

FORÇA DE ADESÃO ENTRE PARTÍCULAS E SUPERFÍCIES DE DIFERENTES RUGOSIDADES.

ANTONIO KRASNIEVIZ RODRIGUES^{1,2}, MARCOS ALCEU FELICETTI^{2,3}

1 Introdução

A força de adesão pode ser definida como a força exigida para desprender uma partícula aderida a uma determinada superfície. A adesão entre superfícies sólidas em contato é muito importante para as propriedades mecânicas quando o assunto é a separação (Charlaix e Crassous, 2005). A adesão de partículas micrométricas em superfícies vem ganhando destaque em vários campos da tecnologia. Enquanto a adesão é requerida em certos processos técnicos como na filtração, no revestimento de superfície, em outros pode gerar efeitos não desejados, como na contaminação de *chips* de microcomputadores (Weiner, Kokosinski, Cook e Grunze; 1988) e nas indústrias de alimentos, resultando em uma redução na eficiência das instalações industriais. A técnica centrífuga (Shimada et al., 2000; Zhou et al., 2003 e Takeuchi, 2006) é o método utilizado no estudo da interação partícula-superfície e tem como vantagem poder determinar a força de adesão entre partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas ou rugosas; permitindo determinar a força de adesão, através da distribuição da força adesiva dentro de um grupo grande de partículas (incluindo até 1000 partículas) sobre um substrato, em uma única medida. Para este método, a força de adesão é igual em magnitude, mas com sinal oposto, à força centrífuga requerida para desprender as partículas do substrato.

2 Objetivos

Investigar a influência da rugosidade da superfície de contato com o material pulverulento (pó) orgânico sobre a força de adesão partícula superfície, utilizando a técnica centrífuga.

3 Metodologia

Materiais: O material pulverulento utilizado nesta pesquisa foi leite em pó (Nestle[®]) comercialmente adquirido no varejo da cidade de Laranjeiras do Sul/PR. Discos de aço inox, com diâmetro de 22,23 mm e espessura de 4,95 mm, foram utilizados como substrato para avaliação da adesão das partículas de leite em pó. Como o objetivo da pesquisa foi avaliar a força de adesão de um material pulverulento sobre uma superfície de diferente rugosidade,

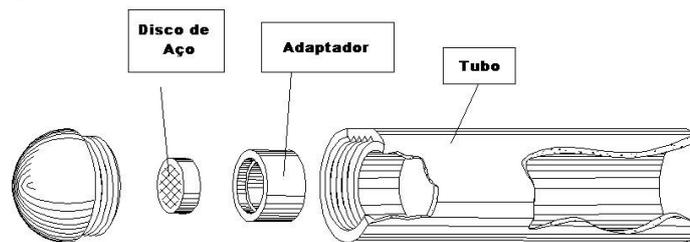
1 Titulação acadêmica Graduação, instituição UFFS, *campus Laranjeiras do Sul*, contato: antoniokrasnieviz@gmail.com

2 Grupo de Pesquisa: Produção, transformação e armazenamento de alimentos

3 Titulação acadêmica Doutor Engenharia Química, instituição UFFS, **Orientador**.

dois tubos de aço inox, de mesma dimensão, foram adotados ($2\mu\text{m}$ e $30\mu\text{m}$ de rugosidade média, respectivamente). Tubos com adaptadores em aço inoxidável foram utilizados para acomodar os discos de inox conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama esquemático do tubo e do adaptador, construído em alumínio, instalados na microcentrífuga.



Equipamentos: O módulo experimental utilizado para a realização da pesquisa era composto por um dispersor de partículas, uma microcentrífuga, um microscópio óptico e um computador com *software* analisador de imagens (Image Pro Plus 6.0). A microcentrífuga (marca Hettich, modelo Rotina 380) possui velocidade máxima de rotação de 10.000 rpm (Figura 2).

Figura 2 – Microcentrífuga marca Hettich, modelo Rotina 380.



O microscópio (marca DIGILAB, modelo Biológico Trinocular DI-115T com câmera DIGILAB HD 720p 5 HD) foi utilizado para melhor visualização e aquisição das imagens. O microscópio foi ajustado para uma ampliação de 40 vezes.

Método: As partículas do material pulverulento foram dispostas sob o disco de prova com o auxílio do dispersor de pó. A umidade relativa do ar do laboratório era controlada e mantida abaixo de 50% afim de evitar a aglomeração das partículas. O controle da umidade relativa do ar foi realizado utilizando aparelho de ar condicionado, mantendo a temperatura do ar entre 15 a 20 °C. As partículas de leite em pó foram armazenadas em dessecador com sílica gel, para minimizar a variação de umidade.

