

**CÉSAR ALEXANDRE SEGALA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO REVESTIMENTO  
DE MOLIBDÊNIO APLICADO NO AÇO SAE 8620  
COM O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA  
PLASMA SPRAY**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Julho/2012

**CÉSAR ALEXANDRE SEGALA**

Tecnólogo em Soldagem, Faculdade de Tecnologia de São Paulo,

1995

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO REVESTIMENTO  
DE MOLIBDÊNIO APLICADO NO AÇO SAE 8620  
COM O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA  
PLASMA SPRAY**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:

Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:

**Prof. Dr. José Pinto Ramalho**

São Paulo

Julho/2012

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita, ou não faz.”

*Ayrton Senna.*

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho a minha querida esposa e amiga Daniela, pelo sacrifício dos momentos de lazer e por toda compreensão e apoio para conclusão deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao Prof. José Ramalho, por todo ensinamento e maestria na difusão de conhecimento, e pelo empenho na orientação e direcionamento do trabalho;
- Ao Prof. Sérgio Brandi, pela dedicação no desenvolvimento deste curso e incentivo e motivação para conclusão deste trabalho;
- Ao Cleber Lima, Éder, Maire, Deborah, Mauro, José Negromonte, Claudio, Gersino, Carlos Gallotti, Fernando Carvalho e Edson Nakamura pelo apoio, amizade e camaradagem, fundamentais durante todo o curso;
- Ao Claudinei Gualassi, pela parceria, pelo apoio e por suportar minha ausência para realização deste trabalho;
- Larissa Frausto e ao Steve Brown, sempre otimistas e incentivadores;
- Ao Romeu Correia, meu grande companheiro e mestre no assunto;
- Ao Marcos Freitas, pela amizade e ensinamentos de Engenharia;
- Ao Alexandre Ferreira, pela ótima disposição na metalização dos corpos de provas e pela longa amizade;
- Ao Gilberto Pulquério nas medições de dureza dos corpos de provas, sempre prontamente disposto a colaborar;
- Ao Doug Puerta do IMR Labs, Ray Sinatra da RR Corporation e Steve Bomford da Sulzer Metco pelas dicas e material didático cedido;
- À toda minha família, por toda compreensão pela minha ausência no período do curso e de preparação deste trabalho.

## **CURRICULUM VITAE**

### **Formação / Histórico Acadêmico:**

- Tecnólogo em Mecânica – modalidade Soldagem. Fatec - Faculdade de Tecnologia de São Paulo. 1995.
- Fundamental Principles of Metallography – Thermal Spray and Diffusion Coatings. IMR Test Labs – City of Ithaca, New York. 2005.
- Thermal Spray Processes & Application Techniques. Sulzer Metco – São Paulo. 2008.
- Operação e Programação de Robôs FANUC. FANUC Robotics do Brasil. 2006.

### **Experiência Profissional:**

- Supervisor de Produção, área Reparo de Componentes Aeronáuticos na Rolls Royce Brasil desde 1999.
- Instrutor de Processos de Soldagem – SENAI “A. Jacob Lafer” de Santo André – 1998 a 2003.
- Soldador de Manutenção – Rhodia Poliamida – 1987 a 1999.

## **RESUMO**

Os processos de aspersão térmica têm sido aplicados na indústria com várias finalidades, entre elas a aplicação de revestimentos duros e cerâmicos, restauração dimensional e ajustes de folgas entre conjuntos estáticos e rotativos. A aplicação de revestimentos por aspersão térmica possibilita que componentes mecânicos apresentem ótimo desempenho em trabalho, tornando-se uma solução de engenharia economicamente viável.

O processo de aspersão térmica plasma spray consiste basicamente de um arco elétrico formado entre um eletrodo de tungstênio e um bocal de cobre, por onde flui uma mistura de gases que ganha velocidade e temperatura gerando o plasma. Devido a reações de dissociação e ionização este atinge temperaturas da ordem de 15.000°C a 20.000°C, capazes de aquecer e possibilitar a aspersão de qualquer tipo de material conhecido.

Este trabalho avalia as características de qualidade de camadas de molibdênio aplicadas por plasma spray em substrato de aço SAE 8620 em relação a: nível de porosidade, porcentagem de contaminação interfacial, número de partículas não fundidas e dureza.

Este tipo de camada tem grande aplicação na indústria aeronáutica na recuperação de engrenagens de motores e a importância de estudá-las reside no fato de que estas atuam como atenuadores de vibração eliminando riscos de falhas catastróficas durante serviço.

Para tanto foram metalizados com pó de molibdênio corpos de provas de aço SAE 8620 variando os valores de dois parâmetros: a temperatura de pré-

aquecimento e o tamanho da gralha de óxido de alumínio utilizada na preparação da superfície. Com o intuito de verificar também a viabilidade de reaplicação destas camadas em um mesmo componente, em algumas amostras os revestimentos foram aplicados, removidos por jateamento e então novamente aplicados. Os corpos de prova foram submetidos em seguida a ensaios de dureza e metalográficos.

De posse dos dados obtidos, adicionalmente às análises metalográficas e dimensionais foi feito o modelamento matemático com os resultados encontrados. Este modelamento visou mensurar até que ponto os resultados obtidos foram ou não consequência da alteração dos parâmetros escolhidos no estudo.

Os resultados mostram que a porosidade da camada e a contaminação interfacial são diretamente afetadas pela alteração nos parâmetros estudados, enquanto a dureza e o número de partículas não fundidas praticamente não sofreram alteração. Foi também evidenciado que a reaplicação da camada em uma mesma peça é possível, desde que os procedimentos de preparação sejam cuidadosamente seguidos.



## **ABSTRACT**

The thermal spray processes have been applied in the industry for several reasons, including hard facing and ceramic coatings applications, dimensional restoration and gap adjustments between rotational and static assemblies. The coating applications by thermal spray allow mechanic components to have optimal performance during service, making it an economically viable engineering solution.

The plasma spray process basically consists of an electric arc held between a tungsten electrode and a copper nozzle, through which flows a gas mixture which raises the speed and temperature generating the plasma. Due to the dissociation and ionization reactions, it reaches temperatures of 15.000°C to 20.000°C, capable of heating and allowing spray any type of known material.

This study evaluates the quality features of the plasma spray molybdenum coatings applied over SAE 8620 steel substrates in respect to: level of porosity, interface contamination rate, unmelted particles and hardness.

This type of coating has a wide application on aviation industry to repair engine gears and the importance of studying them lies in the fact that they act as vibration dampers eliminating risks of catastrophic failures during service.

For this purpose SAE 8620 steel test coupons were sprayed with molybdenum powder changing two parameters: the pre-heating temperature and the aluminum oxide grit for surface preparation. In order to verify the feasibility of coating reapplication on the same component, in some coupons

the coatings were applied, stripped by grit blasting and then reapplied. The coupons were submitted to hardness test and metallographic evaluation.

With the obtained data, in addition to the dimensional and metallographic analysis, a mathematical modeling was done with the results. This modeling aimed to measure the extent to which the results were or were not consequence of changing the parameters chosen in the study.

The results show that the coating porosity and interface contamination are directly affected by the change in the studied parameters, while the hardness and the number of unmelted particles are virtually non-affected. It was also evidenced that the coating reapplication over the same part is possible, provided that the preparation procedures are carefully followed.

