

ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DE FORÇAS COESIVAS NO COMPORTAMENTO DE LEITOS VIBRO-FLUIDIZADOS

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT THE INFLUENCE OF COHESION FORCES ON THE VIBRO-FLUIDIZED BED BEHAVIOR

Denise A. Moreira¹ e M. Laura Passos^{1,2}

1. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG)

2. Centro de Secagem, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

Caixa Postal 676 – 13565-905 - São Carlos – SP

E-mail: merilau@microplanet.com.br

ABSTRACT

Vibro-fluidized bed systems are used in industrial processes involving the drying of cohesive particles, as in powdery milk production. The fluid-dynamic study of these beds is of fundamental importance in scaling up equipment and in obtaining the powdery product at higher quality. This work aims at analyzing the fluid flow behavior in vibro-fluidized beds of skim milk and whole milk and at identifying the different flow regimes as function of the morphologic characteristics of agglomerates as well as the type of cohesion forces between particles. Whole and skim milk powdery agglomerates are characterized regarding the size, form, density and cohesion degree. Experiments are performed in a vibro-fluidized bed prototype, in laboratorial scale, to obtain the pressure drop curves as function of the inlet air flow rate, the vibration column amplitude and the type of particle used. Based on these data, the flow regime is identified and related to agglomerate characteristics and its fat content.

Keywords: cohesion force, vibro-fluidized bed, whole milk powder and skim milk powder.

RESUMO

Sistemas de leitos vibro-fluidizados são empregados em processos industriais envolvendo a secagem de partículas coesivas, como na produção do leite em pó. O estudo da fluidodinâmica destes leitos é de fundamental importância para o dimensionamento adequado dos equipamentos e para obtenção de um produto de melhor qualidade. O presente trabalho visa analisar o comportamento fluidodinâmico em leitos vibro-fluidizados de leite em pó desnatado e de leite em pó integral e identificar os diferentes regimes de escoamento em função das características morfológicas dos aglomerados e das possíveis forças coesivas entre estas partículas. Caracterizam-se os aglomerados do leite em pó desnatado e do integral, quanto ao tamanho, forma, densidade e grau de coesão. Realizam-se experimentos em um protótipo de leito vibro-fluidizado, em escala de laboratório, para obtenção das curvas de queda de pressão em função da vazão de ar alimentado, da amplitude de vibração do equipamento e do tipo de partícula utilizada. Com base nestes dados, identificam-se os regimes de escoamento, correlacionando-os com as características dos aglomerados e o seu teor de gordura.

Palavras-Chave: força coesiva, leitos vibro-fluidizados, leite em pó integral e desnatado.

1- INTRODUÇÃO

A secagem é a etapa determinante na produção industrial do leite em pó e pode ser constituída de um ou mais estágios, dependendo do tipo de produto desejado. Para a produção do leite em pó instantâneo, utilizam-se, no mínimo, dois estágios de secagem, o primeiro em um secador *spray* e o segundo em um sistema de leitos vibro-fluidizados, acoplado à saída da câmara *spray* [1].

A emulsão concentrada de leite, com cerca de 48% de sólidos, é pulverizada no topo do secador *spray*. As gotículas formadas descem na câmara de secagem em contato com o ar quente, que escoam concorrentemente e a alta velocidade. Tais gotículas são parcialmente secas (8 a 5 % de umidade) e aglomeradas. Esta aglomeração se processa por três mecanismos distintos: o primário, no

topo do secador, resultante de colisões efetivas entre duas ou mais gotículas; o secundário, decorrente de colisões entre as gotículas e os finos reciclados, com a captura destes finos pelas gotículas, e o terciário, na base cônica da câmara, devido ao deslizamento de partículas mais secas sobre as outras. Estes aglomerados, ao deixarem a câmara *spray*, são fluidizados pelo ar no sistema vibro-fluidizado, o qual é responsável pela redução final da umidade das partículas (4 a 2,5%), pelo arraste de finos não aglomerados e pelo resfriamento gradual do produto. Nestes leitos, a temperatura do ar de entrada decai gradualmente, seguindo a cinética de secagem do pó. A vibração do equipamento garante um regime de fluidização mais homogêneo, minimizando a formação de caminhos

preferenciais para o escoamento do ar no interior do leite.

