

O PROCESSO DE METALIZAÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA COMO FACILITADOR DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS FORMADOS POR NANOMATERIAIS

COUTO, Luiz Cláudio de Oliveira^[1]; ROCHA, Marcia Santos da^[2]
metalizacao@metalizacao.eng.br

Centro de Pós-graduação, Pesquisa e Extensão Oswaldo Cruz

Resumo: *O objetivo deste estudo é de ampliar as possibilidades de deposição de nanomateriais como camadas funcionais, utilizando como ferramenta facilitadora, os diversos processos de metalização por aspersão térmica, atualmente disponíveis no mercado. Os processos de metalização por aspersão térmica são amplamente utilizados para deposição de revestimentos metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos, voltados a proteção contra a corrosão, desgaste, recuperação dimensional, isolamento térmico ou elétrico, condutibilidade elétrica, condutividade térmica, moldabilidade, antiaderência, antifricção, refletividade, biocompatibilidade, decoração, entre outras soluções, em estruturas metálicas, partes e peças de equipamentos em geral. Uma vez que muitos dos materiais a serem aplicados pelos processos de metalização por aspersão térmica estão disponíveis também sob a forma de pó, a deposição de nanomateriais é facilitada quando utilizamos destes processos. É necessário, porém, o desenvolvimento de tecnologias de fabricação de pós em dimensões adequadas e adaptações dos equipamentos de aplicação. Neste estudo foram analisadas as características de dois dentre os atuais equipamentos utilizados nos processos de metalização por aspersão térmica, conhecidos como HVOF - “High Velocity Oxy Fuel” (utilizado aqui para a deposição da superliga NiCrAlY) e plasma de arco não transferido (através do qual serão depositados TiO₂ e Nb₂O₅) em função dos respectivos resultados quando de sua utilização em aplicações nanotecnológicas.*

Palavras-Chave: *Aspersão térmica. Metalização. Nanomateriais. HVOF. Plasma de arco não transferido.*

Abstract: *The aim of this study is to expand the nanomaterials deposition possibilities as functional layers, using as a facilitating tool, the various metallization processes for thermal spraying, currently on the market. The metallization processes for thermal spray are widely used for the deposition of metal coatings, ceramics, polymers and composites, aimed at protection against corrosion, wear, dimensional recovery, thermal or electrical insulation, electrical conductivity, thermal conductivity, formability, anti-stick, anti-friction, reflectivity, biocompatibility, decoration, among other solutions in metal structures, parts and pieces of equipment in general. Since many of the materials to be applied by metallization by thermal spray processes are also available in the form of powder, depositing nanomaterials is facilitated when using these processes. It is necessary, however the development of post manufacturing technologies in appropriate dimensions and adjustments to the application equipment. In this study the characteristics were analyzed in two of the current equipment used*

^[1] Engenharia de Superfícies e Tintas, São Paulo/SP, Brasil. Consultoria Técnica, Treinamentos e Cursos de Metalização.

^[2] Docente do Programa de Pós-graduação das Faculdades Oswaldo Cruz.

manufacturing technologies in appropriate dimensions and adjustments to the application equipment. In this study the characteristics were analyzed in two of the current equipment used in plating processes by thermal spray, known as HVOF - "High Velocity Oxy Fuel" (used here for the deposition of superalloy NiCrAlY) and plasma arc not transferred (through which shall be deposited TiO₂ and Nb₂O₅) according to their results when they are used in nanotechnology applications.

Keywords: Thermal spraying. Metallization. Nanomaterials. HVOF. Plasma arc not transferred.

1 INTRODUÇÃO

Através dos resultados deste estudo somado àqueles desenvolvimentos já em andamento ao redor do mundo, esperamos poder contar com a metalização por aspersão térmica como um dos principais processos de deposição de nanomateriais num futuro muito próximo. Contudo, alguns entraves técnicos deverão ser resolvidos em relação aos atuais equipamentos utilizados, seus parâmetros de trabalho, temperaturas geradas, as velocidades de lançamento das partículas, os procedimentos de limpeza e preparação atualmente utilizados e a produção dos materiais, de forma a compatibilizar tamanho de partícula a novos padrões nanotecnológicos a que também os equipamentos devem submeter-se.

O objetivo deste estudo foi ampliar as possibilidades de deposição de nanomateriais como camadas funcionais, utilizando como ferramenta facilitadora os diversos processos de metalização por aspersão térmica, atualmente disponíveis no mercado. O cruzamento de informações baseadas em estudos já efetuados e de sua análise, pode resultar num horizonte com amplas possibilidades, resultado da soma das peculiares características destes materiais com a diversidade de alternativas oferecidas pelos processos e equipamentos de metalização.

As limitações deste trabalho estão diretamente ligadas à grande diversidade de processos de metalização por aspersão térmica disponíveis no mercado, os respectivos tipos de equipamentos utilizados e os materiais aplicáveis.

A metodologia utilizada neste trabalho, levou em conta a análise da pesquisa bibliográfica realizada sobre estudos anteriormente efetuados, onde foram utilizados equipamentos de metalização por aspersão térmica tipo HVOF e plasma de arco não transferido, para a aplicação de nanomateriais.