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
2.1	Desenvolvimento da aspersão térmica e suas aplicações	4
2.2	Representação esquemática do processo de aspersão térmica plasma spray	5
2.3	Corte transversal de uma superfície metalizada	6
2.4	Representação esquemática do processo de aspersão térmica por arco elétrico	8
2.5	Esquema do processo de aspersão térmica por chama, aplicação de pó	9
2.6	Esquema do processo de aspersão térmica por chama, aplicação de arame	10
2.7	Representação esquemática de uma pistola HVOF	11
2.8	Temperatura e energia liberada dos gases plasma (entalpia), a pressão atmosférica	12
2.9	Representação esquemática de uma pistola de metalização para o processo plasma spray	13
2.10	Pistola SG-200	14
2.11	Pistola TriplexPro	14
2.12	Equipamentos de uma célula de metalização a plasma	17
2.13	Faixas de potência de arco em função da mistura dos gases	22
2.14	Ionização do gás argônio (Ar) - gás monoatômico	24
2.15	Representação dos fenômenos de ionização e ionização/dissociação dos gases	25
2.16	Metalização de eixo em ângulo de aplicação de 90º	35
2.17	Partículas de pó de molibdênio após colisão com o substrato	37

<b>Figura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
2.18	Jatos de ar montados na pistola	41
2.19	Sopradores de ar externos	41
2.20	Resfriador de vapor de nitrogênio líquido	41
2.21	Peça mascarada com fita e com borracha	45
2.22	Peça mascarada com fita e com tinta antiaderente	45
2.23	Mecanismo de adesão e formação da camada	48
2.24	Imagem da interface substrato / camada de molibdênio, obtida com microscopia eletrônica de transmissão	49
2.25	Rugosidade provocada pela ação do jateamento	50
2.26	Principais módulos de um motor à reação	56
2.27	Materiais aplicados em cada módulo do motor	57
2.28	Sistema bond coat NiAl / top coat Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	62
2.29	Camada típica de alumínio grafite sobre bond coat de NiAl	64
2.30	Camada típica de WCCo	65
2.31	Camada típica de CuNiIn + lubrificante seco	68
2.32	Camada típica de molibdênio	70
4.1	Corpos de provas em preparação para o processo	72
4.2	Mesa giratória 7HE, robô Fanuc ArcMate 120i e cabine acústica com sistema de exaustão	74
4.3	Medidor de espessura Kroeplin B-220	74
4.4	Pó de molibdênio Praxair MO-102 e óxido de alumínio grana 60	76
4.5	Fita adesiva de mascaramento de 1"	76
4.6	Desengraxe com acetona e jateamento da superfície	79
4.7	Unidade de controle, alimentador de pó, controlador do robô e teach pendant	80

<b>Figura</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
4.8	Posicionamento no dispositivo e monitoramento da temperatura de pré-aquecimento	81
4.9	Aplicação do pó de molibdênio nos corpos de provas	81
4.10	Durômetro ATK-600 para ensaio de dureza superficial	85
4.11	Preparação da superfície para ensaio de dureza	86
4.12	Equipamento de polimento de amostras Tegrapol-25	88
4.13	Microscópio AxioVert 40 MAT	90
5.1	Porosidade de 2% - cp. nº 4.1	98
5.2	Porosidade de 5% - cp. nº 3.2	98
5.3	Contaminação de interface por resíduos de camadas – cp. nº 8.1	103
5.4	Contaminação de interface por resíduos de camadas e incrustação de granalha de jateamento – cp. nº 5.3	103
5.5	Jateamento com grana 20 – contaminação de interface aceitável – cp. nº 1.1	105
5.6	Jateamento com grana 60 – contaminação de interface aceitável – cp. nº 4.1	105
5.7	Partícula não fundida com diagonal de 0,003" – cp. nº 2.1	109
5.8	Partícula não fundida com diagonal de 0,0021" – cp. nº 4.1	109
5.9	Partícula de molibdênio com diagonal de 0,0019" – cp. nº 2.2	110
5.10	Partícula de molibdênio com diagonal de 0,0019" – cp. nº 4.2	111
5.11	Modelo proposto para a previsão da contaminação interfacial	113
5.12	Modelo proposto para a previsão de porosidade da camada	114

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
2.1	Comparação das características do revestimento em cada processo	7
2.2	Concentração dos gases do processo plasma	27
2.3	Causas e efeitos das injeções incorretas do pó	29
2.4	Exemplos de especificações de bicos injetores de pó	32
2.5	Diferenças nos diâmetros dos bicos e seus efeitos	34
2.6	Requerimentos para qualidade da água do sistema de refrigeração	43
2.7	Rugosidade superficial típica em função da grana de jateamento	51
2.8	Particularidades dos equipamentos de jateamento	53
2.9	Composição química aço SAE 8620 e AISI 9310	60
4.1	Composição química típica corpos de provas aço SAE 8620	73
4.2	Parâmetros de metalização	77
4.3	Parâmetros de movimentação	78
4.4	Parâmetros de jateamento	78
4.5	Planejamento do experimento	83
4.6	Parâmetros de preparação metalográfica	89
4.7	Características avaliadas e respectivos limites de aceitação	90
5.1	Resultados dos ensaios metalográficos e dureza média	92
5.2	Resultados das medições de dureza e desvio padrão	94
5.3	Porcentagem de porosidade das camadas	96
5.4	Porcentagem de contaminação de interface das camadas	101
5.5	Quantidade de partículas não fundidas nas camadas	108

<b>Tabela</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
5.6	Valores médios para o modelamento matemático	112
5.7	Modelos de regressão propostos	113

**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
APS:	Air Plasma Spray
VPS:	Vacuum Plasma Spray
HVOF:	High Velocity Oxygen fuel
D-GUN:	Detonation Gun
LPPS:	Low Pressure Plasma Spray
HF:	High Frequency
dB:	Decíbel
SCFH:	Standard Cubic Feet per Hour
SLPM:	Standard Liters per Minute
g/min:	Gramas por Minuto
MEV:	Microscópio Eletrônico de Varredura
MET:	Microscópio Eletrônico de Transmissão
AISI:	American Iron and Steel Institute
SAE:	Society of Automotive Engineers
ASTM:	American Society for Testing and Materials
FOV:	Field of View



## **SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xiv
SUMÁRIO	xv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA ASPERSÃO TÉRMICA	3
2.2 PRINCÍPIOS DO PROCESSO	5
2.3 FUNDAMENTOS DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	7
2.3.1 PROCESSO ARCO ELÉTRICO	7
2.3.2 PROCESSO A CHAMA	9
2.3.3 PROCESSO HVOF	10
2.3.4 PROCESSO PLASMA SPRAY	11
2.3.4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO	15
2.3.4.2 EQUIPAMENTOS DE METALIZAÇÃO	17
2.4 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO PROCESSO	20
2.4.1 CORRENTE	20
2.4.2 TENSÃO	20
2.4.3 POTÊNCIA DO ARCO	22

2.4.4	GASES DO ARCO PLASMA	23
2.4.4.1	REAÇÕES DOS GASES PLASMA	23
2.4.4.2	GASES MONOATÔMICOS E DIATÔMICOS	24
2.4.4.3	QUALIDADE DOS GASES	26
2.4.4.4	OUTRAS PROPRIEDADES DOS GASES PLASMA	27
2.4.4.5	GASES PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO	28
2.4.5	GÁS CARREGADOR DE PÓ	28
2.4.6	TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ	30
2.4.7	BICO INJETOR DE PÓ	31
2.4.8	DISTÂNCIA BICO/PEÇA	32
2.4.9	BICO E ELETRODO	33
2.4.10	ÂNGULO DE APLICAÇÃO	35
2.4.11	PRÉ-AQUECIMENTO	36
2.4.11.1	INTERAÇÃO PARTÍCULAS X SUBSTRATO	36
2.4.11.2	TENSÕES RESIDUAIS	38
2.4.11.3	MÉTODOS E CUIDADOS NO PRÉ-AQUECIMENTO	39
2.4.12	TEMPERATURA DE PROCESSO	40
2.4.13	VELOCIDADE ROTACIONAL E TRANSVERSAL	42
2.4.14	REFRIGERAÇÃO DA PISTOLA	42
2.5	PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	44
2.5.1	LIMPEZA E DESCONTAMINAÇÃO	44
2.5.2	MASCARAMENTO	45
2.5.3	JATEAMENTO ABRASIVO	46
2.5.3.1	MECANISMO DE ADESÃO	46
2.5.3.2	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	49
2.5.3.3	ABRASIVO DE JATEAMENTO	51
2.5.3.4	EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS DE JATEAMENTO	52
2.5.4	CUIDADOS PÓS-JATEAMENTO	54