Estudos anteriores [2] sugerem que o comportamento dos leitos vibro-fluidizados formados por aglomerados de leite em pó depende do teor de água e de gordura existente na superfície destes aglomerados. Tais constituintes podem gerar diferentes tipos de forças coesivas, que influenciam de forma distinta o regime de escoamento no interior destes leitos, prejudicando a transferência de calor e de massa entre as fases.

Este trabalho visa descrever e analisar o comportamento de leitos vibro-fluidizados constituídos por leite em pó desnatado e por leite em pó integral, identificando os regimes de escoamento em função das características destes aglomerados e das possíveis forças coesivas entre eles. Determinaram-se as propriedades físicas dos dois tipos de leite em pó utilizados e realizaram-se os testes fluidodinâmicos no protótipo de leite vibro-fluidizado, montado no laboratório. Analisaram-se os resultados obtidos, comprovando a influência do teor de gordura nos regimes de escoamento. Imagens dos aglomerados, obtidas no microscópio eletrônico, confirmam que a sua formação e as suas características de superfície dependem do teor de gordura.

2 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O leite em pó desnatado e o integral foram adquiridos no mercado e caracterizados quanto a: (i) a distribuição de tamanho das partículas e o seu diâmetro médio, D_{sauter} ; (ii) a sua umidade, m ; (iii) a densidade do sólido (ρ_s), do aglomerado (ρ_p) e a densidade aparente do leite destas partículas em sua compactação máxima ($\rho_{\text{ap}|\text{max}}$). Na Tabela 1, apresentam-se as técnicas utilizadas nestes testes e os valores obtidos. Tais técnicas foram testadas e padronizadas para o leite em pó em trabalhos anteriores [3].

Na medição de massa, empregou-se a balança digital Mettler Toledo, com precisão $\pm 10^{-7}$ kg. No cálculo do diâmetro médio de Sauter, D_{sauter} , ajustaram-se os dados de distribuição granulométrica aos modelos reportados em literatura [4], selecionando-se o de melhor ajuste (no caso, o log-normal). Ressalte-se que a técnica de peneiramento, quando padronizada (efetuada sob condições de umidade relativa do ar inferior a 60 %, usando um conjunto de nove peneiras Tyler, série numérica de 16 a 170, com vibração mecânica de 600 a 900 segundos e amostras de 0,01 kg), fornece dados mais reprodutíveis da distribuição granulométrica do leite em pó, quando comparadas às técnicas de microscopia ótica, de peneiramento inverso com injeção de jato de ar seco e de laser em meio líquido dispersante [3].

Na identificação da forma e das características superficiais dos aglomerados, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura, marca JSM modelo 840-A, do Laboratório de Microanálise do Departamento de Física da UFMG.

Tabela 1- Propriedades físicas do leite em pó desnatado (LD) e do leite em pó integral (LI).

Propriedade	LD	LI	Técnica utilizada
m (b.s. %)	5,1	3,2	secagem em estufa ($T = 97^\circ\text{C}$) até massa constante
D_{sauter} (μm)	162	187	peneiras Tyler e microscopia eletrônica (modelos de ajuste a dois parâmetros)
ρ_s (kg/m^3)	1496	1290	dados reportados na literatura [3] e calculada a umidade m
ρ_p (kg/m^3)	763	764	$\rho_p = (1 - \gamma) \rho_s$ $\gamma = 0,490$ (desnatado); $\gamma = 0,408$ (integral)
$\rho_{\text{ap} \text{max}}$ (kg/m^3)	465	564	compactação em proveta com medição: massa da amostra e volume ocupado pelo leite
ε_{min}	0,390	0,261	$\rho_{\text{ap} \text{max}} = (1 - \varepsilon_{\text{min}}) \rho_p$
ε_0	0,524	0,464	medição: massa da amostra e volume do recipiente
Teor de gordura (%)	1,5	27,0	dados fornecidos pelo fabricante

Os testes fluidodinâmicos foram desenvolvidos no protótipo de leite vibro-fluidizado, existente no Laboratório de Secagem em Meios Porosos do Departamento de Engenharia Química da UFMG.

