

**ADESÃO ENTRE PARTÍCULAS E SUPERFÍCIES DE DIFERENTES
RUGOSIDADES**

**ADHESION BETWEEN PARTICLES AND SURFACES OF DIFFERENT
ROUGHNESS**

Antonio Krasnieviz Rodrigues¹

Marcos Alceu Felicetti²

Resumo: Força de adesão pode ser definida como a força exigida para desprender uma partícula aderida a uma determinada superfície. A adesão entre superfícies sólidas é muito importante para as propriedades mecânicas quando o assunto é a separação (Charlaix e Crassous, 2005). A interação de partículas micrométricas em superfícies vem ganhando destaque em vários campos da tecnologia. Enquanto este fenômeno 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 et al., 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 determinar a força de adesão entre partículas reais regulares e irregulares em superfícies lisas ou rugosas 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. 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. A diminuição da força de adesão com o aumento da rugosidade da superfície é devido a força de Van der Waals diminuir com a redução na área de contato entre a partícula e a superfície do substrato.

Palavras-chave: Interação; compressão; rugosidade; técnica centrífuga.

¹ Graduação em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS. antoniokrasnieviz@gmail.com

² Doutorado. Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS. Docente da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Laranjeiras do Sul do curso em Engenharia de Alimentos, com ênfase em Engenharia de Alimentos; na pós-graduação *stricto sensu* atua no mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos atuando principalmente na área de Sistemas Particulados (Força de Adesão) e Processos Térmicos. marcos.felicetti@uffs.edu.br

INTRODUÇÃO

A adesão pode ser compreendida como atração entre dois corpos sólidos, com superfície de contato comuns, e produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância. A adesão entre superfícies sólidas em contato é muito importante para as propriedades mecânicas quando o assunto é revestimento de partículas finas da fluidização, nos processos de envolvimento de matérias sólidas da microencapsulação e em meios granulares como a areia e a argila que podem estar ligadas umas às outras no solo (Charlaix e Crassous, 2005). Compreender a adesão de partículas e a sua remoção das superfícies é importante para muitos processos industriais. Por exemplo, na indústria microeletrônica, partículas aderentes com diâmetro muito pequeno podem contaminar os dispositivos eletrônicos de uma placa e produzir graves defeitos quanto ao desempenho da mesma (Burdick et al., 2005). Como os dispositivos eletrônicos continuam diminuindo aceleradamente de tamanho, métodos para remoção dessas partículas micrométricas são necessários por essas indústrias (Rimai e Busnaina, 1995 e Krishanan et al., 1994).

Conhecer a força de adesão não só é importante para a descrição quantitativa de dispositivos eletrônicos, mas também para os processos de filtração e de limpeza de ar industriais. Por isto um número grande de trabalhos teóricos e experimentais é dedicado aos problemas de adesão, como revisado por Corn (1966), Krupp (1967), Zimon (1969), Astm (1977), Lam e Newton (1982), Busnaina et al. (1993), Podczek (1995), Rimai et al. (2000), Oláh e Vancso (2005), Li et al. (2006) e Farshchi-Tabrizi et al. (2006). A adesão de partículas micrométricas e nanométricas 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 por exemplo, na contaminação de *chips* de microcomputadores (Weiner, Kokosinski, Cook e Grunze; 1988), nas superfícies ópticas sensíveis, nas indústrias de alimentos e farmacêuticas e nas tubulações, resultando em uma redução na eficiência das instalações industriais. Nas indústrias de preenchimento de cápsulas, adesões indesejadas podem afetar seriamente o desempenho dos equipamentos, devido ao contato repetido do material particulado com as estruturas metálicas do equipamento (Siegel e Hanus; 1963).