2.6	MATERIAIS DE BASE	55
2.6.1	MOTORES A REAÇÃO	55
2.6.2	MATERIAIS DE BASE – MÓDULOS	57
2.6.3	MATERIAIS DE BASE – ENGRENAGENS	59
2.6.4	MATERIAIS DE BASE – DESENVOLVIMENTOS	60
2.7	MATERIAIS DE ASPERSÃO	61
2.7.1	CAMADAS DE ADESÃO (BOND COAT)	61
2.7.2	CAMADAS DE TRABALHO (TOP COAT)	63
2.7.2.1	CAMADAS ABRADÁVEIS	63
2.7.2.2	CAMADAS DURAS (HARDCOATS)	64
2.7.2.3	CAMADAS CERÂMICAS	65
2.7.2.4	CAMADAS METÁLICAS	66
2.7.3	CAMADAS DE MOLIBDÊNIO	68
3.	OBJETIVOS	71
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	72
4.1	CORPOS DE PROVAS	72
4.2	EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E GASES DE PROCESSO	73
4.3	MATERIAIS CONSUMÍVEIS	75
4.4	PARÂMETROS DE PROCESSO	77
4.5	PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO	79
4.6	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	82
4.7	ENSAIOS REALIZADOS	84
4.7.1	ENSAIO DE DUREZA	84
4.7.2	AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA	87
4.7.2.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS	87
4.7.2.2	AVALIAÇÃO DAS CAMADAS DE MOLIBDÊNIO	89
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS	92

5.2	DUREZA DA CAMADA	93
5.3	POROSIDADE	95
5.4	CONTAMINAÇÃO INTERFACIAL	99
5.5	NÚMERO DE PARTÍCULAS NÃO FUNDIDAS	107
5.6	MODELAMENTO MATEMÁTICO DO EXPERIMENTO	111
6.	CONCLUSÕES	117
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	119
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO I	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO UNIDADE CONTROLADORA SULZER METCO 9MC	125
ANEXO II	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MEDIDOR DE TEMPERATURA DIGITAL INFRAVERMELHO MINIPA MT-350	126
ANEXO III	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MEDIDOR DE ESPESSURA KROEPLIN B-220	127
ANEXO IV	CERTIFICADO DE CONFORMIDADE / COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO PÓ DE MOLIBDÊNIO PRAXAIR MO-102	128
ANEXO V	CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DURÔMETRO MITUTOYO ATK-600	129

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA**

Revestimentos de superfícies são utilizados quando se deseja modificar, reparar ou beneficiar as características de uma superfície. Entre as diversas características que se deseja alterar encontram-se as propriedades mecânicas e de resistência a corrosão do material que são desejadas diferentes das encontradas no metal base.

Vários tipos de revestimentos foram desenvolvidos, para diferentes finalidades e com diferentes formas de aplicação. Entre os principais processos de revestimentos encontramos a soldagem, pintura, galvanoplastia e a aspersão térmica.

A aspersão térmica, também conhecida como metalização, é um processo de revestimento superficial que oferece uma grande variedade de materiais para recobrimento, como revestimentos abrasíveis, revestimentos duros ou cerâmicos (barreiras térmicas) e, aliado a não alteração das características metalúrgicas do metal base e mínimo aporte térmico aplicado à peça, fazem este processo ser amplamente utilizado na indústria aeronáutica.

Este trabalho estuda a variação dos valores de dois parâmetros de processo, nomeadamente a grana do óxido de alumínio utilizado na preparação da superfície e a temperatura de pré-aquecimento, verificando a influência que estes fatores

podem vir a causar na porosidade da camada, no número de partículas não fundidas, na contaminação da interface (superfície) da chapa e na dureza em camadas de molibdênio aplicadas pelo processo plasma spray (APS – Air Plasma Spray). Além disso, de forma a verificar a viabilidade de reaplicação do revestimento, em alguns corpos de provas as camadas foram aplicadas, removidas por jateamento abrasivo e então reaplicadas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta revisão bibliográfica é feita uma abordagem sobre os principais processos de aspersão térmica, materiais, parâmetros e equipamentos utilizados, métodos de preparação da superfície e materiais de base utilizados em componentes de motores aeronáuticos.

### **2.1 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DA ASPERSÃO TÉRMICA**

O processo de aspersão térmica, genericamente conhecido como metalização, foi desenvolvido na Suíça em 1910 pelo Sr. Max Ulrich Schoop, inicialmente utilizando materiais com baixo ponto de fusão como o estanho e o chumbo. Consistia basicamente de um equipamento que empregava arames metálicos como consumíveis que eram alimentados uniformemente por ar comprimido enquanto a fusão ocorria com chama através da queima de gases<sup>[1]</sup>. Porém, somente em 1930 nos Estados Unidos, foi iniciado o uso comercial dos materiais e equipamentos desenvolvidos para este processo.

Durante os próximos 20 anos vários aperfeiçoamentos foram incorporados aos processos de aspersão térmica. Na década de 1940 foi desenvolvido um novo equipamento no qual sua pistola utilizava arco voltaico para promover a energia necessária para a fusão do arame consumível. A partir de 1950 os avanços tecnológicos nos equipamentos e materiais possibilitaram obter maior repetibilidade

no processo de aplicação. A partir de 1960 iniciou-se o desenvolvimento do processo plasma spray, onde o material consumível era aplicado em forma de pó. Posteriormente foi desenvolvido o processo de deposição de pós por detonação.

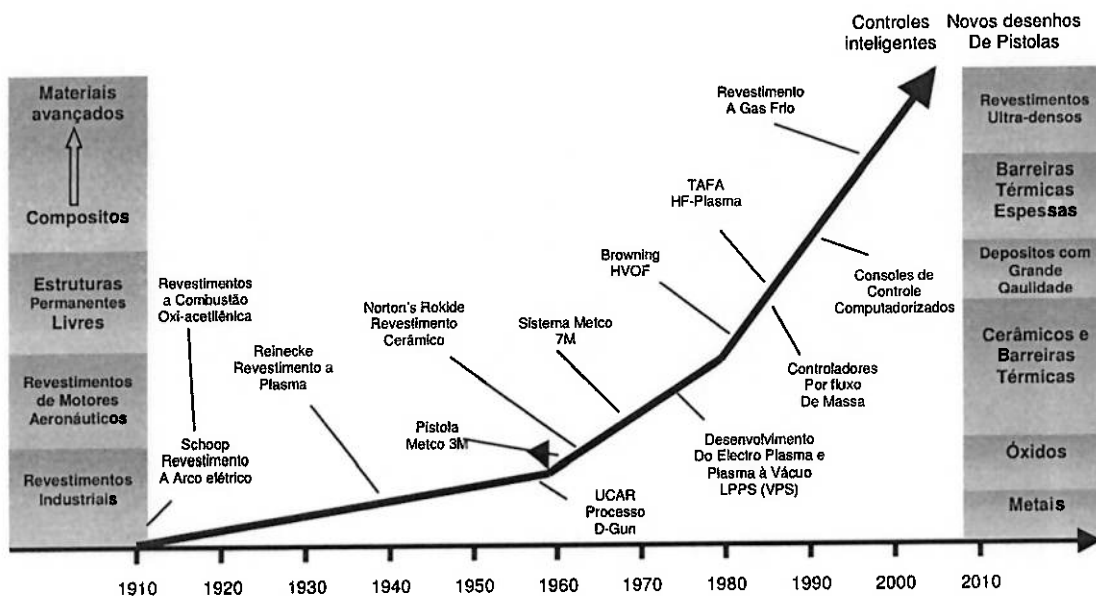


Figura 2.1 – Desenvolvimento da aspersão térmica e suas aplicações.

Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

Durante a década de 1980 foi desenvolvido um processo utilizando o calor através da queima de gases ou de líquidos combustíveis com pistola hipersônica, o que possibilitou a aplicação de materiais a elevadas velocidades de aspersão.

Atualmente a aspersão térmica tem larga aplicação nos setores Aeronáutico / Aeroespacial, não só na fabricação, mas principalmente na recuperação de componentes de motores e unidades de propulsão.



## 2.2 PRINCÍPIOS DO PROCESSO

Conforme CLARA<sup>[3]</sup>, a aspersão térmica é caracterizada por processos onde um material metálico ou não metálico é aquecido ligeiramente abaixo da temperatura de fusão e aspergido em alta velocidade contra a superfície da peça previamente preparada. Este material pode estar em forma de pó ou arame (vareta), e é aquecido até atingir seu estado fundido / plástico. A figura 2.2 ilustra o funcionamento de uma pistola de metalização pelo processo plasma spray.