Como base de seu desenvolvimento, foram escolhidas duas pesquisas representativas do tema, uma vez que ambas se referem a utilização de materiais que sofreram moagem e/ou peneiramento até que alcançassem as dimensões de nanomateriais. Posteriormente tanto as pesquisas de Takimi (2004) quanto as de Souza (2010), aplicaram estes nanomateriais através dos processos de metalização por aspersão térmica, conhecidos respectivamente como HVOF - "High Velocity Oxy Fuel" para deposição da superliga NiCrAlY e plasma de arco não transferido, para aplicação de TiO₂ e Nb₂O₅.

2 NANOTECNOLOGIA E ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

A nanotecnologia tem se mostrado útil em diversas áreas do conhecimento humano, uma vez que potencializa as propriedades dos materiais de forma a nos trazer novas perspectivas dos mesmos. Nas dimensões nanométricas, os materiais podem ser tratados quase que como materiais diversos daqueles que conhecemos em nosso dia-a-dia.

A nanotecnologia é o estudo e manipulação de estruturas com características medindo entre 1 e 100 nanômetros. Nessa escala átomos e moléculas são

manipulados para criação de nanoestruturas úteis para diversas aplicações. Materiais nessa escala nanométrica adquirem diferentes propriedades que são exploradas na criação de nanotecnologias (GOLDMAN, 2012; OTRANTO, 2012).

A Engenharia de Superfícies tem como objetivo, propor melhorias às regiões sobre as quais de alguma forma interferem, quer seja através de tratamentos ou revestimentos depositados. A nanotecnologia quando devidamente aproveitada nesta área, pode trazer inúmeros benefícios às camadas aplicadas, proporcionando-lhes propriedades protetoras superiores àquelas normalmente alcançadas pelos materiais depositados em sua forma convencional.

3 METALIZAÇÃO/ASPERSÃO TÉRMICA

Mais conhecidos no Brasil como metalização, os processos de aspersão térmica são amplamente utilizados para deposição de revestimentos metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos, voltados a proteção contra a corrosão, desgaste, recuperação dimensional, isolamento térmico ou elétrico, condutibilidade elétrica, condutividade térmica, moldabilidade, antiaderência, antifricção, refletividade, biocompatibilidade, decoração, entre outras soluções, em estruturas metálicas, partes e peças de equipamentos em geral.

Definindo: *Aspersão térmica é um grupo de processos nos quais se divide finamente materiais metálicos e não metálicos que são depositados em uma condição fundida ou semifundida, sobre um substrato preparado para formar um depósito aspergido.* (AWS, 1985)

Entre as diversas vantagens normalmente propostas pelos processos de metalização por aspersão térmica, encontra-se, por exemplo, o seu alto desempenho na proteção à corrosão, desgaste e na manutenção de peças e partes de equipamentos industriais. Nesta última, a redução de custos e prazos utilizados nas recuperações, são fatores de suma importância no atendimento ao cliente, pertença ele a qualquer segmento industrial.

Somando-se as vantagens das camadas aplicadas pelos processos de metalização àquelas proporcionadas pela utilização de nanomateriais como matéria-prima, teremos como resultado revestimentos otimizados, aproveitando melhor as características de cada material.

Características como dureza, tenacidade à fratura, condutividade térmica, condutividade elétrica propriedades óticas e magnéticas e difusividade atômica dos materiais aplicados através dos processos de metalização, podem ser significativamente ampliadas com a utilização de materiais nanoestruturados (CHOW et al, 1999; EDELSTEIN et al, 1996 apud TAKIMI, 2004).

Temos ainda outras melhorias, além das citadas, como aumento de solubilidade, na eficiência luminescente de semicondutores, na condutividade elétrica em cerâmicas, na resistividade dos metais e na coercitividade magnética abaixo de um determinado tamanho crítico de partículas (GUIMARÃES, 2006; YETER et al, 2009 apud SOUZA, 2010).

As dimensões alcançadas por estes materiais fazem *com que proporcionalmente uma grande fração dos átomos esteja presente nos contornos de grão* (EDELSTEIN et al, 1996 apud TAKIMI, 2004).

Essas novas propriedades se devem à microestrutura e distribuição de grãos, fração volumétrica e morfologia de contorno de grãos, contorno de interfaces e arranjo atômico formados nos produtos finais (GRILLO, 2008; GUIMARÃES, 2006 apud SOUZA, 2010).

Todas essas características somadas indicam que a nanotecnologia deve provocar um significativo aumento no desempenho de materiais em diversas áreas, principalmente naquelas ligadas à *ótica, mecânica, elétrica, estrutural e de propriedades magnéticas* (GRILLO, 2008; GUIMARÃES, 2006 apud SOUZA, 2010).

Quanto à produção de nanopartículas:

Nanopartículas podem ser preparadas através de qualquer método capaz de produzir grãos muito finos. Geralmente são produzidas sob a forma de estruturas pura ou heterogênea e caracterizados em sua apresentação por seu tamanho de partícula, distribuição granulométrica, morfologia e propriedades físicas como: Densidade, área superficial específica, rugosidade, porosidade e forças inter partícula (FATAH, 2008 apud SOUZA, 2010).