Press-on e spin-off

Após controle da umidade relativa do ar abaixo de 50% e da dispersão uniforme das partículas do leite em pó sobre a superfície do disco de prova, o disco foi acomodado no adaptador e no tubo, e o conjunto foi colocado na centrífuga. O disco foi disposto no equipamento de forma que a força centrífuga comprimisse as partículas sobre a superfície. Esta força de compressão, também denominada de *press-on* foi aplicada sobre o disco de prova na velocidade de rotação de 1.000 rpm. Após 1 min da *press-on* as imagens da superfície foram obtidas pela câmera digital acoplada ao microscópio. E pelo *software* analisador de imagens a contagem das partículas foi determinada. Em seguida, os discos retornaram à centrífuga, porém em posição invertida da anterior para a aplicação da força *spin-off* (desprendimento das partículas). As velocidades angulares foram de 1.000, 3.000, 5.000, 7.000 e 9.000 rpm, respectivamente. Entre os intervalos de cada aplicação de velocidade de desprendimento os discos foram analisados no microscópio e as imagens capturadas pela câmera digital para a obtenção do diâmetro médio, do raio e da área de cada partícula para a determinação da força de adesão.

Força de adesão

Para a determinação da força de adesão foi necessário calcular a massa das partículas do material pulverulento: $m = \rho_p \cdot V_p$ Equação 1

sendo ρ_p a massa específica do leite em pó ($1.036 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e V_p o volume médio das partículas de leite em pó (m^3). O volume das partículas foi determinado utilizando a equação de cálculo de volume da esfera:

$$V_p = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_p^3}{3} \quad \text{Equação 2} \quad \text{sendo } R_p \text{ o raio médio da partícula (m).}$$

Com a massa média das partículas de leite em pó calculada, foi realizado o cálculo da força de adesão entre a superfície de aço inox e a partícula leite em pó. Assume-se que a força de adesão (F_{ad}) é igual a força centrífuga em magnitude, porém com o sinal oposto, logo:

$$F_{ADES\tilde{A}O} = -F_{CENTR\tilde{I}FUGA} \quad \text{e} \quad F_{ADES\tilde{A}O} = m \cdot D_c \cdot \omega^2 \quad \text{Equação 3}$$

sendo $F_{CENTR\tilde{I}FUGA}$ a força centrífuga (N); $F_{ADES\tilde{A}O}$ a força de adesão (N); m a massa média das partículas de leite em pó (kg); D_c a distância entre a amostra e o centro do rotor da centrífuga (m) e ω a velocidade angular necessária para a descompressão ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).

4 Resultados e Discussão

Executada a metodologia, um gráfico de percentagem de partículas em função da velocidade angular de desprendimento foi construído. Os diâmetros médios utilizados na legenda deste

foram obtidos pela média dos diâmetros das partículas de leite em pó fornecido pelo *software* Image Pro-Plus 6.0. Verifica-se, neste gráfico, que com o aumento da velocidade angular de desprendimento (*spin-off*), a percentagem de partículas aderidas na superfície do disco diminuiu em ambos os discos de aço inox de diferentes rugosidades.

Com os resultados encontrados para a percentagem de partículas aderidas em função da força de adesão para o diâmetro médio de 56,42 μm para o disco de menor rugosidade (2 μm) e 62,85 μm para o disco de maior rugosidade (30 μm), construiu-se o gráfico da Figura 4 em coordenadas do tipo logaritmo-probabilidade.

Figura 3 – Percentagem de partículas de leite em pó aderidas na superfície de aço inox em função da velocidade angular de desprendimento.

