	0,0052	0,0164	—	—	—	—

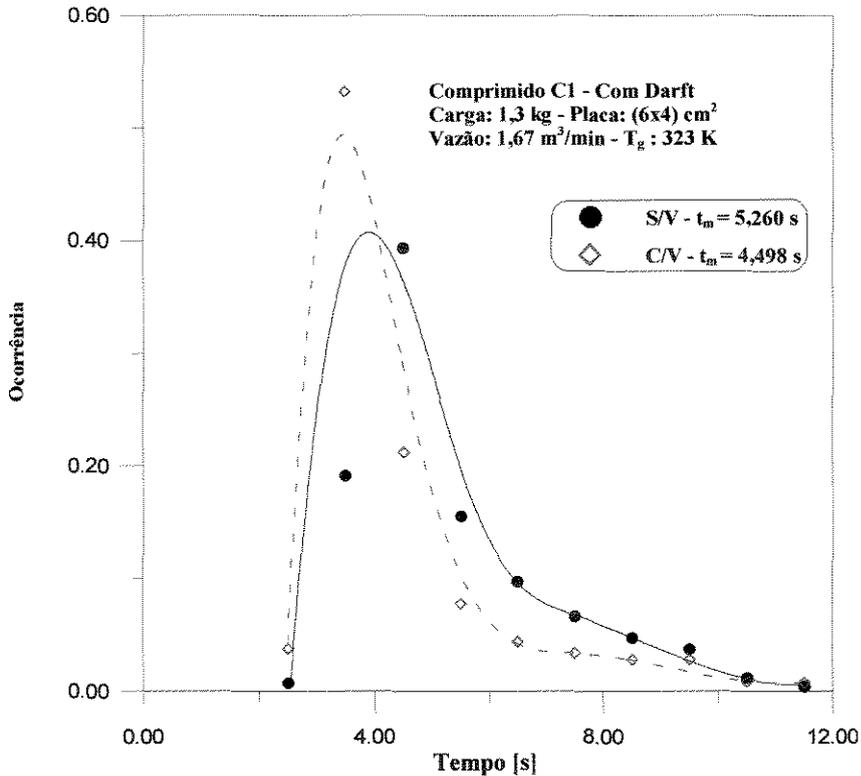


Figura E.3- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.4- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.4.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 348)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 385)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,4997	0,0520	1,0000	0,0525	1,5004	0,0260	1,0000	0,0256
2,5000	2,5002	0,3560	1,0000	0,3515	2,5002	0,4880	1,0000	0,4908
3,5000	3,4974	0,2870	1,0000	0,2673	3,4967	0,2520	1,0000	0,2388
4,5000	4,5042	0,1090	1,0000	0,1551	4,5010	0,0930	1,0000	0,1095
5,5000	5,5003	0,0770	1,0000	0,0819	5,5002	0,0550	1,0000	0,0603
6,5000	6,4999	0,0430	1,0000	0,0383	6,4997	0,0420	1,0000	0,0305
7,5000	7,4992	0,0320	0,5000	0,0171	7,4999	0,0210	1,0000	0,0149
8,5000	8,5000	0,0260	1,0000	0,0112	8,5000	0,0130	1,0000	0,0087
9,5000	9,5000	0,0090	0,1000	0,0099	9,5000	0,0050	0,3000	0,0067
10,500	10,500	0,0090	0,1000	0,0086	10,500	0,0050	0,3000	0,0042

Tabela E.4a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.4.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,4997	0,0525	-0,8137	1	1,5004	0,0256	-1,7996
2	3,4974	0,2673	0,0456	2	3,4967	0,2388	0,3591
3	10,5000	0,0086	0,0089	3	4,5010	0,1095	0,0242
---	---	---	---	4	10,5000	0,0042	-0,0056

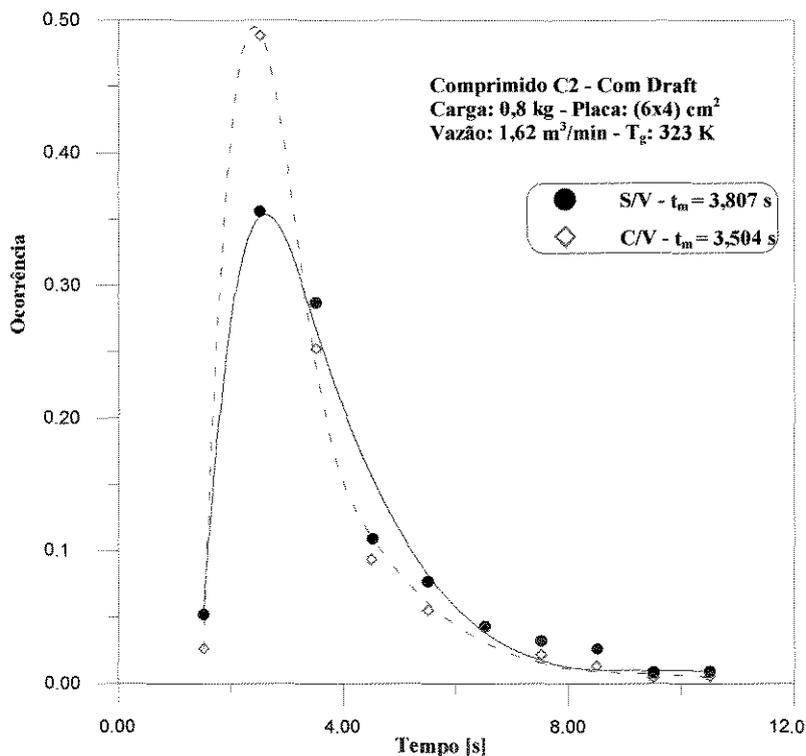


Figura E.4- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.5- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.5.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 276)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 282)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5004	0,0760	1,0000	0,0754	2,4988	0,2450	1,0000	0,2471
3,5000	3,5001	0,4240	1,0000	0,4281	3,4980	0,4390	1,0000	0,4225
4,5000	4,4975	0,2720	1,0000	0,2600	4,5098	0,1560	1,0000	0,2010
5,5000	5,5017	0,0910	1,0000	0,1079	5,4970	0,0780	0,5000	0,0672
6,5000	6,4996	0,0510	0,5000	0,0477	6,4998	0,0425	1,0000	0,0327
7,5000	7,5000	0,0290	1,0000	0,0346	7,5005	0,0170	0,1500	0,0178
8,5000	8,5000	0,0290	1,0000	0,0272	8,5000	0,0100	1,0000	0,0072
9,5000	9,5000	0,0180	1,0000	0,0185	9,5000	0,0070	0,5000	0,0048
10,500	10,500	0,0110	1,0000	0,0109	10,500	0,0030	0,5000	0,0024

Tabela E.5a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.5.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5004	0,0754	-1,1777	1	2,4988	0,2471	-0,9820
2	4,4975	0,2600	0,1328	2	4,5098	0,2010	0,1998
3	6,4996	0,0477	0,0491	3	6,4998	0,0326	0,0027
4	7,5000	0,0346	-0,0035	4	10,5000	0,0048	-0,0088
5	10,500	0,0109	0,0033	—	—	—	—