Há várias técnicas experimentais e métodos diferentes que foram desenvolvidos, durante os anos, para medir a força de adesão entre partícula e uma superfície (Krupp, 1967; Boehme,

Krupp, Rabenhorst e Sandstede, 1962; Lodge, 1983). Entre esses métodos (Microscopia de Força Atômica e Separação por Campo Elétrico), a técnica centrífuga vem sendo utilizada (Otsuka, Iida, Danjo e Sunada, 1988; Booth e Newton, 1987; Otsuka, Iida, Danjo e Sunada, 1983; Podczeczek et al., 1995; Shimada et al., 2000; Zhou et al., 2003 e Takeuchi, 2006) e tem como vantagem poder determinar a força de adesão entre partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas ou rugosas.

A técnica centrífuga permite 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 (Böehme et al., 1962). 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.

Dado o grande interesse de compreendermos o que este fenômeno representa na adesão de partículas em superfícies e sua complexidade, este fenômeno ainda está longe de ser compreendido. Isto se deve ao fato da adesão partícula-superfície ser influenciada pelas características físico-químicas dos materiais pulverulentos e dos substratos como, por exemplo, tamanho da partícula e rugosidade das superfícies.

Assim, diante a importância da força de adesão em vários processos, este trabalho tem como objetivo investigar a influência do tamanho das partículas pulverulentas inorgânicas – óxido de cálcio (CaO) sobre a força de adesão partícula substrato, utilizando a técnica centrífuga. O que certamente, será um grande passo na determinação da força de adesão entre partículas, parâmetro de extrema importância para o dimensionamento de alguns equipamentos tais como: filtros de mangas, de secagem de pastas, de recobrimento de partículas entre outros.

Como justificativa este projeto de pesquisa propiciou ao acadêmico iniciativa própria, responsabilidades e condições para o desenvolvimento de atividades de iniciação científica que possibilitam o domínio de métodos gerais e específicos de investigação, na análise e atuação na área de conhecimento acadêmico-profissional. estimular a produção científica e a afinidade com a pesquisa, o ensino e a extensão para novos projetos envolvendo estas três esferas, possibilitando, desta maneira, maior interação entre a graduação e a pós-graduação. além de possibilitar maior interação entre a graduação e a pós-graduação e a otimização dos recursos humanos para a pesquisa.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A força de adesão entre corpos contíguos é devida às forças de Van der Waals, eletrostática e capilar (Rumpf, 1977). Mas o predomínio de uma ou várias destas forças depende das condições locais durante os experimentos e das propriedades físico-químicas dos materiais em contato. Todas estas forças, em tese, são afetadas pelo formato da partícula, pela rugosidade da superfície, pelo tamanho da partícula, pela umidade relativa do ar e pela pressão de aplicação do contato (Ahrens et al., 2005).

A força mais importante é a força de Van der Waals. Esta força surge porque o movimento aleatório dos elétrons, em qualquer material, produz áreas transitórias de cargas concentradas chamadas dipolos (Rumpf, 1977). A qualquer instante estes dipolos induzem dipolos complementares no material vizinho, produzindo forças atrativas. A força de Van der Waals diminui rapidamente com a distância de separação entre as superfícies; conseqüentemente, esta influência estende-se apenas por alguns diâmetros moleculares longe da superfície (Krupp, 1967).

Depois do contato inicial da partícula, a força de Van der Waals e a força eletrostática deformam gradualmente a superfície para reduzir a distância de separação e aumentar a área de contato até que as forças atrativas equilibrem as forças que resistem à deformação. A dureza dos materiais envolvidos delimita o tamanho da área de contato final e, portanto, a intensidade da força de adesão (Tsai et al., 1991).

A maioria das partículas de 0,1 mm ou maiores carrega alguma pequena carga resultante que induz uma carga igual, mas de sentido contrário na superfície (Hinds, 1998).

Para umidades relativas maiores que 90% e superfícies lisas a força de capilaridade predomina na interação partícula-superfície. Para baixas umidades relativas do ar, a força depende da curvatura da rugosidade da superfície nos pontos de contato e não do diâmetro de partícula (Corn, 1961).

Medidas experimentais de forças de adesão são feitas determinando a força exigida para separar uma partícula de uma superfície. Estas podem ser medidas diretamente através de uma força centrífuga.