Conforme visto na Figura 1, esse protótipo, construído em aço inoxidável, é constituído por uma coluna cilíndrica de 0,25 m de diâmetro (D_c) e 0,30 m de altura com bases cônicas e por um ciclone Lapple acoplado à sua saída. A coluna possui um visor de acrílico, por onde se alimentam as partículas e se visualiza o comportamento do leite. O seu distribuidor de ar é composto por um leite fixo de esferas de isopor (0,003 m), inserido na base cônica inferior da coluna, e por um conjunto entrelaçado de duas telas de aço inoxidável com malha de 140 μm , disposto na junção da coluna cilíndrica com a base cônica. O sistema de vibração é eletromagnético (Inbras-Eriez 20N) e se encontra acoplado à parte externa da coluna cilíndrica. Um soprador (Irmãos Ayres Ltda 5HP) alimenta o ar no protótipo. Uma válvula esfera e um anemômetro de fio quente (VelociCheck TSI-8315-M), inseridos em linha, regulam e medem a vazão de ar. Um termo-higrômetro (Cole-Parmer E-37950) registra a temperatura e a umidade do ar na entrada e na saída da coluna. Um manômetro inclinado, com líquido manométrico vermelho de densidade igual à da água, é usado na medição da pressão na entrada e saída da coluna. Fitas graduadas em milímetros, afixadas no interior da coluna, medem a altura do leite de partículas.

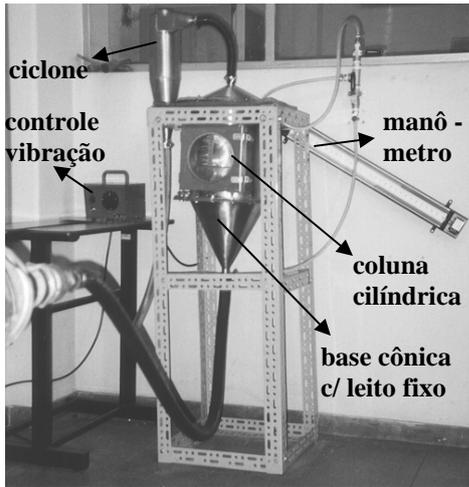


Figura 1 - Protótipo do leito vibro-fluidizado.

Antes da realização dos testes fluidodinâmicos, determinaram-se, sem a presença do leito de leite em pó, as pressões na entrada e na saída da coluna em função da vazão de ar. Estes dados de calibração foram utilizados no cálculo da queda de pressão através do leito de partículas, de acordo com o procedimento proposto por Freitas [5].

Fixou-se a massa do leite em pó a ser processado (M_s) em 0,3 kg, correspondendo à altura inicial do leito de 0,02 m. Variou-se a amplitude de vibração da coluna (A) em três níveis (0; 0,0015 e 0,003 m) mantendo-se em 60 Hz a frequência de vibração do equipamento. Obteve-se, para cada teste, a curva de queda de pressão no leito, ΔP , em função da velocidade superficial do ar, U . A altura expandida do leito de partícula, H_{mf} , foi medida ao término de cada experimento para calcular a porosidade do leito na condição de mínima fluidização, ε_{mf} , ou seja:

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_{ar})g = \frac{4M_s}{\pi D_c^2 H_{mf}} = \frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} \quad (1)$$

Na análise e comparação dos resultados fluidodinâmicos, utilizou-se, também, a equação de Ergun [6]:

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})^2 \mu_{ar}}{\varepsilon_{mf}^3 (D_{sauter})^2} U + \frac{1,75(1 - \varepsilon_{mf}) \rho_{ar}}{\varepsilon_{mf}^3 (D_{sauter})} U^2 \quad (2)$$

Equação 2 interliga $\Delta P/H_{mf}$ com a força interativa fluido-partícula (no caso ar-aglomerado) por unidade de volume do leito. Esta força de interação é dividida no componente viscoso (primeiro termo do lado direito da Equação 2) e o componente inercial (segundo termo do lado direito da Equação 2). No caso de partículas finas, como os aglomerados de leite em pó, o componente inercial torna-se desprezível em relação ao viscoso e $\Delta P/H_{mf}$ passa a ser uma função linear de U . Hahne [3] demonstrou, utilizando o mesmo equipamento, que a forma linear da Equação 2 descreve o regime de leito fixo para o leite em pó integral (erro experimental de $\Delta P/H_{mf} = 55$ Pa/m). Portanto, esta equação pode ser utilizada na

análise do escoamento do ar através dos leitos vibro-fluidizados de leite em pó integral e estendida, neste trabalho, para os de leite em pó desnatado.

3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pode-se observar, na Figura 2, que as partículas individuais do leite em pó integral são menos esféricas e, portanto, ao se interligarem, tendem a formar aglomerados mais densos (com menos poros internos) que os do leite em pó desnatado, conforme visto na Figura 3. Note-se ainda que estes aglomerados de leite em pó integral são maiores e, como possuem formas irregulares e amorfas, propiciam, quando empacotados, uma menor porosidade dos seus leitos. Tais características corroboram os dados obtidos na Tabela 1.

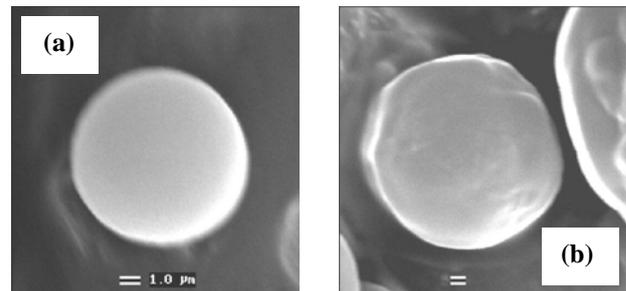


Figura 2 - Partícula individual que compõe os aglomerados de leite em pó: (a) desnatado e (b) integral.

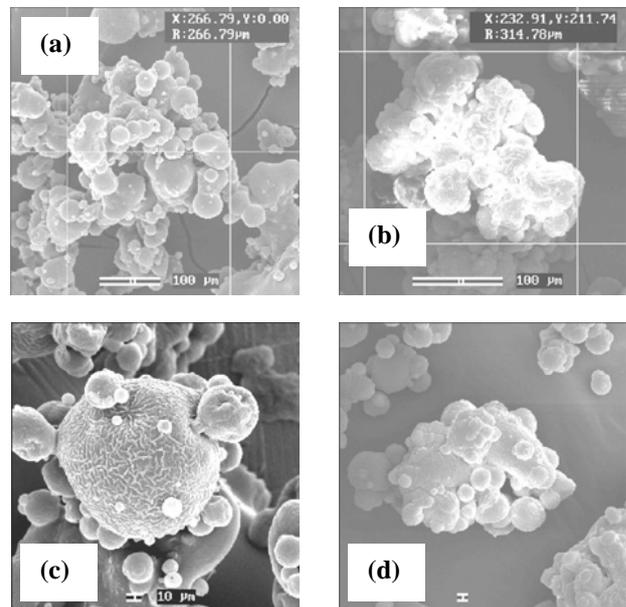


Figura 3 - Tipo e forma dos aglomerados do leite em pó: (a) e (c) desnatado; (b) e (d) integral.

