

3.06.02 - Engenharia Química / Operações Industriais e Equipamentos para Engenharia Química

ANÁLISE SOBRE A COMPACTAÇÃO GRAVITACIONAL DE PÓS DE SERRAGEM DE PINHEIRO (*Pinus elliottii*)

Lucas Massaro Sousa^{1*}, Maria do Carmo Ferreira²

1. Mestrando do Departamento de Engenharia Química da UFSCar

2. CCET-UFSCar - Pesquisadora do Departamento de Engenharia Química / Orientadora

Resumo:

Este trabalho teve como objetivo analisar a compactação gravitacional de pós de serragem, visto que esse material é submetido industrialmente à compactação durante operações de descarga de reservatórios, transporte e armazenamento. Determinou-se a distribuição granulométrica, os diâmetros médios d_{50} e de Sauter, a massa específica das partículas, as densidades *bulk* e a porosidade do leito em função do número de vibrações utilizadas na compactação, as densidades *bulk* aerada e compactada e os índices de Hausner e de Carr. Os resultados mostraram que compactações menos intensas ocorreram para os pós de menores granulometrias; a cinética de compactação dos materiais é afetada pelas características físicas dos pós e o modelo de Mallol *et al.* (2008) se ajustou bem aos dados experimentais e foi fisicamente coerente.

Autorização legal: Nada a declarar.

Palavras-chave: serragem em pó; densidades *bulk*; índice de Hausner e de Carr.

Apoio financeiro: FAPESP (Processo 2016/03587-0)

Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição: Nada a declarar.

Introdução:

Segundo a ABTCP (2015), a produção brasileira de papel, em 2014, chegou a 10,4 milhões de toneladas, estando a maior parcela das indústrias do setor concentradas na região Sudeste do Brasil. Dentre os resíduos do processo, destacam-se os pós de serragem, gerados em grande quantidade, de difícil descarte e de alto poder calorífico.

Esses resíduos, muitas vezes, são transformados em subprodutos da indústria, sendo utilizados em sistemas de cogeração de energia ou para fabricação de compósitos poliméricos. Nesses processos, os pós de serragem são submetidos a diferentes operações unitárias, tais como empacotamento, descarga de reservatórios,

transporte e armazenamento, nas quais os pós sofrem compactação gravitacional.

A compactação gravitacional é caracterizada pela diminuição do volume total do leito de partículas dos pós pela ação do peso das partículas como principal força motriz e tendo como forças contrárias a coesão interpartículas e a adesão com as paredes dos equipamentos.

Nesse sentido, é importante do ponto de vista tecnológico conhecer como as propriedades do conjunto das partículas ou propriedades *bulk* se alteram sob compactação, assim como uma boa caracterização desses resíduos pode contribuir para a melhoria do processo e otimização da planta.

O presente trabalho teve como objetivo analisar o processo de compactação gravitacional de pós de serragem de pinheiro, provenientes de resíduo industrial, em três granulometrias diferentes. Foram avaliadas as influências do diâmetro médio e das características físicas dos pós sobre a densidade *bulk* e a porosidade média do leito em diferentes estados de compactação.

Além disso, foram determinados os índices de Hausner e de Carr dos materiais e os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Mallol *et al.* (2008).

Metodologia:

Os pós de serragem, com três diferentes distribuições granulométricas (Serragens P, M e G) foram fornecidos pela INTECMAT (São Carlos/SP). As distribuições granulométricas para a serragem M e G foram obtidas em triplicata, utilizando uma série de 10 peneiras de aço (Retsch® - ASTM E11), e um agitador (Retsch® - AS 200 control) com amplitude de vibração de 1,5 mm e com uma massa de amostra de cerca de 200g, de acordo com a ASTM C136. Para a serragem P utilizou-se a difração a laser por meio do Malvern Mastersizer, em triplicata, com dispersão em água destilada.