Uma das maneiras de classificar as formas de produção dos materiais nanoestruturados é subdividi-las em duas abordagens, a física e a química. A abordagem física, também conhecida como “top-down” (de cima para baixo), divide os processos de produção em: fotolitografia, nanolitografia de raio de elétrons, nanolitografia de raio de íons e processos mecânicos. Já a abordagem química, conhecida como “bottom-up” (de baixo para cima), divide os processos em: “self-assemble” (auto-organização), “self-assemble monolayers” (auto-organização em uma camada), sol-gel, CVD - “Chemical Vapor Deposition” (Deposição Química por Vapor), manipulação e impressão 3D (COUTO, 2014).

Diferentemente desta, segundo Souza (2010), outra forma de divisão da produção de nanomateriais é subdividi-la em quatro categorias: a síntese termofísica ou síntese em fase gasosa, a abordagem química, os processos de formação local e a síntese mecânica.

A síntese termofísica ou síntese em fase gasosa utiliza diversos métodos de aproximação física, como por exemplo, a evaporação/condensação e a remoção por “laser”.

Na abordagem química, a *manipulação da cinética da reação favorece a nucleação de partículas ao invés do crescimento de grão.*

Nos chamados processos de formação local estão inclusas *a litografia, a deposição a vácuo, processos como deposição física de vapor (PVD - “Physical Vapor Deposition”) e de deposição química de vapor (CVD - “Chemical Vapor Deposition”), “spray” e revestimentos.*

A síntese mecânica nada mais é do que uma moagem mecânica de alta energia (“mechanical milling”) sendo que este nível de energia tem origem nas altas velocidades e frequência de impactos, que por sua vez, resultam em pós ultrafinos, cuja mistura em nível atômico resulta na produção de materiais nanocristalinos.

Levando em conta os custos envolvidos nos diversos processos de produção descritos, este estudo tomou como base os nanomateriais obtidos através dos processos mecânicos oriundos da abordagem física ou “top-down”, segundo Couto (2014) ou da síntese mecânica, segundo Souza (2010).

Com base em nossa experiência de mais de trinta anos em contato com os processos de metalização por aspersão térmica, um dos grandes problemas enfrentados quando utilizada a matéria-prima na forma de pó é a sua aglomeração, que pode ocorrer devido à grande área de exposição da partícula à umidade. O ideal inclusive é que o material seja deixado numa estufa para a secagem antes de sua efetiva aplicação, removendo desta forma quaisquer resíduos de umidade. Levando em conta esta característica do material particulado, obviamente quando transformado em partículas ainda menores, como no caso dos nanomateriais, o problema de retenção de umidade e conseqüente aglomeração entre as partículas tende a agravar-se devido ao aumento da área de contato com o meio e a umidade nele contida.

Além destas, outras dificuldades podem somar-se ao processo, como a amplitude da distribuição dos tamanhos das partículas obtidas, a possível contaminação do pó que pode ocorrer no equipamento durante a moagem e o rendimento, nem sempre viável quando o objetivo é a obtenção de tamanhos adequados de partícula (PITKETHLY, 2004 apud SOUZA, 2010).

3.1 Os processos de metalização/aspersão térmica e as temperaturas envolvidas

Os processos de metalização por aspersão térmica utilizam tipos diferentes de equipamentos, tais como: chama a gás, arco elétrico, plasma, HVOF, detonação, a frio, etc., para melhor aplicação de camadas formadas por diversos materiais disponíveis. As temperaturas alcançadas pelos equipamentos de metalização na fase de fusão ou amolecimento da matéria-prima em seu interior é uma de suas características que podem prejudicar a sua utilização na aplicação de nanomateriais.

Assim, deve ser considerado o tipo, a forma e as dimensões de material em relação aos altos valores de temperatura como 2.700 a 3.100°C para os equipamentos de chama a gás, 3.000 a 4.000°C no equipamento a arco elétrico, temperaturas superiores a 17.000°C em equipamentos a plasma, 2.800°C nos equipamentos HVOF - “High Velocity Oxy Fuel”, 3.315°C para equipamentos por detonação e 800°C nos equipamentos de metalização a frio (LIMA et al, 2007; TAKIMI, 2004).

Pesquisadoras norte-americanas verificaram que vários metais compostos de cristais devido à sua instabilidade, quando sujeitos a calor ou pressão podem perder algumas de suas vantagens, uma vez que nesta situação os cristais fundem-se, aumentando de tamanho. As participantes do grupo de pesquisa já contam com estudos para projetar e sintetizar uma nova classe de ligas de tungstênio com estruturas nanocristalinas estáveis e combinações de metais que poderiam resultar em ligas estáveis (CIMM, 2012).

Portanto, uma vez que há várias situações que podem alterar as características de formação e aplicação de um nanomaterial, vamos estudar os efeitos de sua produção através do processo de moagem mecânica de alta energia e sua posterior aplicação através dos processos de metalização, de materiais depositados pelos processos de aspersão térmica hipersônica (HVOF) e aspersão térmica a plasma.