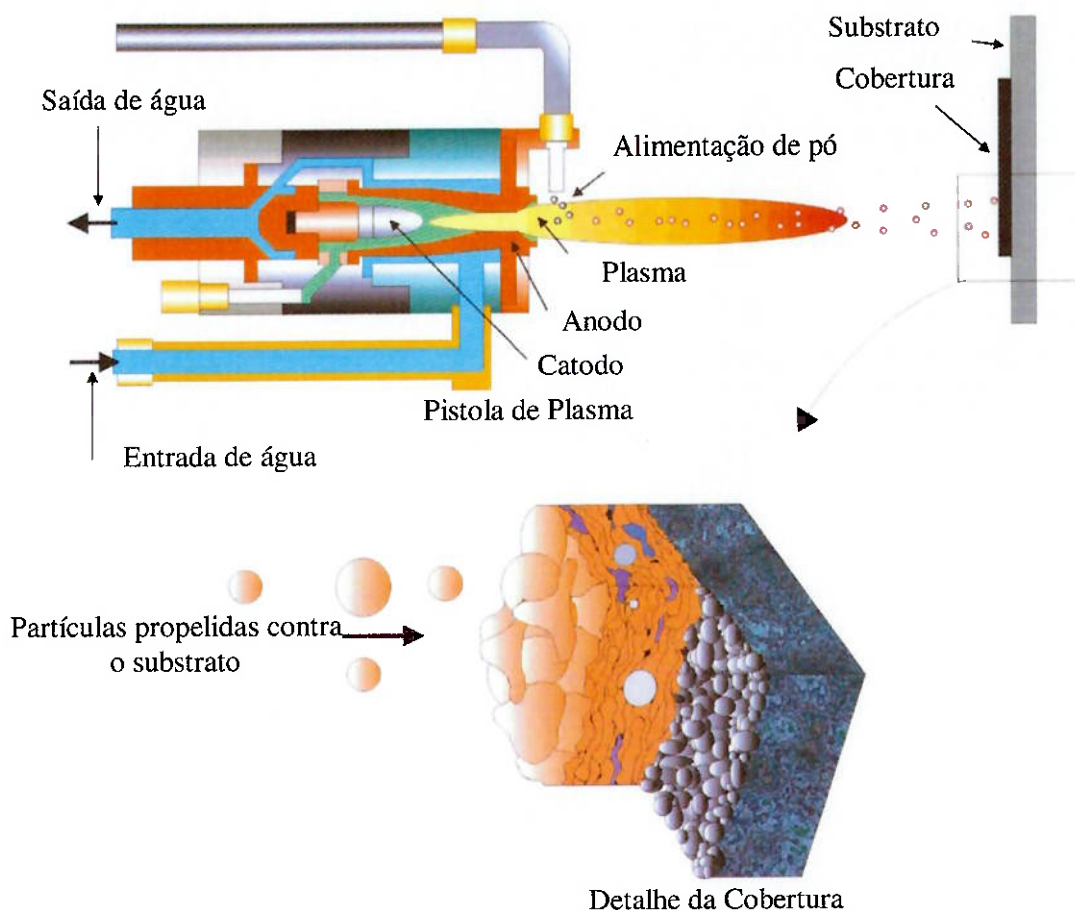


Figura 2.2 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica plasma spray. Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

O material aquecido é aspergido com auxílio de gases formando uma sólida e densa camada sobre a superfície da peça<sup>[5]</sup>. Esta camada é constituída fundamentalmente pelo próprio material aspergido e também por óxidos, porosidades e partículas não fundidas. A figura 2.3 ilustra as particularidades de uma camada metalizada.

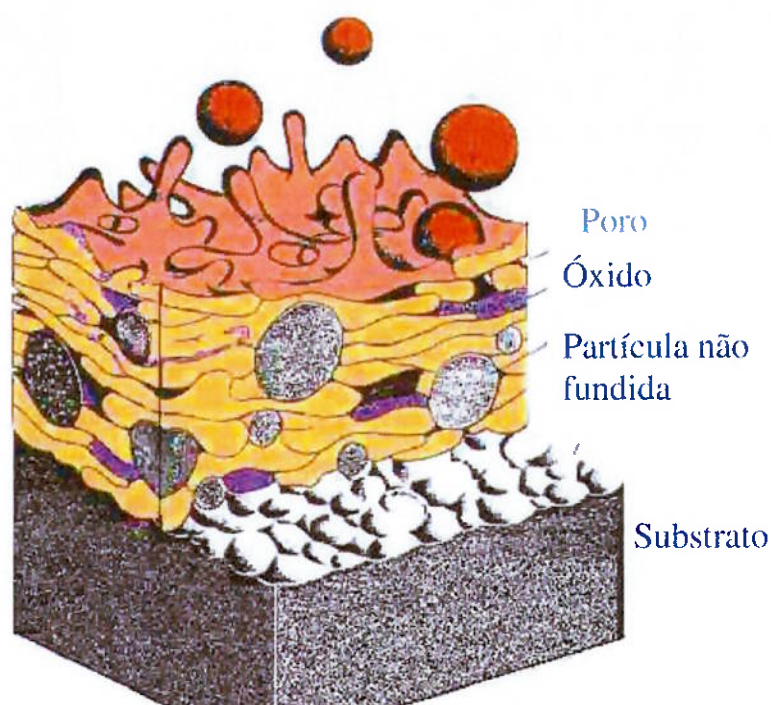


Figura 2.3 – Corte transversal de uma superfície metalizada. Adaptado de AGUIAR, SEGATTO e CORREIA<sup>[4]</sup> e ENGLAND<sup>[21]</sup>

Ao colidir com a superfície da peça, o spray de material lançado contra a superfície é ancorado nesta devido às imperfeições ou rugosidades criadas durante o jateamento, resfriando rapidamente. Faz parte da técnica de aplicação manter a peça e/ou a pistola de aplicação em constante movimentação de forma a controlar o aporte térmico na peça, que não deve ultrapassar 150°C, para evitar empenamentos ou problemas de solda da camada aplicada.

Quanto maior a velocidade de aspersão, melhor será a aderência e mais densa será a camada. A tabela 2.1 compara as velocidades de aspersão e algumas características das camadas dos principais processos de aspersão utilizados na indústria aeronáutica.

TABELA 2.1 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO EM CADA PROCESSO. ADAPTADO DE BOMFORD<sup>[2]</sup>

Processo	Velocidade Partícula (m/s)	Adesão (MPa)	Óxido (%)	Porosidade (%)	Taxa de Deposição (Kg/h)	Espessura de Camada Típica (mm)
CHAMA	40	<8	10-15	10-15	1-10	0,2-10
ARCO	240	10-30	10-20	5-10	6-60	0,2-10
PLASMA	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0,2-2
HVOF	600-1000	>70	1-2	1-2	1-5	0,2-2

## 2.3 FUNDAMENTOS DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Dos vários processos de aspersão térmica conhecidos, é importante destacar quatro destes que tem maior aplicabilidade na seleta indústria aeronáutica devido às boas características de adesão e metalográficas encontradas nos revestimentos: Arco Elétrico, Chama, HVOF e Plasma (APS).

### 2.3.1 PROCESSO ARCO ELÉTRICO

No processo Arco Elétrico ou Arc Spray, o calor é obtido através do arco elétrico formado entre dois arames consumíveis no bico da pistola de metalização. Um jato de ar comprimido a alta pressão é dirigido ao arco elétrico na zona onde os

arames são fundidos, promovendo a atomização e projetando o material contra a superfície da peça<sup>[9]</sup>.

O arame consumível é alimentado na pistola utilizando-se uma pequena turbina a ar comprimido, incorporada na pistola, ou então um moto-reductor elétrico. O equipamento básico para o processo consiste de fonte de corrente constante, alimentador de arame também com velocidade constante, a tocha propriamente dita e fonte de ar comprimido com regulador de pressão / vazão. A figura 2.4 mostra a representação esquemática de um processo a arco elétrico.