A partir das distribuições, foram obtidos os diâmetros médios d_{50} e o de Sauter (d_s). O primeiro é definido como o diâmetro que representa 50% da distribuição granulométrica das partículas, enquanto que o segundo

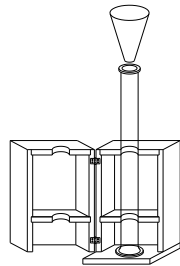
representa o diâmetro da esfera que possui uma relação volume/superfície igual ao da partícula (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982).

A massa específica aparente das partículas (ρ_p) foi determinada por picnometria líquida com água destilada, em triplicata.

A densidade *bulk* dos pós foi determinada segundo a norma QAS/11450 da Organização Mundial da Saúde de 2012, em triplicata, utilizando-se uma proveta de 250 ml (precisão de 2 ml) e 2,2 cm de diâmetro, uma balança com precisão de $\pm 0,01$ g (Gehaka BG-4000) e o equipamento mostrado na Figura 1.

Cerca de 50 g de pó (80% do volume da proveta) foram inseridos na proveta por gravidade, com o auxílio de um funil posicionado em uma altura constante, a fim de evitar a compactação do pó. O dispositivo possibilita que a proveta vibre verticalmente, mantendo-se alturas de deslocamento constantes (5 cm em relação à base) para cada vibração (N). A densidade *bulk* aerada é obtida para N=0 e a compactada para N=1200.

Figura 1 - Dispositivo utilizado para medição de densidade *bulk* de pós



Fonte: Campos e Ferreira, 2013

A porosidade média do leito foi calculada segundo a Equação (1) (WOODCOCK e MASON, 1987).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (1)$$

Os índices de compactação denominados índice de Hausner e índice de Carr foram calculados segundo as Equações (2) e (3) e classificados segundo Tan *et al.* (2015).

$$IH = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (2)$$

$$IC = \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \quad (3)$$

Resultados e Discussão:

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos pós de serragem de pinheiro (*Pinus elliottii*), em que é possível notar que as partículas P apresentam maior fração de finos, seguido pela M e G e que cada um dos pós foi classificado diferentemente segundo Woodcock e Mason (1987).

A baixa massa específica aparente das partículas de serragem indica que em processos de compactação gravitacional, existe pouca diferença entre a situação aerada (estado de compactação do material particulado no qual existe a maior quantidade possível de espaços vazios entre as partículas do pó) e a compactada, como pode ser visto na Tabela 1 para ε_a e ε_c .

Outros fatores que podem dificultar a compactação são o tamanho, formato e a ordenação das partículas no leito, visto que esses estão relacionados com as forças interpartículas, contrárias à compactação. Segundo Delaney e Cleary (2010) para partículas de formato irregular, como as serragens, há formação de leitos desorientados, conseqüentemente, com maior porosidade. Deng e Davé (2013) e Parteli *et al.* (2014) estenderam a discussão para pós coesivos, afirmando que quanto menor o tamanho médio dos pós, maior a porosidade do leito, devido à significância das forças de van der Waals.

Os resultados do parágrafo anterior concordam o exposto na Tabela 1, em que a serragem P, de menor diâmetro médio, apresenta maior porosidade do leito em comparação com as granulometrias M e G; assim como concordam com a literatura, em que foram obtidos ε_c entre 0,88 e 0,85 (TANNOUS *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2015; DHIMAN *et al.*, 2016).