3.2 Ensaios utilizados em cada um dos estudos

O material aplicado através do processo HVOF, a superliga NiCrAlY, teve a sua morfologia, tamanho de cristais e níveis de contaminação caracterizados através do uso de microscopia eletrônica de varredura e granulometria por difração de “laser”; alargamento dos picos de difração de raios X pelo método “single-line”; análise por fluorescência de raios X, respectivamente. Além disso, os parâmetros de deposição e o controle microestrutural da camada também foram controlados para acompanhamento do tamanho final dos cristais manométricos (TAKIMI, 2004).

Já os dois diferentes materiais aplicados pelo processo a plasma de arco não transferido, TiO₂ e Nb₂O₅, com tamanhos de partículas e densidades diferentes, foram comparados entre si para efeito de avaliação quanto à suas taxas de deposição, quando utilizado um alimentador com sistema de coluna fechada (SOUZA, 2010).

Desta forma, foram obtidos resultados de materiais antes utilizados sob a forma convencional, e agora na forma de nanomateriais, usados como matéria-prima em equipamentos típicos de dois processos diferentes dentre os oferecidos pela aspersão térmica.

4 MATERIAIS, PROCESSOS E APLICAÇÕES UTILIZADOS NOS ESTUDOS ABORDADOS

4.1 Materiais

A superliga NiCrAlY utilizada no experimento de Takimi (2004), aplicada através do processo HVOF foi fornecida pela Praxair Inc, Indianápolis, USA, de código NI-343, cuja composição química padrão é 67Ni22Cr10Al1Y. Trata-se de um material apropriado para resistir à corrosão a altas temperaturas. Esta matéria-prima é produzida especificamente para aplicações neste tipo de equipamento e possui uma distribuição granulométrica típica situada entre 15 μ m e 45 μ m.

Já o Nb₂O₅ e o TiO₂, aplicados através do plasma de arco não transferido no experimento de Souza (2010), foram obtidos respectivamente da CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) e da Millennium Inorganic Chemicals do Brasil S. A. O Nb₂O₅ foi originalmente fornecido com 99,5% de pureza com tamanho nominal de grão inferior a mesh 250 (0,063mm). O TiO₂, originalmente fornecido com seu maior volume de massa (90,17%) apresentava grãos menores que mesh 100 (0,150 mm), portanto deveria sofrer moagem para atingir o nível manométrico.

4.2 Moagem

A moagem da superliga NiCrAlY realizada por Takimi (2004), ocorreu de forma mais efetiva quando dentre as 3 rotações utilizadas como padrão (400, 600 e 800 RPM), foram utilizadas 600 e 800 RPM, com esferas (corpos moedores em aço AISI 52100) de 6mm de diâmetro, na proporção de 10:1 (dentre as opções 10:1 com 5 kg de esferas e 20:1 com 10 kg de esferas para 500g de pó por teste) num “container” de inox com 0,005m³ de capacidade.

Os melhores resultados foram obtidos com a rotação de 800 RPM, na proporção 10:1 com a moagem ocorrendo durante 12 horas. Ou seja, utilizou-se a distribuição de partículas mais próxima do material original e o menor tamanho de cristalito entre as opções avaliadas. O moinho utilizado foi o Szegvari da Netzsch, modelo Molinex PE5.

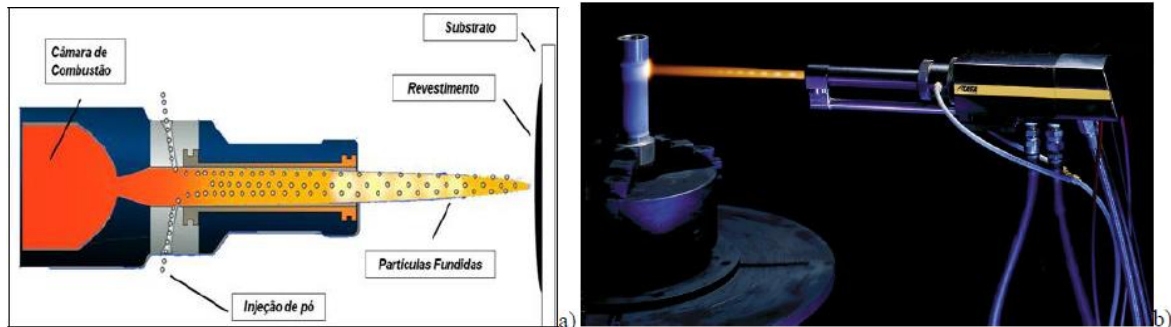
Quanto ao estudo de Souza (2010), na moagem do TiO₂ foi utilizado o moinho planetário do tipo Micro Mill Fritsch Pulverisette7. Num cadinho de porcelana, foram usadas esferas de alumina na proporção 3:1 para uma moagem de alta energia durante 30 minutos. Após a moagem, no ensaio de peneiramento foi utilizada a série de Tyler, onde o pó passa por uma série de peneiras de mesh diferentes empilhadas fixadas em uma mesa vibratória, cujo objetivo é obter a massa de pó retida em cada uma e sua consequente porcentagem para cada tamanho de grão. *Neste ensaio, foram utilizadas peneiras com mesh 250, 270, 325 e 400 montadas sobre a mesa vibratória, onde foram colocados os pós e também peneirados por 50 minutos.* Como resultado da moagem, *seus grãos ficaram em seu maior volume de massa (70,21%), com mesh inferior a 250 (0,063 mm).* O Nb₂O₅, também sofreu a mesma classificação de peneiras, porém sem moagem, após a qual apresentou o seu maior volume de massa (90,20%) com grãos de tamanhos inferiores a mesh 325 (0,045 mm) (SOUZA, 2010).