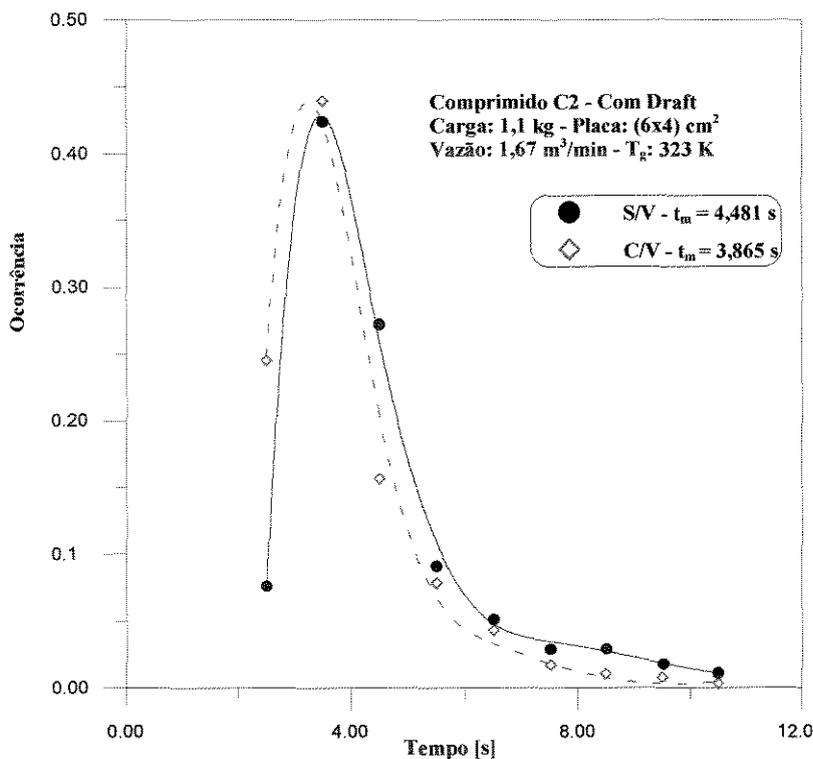


Figura E.5- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.6- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.6.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 238)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 247)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5026	0,0130	1,0000	0,0060	2,5004	0,1130	1,0000	0,1108
3,5000	3,4972	0,2100	1,0000	0,2362	3,4983	0,2310	1,0000	0,2483
4,5000	4,4990	0,2810	1,0000	0,2585	4,4984	0,2990	0,5000	0,2867
5,5000	5,4989	0,2020	1,0000	0,1878	5,5083	0,1290	1,0000	0,1594
6,5000	6,5009	0,1050	1,0000	0,1210	6,4974	0,0930	0,5000	0,0845
7,5000	7,5003	0,0672	1,0000	0,0745	7,4997	0,0520	0,5000	0,0479
8,5000	8,5000	0,0460	1,0000	0,0444	8,5002	0,0320	0,3000	0,0337
9,5000	9,5000	0,0290	1,0000	0,0268	9,5000	0,0200	1,0000	0,0227
10,5000	10,5000	0,0210	1,0000	0,0179	10,5000	0,0120	1,0000	0,0144
11,5000	11,5000	0,0160	1,0000	0,0138	11,5000	0,0120	0,5000	0,0088
12,5000	12,5000	0,0080	1,0000	0,0107	12,5000	0,0040	0,5000	0,0054

Tabela E.6a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.6.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5026	0,0060	-0,3261	1	2,5004	0,1108	-0,0366
2	5,4989	0,1878	0,0240	2	4,4984	0,2867	-0,1623
3	12,5000	0,0107	-0,0028	3	6,4974	0,0845	0,1179
---	---	---	---	4	7,4997	0,0479	0,0033
---	---	---	---	5	12,5000	0,0054	0,0020

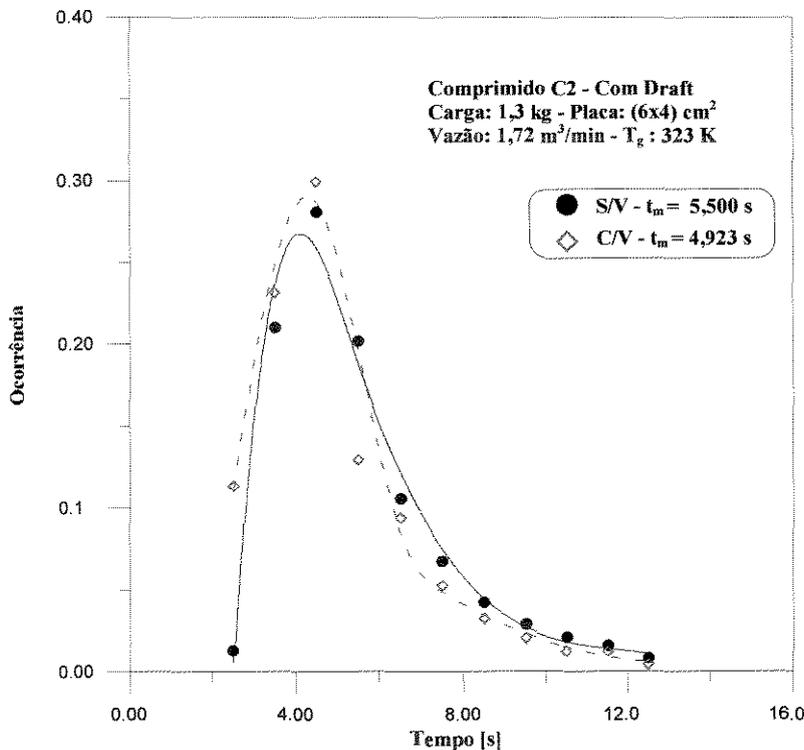


Figura E.6- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.7- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.7.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 213)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 241)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5007	0,0330	1,0000	0,0303	2,5006	0,0160	1,0000	0,0117
3,5000	3,4991	0,1830	1,0000	0,1938	3,4981	0,1610	1,0000	0,1746
4,5000	4,4998	0,2390	1,0000	0,2234	4,5011	0,2950	1,0000	0,2733
5,5000	5,5003	0,1830	1,0000	0,1901	5,5009	0,2530	1,0000	0,2651
6,5000	6,5001	0,1500	1,0000	0,1522	6,5009	0,1450	1,0000	0,1533
7,5000	7,5000	0,1170	1,0000	0,1157	7,4991	0,0940	1,0000	0,0748
8,5000	8,4999	0,0750	1,0000	0,0735	8,5003	0,0260	1,0000	0,0376
9,5000	9,5000	0,0180	1,0000	0,0187	9,4999	0,0100	1,0000	0,0072

Tabela E.7a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.7.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5007	0,0303	-0,2055	1	2,5006	0,0117	-0,0234
2	5,5003	0,1901	0,0085	2	5,5009	0,2651	-0,1479
3	9,5000	0,0187	-0,0198	3	6,5009	0,1533	0,0764
---	---	---	---	4	9,4999	0,0072	0,0282

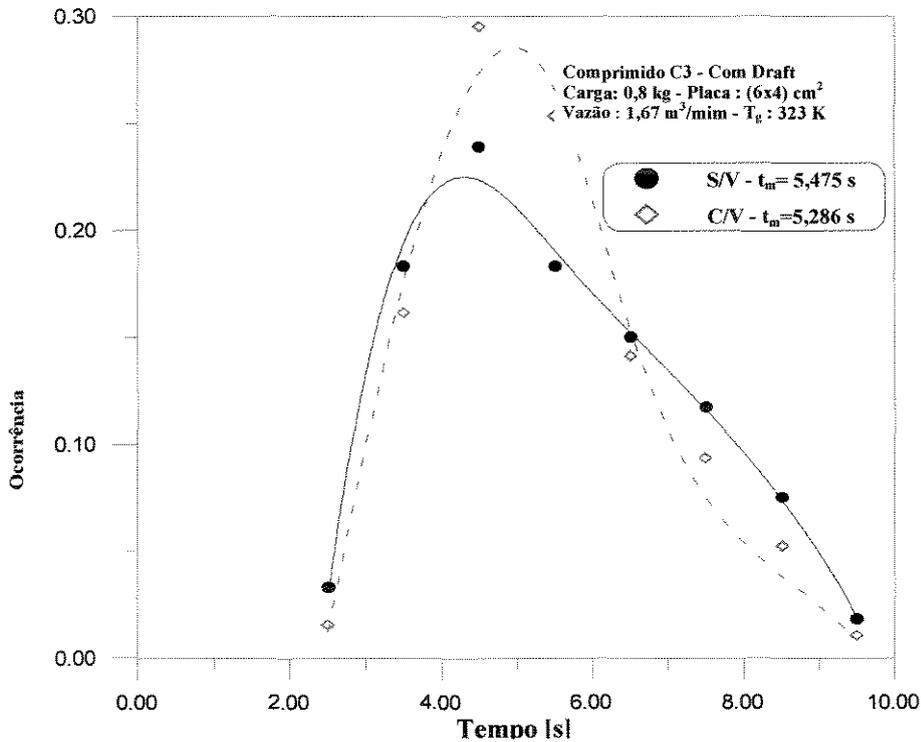


Figura E.7 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.8- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.8.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 177)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 238)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
3,5000	3,5005	0,0130	1,0000	0,0091	3,5168	0,0420	1,0000	0,0401
4,5000	4,4958	0,1240	1,0000	0,1526	4,4824	0,2100	1,0000	0,3105
5,5000	5,5035	0,2940	0,7000	0,2630	5,4867	0,3860	0,5000	0,3261
6,5000	6,5021	0,2200	1,0000	0,2571	6,5079	0,1600	1,0000	0,2015
7,5000	7,5027	0,1520	1,0000	0,1739	7,5020	0,0930	1,0000	0,1031
8,5000	8,4984	0,1020	1,0000	0,0810	8,4997	0,0590	1,0000	0,0521
9,5000	9,4996	0,0450	1,0000	0,0310	9,4999	0,0250	1,0000	0,0182
10,5000	10,500	0,0170	0,3000	0,0168	10,500	0,0080	1,0000	0,0059
11,5000	11,500	0,0170	0,3000	0,0185	11,500	0,0080	1,0000	0,0059
12,5000	12,500	0,0170	0,5000	0,0152	12,500	0,0080	0,5000	0,0087

