

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE ÂNGULO DE CONTATO E A ADESÃO DE MATERIAL PARTICULADO ÚMIDO EM RECOBRIMENTOS DUROS

Raimundo Evangelista dos Santos Junior¹; Manoel Carreira Neto²; Amanda Dantas² Marcelo Sousa de Carvalho² Victor Teixeira Silva Aragão² Luiz Flávio da Silva² Bruno Caetano Silva Santos² André Souza Oliveira² Rodrigo Santiago Coelho²

¹ Bolsista de Iniciação Tecnológica; Projeto de PD&I – Embrapii; raimundo.evangelista@fbter.org.br

² Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; rodrigo.coelho@fieb.org.br

RESUMO

A adesão de material particulado úmido em substratos sólidos é um fenômeno natural, presente em diversos setores da indústria cujas atividades se relacionam com a manipulação de partículas finas, a exemplos da mineração, agricultura, alimentício, dentre outros. Estudos relatam que alguns fatores podem influenciar a ocorrência da adesão, sendo o principal deles a umidade. Neste trabalho, amostras de diferentes revestimentos aplicados em substrato metálico foram investigadas quanto a sua afinidade à água através do estudo do ângulo de contato, em busca de correlacionar a molhabilidade com a adesão. Os resultados confirmaram que quanto maior a hidrofobicidade da superfície, menor a força de adesão, com o revestimento CARBUFLON mostrando um desempenho promissor a fim de mitigar os efeitos da adesão.

PALAVRAS-CHAVE: adesão, molhabilidade, superfícies, material particulado.

1. INTRODUÇÃO

Questões relacionadas à adesão de solos ou material particulado em geral em superfícies de equipamentos e ferramentas podem ser observadas em diferentes setores da indústria, a exemplo da mineração e agricultura. De acordo com Qaisrani et al.¹ até 50% da energia bruta necessária para operações de cultivo pode ser consumida por adesão e fricção entre o solo e as ferramentas de cultivo. De modo que a adesão de materiais particulados úmidos se apresenta como um problema urgente face ao seu impacto nas atividades industriais.²

Segundo Ren et al.² o fenômeno de adesão existe quando estes materiais estão em contato com uma superfície sólida. Nesse estado, as forças intermoleculares promovem a atração entre os corpos, porém quando há a formação de um menisco de água, do inglês “*water ring*”, na interface superfície-partícula são introduzidas novas variáveis no entendimento do fenômeno de adesão, a exemplo da capilaridade e tensão superficial sólido-líquido. De fato, a água tem papel fundamental no entendimento da adesão de solos e elementos particulados úmidos em geral.³

O objetivo do presente trabalho consistiu em analisar a molhabilidade de um substrato metálico com diferentes revestimentos através da análise do ângulo de contato pelo método da gota séssil. O ângulo de contato dos diferentes revestimentos está relacionado com a afinidade à água. Espera-se assim analisar a correlação entre a natureza da interação da superfície com a água e a ocorrência da adesão de material particulado em superfícies sólidas. Uma vez estabelecida esta correlação a técnica tem potencial para ser aplicada na seleção de materiais para aplicações industriais sujeitas aos problemas advindos da adesão.

2. METODOLOGIA

A avaliação do ângulo de contato pelo método da gota séssil descrita a seguir adotou a metodologia adaptada do manual do goniômetro KRUSS DSA25S às condições dos laboratórios do SENAI CIMATEC.⁴

Materiais

Foram analisados diferentes tipos de revestimentos em substrato metálico. O substrato utilizado foi aço inoxidável ASTM A297-HH. Os revestimentos utilizados foram: Carboneto de Tungstênio (WC) aplicado por aspersão térmica hipersônica (HVOF) e CARBUFLON (Carboneto de tungstênio aplicado por HVOF + politetrafluoroetileno, PTFE), aplicados pela empresa Sulcromo. Foram também testados os seguintes revestimentos aplicados pela técnica de Deposição Física a Vapor (PVD): Diamond-Like Carbon (DLC), Nitreto de Titânio (TiN) e Nitreto de Cromo (CrN), todos aplicados pela Oerlikon.