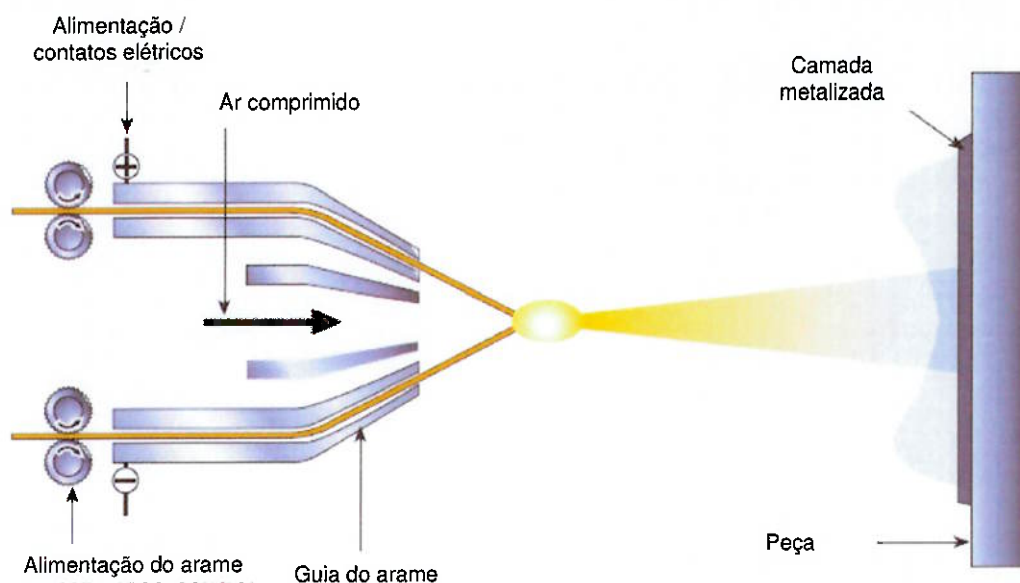


Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica por arco elétrico. Adaptado de METCO<sup>[5]</sup>

Um das grandes vantagens deste sistema são as altas taxas de deposição e o baixo custo operacional, quando comparado com o processo plasma<sup>[1]</sup>. Porém, entre as suas limitações estão a influência da condutividade elétrica dos arames consumíveis e as menores velocidades de aspersão das partículas<sup>[3]</sup>.

### 2.3.2 PROCESSO A CHAMA

O processo de aspersão térmica por chama ou combustão caracteriza-se pela utilização do calor de uma chama oxi-combustível como fonte de calor de processo, sendo possível o uso de gás acetileno, propano ou hidrogênio<sup>[1,2,5]</sup>. Os materiais consumíveis são utilizados na forma de pó, sendo alimentados por gravidade ou com auxílio de um alimentador de pó, ou em forma de arame, sendo alimentados por uma pequena turbina a ar montada na própria pistola de metalização. Assim como no processo a arco, um jato de ar comprimido atomiza o material assim que é aquecido no bico da pistola, projetando-o contra a superfície da peça<sup>[2,9]</sup>.

O equipamento básico consiste em fontes de gases e reguladores, ar comprimido com reguladores e as pistolas de metalização, sendo o uso de alimentadores de pó opcional. As figuras 2.5 e 2.6 mostram a representação esquemática de pistolas para aplicação de pó e arame respectivamente.

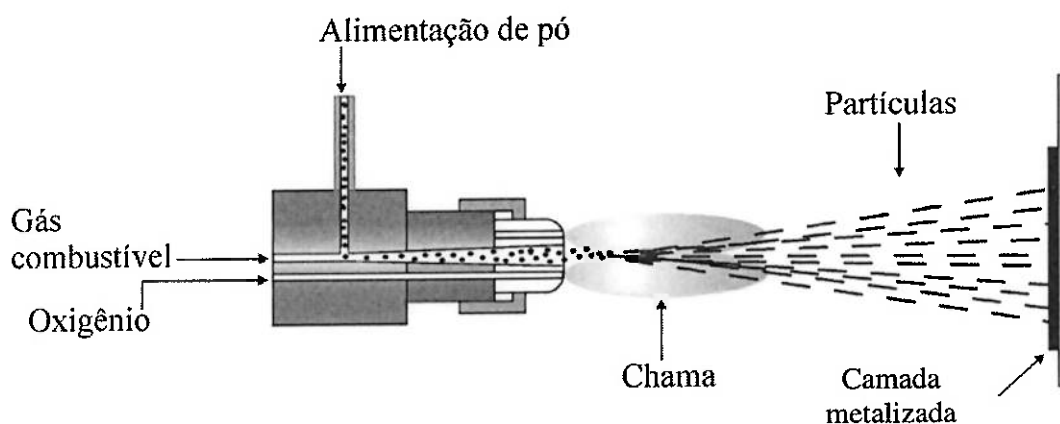


Figura 2.5 - Esquema do processo de aspersão térmica por chama, aplicação de pó. Adaptado de AGUIAR, SEGATTO e CORREIA<sup>[4]</sup>

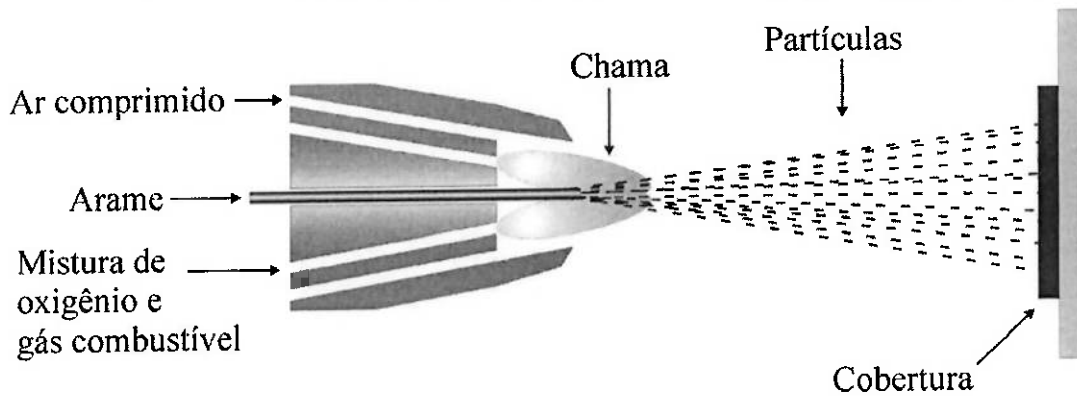


Figura 2.6 - Esquema do processo de aspersão térmica por chama, aplicação de arame. Adaptado de AGUIAR, SEGATTO e CORREIA<sup>[4]</sup>

### 2.3.3 PROCESSO HVOF

Uma das características chave do processo de aspersão térmica HVOF – Hygh Velocity Oxygen Fuel – ou Processo a Chama de Alta Velocidade é a velocidade em que a partícula é aspergida em direção à peça, da ordem de 800 metros/segundo. A velocidade supersônica é identificada pelos “diamantes de choque” observados na chama, provocados pelas ondas de compressão e contração produzidas quando os gases fluem através do bocal da pistola<sup>[2,5,9]</sup>.

O processo utiliza, assim como no processo a chama, o gás oxigênio em combinação com um gás combustível, podendo ser propano, propileno, acetileno ou hidrogênio, ou então querosene como combustível líquido. O material de adição, em forma de pó, é injetado no centro da chama no bico da pistola. Como o material é mantido por pouco tempo na chama e viaja em altíssima velocidade, o depósito é caracterizado pelo baixo nível de óxidos, por ser muito denso e com alta resistência

de adesão e baixa porosidade. Uma das limitações do processo é não aplicar materiais cerâmicos, devido à baixa temperatura de chama. Outro ponto importante é o alto nível de ruído de processo, acima de 140dB.

O equipamento de aspersão HVOF é composto basicamente de fontes de gás combustível, comburente e carregador de pó com reguladores de pressão e vazão, ar comprimido, pistola e alimentador de pó. A figura 2.7 mostra a representação de uma pistola de aspersão HVOF.