Tabela E.8a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.8.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	3,5005	0,0091	0,0749	1	3,5168	0,0111	-0,4981
2	5,5035	0,2630	-0,1446	2	6,5079	0,2215	0,4974
3	8,4984	0,0081	0,0572	3	12,5000	0,0087	-0,0064
4	12,5000	0,0152	-0,2588	---	---	---	---

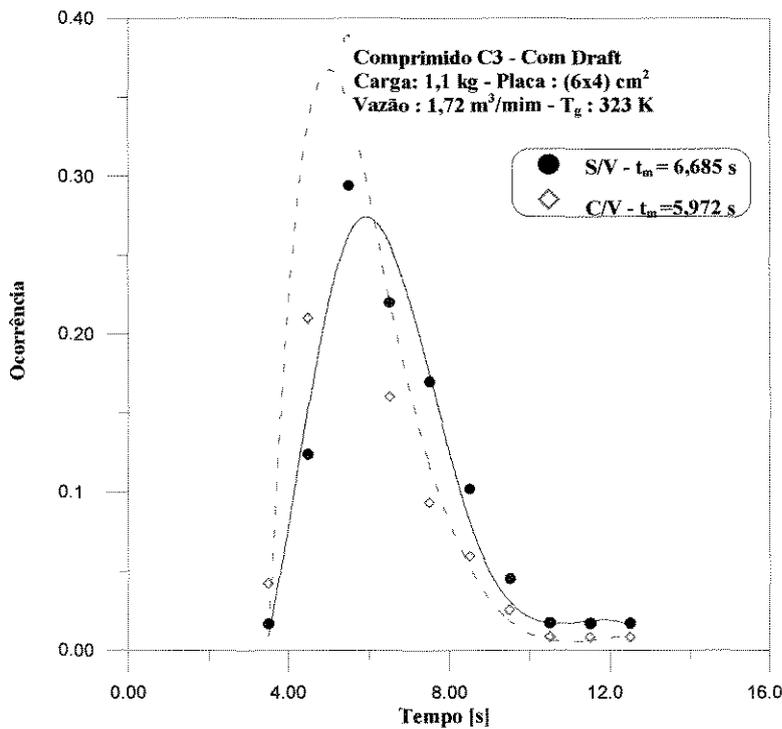


Figura E.8- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.9- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.9.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 175)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 207)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
4,5000	4,5000	0,0400	1,0000	0,0384	4,5000	0,1540	1,0000	0,1519
5,5000	5,4985	0,0970	1,0000	0,1099	5,5000	0,2850	1,0000	0,2837
6,5000	6,5020	0,2460	1,0000	0,2114	6,4998	0,1880	1,0000	0,1859
7,5000	7,5013	0,1830	1,0000	0,2134	7,5001	0,1100	1,0000	0,1116
8,5000	8,5004	0,1490	1,0000	0,1553	8,5000	0,0780	1,0000	0,0803
9,5000	9,4995	0,1140	1,0000	0,1034	9,4999	0,0640	1,0000	0,0592
10,5000	10,5000	0,0800	1,0000	0,0677	10,5000	0,0380	1,0000	0,0420
11,5000	11,5000	0,0400	1,0000	0,0442	11,5000	0,0290	1,0000	0,0287
12,5000	12,5000	0,0230	1,0000	0,0292	12,5000	0,0240	1,0000	0,0196
13,5000	13,5000	0,0170	1,0000	0,0185	13,5000	0,0140	1,0000	0,0147
14,5000	14,5000	0,0110	1,0000	0,0082	14,5000	0,0140	1,0000	0,0141

Tabela E.9a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.9.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	4,5000	0,0384	0,1993	1	4,5000	0,1519	-0,5413
2	6,5020	0,2114	-0,1407	2	6,4998	0,1859	0,8201
3	8,5004	0,1553	0,2023	3	8,5000	0,0803	-0,0037
4	14,5000	0,0082	-0,0035	4	14,5000	0,0141	0,0044

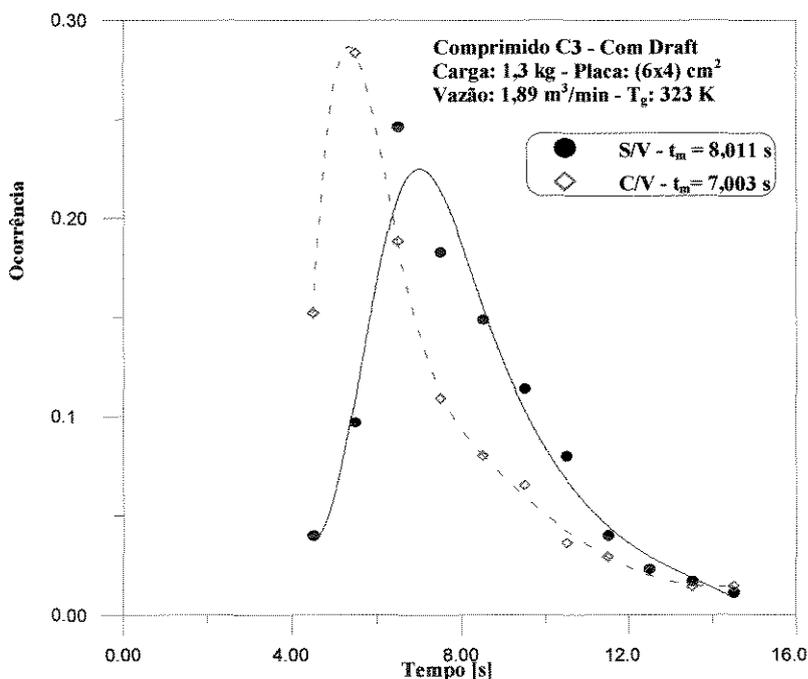


Figura E.9- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (6x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.10- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.10.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 262)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 291)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5008	0,0380	1,0000	0,0358	1,5015	0,0580	1,0000	0,0545
2,5000	2,4992	0,2400	1,0000	0,2486	2,4984	0,2820	1,0000	0,2996
3,5000	3,4994	0,2670	1,0000	0,2556	3,4960	0,3370	1,0000	0,2903
4,5000	4,5003	0,1720	1,0000	0,1762	4,5056	0,1270	1,0000	0,1763
5,5000	5,4999	0,1110	1,0000	0,1096	5,5003	0,0820	1,0000	0,0866
6,5000	6,5002	0,0610	1,0000	0,0682	6,4994	0,0520	1,0000	0,0357
7,5000	7,4999	0,0490	1,0000	0,0436	7,4997	0,0240	0,7000	0,0133
8,5000	8,5000	0,0310	1,0000	0,0282	8,5000	0,0170	1,0000	0,0086
9,5000	9,5000	0,0150	1,0000	0,0189	9,4999	0,0100	1,0000	0,0104
10,5000	10,5000	0,0150	1,0000	0,0139	10,5000	0,0100	0,3000	0,0081

Tabela E.10a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.10.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5000	0,0358	-0,3264	1	1,5015	0,0545	-0,4080
2	4,5003	0,1762	0,0341	2	4,5056	0,1763	0,0502
3	7,4999	0,0436	0,0080	3	10,5000	0,0081	-0,0151
4	10,5000	0,0139	0,0024	---	---	---	---