Identifica-se, na Figura 3-(c), que os aglomerados de leite em pó desnatado são formados por um núcleo central (resultante da coalescência de duas ou mais gotículas na etapa de secagem em *spray*) e por finos capturados na superfície deste núcleo. Além destes aglomerados, há também grânulos maiores, como visualizado na Figura 3-(a), possivelmente estes grânulos são formados na etapa de secagem em leito vibro-fluidizado pelo deslizamento e

rolamento de partículas mais úmidas, umas sobre as outras. Na Figura 4, nota-se, ainda, que os aglomerados do leite em pó desnatado possuem em sua superfície uma crosta com veios e capilares, os quais propiciam ligações de pontes líquidas com partículas menores e mais úmidas. Por outro lado, a superfície dos aglomerados do leite em pó integral é pastosa, formada por nódulos de gordura, os quais tendem a se deformar quando do contato e ligação com outras partículas.

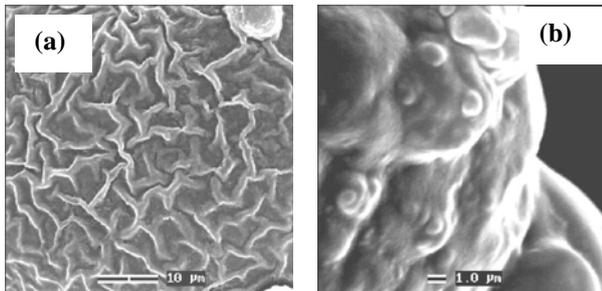


Figura 4 - Superfície dos aglomerados de leite: (a) desnatado e (b) integral.

Corroborando a análise comparativa da Figura 3, os resultados de distribuição granulométrica, apresentados nas Figuras 5 e 6, confirmam que a dispersão de tamanho dos aglomerados de leite em pó desnatado é maior. O cálculo do índice de dispersão de tamanho, definido como $ID = (D_{84,1} - D_{15,9}) / (2D_{50})$, resulta em 0,673 para os aglomerados de leite em pó desnatado e 0,358 para os de leite integral.

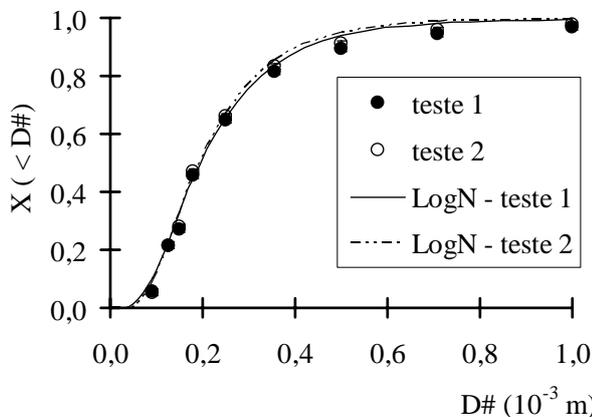


Figura 5 - Curva de distribuição granulométrica do leite em pó desnatado para duas réplicas e a sua predição pelo modelo lognormal, LogN. (Parâmetros ajustáveis do modelo LogN – Teste 1: $D_{50} = 1,96 \times 10^{-4}$ m; $\sigma = 1,84$ – Teste 2: $D_{50} = 1,91 \times 10^{-4}$ m; $\sigma = 1,78$. Desvio padrão médio entre modelo e experimento = $3,9 \times 10^{-5}$ m; resíduos aleatórios com distribuição normal).