Métodos

As amostras foram analisadas através da técnica de medição do ângulo de contato com o objetivo de verificar o ângulo formado entre uma gota líquida e a superfície de um material. Para esta investigação foi utilizado o método da Tangente, sendo o valor do ângulo de contato aferido através da análise de imagem capturada pelo software Drop Shaper Analysis 4 (DSA4).

O método da tangente, geralmente aplicado quando se utiliza o DSA4, se baseia no conceito da intersecção entre as linhas tangenciais traçadas nas interfaces líquido-ar e sólido-líquido, esta última representa a interface entre a superfície sólida aparente e a gota líquida. Isso ocorre em ambos os lados da gota, e essa intersecção forma o ângulo de contato que definirá a molhabilidade do material. As superfícies das amostras foram previamente limpas com álcool isopropílico antes de cada medição, a fim de evitar a influência de fatores externos (poeira, temperatura, umidade etc.) nos resultados. As medições foram feitas em triplicata com a deposição de 12 µl de água na superfície das amostras, sendo posteriormente realizada uma análise estatística dos resultados através dos dados de média e desvio padrão.

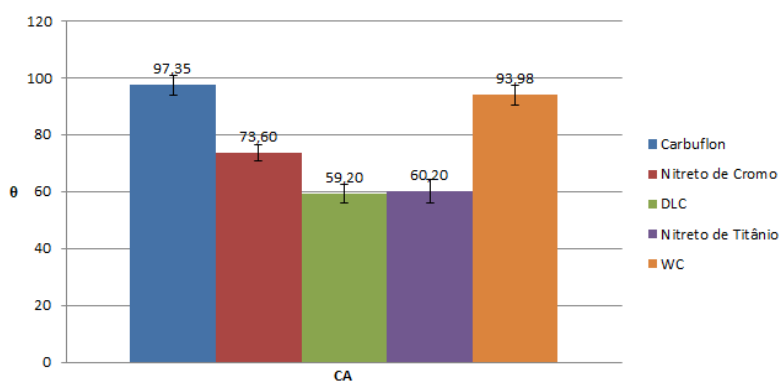
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 apresenta os valores referentes ao ângulo de contato para cada uma das amostras analisadas. Verifica-se que o revestimento de carboneto de tungstênio (WC) mostrou baixa molhabilidade ($93,98^\circ \pm 3,50$), o que implica dizer que esse revestimento tem potencial de inibir a adesão de materiais úmidos particulados em sua superfície, tendo em vista o seu comportamento hidrofóbico ($\Theta > 90^\circ$). De fato, quando aplicado em superfícies de ferramentas e equipamentos, o revestimento de WC tende a diminuir o acúmulo de material particulado, como relatado na literatura.⁵

De modo semelhante, o revestimento de CARBUFLON, que consiste na aplicação de carboneto de tungstênio (WC) e politetrafluoroetileno (PTFE) respectivamente, apresentou uma baixa molhabilidade ($97,3 \pm 3,7$). Em virtude da importância da umidade para o fenômeno de adesão, esse comportamento do CARBUFLON sugere que este revestimento possa diminuir a aderência de material particulado úmido em superfícies. Atualmente o CARBUFLON possui como principal função o revestimento de itens que demandam alta resistência ao desgaste e a não aderência do material a ser processado.⁶

Os recobrimentos a base de DLC, TiN e CrN demonstram um comportamento hidrofílico ($\Theta < 90^\circ$), fato não esperado, principalmente com relação ao DLC em virtude do baixo coeficiente de fricção, porém deve-se ponderar que características do material, bem como as características das amostras podem influenciar nos resultados. Por exemplo, o DLC pode ser encontrado em sua forma halogenada (a: C-H), sendo que nesse estado ele é suscetível ao fenômeno de grafitação, o qual modifica as suas propriedades.⁷

Figura 01 - Avaliação do ângulo de contato em superfícies recobertas com diferentes materiais metálicos.