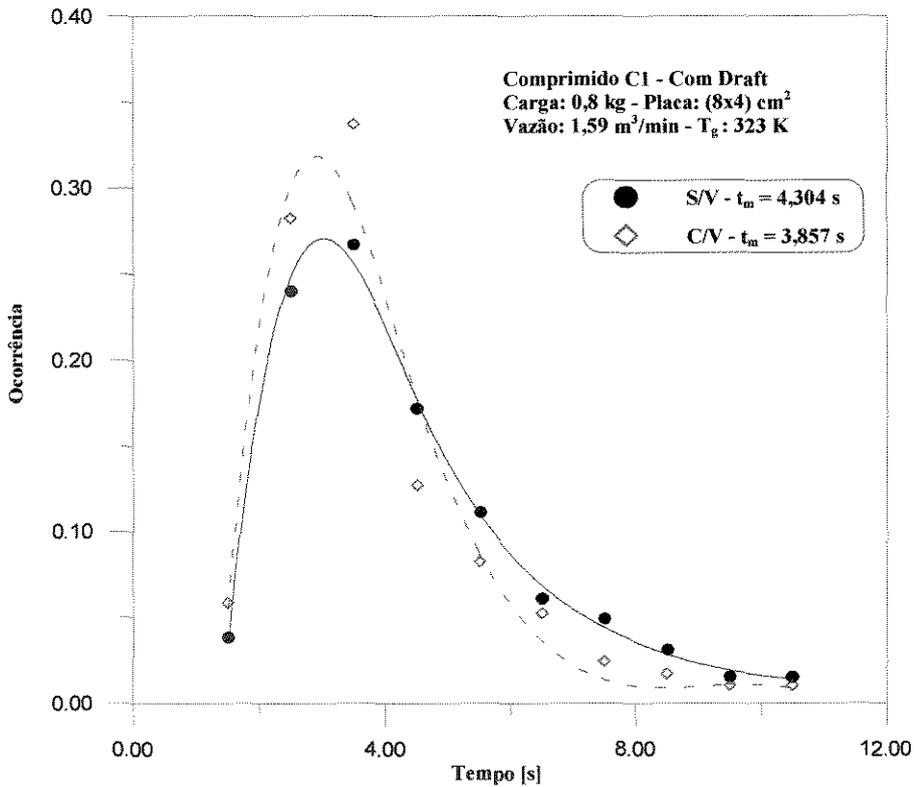


Figura E.10- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.11- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.11.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 253)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 279)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5005	0,1380	1,0000	0,1364	2,4999	0,1900	1,0000	0,1900
3,5000	3,4998	0,2920	1,0000	0,2985	3,4999	0,4050	1,0000	0,4042
4,5000	4,4988	0,2530	1,0000	0,2420	4,5007	0,1720	1,0000	0,1754
5,5000	5,5008	0,1180	1,0000	0,1273	5,4998	0,0830	1,0000	0,0879
6,5000	6,4998	0,0790	1,0000	0,0740	6,5001	0,0570	1,0000	0,0590
7,5000	7,5001	0,0430	1,0000	0,0455	7,4999	0,0390	1,0000	0,0364
8,5000	8,5000	0,0280	1,0000	0,0263	8,5001	0,0140	1,0000	0,0201
9,5000	9,5000	0,0160	1,0000	0,0168	9,5000	0,0110	1,0000	0,0101
10,500	10,500	0,0160	1,0000	0,0157	10,500	0,0110	1,0000	0,0065
11,500	11,500	0,0160	1,0000	0,0160	11,500	0,0070	1,0000	0,0091

Tabela E.11a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.11.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5005	0,1364	-0,3801	1	2,4999	0,1900	-1,2060
2	5,5008	0,1273	0,1037	2	4,5007	0,1754	0,3209
3	6,4998	0,0740	0,0090	3	5,4998	0,0879	0,0063
4	9,5000	0,0168	0,0099	4	11,500	0,0091	0,0064
5	11,500	0,0160	-0,0073	---	---	---	---

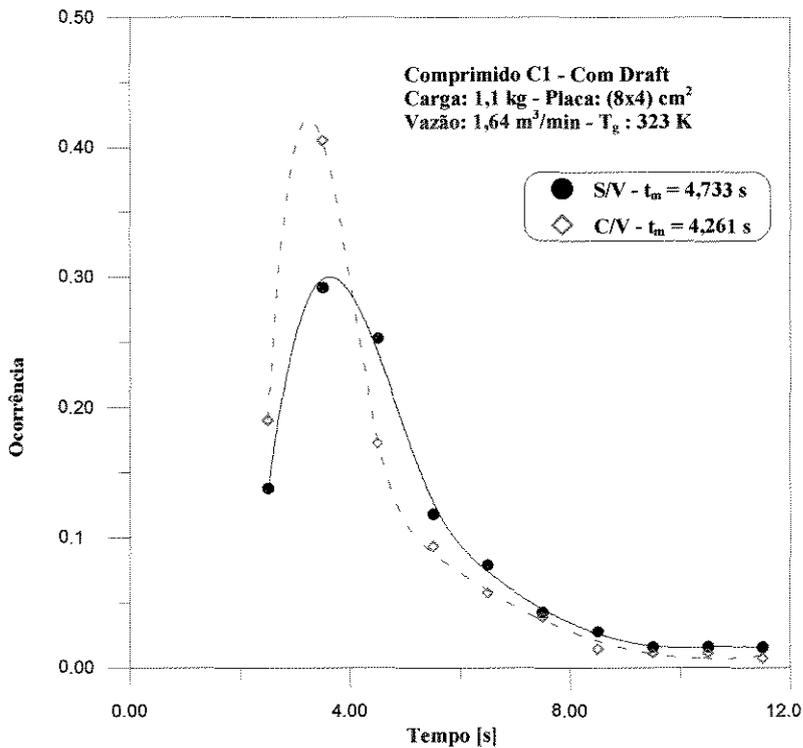


Figura E.11- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.12- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C1, da Figura E.12.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 213)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 252)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5000	0,0090	1,0000	0,0089	2,4996	0,0390	1,0000	0,0394
3,5000	3,4999	0,1690	1,0000	0,1694	3,4998	0,4600	1,0000	0,4567
4,5000	4,5000	0,2770	1,0000	0,2756	4,5022	0,2300	1,0000	0,2368
5,5000	5,5002	0,2210	1,0000	0,2226	5,4994	0,0940	1,0000	0,0861
6,5000	6,5000	0,1170	1,0000	0,1167	6,5000	0,0550	1,0000	0,0519
7,5000	7,5000	0,0750	1,0000	0,0734	7,5001	0,0357	1,0000	0,0394
8,5000	8,5000	0,0520	1,0000	0,0520	8,5000	0,0310	1,0000	0,0292
9,5000	9,5000	0,0330	1,0000	0,0359	9,5000	0,0200	1,0000	0,0214
10,500	10,500	0,0280	1,0000	0,0251	10,500	0,0200	1,0000	0,0156
11,500	11,500	0,0190	1,0000	0,0198	11,500	0,0110	1,0000	0,0118

Tabela E.12a - Parâmetros de interpolação do comprimido C1, da Figura E.12

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5000	0,0089	0,1030	1	2,4996	0,0394	-1,5040
2	4,5000	0,2756	-0,2118	2	4,5022	0,2368	0,2318
3	6,5000	0,1167	0,1059	3	6,5000	0,0519	0,0025
4	7,5000	0,0734	0,0050	4	11,5000	0,0118	0,0018
5	11,5000	0,0198	0,0056	---	---	---	---

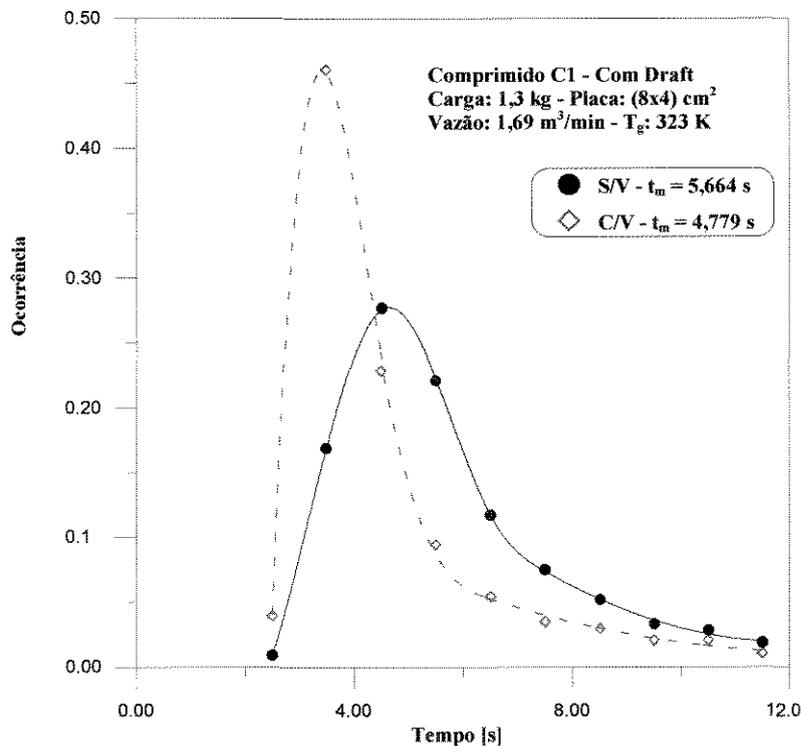


Figura E.12- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C1 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.13- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.13.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 225)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 247)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
1,5000	1,5000	0,0090	1,0000	0,0087	1,5001	0,0050	1,0000	0,0048
2,5000	2,4995	0,2310	1,0000	0,2329	2,4997	0,3330	1,0000	0,3343
3,5000	3,4997	0,3780	1,0000	0,3692	3,4993	0,4020	1,0000	0,3960
4,5000	4,5042	0,1750	1,0000	0,1968	4,5030	0,1640	1,0000	0,1778
5,5000	5,4982	0,1060	1,0000	0,0771	5,4993	0,0620	1,0000	0,0501
6,5000	6,5003	0,0400	0,5000	0,0447	6,5000	0,0250	0,3000	0,0246
7,5000	7,5000	0,0310	1,0000	0,0286	7,5001	0,0050	1,0000	0,0041
8,5000	8,4999	0,0220	1,0000	0,0161	8,5000	0,0030	0,5000	0,0040
9,5000	9,5000	0,0040	1,0000	0,0074	9,5000	0,0000	0,3000	0,0008
10,5000	10,5000	0,0040	1,0000	0,0020	10,5000	0,0000	1,0000	0,0003