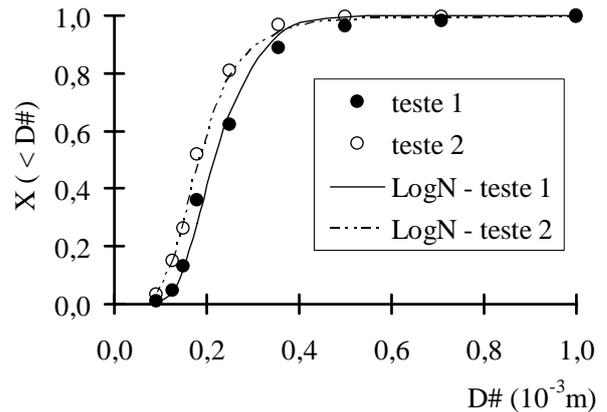


Figura 6 - Curva de distribuição granulométrica do leite em pó integral para duas réplicas e a sua predição pelo modelo lognormal, LogN. (Parâmetros ajustáveis do modelo LogN – Teste 1: $D_{50} = 2,18 \times 10^{-4}$ m; $\sigma = 1,39$ – Teste 2: $D_{50} = 1,76 \times 10^{-4}$ m; $\sigma = 1,44$. Desvio padrão médio entre modelo e experimento = $3,5 \times 10^{-5}$ m; resíduos aleatórios com distribuição normal).

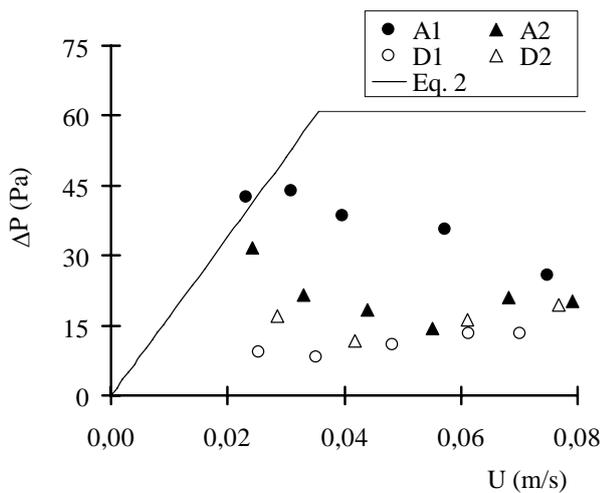
Essas distintas características dos aglomerados de leite em pó desnatado e integral explicam o comportamento fluidodinâmico diferenciados dos seus leitos vibro-fluidizados, conforme esquematizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comportamento dos leitos em função da amplitude de vibração e do tipo de leite.

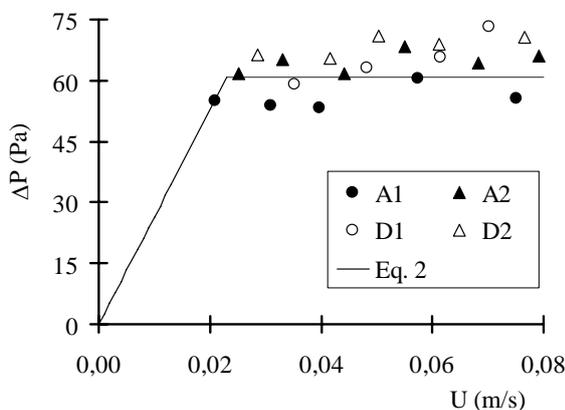
TIPO DE LEITE: DESNATADO		
A = 0	A = 0,0015 m	A = 0,003 m
não fluidização ① + ③	não fluidização ① + ② + ③	fluidização ② + ④
↓	↓	↓
gorros internos segregação	gorros internos aumento segregação	diminuição segregação
Mecanismos possíveis		
① ruptura de ligações entre aglomerados ② desgaste por atrito e liberação das partículas menores ③ estratificação das partículas ④ quebra dos aglomerados		
TIPO DE LEITE: INTEGRAL		
A = 0	A = 0,0015 m	A = 0,003 m
não fluidização ①	não fluidização ① + ②	não fluidização ① + ②
↪	↓	↪
	rachaduras no leito carreamento de ultrafinos	
Mecanismos possíveis		
① desgaste por atrito e liberação de pó ultrafino ② intensificação das forças coesivas entre partículas		