4.3 Equipamentos de metalização

Em seu experimento, Takimi (2004) utilizou o equipamento de aspersão térmica HVOF modelo JP-5000 fabricado pela Praxair, a mesma fabricante do pó utilizado, semelhante ao do desenho esquemático e da foto da Figura 1. Devido às velocidades hipersônicas atingidas pelos gases (até 3000m/s) em consequência do formato em venturi do corpo do equipamento, as partículas dos materiais aplicados pelo processo HVOF residem por um período de apenas

alguns milissegundos na chama, o que permite a redução de óxidos formados, a uma quantidade mínima. As temperaturas máximas em torno de 2.800°C de sua chama, permitem que as partículas atinjam o substrato com alta plasticidade, mas não fundidas, utilizando partículas com tamanho de cristalito nanométrico retendo-os após a deposição.

Figura 1 Esquema de funcionamento do equipamento JP-5000 da Praxair durante aplicação, semelhante ao utilizado por Takimi em seu estudo (a) e foto do equipamento (b).

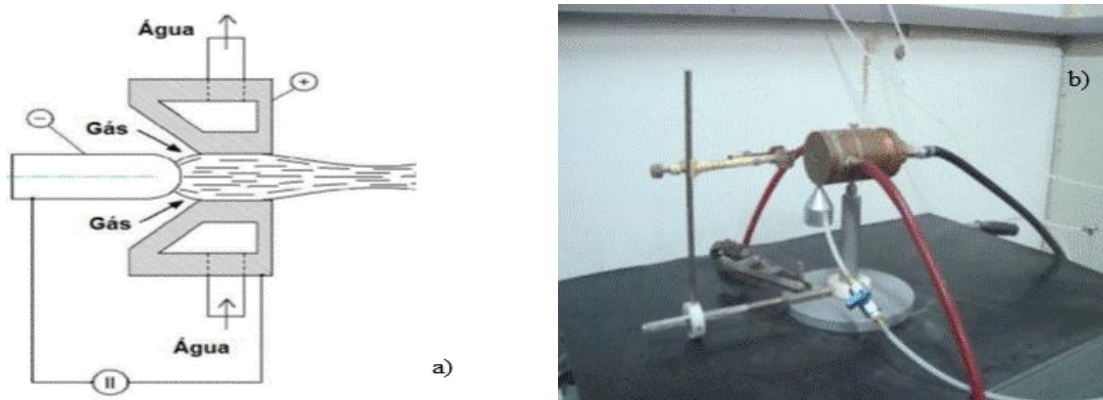


Fonte: O' Czerny (2001) apud Takimi (2004).

Souza (2010), utilizou em seu experimento o equipamento de aspersão térmica a plasma de arco não transferido, disponível no Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma (Labplasma) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). No plasma térmico criado num equipamento de plasma "spray", o gás (argônio ou nitrogênio) é injetado através de um arco elétrico anular, recebendo energia térmica e resultando em seu aquecimento e ionização. Por sua vez, os elétrons liberados dos átomos ou moléculas formam o plasma, que recombinados ao longo de seu fluxo geram altíssimas temperaturas. O pó ao ser introduzido no plasma, sofre superaquecimento e fusão sendo aspergido à altas temperaturas em direção ao substrato.

O conteúdo de energia, temperatura e velocidade do jato de plasma é controlado pelo tipo de bico empregado, pela corrente do arco, pelo balanceamento da mistura de gases e taxa de fluxo destes gases (VAZ, 2006; LIMA e TREVISAN, 2007 apud SOUZA, 2010). Na Figura 2 vemos o esquema de funcionamento de uma tocha de arco não transferido e a foto do equipamento em bancada.

Figura 2 Esquema de funcionamento do equipamento de plasma de arco não transferido utilizado por Souza em seu estudo (a) e foto do equipamento (b).

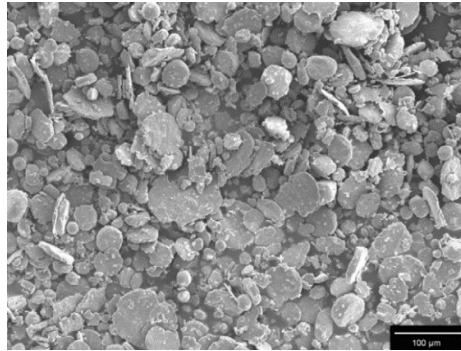


Fonte: Souza (2010).

4.4 Ensaios e caracterização de nanomateriais

Conforme verificação de Takimi (2004), quando o pó sofreu moagem com rotação de 800 rpm e BPR10:1, obteve maior rapidez em sua homogeneização não tendo sido detectada a presença de materiais com formato esférico após 2 horas de processo, como pode ser verificado na Figura 3.