Tabela E.13a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.13.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	1,5000	0,0876	0,3068	1	1,5001	0,0048	-0,1322
2	3,5000	0,3692	-0,4829	2	3,4993	0,3960	-0,4035
3	4,5000	0,1968	0,1759	3	4,5030	0,1778	0,2092
4	6,5000	0,0447	0,0007	4	6,5000	0,0246	-0,0036
5	7,5000	0,0286	0,0043	5	10,5000	0,0003	0,0135
6	10,5000	0,0020	0,0026	---	---	---	---

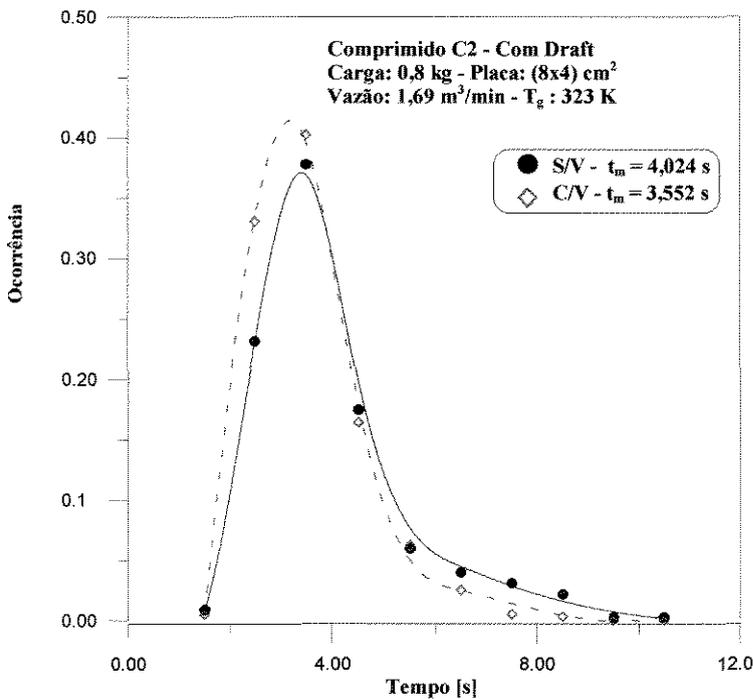


Figura E.13- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.14 - Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.14.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 134)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 195)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5015	0,0600	1,0000	0,0563	2,5004	0,1580	1,0000	0,1567
3,5000	3,4986	0,2750	1,0000	0,2899	3,4999	0,3070	1,0000	0,3112
4,5000	4,4985	0,3070	1,0000	0,2879	4,5001	0,2670	1,0000	0,2679
5,5000	5,5007	0,1800	1,0000	0,1869	5,4983	0,1690	1,0000	0,1531
6,5000	6,5002	0,0980	1,0000	0,1011	6,5009	0,0540	1,0000	0,0686
7,5000	7,5001	0,0450	1,0000	0,0476	7,5001	0,0200	1,0000	0,0254
8,5000	8,4999	0,0270	1,0000	0,0197	8,4999	0,0135	0,5000	0,0103
9,5000	9,5000	0,0080	1,0000	0,0102	9,5000	0,0100	0,3000	0,0104

Tabela E.14a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.14.

SEM VIBRAÇÃO				COM VIBRAÇÃO			
Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5015	0,0563	-0,3739	1	2,5004	0,1567	-0,3237
2	5,5007	0,1869	0,0391	2	5,4983	0,1531	0,0539
3	9,5000	0,0102	0,0118	3	9,5000	0,0103	0,0022

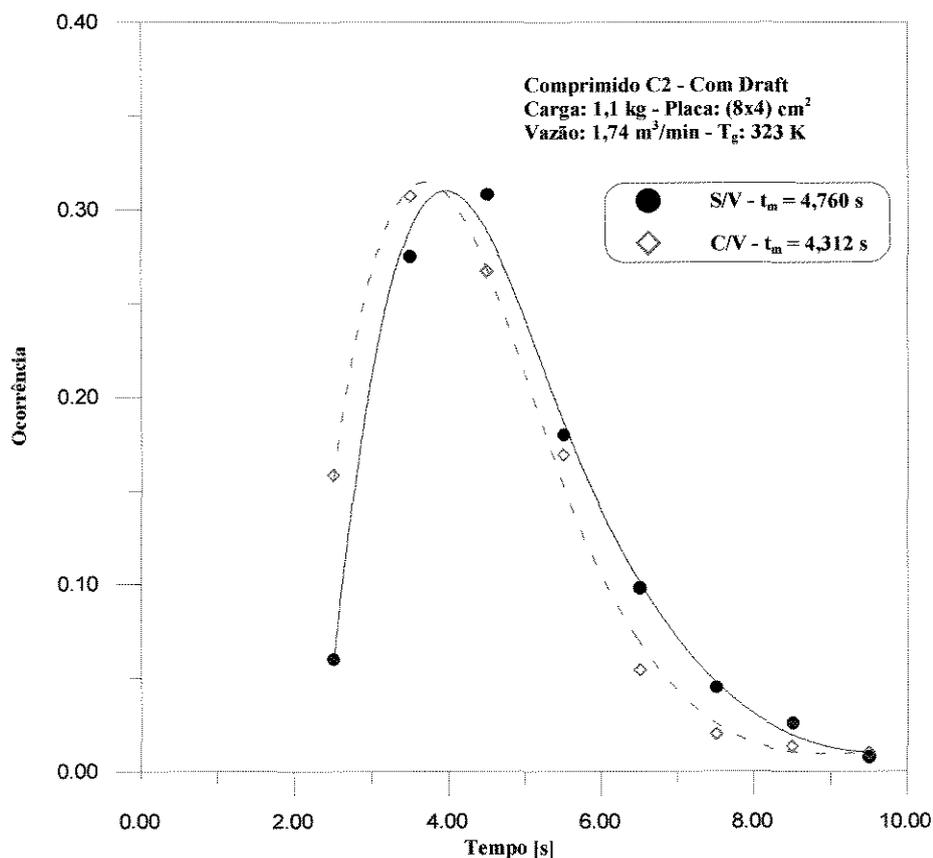


Figura E.14 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.15- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C2, da Figura E.15.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 113)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 175)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5003	0,0340	1,0000	0,0227	2,4985	0,0750	1,0000	0,0779
3,5000	3,4933	0,0720	1,0000	0,1180	3,5007	0,3370	1,0000	0,3165
4,5000	4,5084	0,3360	1,0000	0,2635	4,5043	0,2100	1,0000	0,2508
5,5000	5,5019	0,2720	1,0000	0,3039	5,4994	0,1670	1,0000	0,1604
6,5000	6,5044	0,1440	1,0000	0,1754	6,4991	0,1130	1,0000	0,0958
7,5000	7,5000	0,0720	1,0000	0,0720	7,4995	0,0670	1,0000	0,0525
8,5000	8,4980	0,0430	0,5000	0,0265	8,5004	0,0170	0,7000	0,0258
9,5000	9,5004	0,0150	0,1000	0,0134	9,5001	0,0050	1,0000	0,0100
10,5000	10,5000	0,0090	0,3000	0,0069	10,5000	0,0050	0,5000	0,0023

Tabela E.15a - Parâmetros de interpolação do comprimido C2, da Figura E.15.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5002	0,0227	0,1937	1	2,4985	0,0779	-0,6361
2	5,5019	0,3039	-0,2494	2	4,5043	0,2508	0,0312
3	6,5044	0,1754	0,0844	3	10,5000	0,0022	0,0023
4	10,5000	0,0069	-0,01960	—	—	—	—

