

## Preparação de pós metálicos e intermetálicos para o processo de aspersão térmica: parâmetros de moagem em moinho centrífugo horizontal

## Preparation of metallic and intermetallic powders for the thermal spray process: horizontal centrifugal mill grinding parameters

### RESUMO

**Lucas Bernardon Machado**  
[lucasmachado@alunos.utfpr.edu.br](mailto:lucasmachado@alunos.utfpr.edu.br)  
UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Dalmarino Setti**  
[dalmarino@utfpr.edu.br](mailto:dalmarino@utfpr.edu.br)  
UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Silvana Patrícia Verona**  
[silvanaverona@utfpr.edu.br](mailto:silvanaverona@utfpr.edu.br)  
UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Maria Nalu Verona**  
[nalu@utfpr.edu.br](mailto:nalu@utfpr.edu.br)  
UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

A Aspersão Térmica vem sendo destacada entre as diferentes técnicas de aplicação de revestimentos de proteção por possibilitar a deposição de diferentes tipos de materiais na forma de pó. O principal objetivo desta pesquisa foi determinar uma estruturação e parâmetros de pós de Al/Cu a fim de possibilitar a deposição desses elementos. A produção da matéria prima para deposição foi realizada pela mistura dos pós elementares de Al e de Cu em diferentes proporções por um processo de Mistura Rápida (MR) em moinho centrífugo horizontal. Foram analisadas as microestruturas dos pós, através de análise MEV (Microscopia Eletrônica por Varredura) e EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva), levantou-se as características encontradas em cada uma das composições. Ao longo dos procedimentos, foram controlados aspectos como, tempo de moagem, de repouso, de vácuo e de inserção de gás argônio, sendo assim possível determinar os parâmetros de moagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aspersão Térmica (AT). Alumínio (Al). Cobre (Cu). Moagem Rápida (MR). Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



### ABSTRACT

Thermal Spraying has been highlighted among the different techniques of application of protective coatings because it allows the deposition of different types of materials in powder form. The main objective of this research was to determine a structure and parameters of Al / Cu powders in order to allow the deposition of these elements. The production of the raw material for deposition was performed by mixing the elemental powders of Al and Cu in different proportions by a Rapid Mix (MR) process in a horizontal centrifugal mill. The microstructures of the powders were analyzed by MEV (Scanning Electron Microscopy) and EDS analysis (Dispersive Energy Spectroscopy) and the characteristics found in each of the compositions were raised. During the procedures, aspects such as grinding, resting, vacuum and argon gas insertion time were controlled, thus it is possible to determine the milling parameters.

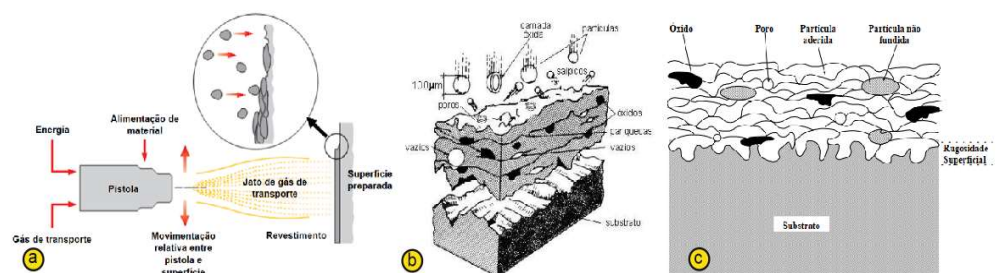
**KEYWORDS:** Thermal Spray (TS). Aluminum (Al). Copper (Cu). Fast Milling (FM). Scanning Electron Microscopy (SEM). Dispersive Energy Spectroscopy (DES).

## INTRODUÇÃO

A aspersão térmica é a tecnologia que está em constante desenvolvimento e evolução, quando o assunto é tratamento de superfícies. As pesquisas envolvendo tal tema se dividem em diferentes frentes e propostas: caracterização das superfícies revestidas, estudo da viabilidade da AT em novas aplicações, novos revestimentos e definição de parâmetros de moagem em moinhos centrífugos. Tal avanço se dá pelo fato da necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças.