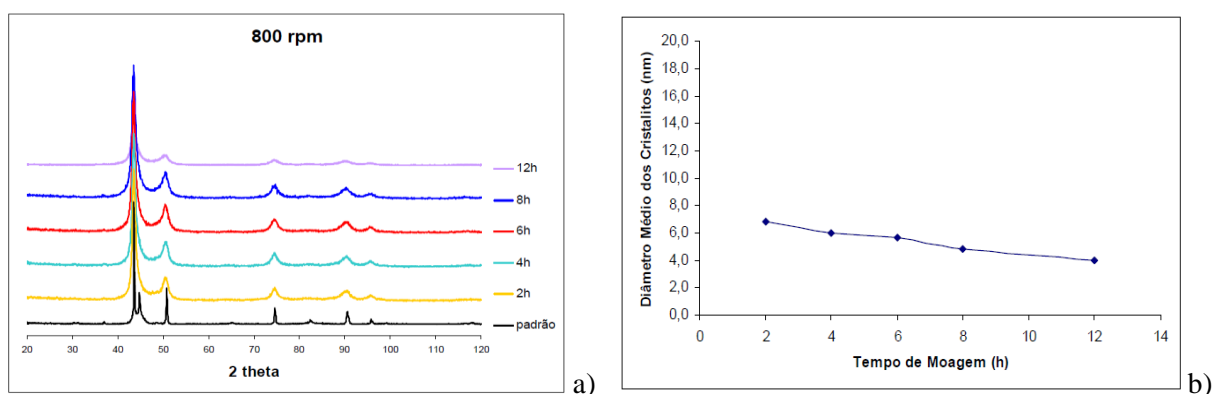
Figura 3 Aspecto das partículas da superliga de NiCrAlY após sofrer moagem a 800 rpm e BPR 10:1 durante 2 horas.



Fonte: Takimi (2004).

Segundo Takimi (2004), observa-se um aspecto irregular do topo do pico da função obtida no gráfico de difração de raios X pelo método “single-line”, em função do tempo de processamento em Moagem de Alta Energia (MAE), devido à falta de ajuste na função Pearson-VII e das limitações do software Winfit utilizados para a sua análise. Isso causa certa imprecisão na determinação do tamanho de cristalito e microdeformação da rede, porém, permite alcançar uma primeira aproximação de seu tamanho médio. Na Figura 4 podemos observar a *variação do alargamento dos picos de difração em função do tempo de moagem e a mesma variação para o tamanho médio dos cristalitos*.

Figura 4 *Variação do alargamento dos picos de difração de raios X em função do tempo de moagem da superliga NiCrAlY, moída a 800 rpm e BPR 10:1 (a) e variação do diâmetro médio dos cristalitos em função do tempo de moagem da superliga NiCrAlY, moída a 800 rpm e BPR 10:1(b).*



Fonte: Takimi (2004).

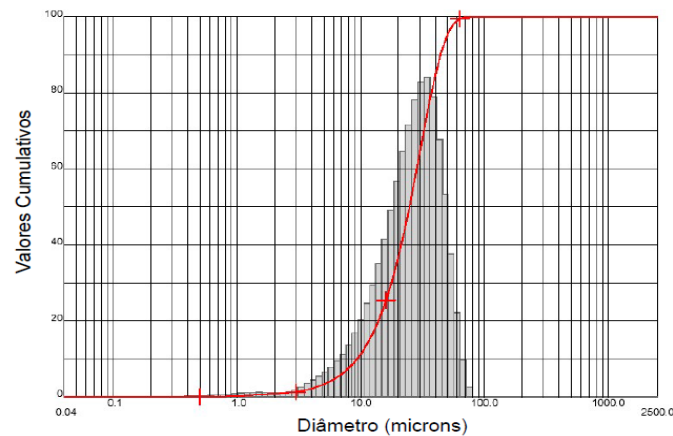
O critério de processamento da superliga durante 12 horas a 800 rpm e BPR 10:1 deveu-se à distribuição de partículas resultante ser a mais próxima do material original utilizado para revestimentos e com o menor dos tamanhos de cristalito obtido.

A Figura 5 mostra a curva de distribuição granulométrica cumulativa obtida por difração de “laser”, que apresenta uma grande quantidade de partículas (cerca de 25%) com dimensões próximas ao limite inferior de diâmetro do material original (15 μm). Ainda assim, tais partículas são grandes o suficiente para manter-se em estado de plasticidade, não se fundindo durante a aplicação, portanto não entupindo o bico do equipamento e nem sofrendo excessiva oxidação, o que prejudicaria suas propriedades mecânicas e reduziria sua resistência a choques térmicos.

No outro extremo da curva, podemos notar a pequena quantidade de material com dimensões de partículas superiores a 45 μm (limite superior). Isso reduz a possibilidade de partículas grandes que, não tendo atingido o estado de plasticidade, tenham dificuldade de ancorar mecanicamente ao substrato e ao revestimento, ricocheteando sobre a superfície a ser revestida, ou ainda, incorporando-se indevidamente à camada, de forma a prejudicar suas propriedades mecânicas.

Embora a fluidez de pós processados por MAE, seja reduzida, o alimentador Miller 1270 utilizado no equipamento HVOF mostrou-se eficiente e não ocorreram problemas de entupimento em sua tubulação de alimentação.