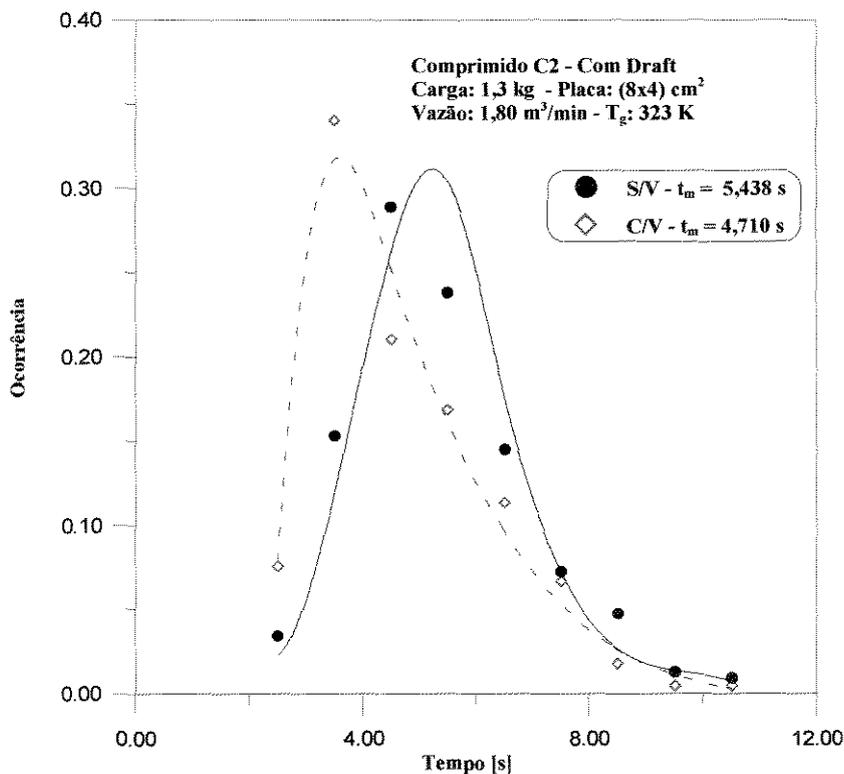


Figura E.15- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C2 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.16- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.16.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 320)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 390)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
2,5000	2,5000	0,0460	1,0000	0,0458	2,5000	0,0750	1,0000	0,0769
3,5000	3,5000	0,0910	1,0000	0,0917	3,5005	0,1050	0,3000	0,1042
4,5000	4,5000	0,1370	1,0000	0,1358	4,4991	0,1580	1,0000	0,1710
5,5000	5,5000	0,1680	1,0000	0,1688	5,5001	0,2260	1,0000	0,2150
6,5000	6,5000	0,1750	1,0000	0,1773	6,5001	0,1870	1,0000	0,1897
7,5000	7,5000	0,1470	1,0000	0,1459	7,5003	0,1180	1,0000	0,1214
8,5000	8,5000	0,1060	1,0000	0,1055	8,4998	0,0740	1,0000	0,0683
9,5000	9,5001	0,0660	1,0000	0,0684	9,5000	0,0360	1,0000	0,0364
10,500	10,500	0,0410	1,0000	0,0387	10,500	0,0160	1,0000	0,0176
11,500	11,500	0,0220	1,0000	0,0206	11,500	0,0050	1,0000	0,0033

Tabela E.16a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.16.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	2,5000	0,0458	0,0074	1	2,5000	0,0769	0,1021
2	4,5000	0,1688	-0,0203	2	4,5001	0,2150	-0,0853
3	6,5000	0,1773	-0,0544	3	6,5001	0,1897	-0,0507
4	7,5000	0,1459	-0,0008	4	7,5003	0,1214	0,2997
5	11,5000	0,0206	0,1563	5	11,5000	0,0033	-0,0041

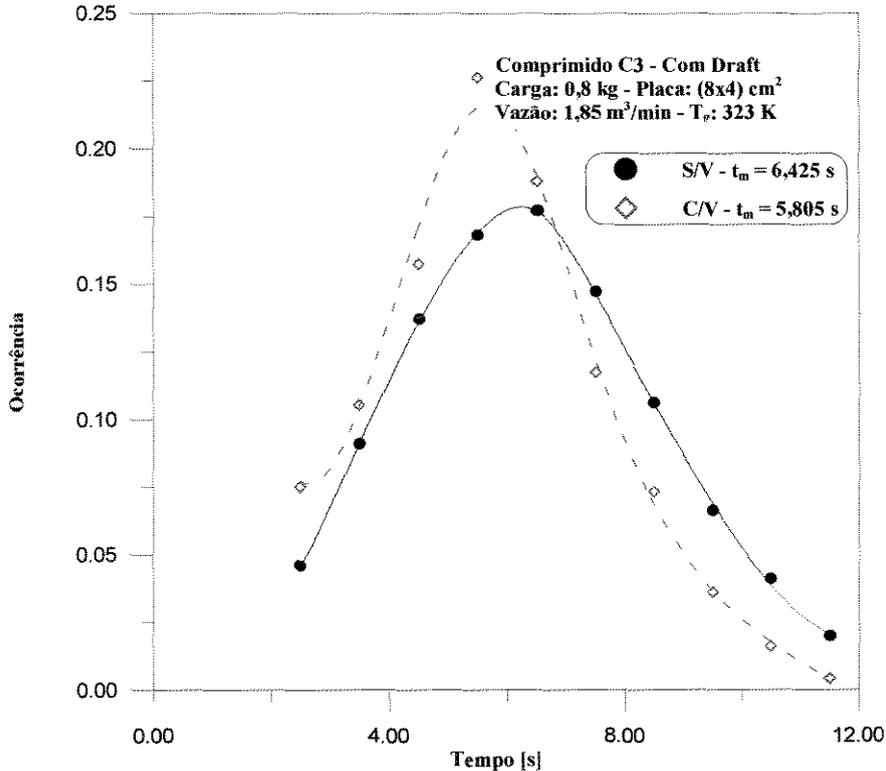


Figura E.16 - Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.17- Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.17.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 268)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 296)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
3,5000	3,5000	0,0070	1,0000	0,0113	3,5002	0,0100	1,0000	0,0160
4,5000	4,5019	0,0890	1,0000	0,0703	4,5037	0,1120	1,0000	0,0862
5,5000	5,4970	0,1490	1,0000	0,1786	5,4942	0,2000	1,0000	0,2410
6,5000	6,5001	0,2460	0,5000	0,2416	6,4992	0,3180	0,5000	0,3117
7,5000	7,4996	0,2090	1,0000	0,2020	7,4992	0,2100	1,0000	0,2042
8,5000	8,5008	0,1270	1,0000	0,1412	8,5009	0,0870	1,0000	0,0986
9,5000	9,4999	0,0890	1,0000	0,0870	9,5001	0,0370	1,0000	0,0381
10,500	10,500	0,0520	1,0000	0,0450	10,500	0,0130	1,0000	0,0105
11,500	11,500	0,0150	1,0000	0,0191	11,500	0,0060	1,0000	0,0038
12,500	12,500	0,0150	1,0000	0,0143	12,500	0,0060	1,0000	0,0063

Tabela E.17a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.17.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			Extremos do intervalo do ajuste (k)	COM VIBRAÇÃO		
	$X_k$	$A_k$	$C_k$		$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	3,5000	0,0113	0,1461	1	3,5002	0,0160	0,2591
2	6,5001	0,2416	-0,1423	2	6,4992	0,3117	-0,2590
3	7,4996	0,2020	0,0021	3	7,4992	0,2042	0,05674
4	12,5000	0,0143	0,0258	4	12,5000	0,0063	-0,0027

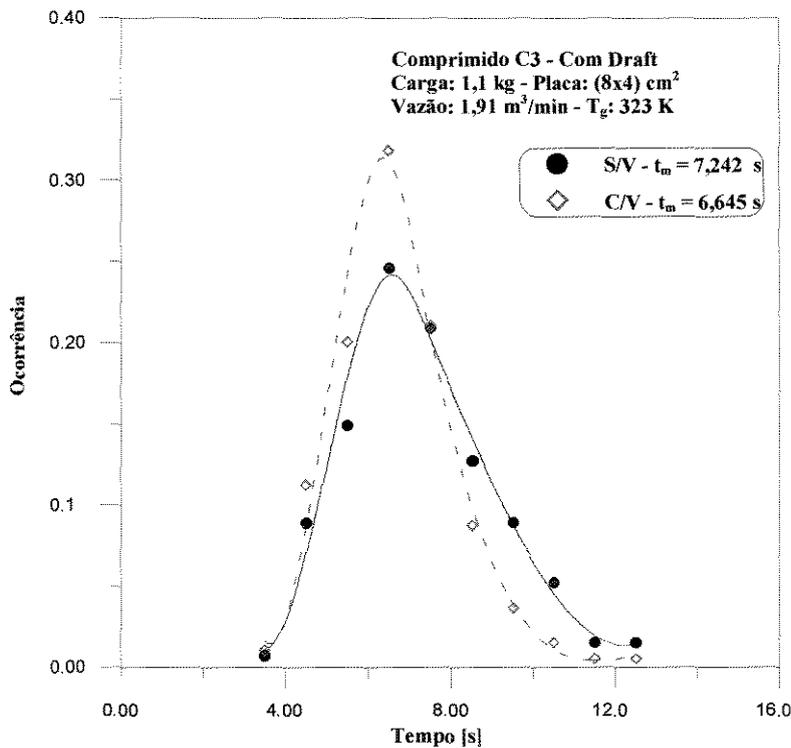


Figura E.17- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

Tabela E.18 - Tempo médio de ciclo *versus* fração de ocorrência de pulsos para o comprimido C3, da Figura E.18.