Segundo Rumpf (1977), a força eletrostática é dez vezes menor que a força de Van der Waals. O papel da força eletrostática na adesão é contribuir na sedimentação e na aglomeração das partículas (Visser, 1995). Em um ambiente seco, a força eletrostática pode surgir durante o contato de superfícies de materiais distintos, mas tende a ser constante no contato entre dois

materiais idênticos (Zimon, 1982). Além disso, o uso de uma força de compressão para aumentar a verdadeira área de contato entre partículas e superfícies aumenta a força de Van der Waals por um fator de cerca de 5 (Podczeczek et al., 1996). Assim, as forças eletrostáticas são muito pequenas para influenciar significativamente as forças de adesão medidas após a aplicação de uma força externa (Gady et al. 1997, 1998a, 1998b).

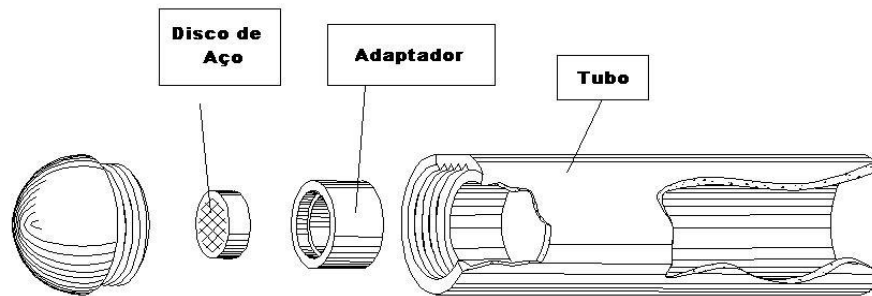
A força centrífuga pode ser definida como a força que tende a afastar a massa em rotação do seu centro de rotação, lançando-a na tangente a trajetória. Atingindo-se uma velocidade centrífuga crítica a força de adesão entre a partícula e a superfície será excedida. No equilíbrio a intensidade da força centrífuga é igual à força de adesão. A força centrífuga é representada por: $F = m \omega^2 r$. Assim podemos ver que essa força depende da massa das partículas (m), da velocidade angular (ω), da superfície do substrato e da distância entre sua superfície e o eixo de rotação (r). Uma técnica centrífuga para se determinar a força de adesão entre partículas e superfície foi desenvolvida por Böhme et al. (1962) e Krupp (1967). Um tubo foi desenvolvido e adaptado junto ao cabeçote do rotor da centrífuga possibilitando a acomodação das superfícies contendo o material a ser analisado. As superfícies foram acomodadas de forma que ocorresse a adesão das partículas na superfície quando fosse acionada a centrífuga. Esse processo foi realizado com velocidade de rotação de 1 min antes de iniciar a desaceleração, pois, experiências anteriores, haviam demonstrado que esse seria um tempo adequado. Esta técnica mostrou-se segura e vantajosa na determinação da força de adesão de materiais pulverulentos polidispersos. Por isso será a técnica utilizada nos experimentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAL PULVERULENTO

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, dois tubos de aço inox, de mesma dimensão, foram adotados (2 μ m e 30 μ 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.



2.2 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.

2.3 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. Como indicador de umidade das partículas do material pulverulento, foi utilizada a sílica gel azul. A sílica gel azul muda de cor à medida que absorve água. Quando está saturada, a sílica gel azul fica rosa, identificando, desta maneira, o momento correto para substituição ou regeneração do dessecante.