Tal procedimento, consiste em um grupo de processos nos quais partículas de matérias com finalidade de revestimento, metálicos ou não metálicos, são depositadas sobre uma superfície devidamente preparada, formando assim uma camada protetora. Ainda para o autor, todo calor necessário para o processo é gerado na tocha de aspersão e pode ser proveniente da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico. Sendo assim, as partículas aquecidas são aceleradas por um gás, direcionadas ao substrato, conforme a Figura 1.a (SUCHARSKI, 2016).

Figura 1 – Deposição de materiais via aspersão térmica



Fonte: Adaptado de Oerlikon (2016); Cortés (1998); Villani (2003).

Ao se chocarem, as partículas se achatam, tomando forma de “panquecas” se aderindo as irregularidades (Figura 1.b e 1.c), em seguida as mesmas resfriam formando um revestimento com geometria lamelar, possuindo este a presença de poros, óxidos e possibilitando a formação de novas fases por meio da mistura e interação dos materiais utilizados (PAREDES, 2009).

A MR difere de outras técnicas utilizadas na preparação de pós para aspersão térmica que apresentam características similares como o *mechanical alloying*, mecano-fusão e *cladding* de pós-compósitos. A Mecano-fusão utiliza de interações mecânico-térmicas para alterar as características do pó, tais como, forma, tamanho e composição (HERMAN et al. (1992). Uma das principais diferenças que se pode destacar da MR em relação aos processos de *mechanical alloying* e mecano-fusão é em relação as reações de estado sólido. Estes processos podem produzir reações de estado sólido em misturas de pós metálicos (CSANÁDY, et al. 1997), enquanto que na MR o objetivo principal é a obtenção de revestimentos homogêneos e sem modificações de composição química dos materiais precursores, ou seja, apenas interação mecânica. Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi determinar os parâmetros da mistura de pós elementares de

Al e Cu a fim de obter uma liga de 67%Al e 33%Cu para ser aplicada por Aspersão Térmica.

## METODOLOGIA

Os materiais utilizados para o presente trabalho foram Alumínio e Cobre comercialmente puros, produzidos pelo processo de sinterização. Utilizou-se o Al com uma granulometria de  $-106 + 63 \mu\text{m}$  e para o Cu de até  $63 \mu\text{m}$ . Tais pós, foram dosados em uma proporção 2:1, de forma a se obter uma mistura com cerca de 67% de Alumínio e 33% de Cobre (elementos que compõem as ligas de Alumínio da série 2xxx). Além disso realizou-se uma Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), permitindo obter imagens de alta resolução de 500x utilizando tensão de 10 kV no seguinte equipamento: ZEISS EVO MA15, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Curitiba.

A finalidade de tal é de que se possa estabelecer parâmetros de moagem em moinho de bolas centrífugo horizontal, a partir da MR de esferas de aço de dois tamanhos (6mm e 8mm), juntamente com Alumínio e Cobre (Figura 2), garantindo assim uma interação mecânica entre as partículas. Tendo uma relação de 15:1, sendo 90g de material e 1339g de esferas ocupando 35% do volume total do jarro (Tabela 1). Utilizou-se um jarro de Alumínio onde fabricou-se uma tampa de Nylon com 2 válvulas, permitindo uma total vedação do sistema, além de garantir uma atmosfera controlada e evitar oxidação do material.

Tabela 1 – Configuração do composto para moagem

Al+Cu (g)	Esfera 6 mm (g)	Esfera 8mm (g)	Total (g)
90	960	379	1429

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 2 – Esferas de aço e compósito utilizados na moagem



Fonte: Autoria Própria (2019).

A produção do pó foi dividida em 2 etapas: homogeneização, moagem. A primeira etapa consiste em realizar a mistura dos pós em questão no misturador vertical do tipo Y, durante 15 minutos, em seguida 60 minutos no forno mufla a  $80^{\circ}\text{C}$  com intuito de eliminar qualquer umidade e garantir uma homogeneização dos dois materiais. Após cada mistura o moinho foi devidamente limpo e seco para evitar qualquer acúmulo de resíduos e contaminação.