Tempo médio experimental (s)	SEM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 235)				COM VIBRAÇÃO (Nº PULSOS: 238)			
	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada	Tempo médio calculado (s)	Fração de ocorrência experimental	Desvio padrão da fração de ocorrência	Fração de ocorrência calculada
4,5000	4,5000	0,0170	1,0000	0,0172	4,5000	0,0170	1,0000	0,0190
5,5000	5,5000	0,0600	1,0000	0,0616	5,5004	0,0770	1,0000	0,0730
6,5000	6,4997	0,1150	1,0000	0,1201	6,4994	0,1920	1,0000	0,1958
7,5000	7,5002	0,1750	1,0000	0,1719	7,5001	0,2520	1,0000	0,2603
8,5000	8,5000	0,2040	1,0000	0,1963	8,4973	0,2270	1,0000	0,1963
9,5000	9,5004	0,1660	1,0000	0,1794	9,5017	0,0960	1,0000	0,1227
10,5000	10,5000	0,1330	1,0000	0,1134	10,5000	0,0720	1,0000	0,0723
11,5000	11,5000	0,0880	1,0000	0,0805	11,5000	0,0420	0,3000	0,0408
12,5000	12,5000	0,0420	1,0000	0,0400	12,5000	0,0250	0,3000	0,0244

Tabela E.18a - Parâmetros de interpolação do comprimido C3, da Figura E.18.

Extremos do intervalo do ajuste (k)	SEM VIBRAÇÃO			COM VIBRAÇÃO			
	$X_k$	$A_k$	$C_k$	Extremos do intervalo do ajuste (k)	$X_k$	$A_k$	$C_k$
1	4,5000	0,01722	0,0346	1	4,5000	0,0190	0,1960
2	8,5000	0,1963	-0,0480	2	7,5001	0,2603	-0,1854
3	12,5000	0,0378	0,3084	3	8,4973	0,1963	0,02678
---	---	---	---	4	12,5000	0,0244	0,01114

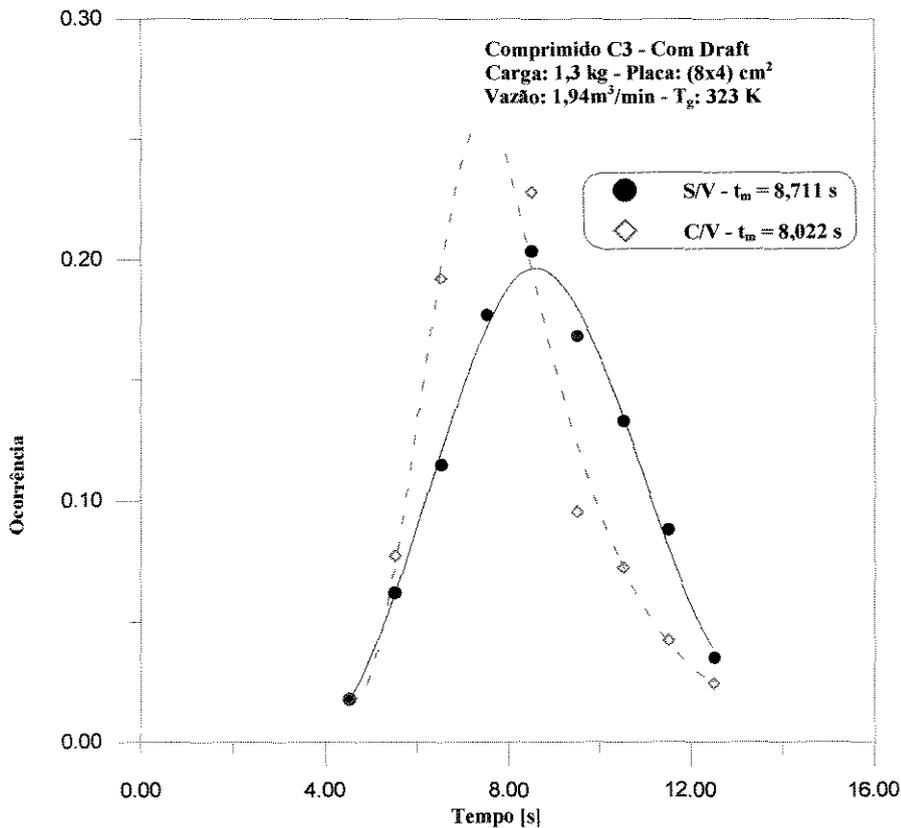


Figura E.18- Distribuição de tempo de ciclo para o comprimido C3 na placa (8x4) cm<sup>2</sup>.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ATAÍDE, C.H. **Estudo do recobrimento de comprimidos em leitos de jorro e jorro - fluidizado.** Campinas - SP. UNICAMP-FEQ, 1996, p.188. (Tese de Doutorado).
- AYUB, G.S.E. **Recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional: Análise do crescimento e transferência de calor gás-partícula.** Campinas - SP. UNICAMP - FEQ. 1993, p.107. ( Tese de Mestrado).
- CALDWELL, H.C. & ROSEN, E. New air suspension apparatus for coating discrete solids. **J. of Pharm. Sci.** v.53, n. 11, p.1387 - 1391. 1964.
- DELLATONIA, V.; FREIRE, J.T. & TOBINAGA, S. Leito Vibro-fluidizado I - Desenvolvimento de equipamento e testes preliminares. São Carlos - SP. **Anais do XVII Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos**, v.1, p.307 - 311, 1989.
- ERDÉSZ, K. & MUJUMDAR, A.S. Hydrodynamics aspects of conventional and vibrofluidized beds - A comparative evaluation. **Powder Technology, Lausanne**, v.46, n.2, p. 167 - 172, 1986.
- ERDÉSZ, K. Hydrodynamics studies on vibrated and fluidized beds. **Powder Handling and Processing**, v.2, n.4, p.: 327 - 339, 1990.
- ERDÉSZ, K.; RINGER, D. & MUJUMDAR, A.S. Transport Process in Vibrofluidized Beds in: **Transport in Fluidized Particle Systems**. Amsterdam, Ed. Elsevier Science Publishers: p.317 - 357, 1989.
- FINZER, J.R.D. & KIECKBUSCH, T.G. Secagem em sistemas com vibração. in: **Tópicos Especiais em Secagem.**, Ed. Freire, J. T & Sartori, D. J. M. São Carlos - SP ,v. 1, p. 87 - 127,1992.
- FINZER, J.R.D. **Desenvolvimento de um secador de leito vibro-jorrado.** Campinas. UNICAMP - FEA. 1989, p.258. (Tese de Doutorado).
- FINZER, J.R.D. **Secagem de fatias de cebola em leito fluidizado.** Campinas - SP. UNICAMP - FEA, 1984, p. 134. (Tese de Mestrado).
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A; CLUMP, C.W.; MAUS, L & ANDERSEN, L.B. **Princípios de Operações Unitárias.** México . Compana Ed. Continental, p.704, 1977.

- FREIRE, J.T. & OLIVEIRA, W.P. Aspectos tecnológicos dos processos de recobrimento de partículas in: **Tópicos especiais em secagem.**, Ed. Freire, J. T. & Sartori, D. J. M. São Carlos - SP, v.1, p. 255 - 296, 1992.
- GELPERIN, N.J. Hydrodynamic properties of fluidized granular materials in conical and conical-cylindrical sets, **Khim. Mashinosti.** (Moscou), v.12 ,n.4, 1961.
- GUPTA, R. & MUJUMDAR, A.S. Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds - a review. **Drying 80** New York. Ed A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing, v.1,p. 141 - 150, 1980.
- GUTMAN, R.G. Vibrated beds of powders: Part II - Heat transfer and energy dissipation of a vibrated bed. **Transactions of the Institution of Chem. Eng.** v.54, n.4, p. 251-257, 1976.
- HAN, W.; MAI, B. & GU, T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. **Drying Technology** . v.9, n.1, p.159 - 181, 1991.
- KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V.; MUJUMDAR, A.S. & FANOUS, M.A. Aerodynamics of grains in a large scale two-dimensional spouted bed with draft plates. **International Drying Symposium**, Versailles, France, 69 , 1988.
- KMIÉC, A.; MUJUMDAR, A.S. & RAGHAVAN, G.S.V. Hydrodynamics of flows and heat transfer in spouted beds. **Chemical Engineering Journal**, n.19, p. 189 - 200. 1980.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Gas-to-particle heat transfer in two-dimensional spout beds. **Can. J. Chem. Heat and Mass Transfer**, v.16, p. 730 - 741, 1989.
- KUNII, D. & LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. New York, John Wiley,. 534 p. 1969.
- KURCHARSKI, J. & KMIÉC, A. Analysis of simultaneous drying and coating of tablets in a spouted bed. Polônia. **Notas particulares**, 1986.
- KURCHARSKI, J. & KMIÉC, A. Heat and mass transfer during coating of tablets in spouted bed. Apresentado no 3<sup>rd</sup> **International Symposium in Spouted Beds**, Vancouver, Canada, 1991.
- KURCHARSKI, J. & KMIÉC, A. Hydrodynamics heat and mass transfer during coating tablets in a spouted bed. **Can. J. Chem. Eng.** v.61, p. 435 - 439, 1983.