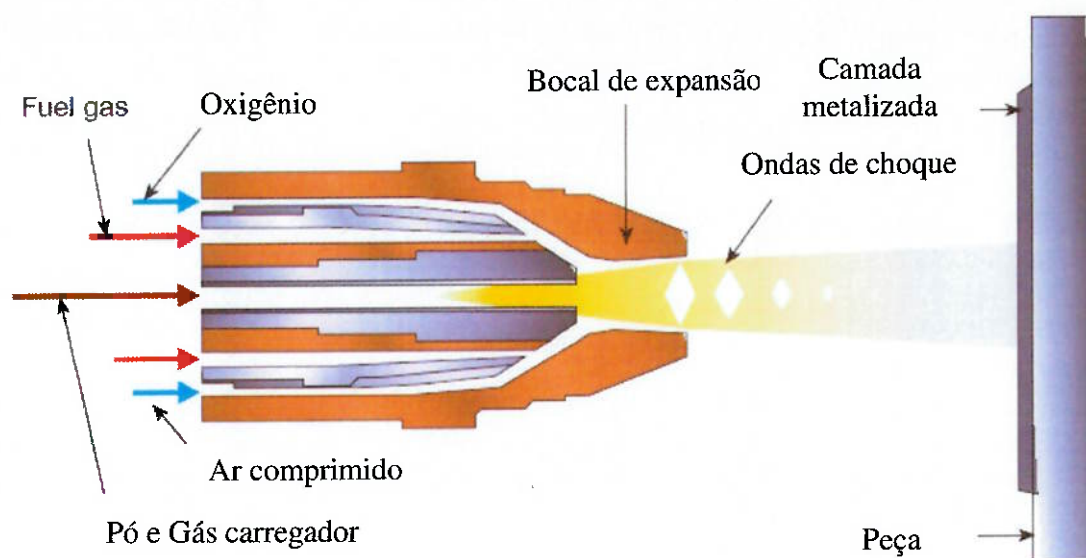


Figura 2.7 – Representação esquemática de uma pistola HVOF. Adaptado de METCO<sup>[5]</sup>

### 2.3.4 PROCESSO PLASMA SPRAY

O processo plasma spray em atmosfera ambiente (APS), que vem a ser objeto deste estudo, é um processo que tem grande aplicação pois sua altíssima temperatura de arco, da ordem de 15.000°C a 20.000°C, é capaz de aplicar qualquer material existente inclusive os cerâmicos. O plasma é obtido aquecendo-



se um gás a altas temperaturas de forma que, ionizado, ele se torne eletricamente condutor de corrente elétrica. É conhecido também como o quarto estado da matéria<sup>[2]</sup>. Vários gases podem ser utilizados neste processo. A figura 2.8 mostra as temperaturas do plasma obtidas pelos gases comumente utilizados no processo e as respectivas quantidades de energia liberada.

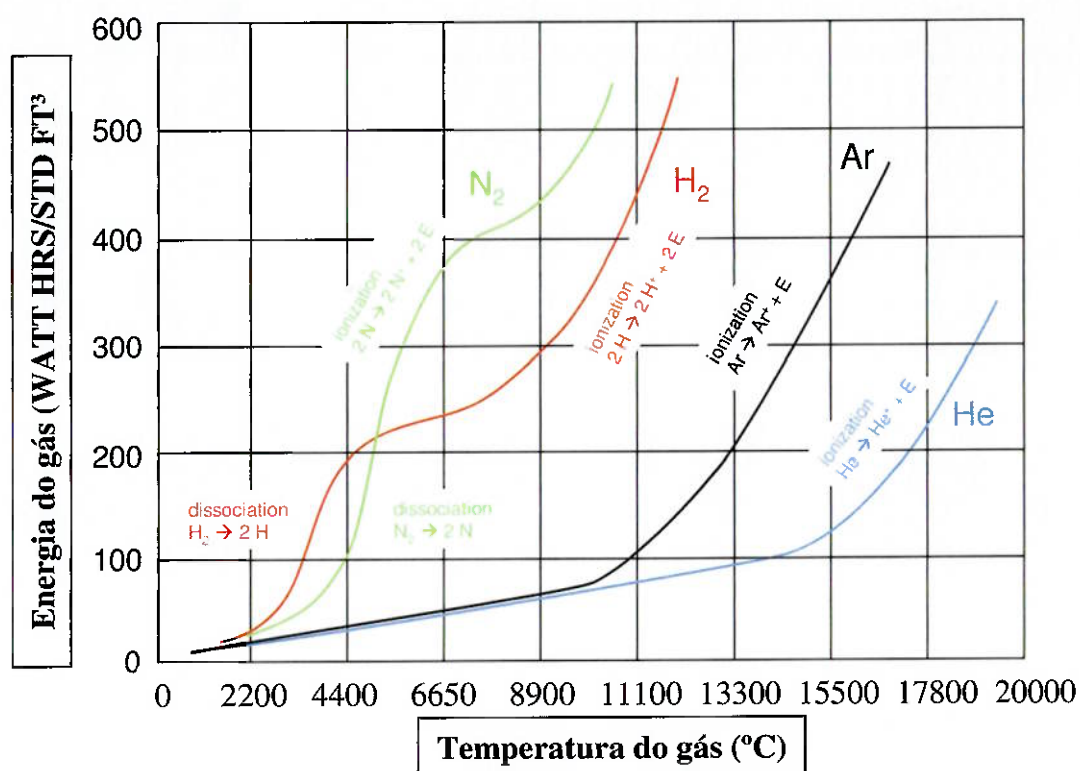


Figura 2.8 – Temperatura e energia liberada dos gases plasma (entalpia), a pressão atmosférica. Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

No processo plasma spray, um gás ou uma mistura de dois gases, passa através de um arco elétrico formado entre o catodo de tungstênio e um ânodo (bocal) de cobre com um furo central<sup>[6]</sup>. Nesta passagem ocorre o aquecimento e aumento da velocidade do gás, gerando o plasma. A figura 2.9 mostra a



representação esquemática de uma pistola de metalização para o processo plasma enquanto as figuras 2.10 e 2.11 mostram fotos de diferentes modelos de pistolas disponíveis no mercado.

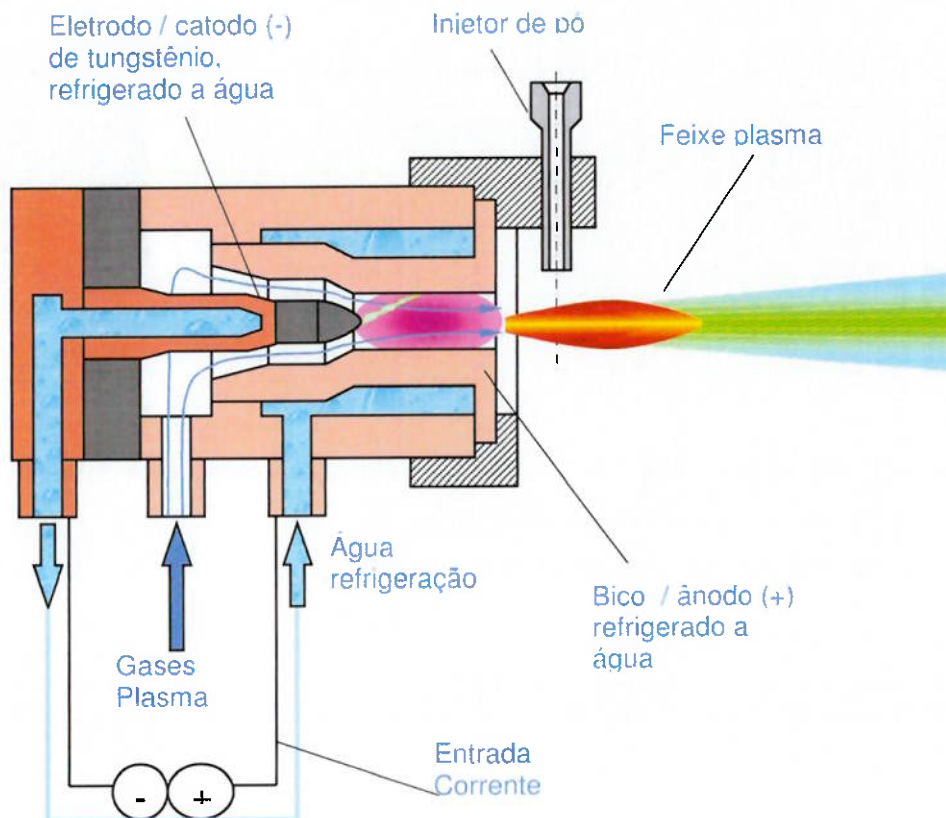
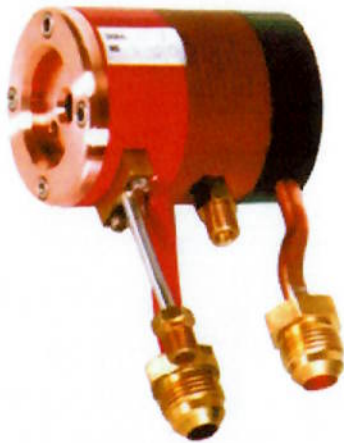


Figura 2.9 – Representação esquemática de uma pistola de metalização para o processo plasma spray. Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

Figura 2.10– Pistola SG-200<sup>[7]</sup>Figura 2.11 – Pistola TriplexPro<sup>[8]</sup>

O material de recobrimento é utilizado na forma de pó, o qual é alimentado até a frente do arco plasma e aspergido na superfície da peça. Conforme BOMFORD<sup>[2]</sup>, somente de 5% a 10% dos gases plasmas são ionizados, o restante concentra o feixe plasma que carrega as partículas até a peça e também protege o bocal e o eletrodo de tungstênio contra danos provocados pela presença de oxigênio do ar ambiente.