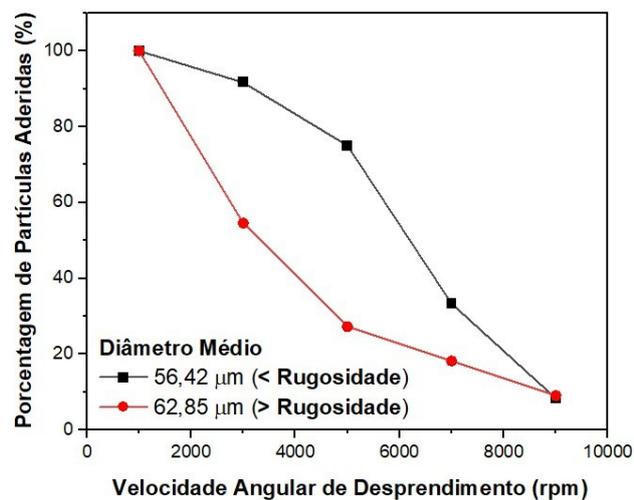
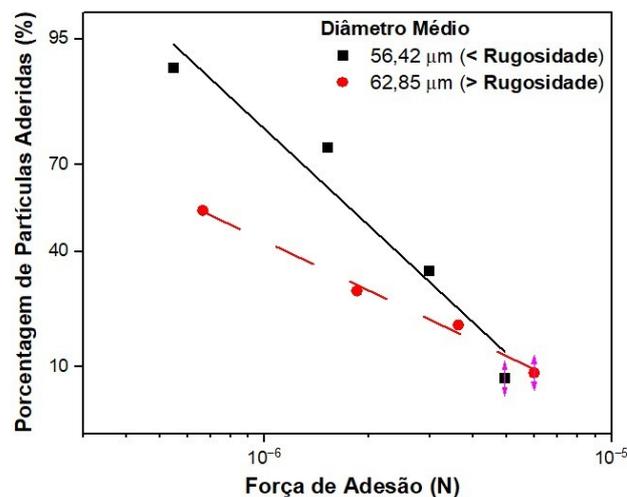


Figura 4 – Percentagem de partículas aderidas em função da força de adesão.



Observa-se que a força de adesão apresentou comportamento linear com o diâmetro da partícula do material pulverulento e a superfície de aço inox em ambos os discos, porém, a

superfície de maior rugosidade apresentou menores valores de força de adesão. Este fenômeno é justificado através da redução da área de contato (maior aspereza) com a diminuição da força de Van der Waals na superfície de maior rugosidade. Comportamentos semelhantes foram observados para a força de adesão utilizando a técnica centrífuga por Lam e Newton (1992), Salazar-Banda et al. (2007), que realizaram o estudo da adesão de amido em uma superfície de aço inoxidável utilizando uma microcentrífuga (18.000 rpm) e por Shimada et al. (2002), que avaliaram a adesão de partículas de amido de milho e amido de batata sobre substrato de vidro. O mesmo comportamento foi observado com partículas de natureza distinta, por Almeida (2013), que analisou a adesão de partículas de fuligem aderidas em um substrato de membrana de éster-celulose e Lam e Newton (1992), que avaliou a adesão de partículas de carbonato de cálcio em um substrato de aço inoxidável utilizando uma microcentrífuga em que a velocidade máxima de rotação era de 14.000 rpm.

5 Conclusão

A força de adesão entre as partículas de leite em pó e a superfície de aço inox apresentou um comportamento linear com o diâmetro das partículas. A superfície de aço inox de maior rugosidade apresentou menores valores de força de adesão que a superfície de menor rugosidade quando se aplicou a mesma velocidade angular de compressão.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, A. F. Determinação da força de adesão através da técnica centrífuga entre partículas e membranas filtrantes. Dissertação de Mestrado, UFSCar, São Carlos, 2013.
- CHARLAIX, E. and CRASSOUS, J., "Adhesion forces between wetted solid surfaces". *The journal of Chemical Physics*, v. 122, nº 184701, p. 1 - 9, 2005.
- LAM, K.K., NEWTON, J.M., "Influence of particle size on the adhesion behaviour of powders, after application of an initial press-on force". *Powder Technology*, v.73, p.117 - 125, 1992.
- SALAZAR-BANDA, G. R.; FELICETTI, M. A.; GONÇALVES, J. A. S.; COURY, J. R.; AGUIAR, M. L. "Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique". *Powder Technol.* v.173, p.107-117, 2007.
- SHIMADA, Y., YONEZAWA, Y., SUNADA, H., NONAKA, R., KATOU, K. and MORISHITA, H., "Development of an apparatus for measuring adhesive force between fine particles". *KONA*, n. 20, p. 223 - 230, 2002.
- WEINER J. J., KOKOSINSKI J., COOK M. R. and GRUNZE M., em MITTAL K. L. (ed), *Particles and Surfaces I*, Plenum Press, New York, p. 69, 1988.

Palavras-chave: Interação; força de adesão; rugosidade; técnica centrífuga.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES 2020 - 0129

Financiamento: Fundação Araucária.