- KURCHARSKI, J. & KMIÉC, A. Kinetics of granulation process during coating of tablets in a spouted beds. **Chem. Eng. Science**. v. 44, n.8, p. 1627 - 1636, 1989.
- KURCHARSKI, J. & KMIÉC, A. The effect of process parameters on massic distributions and the efficiency of tablet coating in a spouted bed. **Anais do 6<sup>th</sup> IDS'88**, Versailles, France: p.27 - 31, 1988.
- MALHOTRA, K. & MUJUMDAR, A.S. Immersed surface heat transfer in a vibrated fluidized bed. **Industrial Engineering Chemistry Research**. Washington, v.26, n.10, p. 1983 - 1992, 1987.
- MALHOTRA, K.; LAW, L.K.C. & MUJUMDAR, A.S Pressure drop characteristics for vibrated beds of dry and sticky particles. **Powder Technology**, Lausanne. v.39, n.1, p. 101 - 105, 1984.
- MANN, U. & CROSBY, E.J. Number of cycles distribution in circulating systems. **Chemical Eng. Science**. v.29, p.761 - 765, 1974.
- MANN, U. Analysis of spouted-bed coating and granulation 1 - Batch operation. **Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.** v. 22, p.288 - 292, 1983.
- MANN, U., CROSBY, E.J., & RUBINOVITCH, M. Cycle time distribution measurements in spouted beds. **Can. J.of Chem. Eng.** v.53, p.579 - 581, 1975.
- MANN, U.; CROSBY, E.J. & RUBINOVITCH, M. Number of cycles distribution in circulating systems. **Chemical Eng. Science**. v. 29, p.761 - 765, 1974.
- MATHUR, K.B. & EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York, Academic Press, p. 304, 1974.
- McCABE, W.L. & SMITH, J.C. **Unit operations of chemical engineering**. 3<sup>a</sup> ed. USA, McGraw-Hill, p.1028, 1976.
- MONTEDO, O.R.K. & FREIRE, J.T. Coeficiente de troca térmica entre uma esfera (ou um cilindro) e um leito vibro-fluidizado. **Anais do 9<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Salvador - BA. v.1, p.53 - 61, 1992.

- MONTEDO, O.R.K. & FREIRE, J.T. Influência da geometria e da mobilidade do aquecedor no coeficiente de transferência de calor corpo submerso-leito em um leito vibro-fluidizado. São Carlos - SP. **Notas particulares**, 1991.
- MUJUMDAR, A.S. Drying of granular materials. **Lectures Notes**. McGill University, Montreal, Canada, p.148, 1981.
- MUKLENOV, J.P. & GORSHTAIN, A.G. Investigation of spouted bed., **Khim. Prom.** Moscou. v. 41, p. 443, 1965.
- NUNHEZ, J.R. Método spline modificado : Acoplamento do método da máxima verossimilhança ao método spline. Campinas - SP, UNICAMP-FEQ, 1990, p.117. (Tese de Mestrado).
- NUNHEZ, J.R.; Mori, M. & D'Ávila, S.G. Fitting thermodynamic data using the modified spline technique. **Computers Chem. Engng.** v.17, p.1091 - 1099. 1993.
- OLIVEIRA, W.P. **Recobrimento de partículas em leito de jorro**, São Carlos - SP. UFSCar, 1992, p.97. (Tese de Mestrado).
- OLSEN, W. Recent advances in fluid bed agglomerating and coating technology. **Plant Operations Progress**, v.4, n.3, p. 135 - 138, 1985.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A.S & STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes.: in - **Advances in drying**. Washington, Ed. Hemisphere, p. 245 - 305, 1984.
- PARADA, E.A. **Recobrimento de partículas em leito de jorro de secção quadrada**. São Carlos - SP. UFSCAR, 1994, p. 75. (Tese de Mestrado).
- PASSOS, M.L.A. **Flow characteristics of two-dimensional spouted and spouted-fluidized beds of particle**. Ph. D. Thesis; McGill University, Montreal, Canada, 1991, p.225.
- PERRY, R.H. & CHILTON, C.H. **Chemical engineers handbook**. 5ª ed. New York, Ed. McGraw-Hill, secção 20, p. 78 - 87. 1973.
- RATKAI, G & TOROS. Hydrodynamic model of the vibro spouted bed. **Chemical Engineering Science**, Oxford. v.41, n.5, p. 1345 - 1349, 1986.

- REAY, D. & BAKER, C.G.J. Drying. in: - **Fluidization**. 2<sup>a</sup> ed. London, Ed. Academic Press, p. 529 - 562, 1985.
- RINGER, D.V. & MUJUMDAR, A.S. Analysis of aerodynamics and heat transfer in vibrofluidized beds. **Drying Technology**. v.2, n.4, p. 449 - 470, (1983-84).
- ROCHA, S.C.S. Recobrimento de comprimidos. in: **Tópicos especiais em secagem**. Ed. Freire, J. T. & Sartori, D. J. M., São Carlos - SP, v. 1, p. 297 - 330, 1992.
- ROY, D.; LARACHI, F.; LEGROS, R. & CHAOUKI, J. A study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking. **Canadian J. of Chem. Eng.** v.72, p.945 - 951, 1994.
- SANTANA, C.C.; ROCHA, S.C.S; CREMASCO, M.A. & ATAÍDE, C.H. Recobrimento de comprimidos em leito de jorro: Estudos preliminares. Apresentado no **XIX Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos**, Campinas - SP, Outubro, 1991.
- SCHOENBERG, I. J. Contribution to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions. **Quarterly of Appl. Math.** v.4, p. 45-99, 1946.
- SEITZ, J.A., MEHTA, S.P. & YEAGER, J.L. Tablet coating, in: **The theory and practice of industrial pharmacy**. 3 ed. Philadelphia : Lea & Febiger, p.346 - 373, 1986.
- SINGISER, R.E.; HEISEN, A.L. & PRILLIG, E.B. Air-suspension tablet coating. **Chem. Eng. Progress**. v.62, n.4, p.107 - 111, 1966.
- SOUZA, C.A.G & KIECKBUSCH, T.G. Dinâmica das partículas em leito de jorro vibrado bidimensional: Ensaio preliminares. **Anais do V Encontro Nacional de Ciências Térmicas**. São Paulo, p.219 - 222, 1994.
- STRUMILLO, C. & KUDRA, T. **Drying Principles, Applications and Design**. Ed. Gordon and Breach Science Publishers, London, , p 348, 1986.
- STRUMILLO, C. & PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. in - **Drying 80**. v.1. New York, Ed. Hemisphere Publishing, p. 211 - 226, 1980.
- STRUMILLO, C. & PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds, in: **Drying 80**. v.1, New York, Ed. Hemisphere Publishing, p.211 -226, 1980.

- TANNOUS, K. **Contribution a l'étude hydrodynamique des lits fluidisés de grosses particules**. These de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1993.
- TARANTO, O.P. **Estudo experimental da dinâmica em um leito de jorro bidimensional: Aplicações em recobrimento de comprimidos**. Campinas - SP. UNICAMP - FEQ. 1992, p. 114. (Tese de Mestrado).
- THOMSON, W.T. **Teoria da vibração com aplicações**. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, p. 462, 1978.
- UHLEMANN, H. Kontinuierliche wirbelschicht-sprühgranulation. Chem. Ing. Tech. v. 62, p. 882-834, 1990.
- WEISS, J. & MEISEN, A. Laboratory studies on sulphur-coating urea by the spouted bed process. **Can. J. of Chem. Eng.** v.61, p. 440 - 447, 1983.
- WURSTER, D.E. Method of applying coatings to tablets or the like. **U.S. Patent 2, 648.609**, 1953.