O processo plasma de aspersão pode ser operado em atmosfera controlada (LPPS) ou vácuo (VPS), onde se utilizam câmaras especiais, ou em atmosfera com gás protetor como o argônio<sup>[2,11]</sup>, conhecido como Air Plasma Spray (APS), que vem a ser o processo estudado neste trabalho.

### 2.3.4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO

Em relação a outros processos de aspersão, a metalização por plasma apresenta as seguintes vantagens<sup>[3-4-9]</sup>:

a) Alta temperatura de arco: Permite a aplicação de uma ampla gama de materiais disponíveis como, por exemplo, os cerâmicos, resultando em ótimos valores de dureza e baixos níveis de oxidação e porosidade da camada.

b) Alta velocidade de aspersão: Proporciona principalmente bons resultados de aderência de camada e também contribui para reduzir os níveis de óxidos.

c) Fácil controle da potência aplicada: Em uma ampla faixa de utilização, permite fino ajuste dos parâmetros de processo, novamente ampliando a sua gama de utilização e proporcionando propriedades físicas e metalúrgicas dos depósitos superiores às aplicadas pelos outros processos.

d) Possibilidade de automação: Capacita o processo para aplicações tecnicamente rigorosas, garantindo repetibilidade e aumentando a confiabilidade quanto à utilização dos parâmetros de processo.

e) Ampla gama de utilização: Possibilita a aplicação de proteção contra atrito, desgaste e corrosão, recuperação de peças, barreiras térmicas e biomateriais.

f) Ambiental / ecológico: O processo tem sido amplamente utilizado na substituição de processos tratamentos de superfície, como o cromo duro em

aplicações em trens de pouso de aviões, processo que gera resíduos altamente nocivos ao meio ambiente.

Como desvantagens, pode-se citar:

a) Alto custo do equipamento: Em comparação a outros processos de aspersão térmica o processo plasma requer o uso equipamentos mais complexos e com alta tecnologia aplicada, incluindo pistola e seus componentes, que devido ao alto desgaste, devem ser trocados com poucas horas de uso, para garantir a operação segura e confiável.

b) Taxa de deposição: Quando comparado ao processo de aspersão a chama, o processo plasma fornece metade da taxa de deposição e, quando comparado com o processo a arco elétrico, fornece somente 1/12 da taxa de deposição.

c) Melhor qualificação do operador: Também pela complexidade e quantidade de parâmetros a serem controlados, os operadores das células de metalização por plasma devem ter níveis de instrução e treinamento diferenciados. Nas aplicações mais complexas com utilização de robôs, usualmente o operador da célula de metalização também opera e programa este equipamento.

d) Ruído excessivo: É comparado ao momento de decolagem de um grande avião comercial gerando ruído acima de 130dB. Somado à grande geração de fumos, requer a utilização de cabines apropriadas com revestimento acústico e unidades de exaustão.

### 2.3.4.2 EQUIPAMENTOS DE METALIZAÇÃO<sup>[4,5,10]</sup>

Devido a alta tecnologia aplicada na aspersão térmica pelo processo plasma, é possível afirmar que este possui um conjunto de equipamentos de grande complexidade e que demanda um espaço considerável na célula de metalização. Alguns equipamentos podem ser considerados acessórios, uma vez que não são mandatórios, mas garantem uma operação tecnicamente mais adequada, dependendo da utilização do componente a ser metalizado, ou promovem maior conforto ao operador da célula – neste caso, o robô.

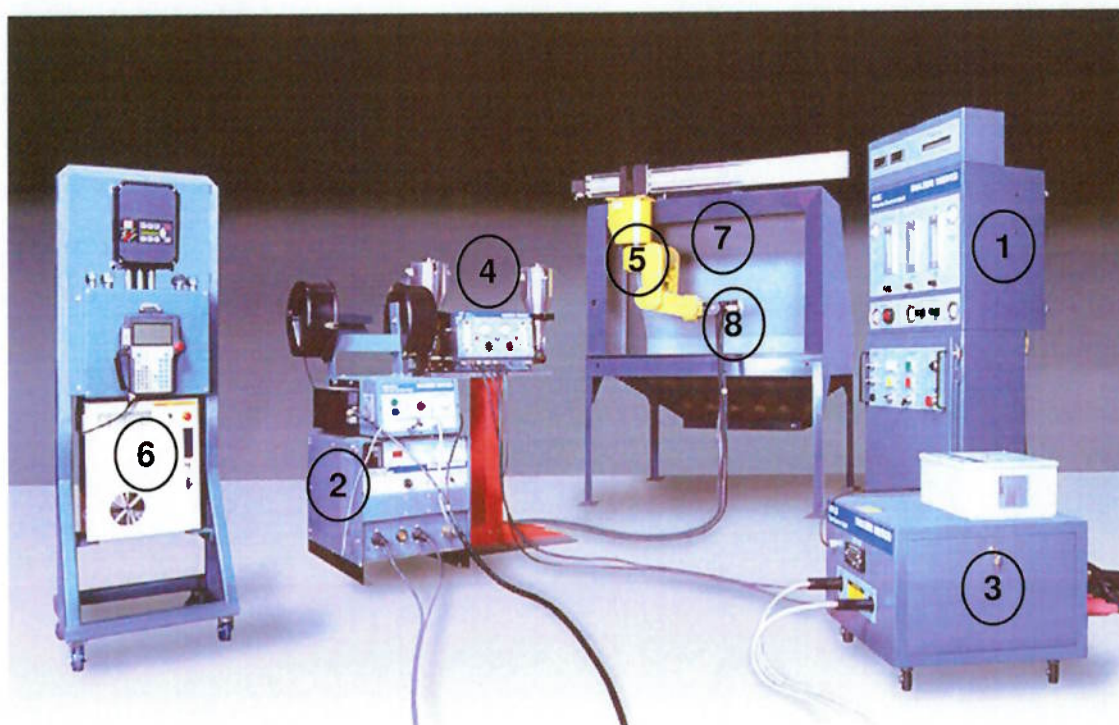


Figura 2.12 – Equipamentos de uma célula de metalização a plasma.