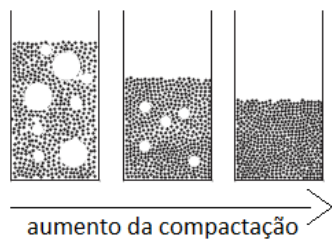
A compactação de pós foi discutida por Mallol *et al.* (2008) para pós de quartzo, em função de dois fenômenos independentes,

Tabela 1 - Propriedades dos materiais particulados

Pós	d_{50} (μm)	d_s (μm)	ρ_p (kg/m^3)	ρ_a (kg/m^3)	ρ_c (kg/m^3)	ε_a	ε_c	IH	IC
P	83 Pó fino	10	1515 ± 45	151 ± 3	259 ± 4	0,90	0,83	1,72 \pm 0,02 Péssima	0,42 Péssima
M	265 Pó grosseiro	168	1462 ± 13	182 ± 4	264 ± 4	0,88	0,82	1,45 \pm 0,03 Ruim	0,31 Ruim
G	430 Sólido granular	319	1338 ± 3	253 ± 2	318 ± 2	0,81	0,76	1,26 \pm 0,02 Boa	0,20 Boa

ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Rompimento de poros entre partículas



Fonte: Adaptação de Mallol *et al.* (2008)

O primeiro, característico do início da compactação, é a redução do volume de vazios ou de poros grandes (muito maiores do que o tamanho médio das partículas) a volumes com tamanhos menores, da mesma ordem de grandeza do volume das partículas. Por fim, tem-se o rearranjo das partículas do pó para posições mais favoráveis nos vazios do leito, diminuindo o volume total ocupado pelo pó.

O modelo de Mallol *et al.* (2008), o qual possui 3 parâmetros de ajuste com significado físico (f - fração de empacotamento decorrente da eliminação dos poros grandes, N_1 e N_2 - número de vibrações para diminuir 63% dos poros grandes e poros pequenos, respectivamente), é mostrado nas Equações 4 e 5.

A razão entre o grau de avanço para cada vibração e o máximo (ξ/ξ_{max}) representa o estado de compactação do sistema, em que V_{p0} é o volume aerado, V_p é o volume para cada vibração N e $V_{p\infty}$ é o volume compactado.

$$\frac{\xi}{\xi_{max}} = \left[1 - f \cdot e^{\left(-\frac{N}{N_1}\right)} + (1 - f) \cdot e^{\left(-\frac{N}{N_2}\right)} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\xi}{\xi_{max}} = \frac{V_{p0} - V_p}{V_{p0} - V_{p\infty}} \quad (5)$$

A Figura 3 mostra as curvas de compactação dos pós, em que os símbolos

vazios dizem respeito à densidade *bulk* e os cheios à porosidade do leito. Valores de N superiores a 500 foram omitidos por haver pouca mudança nas propriedades até $N=1200$.

É possível notar que o perfil de compactação é similar para os três pós, com um aumento inicial acentuado da densidade *bulk* até um número de vibrações $N \sim 40$. A partir desta condição, ρ_b passa a aumentar lentamente em função do número de vibrações, até atingir valores constantes. Para a porosidade, nota-se comportamento inverso.

A serragem G possui compactação mais rápida no início, seguida pela M e P. A compactação máxima é atingida com menor N para a serragem M, depois pela G e P.

Os valores de f , N_1 e N_2 apresentaram-se fisicamente coerentes para todos os pós e de acordo com o exposto no parágrafo anterior. A diminuição dos poros grandes, característica do início do processo, foi mais rápida para a serragem G ($N_1 = 4,4$), seguida pela M ($N_1 = 7,1$) e P ($N_1 = 13,1$) e a diminuição dos poros pequenos, característica da compactação máxima do leito, foi mais rápida para as partículas M ($N_2 = 156,4$), seguidas pela G ($N_2 = 221,2$) e pela P ($N_2 = 279,7$).

Os valores de f sempre foram menores que 1 (P - 0,82; M e G - 0,76) e indicam que a maior eliminação dos vazios do leito no processo de compactação gravitacional é devido à eliminação de poros grandes. A Figura 4 mostra o ajuste do modelo (linhas) aos pontos experimentais.

Por fim, nota-se que o índice de Hausner (IH) e o de Carr (IC), mostrados na Tabela 1, concordaram entre si na classificação da compactação dos pós e que os resultados mostraram-se coerentes com os dados de porosidade média, visto que as serragens que apresentaram maior porosidade do leito, em ordem crescente, G, M e P, apresentaram IH e IC igualmente crescentes, o que indica maior dificuldade de compactação.