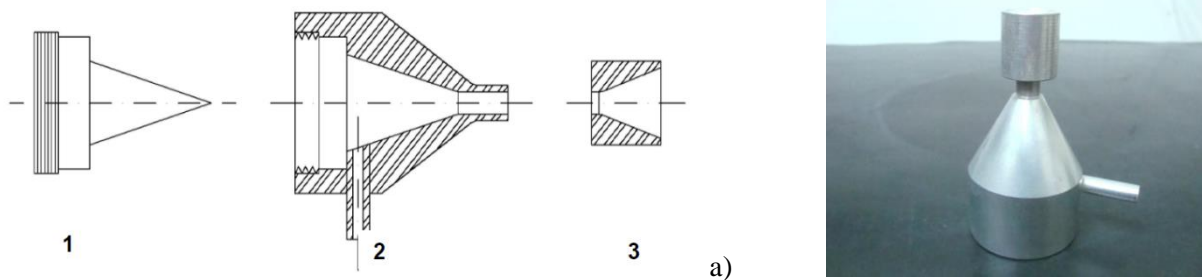
Figura 5 Curva de distribuição granulométrica da superliga NiCrAlY, moída durante 12 horas a 800 rpm.



Fonte: Takimi (2004).

O alimentador de pó com sistema de coluna fechada, elaborado para a pesquisa de Souza (2010), foi construído em função do equipamento de aspersão térmica a plasma por arco não transferido existente no Labplasma da UFRN e dos trabalhos normalmente realizados na instituição. Levando em conta tais necessidades, foram adotadas: áreas médias de deposição de 2 cm^2 a 8 cm^2 , espessura de camada máxima de 0,05 cm (500 μm) e volume de pó entre 0,1 cm^3 e 0,4 cm^3 . O alimentador conforme esquema e foto que podem ser vistos na Figura 6, é formado por um corpo com um cone, uma base de vedação e uma rosca de fixação (tampa), um corpo com cavidade cônica interna com entrada radial para injeção do gás de arraste (corpo) e um copo de enchimento, com um cônico interno, para facilitar a entrada do pó no alimentador (funil de enchimento).

Figura 6 Desenho esquemático do alimentador de pó: 1 - tampa, 2 - corpo, 3 - funil de enchimento (a) e foto do alimentador de pó montado (b).



b)

Fonte: Souza (2010)

A montagem final, pode ser vista na foto da Figura 7, onde o alimentador de pó encontra-se acoplado à tocha de plasma do equipamento de aspersão térmica utilizado por Souza (2010).

Figura 7 Fotografia da montagem da tocha de plasma com alimentador de pó.



Fonte: Souza (2010).

Após a ignição da tocha e do pré-aquecimento do substrato, o gás de arraste é liberado e ao entrar no alimentador, movimenta o pó injetando-o para o interior da tocha, onde é fundido (ou semi-fundido), aspergido e aplicado sobre o substrato.

Para o bom funcionamento do alimentador, e para que a taxa de aspersão e a qualidade da deposição desejada sejam alcançadas, o tipo de pó a ser aspergido bem como seu tamanho de grão, são de fundamental importância na hora de selecionar o fluxo de gás de arraste, devido sua coesividade e tendência a aderir nas paredes do alimentador (SOUZA, 2010).

4.5 Aplicação dos revestimentos

O equipamento HP/HVOF JP-5000 utilizado por Takimi (2004), gera chama de 1000 a 1200 m/s, temperatura de até 2800°C utilizando combustão da mistura de O₂ e querosene de aviação tipo K1. Na Tabela 1 estão listados os parâmetros de aplicação para chama oxidante e redutora, obtidos com base em informações fornecidas pelo fabricante do equipamento. Os valores escolhidos levam em conta que a quantidade de oxigênio presente na superliga NiCrAlY, após aplicada, influencia de forma direta as propriedades mecânicas e a resistência à oxidação da camada.

Tabela 1 Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos.

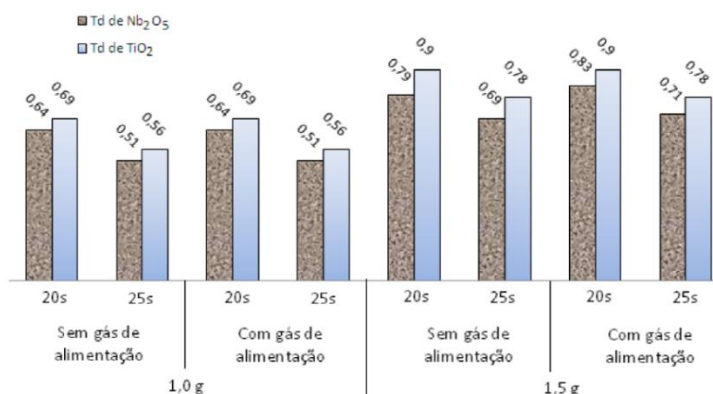
TIPO DE CHAMA	PARÂMETROS				
	Fluxo de Oxigênio	Fluxo de Combustível	Distância de Deposição	Comprimento do Bico	Taxa de Alimentação
Oxidante (Razão O ₂ /Combustível = 1,25)	0,015 m ³ /s	6,11x10 ⁻⁶ m ³ /s	0,35 m	0,15 m	0,05 kg/min
Redutor (Razão O ₂ /Combustível = 0,80)	0,011 m ³ /s	6,11x10 ⁻⁶ m ³ /s	0,35 m	0,10 m	0,05 kg/min

Fonte: Takimi (2004).