2.3.1 TÉCNICA CENTRÍFUGA

A técnica centrífuga provoca o desprendimento das partículas de uma superfície. A utilização de uma centrífuga para a medição das forças de adesão é baseada no princípio de que a força resultante da velocidade angular de rotação de uma partícula, com massa definida numa distância conhecida do centro de rotação, excederá a força de adesão entre a partícula e a superfície acima de uma velocidade centrífuga crítica. Para partículas polidispersas aderidas numa superfície, a força necessária para desprender as partículas varia proporcionalmente ao tamanho da partícula. O desprendimento da partícula, utilizando a técnica centrífuga, pode monitorar a adesão das partículas carregadas e não carregadas. Portanto, é a técnica preferencial quando se estuda a dependência da adesão sobre partículas carregadas. Para a técnica centrífuga, assume-se que a força de adesão é igual em magnitude, mas com sinal oposto à força centrífuga aplicada, como mostra a seguinte equação:

$$F_{\text{centrífuga}} = - F_{\text{adesão}} \quad \text{Equação 1}$$

A força centrífuga, $F_{\text{centrífuga}}$, gerada no sentido da adesão ou no sentido do desprendimento, pode ser calculada utilizando a Equação 2:

$$F_{\text{centrífuga}} = M w^2 d_c$$

Equação 2

Sendo:

M : Massa média das partículas

w : Velocidade angular

d_c : Distância entre a amostra e o centro do rotor (eixo rotacional).

A distância entre o eixo da microcentrífuga e a superfície do substrato (d_c) é de 0,057 m.

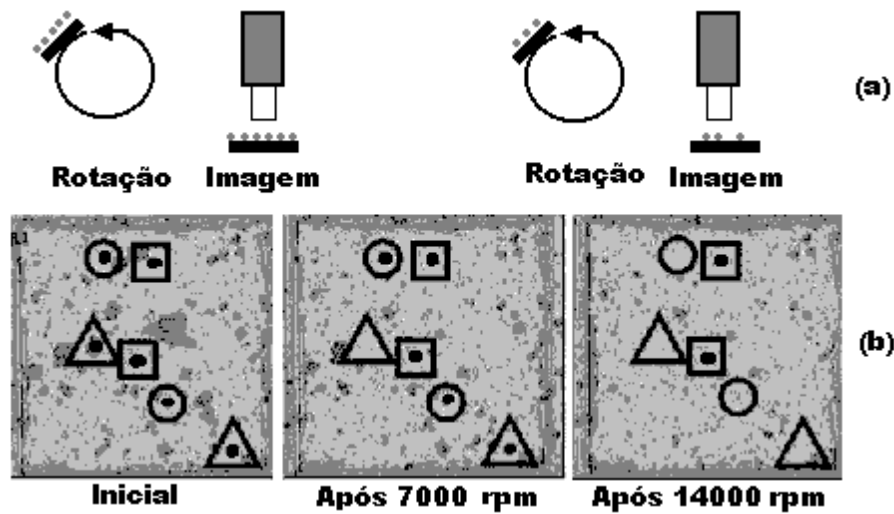
A técnica centrífuga utiliza a análise de imagens para determinar o número de partículas aderidas na superfície do disco de prova antes e depois de cada centrifugação. Duas forças centrífugas são aplicadas:

a) A força de pressão sobre as partículas (*press-on*), a qual é aplicada para incrementar o contato simultâneo entre as partículas. Nesse caso a amostra é colocada com o lado da superfície das partículas dirigida para o centro da centrífuga.

b) A força para o desprendimento das partículas (*spin-off*), a qual é empregada para desprender as partículas aderidas. Aqui, a amostra é colocada na centrífuga na direção oposta do caso anterior, a fim de permitir o desprendimento das partículas da superfície e realizar a limpeza da superfície.

A Figura 3 ilustra bem o efeito da aplicação das forças centrífugas *press-on* e *spin-off* sobre a superfície do substrato contendo o material pulverulento. As partículas são depositadas em uma superfície plana e levadas a microcentrífuga. Conforme mostra a Figura 3 (a). A superfície é rotacionada a velocidades crescentes, e a cada aumento da velocidade rotacional o número de partículas que permanecem sob a superfície do substrato é fotografada na mesma área da superfície onde as partículas foram depositadas. Assim pode-se analisar as mesmas partículas que permaneceram na superfície do substrato após cada aumento da velocidade rotacional até que, a força gerada seja suficiente ou não para remover aquela partícula. Três microfotografias de um experimento típico são mostradas na Figura 3 (b).