Figura 3 - Densidade *bulk* e porosidade média em função das vibrações para compactação

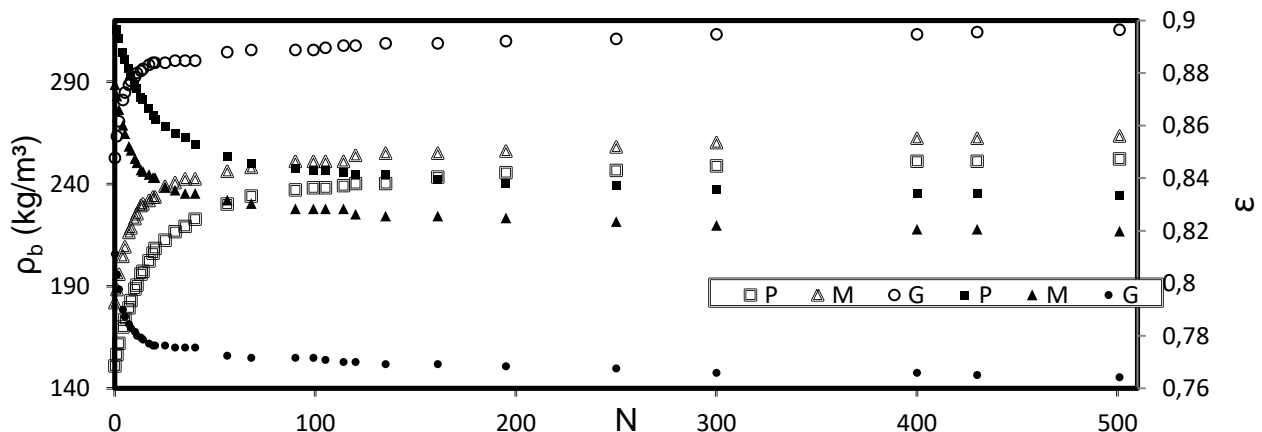
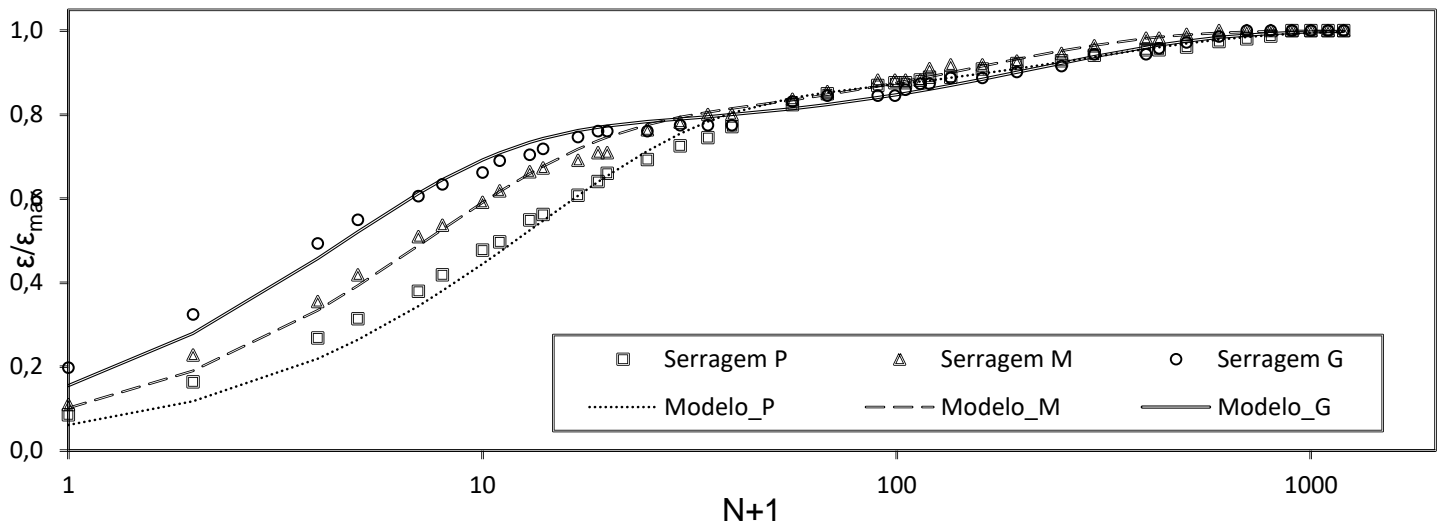