Nos leitos de leite em pó desnatado, há a formação de gorros internos com circulação de finos e deposição de partículas maiores na base do leito. Registre-se que este fenômeno de segregação por tamanho ocorre em leitos de

partículas com ID mais elevado, como é o caso do leite em pó desnatado. Passando-se de uma amplitude de vibração de $A = 0$ para $A = 0,0015$ m, a dispersão do tamanho das partículas tende a aumentar com o desgaste e a liberação dos finos incrustados na superfície dos aglomerados. Note-se que estes finos, vistos nas Figuras 3-(a) e 3-(d), parecem possuir ligações capilares, que são sucessíveis à quebra com o aumento da vibração do leito. O desprendimento dos finos da superfície do aglomerado resulta em um adicional aumento na segregação das partículas, prejudicando ainda mais a fluidização do leito. Entretanto, para $A = 0,003$ m, o regime de fluidização é atingido, conforme comprovado na comparação das curvas e dados apresentados na Figura 6.



(a)



(b)

Figura 7 - Queda de pressão no leito de leite em pó desnatado em função da velocidade superficial do ar: (a) comportamento para $A = 0,0015$ m; (b) comportamento para $A = 0,003$ m. (A1 e A2: aumento de U no teste 1 e no teste 2 respectivamente; D1 e D2: redução de U no teste 1 e no teste 2 respectivamente).

Nesses leitos com a amplitude de vibração no seu valor máximo ($A = 0,003$ m), observa-se, inicialmente, a formação de um jorro central que se estende por todo o leito, culminando na sua completa fluidização. Nesta amplitude de vibração, a quebra dos aglomerados maiores

deve, também, ocorrer, reduzindo a dispersão de tamanho e a segregação das partículas. Comportamento similar foi reportado por Hahne e Passos [2], quando trabalharam com partículas de leite integral com umidade mais elevada ($m = 0,06$).

Na faixa de operação do protótipo, não foi possível fluidizar os leitos de leite em pó integral. Mesmo com a amplitude de vibração no seu valor máximo ($A = 0,003$ m), os aglomerados se mantiveram coesos sem qualquer movimento aparente. Isto vem comprovar que o tipo de coesão entre as partículas de leite em pó integral é distinto do existente nos aglomerados de leite em pó desnatado. Possivelmente, esta força de coesão envolve ligações do tipo van der Waals, como reportado por Hahne e Passos [2], devido ao maior teor de gordura na superfície destes aglomerados. A oscilação mais intensa pode, neste tipo de força, favorecer a interligação dos finos com os aglomerados devido à probabilidade de contato entre eles, quando da passagem da onda de compressão. Entretanto, qualquer que seja o mecanismo de interligação destas partículas, há o aparecimento de rachas ao longo do leito, propiciando o escoamento preferencial do ar através destas rachas. Ocorre ainda o carregamento de pó ultrafino pelo ar. Cumpre registrar que, durante a execução dos experimentos, este pó depositou nas mangueiras do manômetro, dificultando a medição da queda de pressão após a formação das rachas no leito. Tal comportamento evidencia a presença de forças coesivas mais intensas entre as partículas de leite integral.

Segundo Geldart [7], quando as forças coesivas são de importância no processo de fluidização, o número de Hausner, HR , pode ser utilizado como índice de medida destas forças. Este parâmetro representa a razão entre a densidade aparente do leito de partículas em condições de máximo empacotamento e a densidade aparente deste mesmo leito em condições de empacotamento livre. Como discutido pelo esse autor, altas forças coesivas entre partículas impedem que estas rolem ou deslizem umas sobre as outras quando alimentadas livremente na coluna. Isto induz uma estrutura de empacotamento mais aberta e, conseqüentemente, um baixo valor da densidade aparente do leito na condição de empacotamento livre. Contudo, tal estrutura pode ser rompida facilmente pela vibração ou impacto mecânico, resultando em uma estrutura ou matriz sólida compacta. Tais características conferem valores mais elevados de HR para os materiais coesivos.