Fonte: Própria

A fim de relacionar as medidas de ângulo de contato com o fenômeno de adesão, os mesmos revestimentos apresentados na figura 1 foram submetidos a medidas de energia de adesão. A energia adesiva é medida através da força necessária para remover uma quantidade de material particulado compactado sobre o substrato sólido a ser estudado. Este teste foi realizado em um laboratório parceiro do SENAI CIMATEC (MIB, Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda.) e é baseado no trabalho proposto por Plinke et al⁸. A tabela 1 apresenta os valores de energia adesiva e ângulo de contato medidos para os substratos propostos utilizando-se como material particulado uma polpa a base de minério de ferro com 10,7% de umidade.

De acordo com os resultados obtidos, o carboneto de tungstênio e o WC+PTFE (CARBUFLON) apresentaram mínima adesão, quando comparados às demais amostras estudadas. Isto corrobora com as

conclusões dos testes de ângulo de contato, em que esse material apresentou baixa molhabilidade ($97,3^\circ \pm 3,7$), a menor entre todos os revestimentos analisados, de modo que a tecnologia CARBUFLON se apresenta com a capacidade de ofertar um material com potencial para aplicação em setores da indústria que estão sujeitos aos problemas advindos da adesão.

Tabela 1 – Ângulo de contato e energia adesiva medidos para diferentes revestimentos.

Substrato / Revestimento	Ângulo de Contato (graus)	Energia Adesiva (mJ)
CARBUFLON	97,35	0,013
Nitreto de Cromo	73,6	0,479
DLC	59,2	0,726
Nitreto de Titânio	60,2	0,307
Carboneto de Tungstênio	93,98	0,24

Fonte: Própria

Essa correlação entre a molhabilidade e a adesão se justifica pelo fato que a força de adesão de materiais particulados está diretamente relacionada com a interface situada entre a partícula e a superfície. Em outras palavras, as forças de atração intermoleculares, principalmente aquelas devido à presença de um filme de água na interface partícula-substrato possuem um papel decisivo na adesão, pois elas agem de modo a intensificar as interações devido a viscosidade da água. Portanto, quanto maior a hidrofobicidade da superfície, menor a força de adesão em relação à mesma, justamente em virtude da tendência em formar essa película de água, *water ring*, estar associada com um caráter hidrofílico da superfície.²⁻³

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de ângulo de contato mostraram que o revestimento de carboneto de tungstênio (WC) e o CARBUFLON (WC+PTFE) possuem um comportamento hidrofóbico ($\Theta > 90^\circ$), com um valor ligeiramente maior para o CARBUFLON ($97,3^\circ \pm 3,7$). Estes resultados indicam que estes materiais têm um bom desempenho quando se deseja minimizar o fenômeno da aderência de material particulado úmido ao substrato. As medidas de energia adesiva realizadas reforçam este direcionamento.

Agradecimentos

À Embrapii pelo apoio financeiro.

À equipe do projeto VALE-Pelotamento pelas contribuições para a conclusão deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- QAISRANI et al. Soil Adhesion Preventing Mechanism of Bionic Bulldozing Plates and Mouldboard Ploughs. **Advances in Natural Science**. Vol. 3, Nº2, 2010, pp. 100-107
- Ren et al. Soil Adhesion and Biomimetics of Soil-engaging Components: a Review. **Journal Agriculture Engineering Research**. 79(3), 2001, pp. 239-263.
- JIA, Xian. Theoretical Analysis of the Adhesion Force of Soil to Solid Materials. **Biosystems Engineering**. 87(4), 2004, pp. 489-493.
- KRUSS. Manual de utilização do goniômetro DSA25S. Adaptado
- CARNEIRO JR., Júlio Cesar. **Estudo do uso de revestimentos de carbeto de tungstênio em misturadores de minério**. Trabalho de Conclusão de Curso. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.
- SULCROMO: Cromo Duro e Metalização. Disponível em: www.sulcromo.com.br/revestimentos/carbuflon-carboneto-de-tungstênio/. Acesso em 01/04/2021.
- Li et al. Effect of sp3 Content on Adhesion and Tribological Properties of Non-Hydrogenated DLC Films. **Materials** 2020, 13, 1911.
- PLINKE, J.; PRIGGE, J.; WILLIAMS, K. C. Development of new analysis methods for the characterization and classification of wet sticky ores. **Powder Technology**, v.294, p. 252- 258, 2016.