Figura 3 - (a) Desprendimento das partículas na técnica centrífuga, (b) Análise das imagens das superfícies antes e depois de cada centrifugação (Mizes et al., 2000).



A técnica centrífuga pode ser utilizada para medir a força de adesão entre partículas de origem orgânica ou inorgânica, com a qual se pode medir a força de adesão de um conglomerado de partículas de uma única vez, levando-se em conta os efeitos de partículas vizinhas. Além disso, essa técnica possui como vantagem medir a força de adesão de partículas reais, de forma irregular e superfície rugosa.

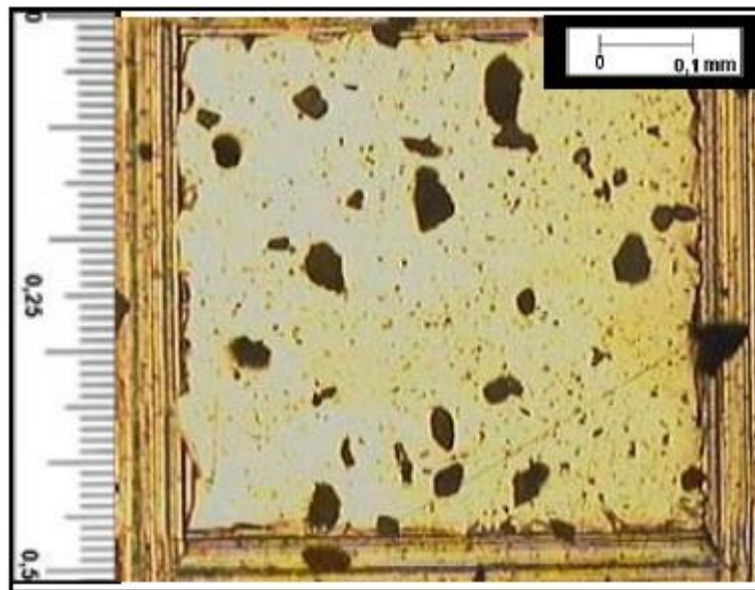
2.3.1.1 *PRESS-ON* e *SPIN-OFF*

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 comprimissem 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.

A Figura 4 ilustra a superfície do substrato com o material pulverulento após a velocidade *press-on* de 1.000 rpm.

Figura 4 – Microfotografia do substrato e partículas de leite em pó após a aplicação da velocidade *press-on* de 1.000 rpm (com ampliação de 100 vezes do microscópio – câmera DIGILAB HD 720p 5 HD Olympus BX60).



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Executada a metodologia, um gráfico de percentagem de partículas em função da velocidade angular de desprendimento foi construído e está representado pela Figura 5. 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 6 em coordenadas do tipo logaritmo-probabilidade.

Figura 5 – Percentagem de partículas de leite em pó aderidas na superfície de aço inox em função da velocidade angular de desprendimento.