Já a segunda etapa, moagem, foi realizada de forma precisa e cuidadosa, com um controle de tempo, peso e controle da atmosfera. Foram feitas 13 amostras, de acordo com a Tabela 1. Para a MR, na primeira tentativa realizou-se a moagem

intercalada com o tempo de “repouso” do material, ou seja, 5 minutos com o moinho em funcionamento e 10 minutos desligado (4 vezes), sendo assim um total de 60 minutos por amostra (8 amostras). Já na segunda tentativa mudou-se o tempo de moagem para 10 minutos e 15 minutos de repouso, totalizando 100 minutos de processo (5 amostras), conforme a Tabela 2. Essa variação de tempo deu-se justamente para evitar uma interação superior ao necessário das partículas, sendo assim, as partículas de Cu deixam de adentrar no Al formando aglomerados de tamanhos menores do que o necessário para a deposição, evitando assim também uma deformação plástica severa do Alumínio decorrendo uma perda de resistência a corrosão.

Tabela 2 – Alternativas de moagem

Alternativa	Tempo de Moagem (min)	Tempo em repouso (min)	Repetições	Total (min)
A	5	10	4	60
B	10	15	4	100

Fonte: Autoria própria (2019).

Para o sistema de moagem, utilizou-se uma bomba de vácuo com finalidade de reduzir pressão do ar contido no jarro e em seguida introduzido o gás argônio 5.0 com 99,99% de pureza, para se ter uma atmosfera interna controlada minimizando o efeito de oxidação durante o processo de MR, obtendo uma pressão interna de 1,5 Kg/cm<sup>2</sup>. Para isso foram feitos os seguintes procedimentos: 2 minutos de vácuo com pressão de 30 bar; 2 minutos de inserção de argônio com a bomba de vácuo ligada; 2 minutos somente de argônio injetado diretamente até a pressão da “pistola” chegar em 2 bar, como mostra a Figura 3.

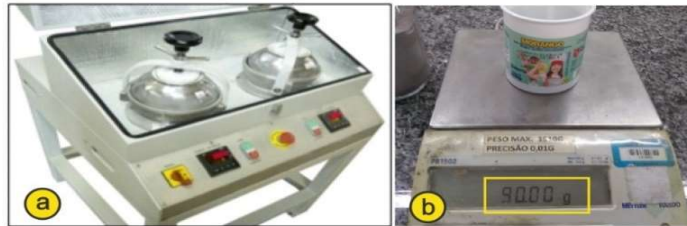
Figura 3 – Sistema para moagem



Fonte: Adaptado de Gomes (2016).

O procedimento da moagem rápida foi realizado no moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT 242, com dois módulos e 1CV de potência, com uma rotação de 350 rpm, como mostra a Figura 4.a (modelo semelhante ao utilizado no processo). Após todo o procedimento pesou-se o material retirado do jarro para a separação e pesagem, garantindo assim as 90 gramas da mistura de Al e Cu (Figura 4.b).