Figura 4 - Grau de avanço em função das vibrações para compactação, com ajuste de Mallol *et al.* (2008)

Conclusões:

O modelo de Mallol *et al.* (2008), previamente validado para pós de quartzo, foi adequado e pode ser estendido para a previsão da compactação gravitacional de serragens em pó, as quais possuem índices de compactação muito piores que os de quartzo.

Os parâmetros f , $N1$ e $N2$ foram coerentes fisicamente e de acordo com os dados experimentais e podem ser utilizados industrialmente para a previsão da densidade *bulk* em equipamentos de processo sob compactação gravitacional.

Os índices de Hausner e de Carr forneceram o mesmo resultado qualitativo para a compactação dos pós, sendo igualmente adequados, e os pós de menor granulometria foram os de pior compactação, possivelmente, pela maior influência das forças interpartículas.

Referências bibliográficas

ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Guia ACTP de Fornecedores e Fabricantes. **48º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel**. 2015.

CAMPOS, M. M.; FERREIRA, M.C.; - *A Comparative Analysis of the Flow Properties between Two Alumina-Based Dry Powders*. **Advances in Materials and Science Engineering**, Vol. 2013, Article ID 519846, 7 p, 2013.

DELANEY, G. W.; CLEARY, P. W. - The packing properties of superellipsoids. **EPL (Europhysics Letters)**. 89(3):34002. 2010.

DENG, X.L.; DAVÉ, R.N. - Dynamic simulation of particle packing influenced by size, aspect ratio and surface energy. **Granular Matter**. 15: 401. doi:10.1007/s10035-013-0413-0. 2013.

DHIMAN, J.; SHRESTHA, A.; FASINA, O.; ADHIKARI, S.; VIA, B.; GALLAGHER, T. - Physical, ignition, and volatilization properties of biomass feedstock dusts. **Transactions of ASABE**. 2016

GUO, Z.; CHEN, X.; XU, Y.; LIU, H. Study of Flow Characteristics of Biomass and Biomass-Coal Blends. **Fuel**. 207-213. 2015.

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J.; - *Introduction to Mineral processing*. Ed John Wiley & Sons, 1982.

MALLOL, G.; AMORÓS, J.L.; ORTS, M.J.; LLORENS, D.; - *Densification of Monomodal Quartz Particle Beds by Tapping*. **Chemical Engineering Science**, vol. 63, p. 5447-5456, 2008.

PARTELI, E. J. R.; SCHMIDT, J.; BLUMEL, C.; WIRTH, K. E.; PEUKERT, W.; POSCHEL, T. - Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders. **Nature Scientific Reports**. 4:6227. 2014.

TAN, G.; MORTON, D. A. V.; LARSON, I. - On the Methods to Measure Powder Flow. **Current Pharmaceutical Design**. 21. 5751-5765. 2015.

TANNOUS, K; LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; GRACE, J. R. - Physical Properties for Flow Characterization of Ground Biomass from Douglas Fir Wood. **Particulate Science and Technology** 31. 291-300. DOI: 10.1080/02726351.2012.732676. 2013.

WOODCOCK, C.R.; MASON, J.S.; - *Bulk Solids Handling - An Introduction to the Practice and Technology*. Glasgow: Leonard Hill, 1987.