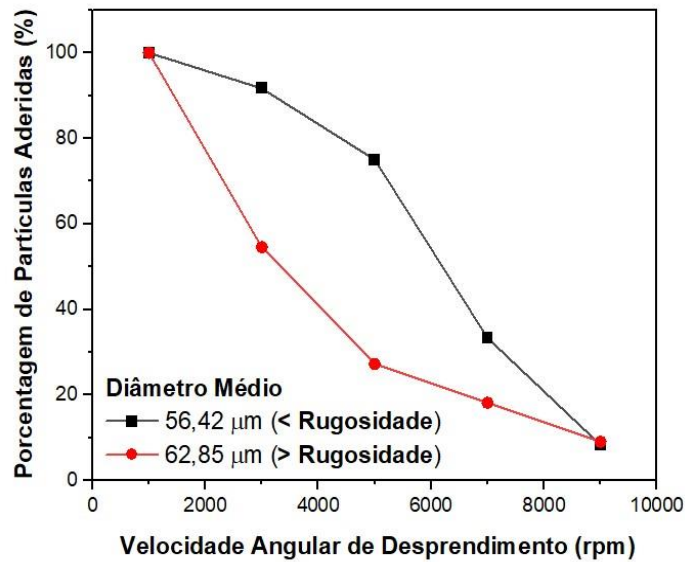
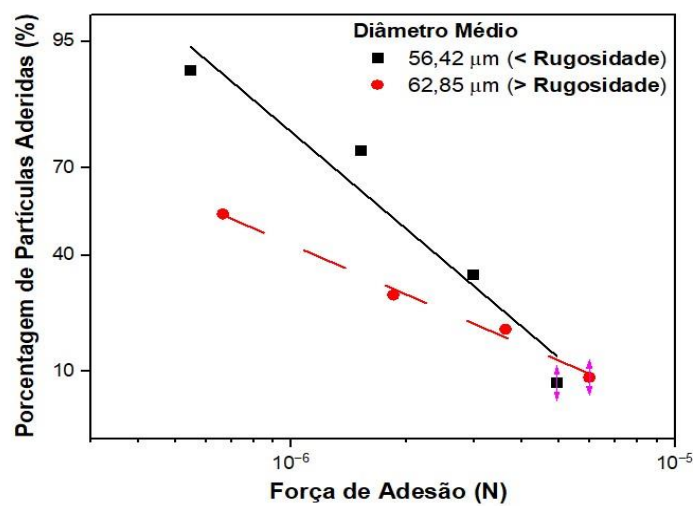


Figura 6 – Percentagem de partículas aderidas em função da força de adesão.



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.

CONCLUSÃO

Espera-se que este projeto estimule a afinidade com a pesquisa e com a extensão, agregando desta forma conhecimento e enriquecimento científico e tecnológico ao acadêmico. 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. Além disso, foi possível observar que com o aumento da força de compressão (*press-on*) as partículas de todas as faixas tiveram comportamento similares em relação ao seu desprendimento quando comparados a forças menores aplicadas. 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

AHRENS, F., PATTERSON, T., MUELLER, S. and HOJJATIE, B., "Investigation of paper dryer picking, web transfer and quality issues using a new web adhesion and drying simulator". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.22, nº 2, p. 217 - 225, 2005.

ASTM, D 907, Standard Definitions of Terms Relating to Adhesives, Annual Book of ASTM Standards, v. 22, p. 233, 1977.

BÖEHME, G., KRUPP, H., RABENHORST, H. and SANDSTEDTE G., “Adhesion measurements involving small particles”. *Trans. Inst. Chem. Eng.* v.40, p.252 - 259, 1962.

BOOTH, S. W. and NEWTON, J.M., “Experimental investigation of adhesion between powders and surfaces”. *Journal of Pharmaceutical and Pharmacology.* v.39, p.679 - 684, 1987.

BURDICK1, G. M., BERMAN, N. S. and BEAUDOIN, S. P., “Hydrodynamic particle removal from surfaces”. *Thin Solid Films*, v. 488, p. 116 - 123, 2005.

BUSNAINA, A., TAYLOR, A., J. and KASHKOUSH, I., “Measurements of Adhesion and Removal Forces of Submicron Particles on Silicon Surfaces”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 7, n°. 5, p. 441 - 455, 1993.

CHARLAIX, E. and CRASSOUS, J., “Adhesion forces between wetted solid surfaces”. *The journal of Chemical Physics*, v. 122, n° 184701, p. 1 - 9, 2005.

CORN, M., “The adhesion of solid particles to solid surfaces, I. A review”. *J. Air Pollution Control Assoc.*, v.11, p. 523 - 528, 1961.

FARSHCHI-TABRIZI, M., KAPPL, M., CHENG, Y., GUTMANN, J. and BUTT, H. J., “On the adhesion between fine particles and nanocontacts: an atomic force microscope study”. *Max-Planck-Institute for Polymer Research*, v. 22, p. 2171 - 2184, 2006.