Figura 4 – Moinho Servitech e peso da amostra após moagem

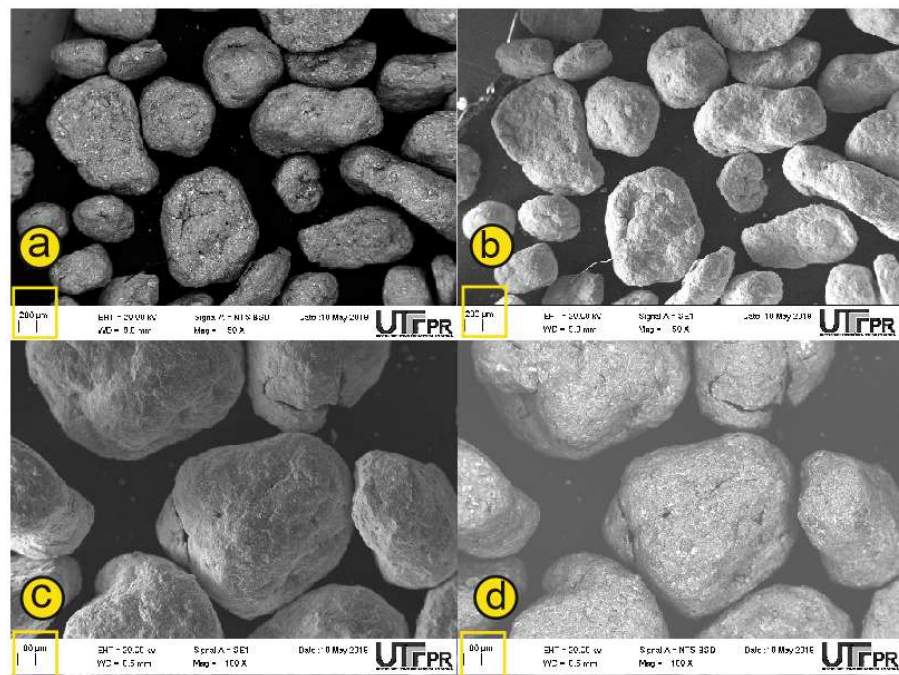


Fonte: Autoria Própria (2019).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após feita as moagens, foram separadas as amostras e encaminhadas até a UTFPR campus de Curitiba para análise a partir de MEV. Assim, tem-se que a Alternativa A tinha gerado muitos aglomerados de tamanhos maiores que 150  $\mu\text{m}$  (Figura 5.a e 5.b). Em contrapartida, a Alternativa B produziu aglomerados menores, de até 100  $\mu\text{m}$  (Figura 5.c e 5.d), confirmando assim que o tempo de moagem influencia diretamente na forma, tamanho e homogeneidade do aglomerado final.

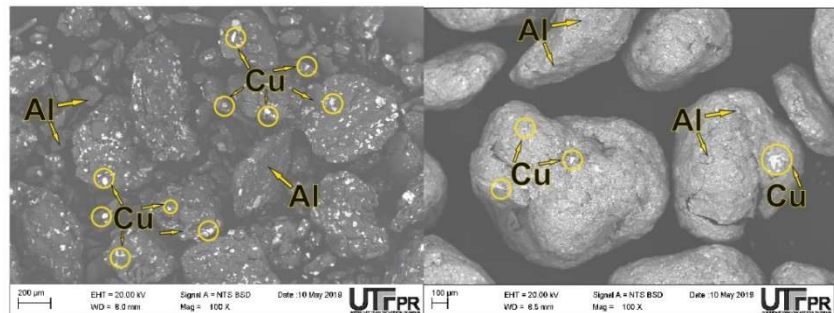
Figura 5 – Micrografia obtida por MEV das amostras



Fonte: Autoria Própria (2019).

Além disso, observou-se que o maior tempo de moagem proporcionou a obtenção de amostras com menor tamanho de poros e distribuição mais homogênea. Assim, de acordo com a Figura 6, pode-se observar a interação entre Al (escuro) e Cu (claro), onde ocorre a ruptura de partículas originais quanto coalescência entre as partículas.

Figura 6 – Distribuição Granulométrica após a MR



Fonte: Autoria Própria (2019).

## CONCLUSÃO

Com a utilização do processo de moagem rápida (MR) foi possível obter a liga de 67%Al-33%Cu com distribuição de partículas compósitas homogênea para ser aplicada por AT. Em relação ao tempo de mistura, seu efeito é diretamente ligado ao tamanho das partículas e a aderência dos materiais na moagem, ou seja, quanto maior o tempo no moinho maior são as partículas e menor a coalescência entre elas. Sendo assim, a Alternativa B de moagem se mostrou mais eficaz, resultando em um pó para AT mais refinado e puro. Outro fator de extrema relevância é o fato de se ter um controle rigoroso de atmosfera dentro do jarro, para se obter o sucesso da mistura devido à alta reatividade do Alumínio com o Oxigênio.

Como sugestão de trabalhos futuros poderia se estudar e analisar outras composições de liga Al-Cu ou outras ligas metálicas de interesse para aplicação por Aspersão Térmica, além de uma análise por Raios-X para verificar se houve ou não reação no estado sólido.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Dalmarino Setti, Silvana Verona e Maria Nalu Verona pelo convite, apoio e orientações para a conclusão da iniciação científica e ao aluno de mestrado da UFPR Caio Moreira por ter cedido o material para a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

CSANÁDY, A., CSORDÁS-PINTÉR, A., VARGA L., TÓTH, L., VINCZE, G. **Solid State Reactions in Al Based Composites Made by Mechanofusion**. *MikrochimicaActa*, v. 125, p. 50-59, 1997.

GOMES, M. N. V. **Desenvolvimento do Compósito de Fe<sub>3</sub>Al-k Nanométrico em Matriz de Alumínio para Revestimento Depositado por Aspersão Térmica Chama a Pó**. Tese – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 297 f. 2016.

HERMAN, H., CHEN, Z.J., HUANG, COHEN, C.C., R. **Mechanofused Powders for Thermal Spray**. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 1, p. 129-135, 1992.