Foram utilizados corpos-de-prova em aço inoxidável AISI 304 de 100x50x3mm, pré-jateados (para limpeza do metal-base e melhoria na adesão do revestimento) com Al₂O₃ eletrofundido, grão 80 (165µm) e pressão de ar comprimido de 405 kPa. A espessura média da camada aplicada manualmente foi de 100 µm.

Dentre as inúmeras condições de aplicação ensaiadas por Souza (2010), utilizando o equipamento de aspersão térmica a plasma por arco não transferido existente no Labplasma da UFRN, pode-se verificar através do gráfico da Figura 8 que as maiores taxas de deposição ocorreram com a utilização de massa de 1,5 g, durante o período de 20 segundos, independente do pó utilizado (Nb₂O₅ ou TiO₂). Já o pó de TiO₂ obteve as melhores taxas de deposição em função de sua melhor eficácia de arraste resultado de sua maior granulometria. As maiores taxas de deposição utilizando massa de 1,5 g dos pós, sugere que maiores massas provocaram maiores arrastes.

Figura 8 Gráfico-resumo das taxas de deposição de Nb₂O₅ e TiO₂



Fonte: Souza (2010).

5 CONCLUSÕES

5.1 Nanomateriais aplicados por aspersão térmica hipersônica/HVOF

A técnica de aspersão térmica hipersônica utilizada por Takimi (2004), com parâmetros de chama redutora, tornou possível a deposição da superliga NiCrAlY com camadas de baixa porosidade, microestrutura homogênea e reduzida quantidade de óxidos, utilizando material nanométrico obtido por moagem de alta energia (MAE). Mesmo com um pequeno

crescimento dos cristalitos, seu tamanho médio não excedeu os 100nm e teve como consequência um aumento de 35% no valor médio de microdureza da camada.

Portanto, a utilização do equipamento HVOF torna viável a deposição de nanomateriais, como por exemplo a superliga NiCrAlY, além de otimizar as vantagens normalmente obtidas pelo processo em relação à qualidade microestrutural da camada, bem como do valor médio alcançado por sua microdureza.

5.2 Nanomateriais aplicados por aspersão térmica a plasma

Graças ao alimentador de pó desenvolvido e ensaiado por Souza (2010), para operar em conjunto com o equipamento de aspersão térmica a plasma por arco não transferido existente no Labplasma da UFRN, para aplicação de pós nanométricos de pentóxido de nióbio (Nb₂O₅) e dióxido de titânio (TiO₂), concluiu-se o seguinte:

- ambos os materiais fluíram livremente sem a ocorrência de aglomeração, porém
- ensaiados sob as mesmas condições, o TiO₂ (70,20% dos grãos com tamanho entre 0,063 e 0,53 mm e densidade de 4,23 g/cm³) obteve melhores taxas de deposição que o Nb₂O₅ (90,2% dos grãos com tamanho entre 0,045 e 0,038 mm e densidade de 4,60 g/cm³). Tal diferença deve-se ao menor tamanho de grãos e maior densidade do pó de Nb₂O₅, o que facilita a atração interpartículas e sua capacidade de aglomeração.

Portanto, embora o equipamento a plasma possa ser utilizado para deposição de materiais nanométricos, a aglomeração do pó em função do tamanho dos grãos e sua densidade devem ser levados em conta para a obtenção de bons resultados na aplicação da camada.

6 REFERÊNCIAS

AWS - American Welding Society. *Thermal spraying - practice, theory and applications*, Miami, FL, USA, 1985, P.184.

CIMM Notícias. *Pesquisadoras criam ligas nanocristalinas estáveis*. 2012. Disponível em: < HYPERLINK "http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/9373-pesquisadoras-criam-ligas-nanocristalinas-estaveis" >. Acesso em: 23 jun. 2015.

COUTO, Luiz Cláudio de Oliveira. *Avanços da Nanotecnologia..* Trabalho apresentado no Curso de Pós-Graduação de Engenharia de Superfícies e Tintas - Faculdades Oswaldo Cruz, São Paulo, 2014.

GOLDMAN, Alfredo; OTRANTO, Guilherme. *Nanotecnologia*. 2012. Disponível em: < HYPERLINK "grenoble.ime.usp.br/~gold/cursos/2012/movel/.../2006-1_Guilherme.pdf" >. Acesso em: 08 jun. 2015.

LIMA, Carlos Camello; TREVISAN, Roseana. *Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações*. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Artliber, 2007.

SOUZA, Eraldo Câmara de. *Construção, montagem e teste de um alimentador de pós nanométricos para aspersão térmica em tocha de plasma*. 2010. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

TAKIMI, Antônio Shigueaki. *Obtenção de superligas NiCrAlY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF)*. 2004. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.