GADY, B., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., L. P. DeMejo, “Contact Electrification and the Interaction Force between a Micrometer-Size Polystyrene Sphere and a Graphite Surface”, *Langmuir*, v.13, n.9, p. 2533 - 2537, 1997.

GADY, B., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., J., “Contact electrification studies using atomic force microscope techniques”, *Appl. Phys.*, v. 84, p. 319, 1998a.

GADY, B., SCHLEEF, D., REIFENBERGER, R., RIMAI, D. S., “The Interaction between Micrometer-size Particles and Flat Substrates: A Quantitative Study of Jump-to-Contact”, *J. Adhesion*, v. 67, p. 291, 1998b.

HINDS, W., C., “Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles”. A Wiley-Interscience publication. Second edition, p. 141 - 144, 1998.

KRISHNAN, S., BUSNAINA, A. A., RIMAI, D. S. and Demejo, D. P., “The Adhesion-induced Deformation and the Removal of Submicrometer Particles”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 8, n°. 11, p. 1357- 1370, 1994.

KRUPP, H., “Particle adhesion theory and experiment”, *Adv. Coll. Interface Science*, v.1, n.2, p. 111 - 239, 1967.

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.

LI, W., PERZL M., HEYDER, J., LANGER, R., BRAIN J. D., ENGLMEIER, K.H., NIVEN, R.W., EDWARDS, D. A., “Aerodynamics and aerosol particle deggregation phenomena in model oral-pharyngeal cavities”. *Journal of Aerosol Science*, v. 27, n. 8, p. 1269 - 1286, 1996.

LODGE, K. B., “Techniques for the measurement of forces between solids”, *Adv. Colloid Interface Sci.*, v. 19, p. 27, 1983.

OLÁH, A. and VANCOSO, G. J., “Characterization of adhesion at solid surfaces: Development of an adhesion-testing device”. *European Polymer Journal*, v.41, n.12, p. 2803 – 2823, 2005.

OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; “Measurement of the Adhesive Force between Particles of Powdered Organic Substances and a Glass Substrate by Means of the Impact Separation Method, I, Ef fect of Temperature”, *Chem. Pharm. Bull.*, 31, p. 4483, 1983.

OTSUKA, A., IIDA, K., DANJO, K. and SUNADA, H.; “Measurement of the Adhesive Force between Particles of Powdered Materials and a Glass Substrate by Means of the Impact Separation Method, III, Ef fect of Particle Shape and Surface Asperity”, *Chem. Pharm. Bull.*, 36, p. 741, 1988.

PODCZECK, F., NEWTON, J.M., “Development of an ultracentrifuge technique to determine the adhesion and friction properties between particles and surfaces”. *J. Pharmaceutical sciences*, v.84, n.9, p. 1067 - 1071, 1995.

PODCZECK, F., NEWTON, J.M., JAMES, M.B., “The estimation of the true area of contact between microscopic particles and a flat surface in adhesion contact”. *J. Appl. Phys.*, v. 79, p. 1458 - 1463, 1996.

RIMAI, D. S. and BUSNAINA, A. A., “The Adhesion and Removal of Particles from Surfaces”. *Journal of Particulate Science and Technology*, v. 13, p. 249 – 270, 1995.

RIMAI, D.S., QUESNEL, D.J., BUSNAINA, A.A., “The adhesion of dry particles in the nanometer to micrometer-size range”. *Colloids and Surfaces*, v. 165, p. 3 – 10, 2000.

RUMPF, H., “Particle Adhesion”. In: Sastra, K.V.S. (Ed.) *agglomeration 77*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97 - 129, 1977.

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.

TAKEUCHI, M., “Adhesion forces of charged particles”. *Chemical Engineering Science*, v.61, n.7, p. 2279 – 2289, 2006.

VISSER, J., “Particle adhesion and removal: a review”, *Particulate science and technology*, v.13, p. 169 - 196, 1995.

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.

ZIMON A.D., “The adhesion of dust and powders”, *Adhesion of Dust and Powders*, Consultants Bureau, New York, p.109 -125, 1982.