O valor calculado de $HR = (1 - \epsilon_{min}) / (1 - \epsilon_{mf})$ para os leitos de leite em pó integral é superior a 1,5 (1,69 a 1,7) na faixa de $0 \leq A \leq 0,003$ m. Isto comprova a alta coesão entre estes aglomerados. Para os leitos de leite em pó desnatado, o valor de HR diminui com o aumento de A (1,6 para 1,35), evidenciando a redução da coesão entre os aglomerados.

4 - CONCLUSÕES

Nos leitos de leite em pó integral (alto teor de gordura), o índice de Hausner, HR , é sempre superior a 1,5 para a faixa de amplitude de vibração estudada. Estes leitos não são fluidizados devido à formação de canais ou fendas no

seu interior. Isto comprova a alta coesão entre as partículas deste leite.

Nos leitos de leite em pó desnatado (baixo teor de gordura), a segregação de partículas por tamanho é mais marcante. A força de coesão entre partículas tende a ser do tipo capilar devido ao maior conteúdo de água na superfície do aglomerado. Esses leitos apresentam uma fluidização mais homogênea à medida que se aumenta a amplitude de vibração, indicando que a coesão entre partículas é minimizada pelo efeito da vibração do equipamento. Isto é corroborado pelo decréscimo no índice de Hausner com o aumento de A. Esta diminuição em HR e, conseqüentemente, em ϵ_{mf} comprova que houve o rompimento das forças coesivas entre partículas com ligeira compactação do leito.

Essas diferenças entre os regimes de escoamento são correlacionadas com as características dos aglomerados, confirmando, assim, a influência do teor de gordura na fluidodinâmica de leitos vibro-fluidizados de leite em pó.

5 - NOMENCLATURA

A	amplitude de vibração (m)
D_c	diâmetro interno da coluna (m)
D_{sauter}	diâmetro de Sauter (m ou mm)
D#	abertura média da peneira (m)
$D_{X\%}$	diâmetro médio correspondente a X (m)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
H	altura do leito de partículas (m)
ID	índice de dispersão (-)
M_s	massa de partículas (kg)
m	umidade da partícula em base seca (%)
ΔP	queda de pressão no interior do leito (Pa)
U	velocidade superficial do ar (m/s)
X	distribuição percentual acumulada da massa passante de partículas com diâmetro menor ou igual a D#

Letras gregas

ϵ	porosidade do leito de partículas (-)
ρ	densidade (kg/m^3)
μ	viscosidade ($kg/m\ s$)
γ	porosidade interna dos aglomerados

Subscrito

ap-	aparente
ar -	ar
max -	máximo
mf -	mínima fluidização
min -	mínimo
p -	aglomerado
s -	sólido
0 -	inicial

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PISECKY, J. "Evaporation and Spray Drying in the Dairy Industry". In: Handbook of Industrial Drying, New York, Marcel Dekker, volume 1, p. 715-742, 1995.
- [2] HAHNE, L.C.C. E PASSOS, M.L. "Utilização do índice de Hausner na determinação dos regimes de escoamento de partículas coesivas em leitos vibro-fluidizados". Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP 2001, UFMG, CD-ROM, 2002.
- [3] HAHNE, L.C.C. "Estudo experimental da secagem e aglomeração de partículas em sistemas vibro-fluidizados para a produção de leite em pó". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFMG, 200 p., 2001.
- [4] MASSARANI, G. "Fluidodinâmica da Partícula Sólida". In: Tópicos Especiais em Sistemas Particulados, São Carlos, UFSCar, volume 3, p. 115-160, 1990.
- [5] FREITAS, M. E. A. "Modelagem da secagem transiente de grãos em leitos de jorro cônicos". Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação em Engenharia Química, UFMG, 168 p., 1996.
- [6] ERGUN, S. "Fluid flow through packed columns", Chem. Eng. Progress, 48, p. 89-94, 1952.
- [7] GELDART, D. "Gas Fluidization Technology". New York, John Wiley and Sons, 1986.