Adaptado de AGUIAR, SEGATTO e CORREIA<sup>[4]</sup>

A figura 2.12 ilustra os equipamentos que compõem uma unidade de metalização plasma spray, conforme segue<sup>[2,3,4,5,6]</sup>:

a) Unidade de controle principal (item 1): Equipamento onde o operador regula e monitora as pressões e vazões dos gases e ar comprimido, corrente e tensão de trabalho, e controla a abertura e o desligamento do arco.

b) Unidade de potência (item 2): Retificador de corrente constante, 100% de ciclo de trabalho.

c) Unidade de distribuição (item 3): Controla a vazão de água de refrigeração da pistola e também incorpora os eletrodos faiscadores que promovem a abertura do arco.

d) Alimentador de pó (item 4): Responsável por alimentar de forma precisa na taxa / razão especificada a pistola com o material (pó) utilizando um gás como meio carregador. Normalmente utiliza-se o mesmo gás primário usado no arco (argônio ou nitrogênio).

e) Robô (item 5): Equipamento opcional, promove um ótimo controle de parâmetros de processo como distância bico/peça, velocidade de deslocamento durante a aplicação e garante ótima repetibilidade. Ideal para processos críticos, imprescindível na indústria aeronáutica.

f) Controlador do robô (item 6): É o equipamento denominado "cérebro" do robô, por controlar todas as funções deste.

g) Unidade de exaustão (item 7): Item fundamental na célula, pois remove do ambiente os gases e fumos gerados na operação, normalmente em grande volume.

h) Cabine de metalização (não ilustrado): Também fundamental, a cabine promove isolamento acústico durante processo, normalmente acima de 130dB.

i) Pistola de metalização (item 8): É o equipamento onde a mistura dos gases entra em contato com o eletrodo, e o arco plasma é estabelecido. Também nela é fixado o injetor de pó, oriundo da unidade de alimentação, que garante a introdução do material na posição ideal de aplicação no arco plasma.

j) Mesa giratória (não ilustrado): Item fundamental onde há grande variabilidade de peças a serem metalizadas, como em uma oficina de reparo de componentes de motores aeronáuticos, tem a função de permitir estabelecer rotação e inclinação da peça a ser metalizada, possibilitando obter as condições ideais de aplicação das camadas para cada peça.

k) Unidade de fornecimento de gases e ar comprimido (não ilustrado): Usualmente do lado externo da cabine, é composta por bateria de cilindros ou, opcionalmente no caso do argônio, um tanque criogênico. Para o ar comprimido pode ser utilizado um compressor convencional, porém cuidados adicionais com excesso de umidade e presença de partículas devem ser considerados.

l) Unidade de fornecimento e arrefecimento de água (não ilustrado): Estas unidades, também posicionadas externamente, irão garantir a alimentação da pistola com água na pressão e temperatura especificadas.

## **2.4 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO PROCESSO<sup>[2,12]</sup>**

Há vários parâmetros e variáveis que tem uma importante influência nas propriedades de qualquer camada aplicada pelo processo plasma spray, sendo a definição e controle destes parâmetros vitais para o processo. Os principais fatores e suas influências são apresentados a seguir.

### **2.4.1 CORRENTE**

A corrente (A) é utilizada para controlar e manter o nível de potência no sistema, a qual positivamente afeta o calor no gás plasma e a velocidade da partícula, para um determinado bocal. Os níveis de corrente para os diversos materiais foram extensivamente desenvolvidos e documentados, e estes valores são ajustados na unidade de controle principal a qual regula a saída do retificador.

### **2.4.2 TENSÃO**

A tensão de processo (V), registrada no painel da unidade controle, é resultado da combinação da corrente, dos fluxos dos gases e da condição dos componentes da pistola – bico e eletrodo - quanto a desgaste. Possui efeito mais significativo nos níveis de potência que a corrente, pois uma pequena mudança no valor da tensão corresponde a uma grande alteração no nível de potência do retificador, conforme pode ser visto na formula a seguir:



**POTÊNCIA (W) = CORRENTE (A) x TENSÃO (V)**

Assumindo-se que a corrente e o fluxo do gás primário foram estabelecidos e não podem variar, a tensão do arco é regulada variando-se o fluxo do gás secundário. Não há botão ou seletor para regulação da tensão de arco no painel de controle. Como a tensão é função também do desgaste dos componentes da pistola, os fabricantes dos pó / equipamentos estipulam, para um determinado material, uma vazão de gás secundário correspondente a uma faixa de tensão de utilização que variam, em linhas gerais, mais ou menos 3 volts. Isto significa que quando bico e eletrodo são novos, o valor de tensão registrado será máximo e, conforme o uso e desgaste natural destes, o valor da tensão diminuirá até atingir o nível mínimo da faixa estipulada, o que significa que algum dos componentes deve ser substituído. Caso continue a operar nesta condição, a potência do arco não será suficiente para aquecer/fundir o material de adição adequadamente para que a camada metalizada seja aplicada com a qualidade desejada.

Por outro lado, caso a vazão de gás secundário seja aumentada para corrigir o valor da tensão, danos à pistola poderão ocorrer, portanto esta ação não é recomendada. Adicionalmente, ao aumentar qualquer valor de vazão de gases, as partículas do pó de metalização serão aspergidas numa velocidade também maior, permanecendo menor tempo no arco. Portanto, uma menor quantidade de partículas será aquecida/fundida adequadamente, resultando em uma camada metalizada com reduzida adesão e maior nível de porosidade.

### 2.4.3 POTÊNCIA DO ARCO

Como já dito anteriormente, a potência do arco é produto direto dos valores de tensão e corrente selecionados, e tem um efeito significativo na velocidade de aspersão da partícula e na transferência de calor com a superfície do metal base, influenciando diretamente na adesão e na qualidade da camada. Porém, o tipo de mistura dos gases também resulta em diferentes potências de arco, conforme observado na figura 2.13.

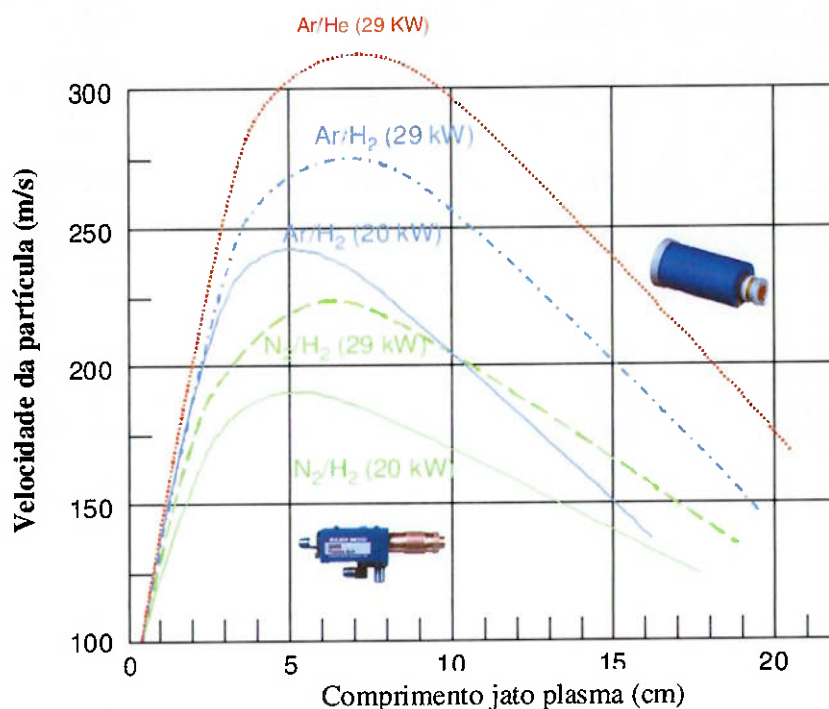


Figura 2.13 – Faixas de potência de arco em função da mistura dos gases.

Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

#### **2.4.4 GASES DO ARCO PLASMA<sup>[2,3,6,12]</sup>**

A correta seleção dos gases de processo e suas vazões é fundamental para que o resultado da metalização seja conforme o desejado. De forma a oferecer equipamentos e consumíveis com garantias de qualidade de aplicação e desempenho durante serviço, as empresas fabricantes investem alto também no desenvolvimento dos parâmetros ideais para cada material. Portanto, a menos que haja necessidade de um tipo específico de camada para um tipo diferenciado de aplicação, deve-se seguir as especificações dos fabricantes quanto aos parâmetros de aplicação e, conseqüentemente, dos tipos e vazões dos gases.

As propriedades atômicas dos gases, monoatômicos ou diatômicos citados em 2.4.4.2, também determinam a aplicação apropriada no processo plasma spray.

##### **2.4.4.1 REAÇÕES DOS GASES PLASMA<sup>[2]</sup>**

Os gases plasma, quando comparados com gases não ionizantes como os utilizados em processos a combustão, apresentam resultados muito superiores como meio de aquecimento. A razão fundamental para este melhor desempenho é que os gases que compõem as misturas passam por pelo menos um estado de mudança (ionização) antes de se tornarem o plasma propriamente dito. Quando a mudança ocorre, o gás aumenta consideravelmente a quantidade de calor disponível sem grande aumento da sua própria temperatura. A figura 2.14 ilustra o fenômeno atômico de ionização do gás argônio.

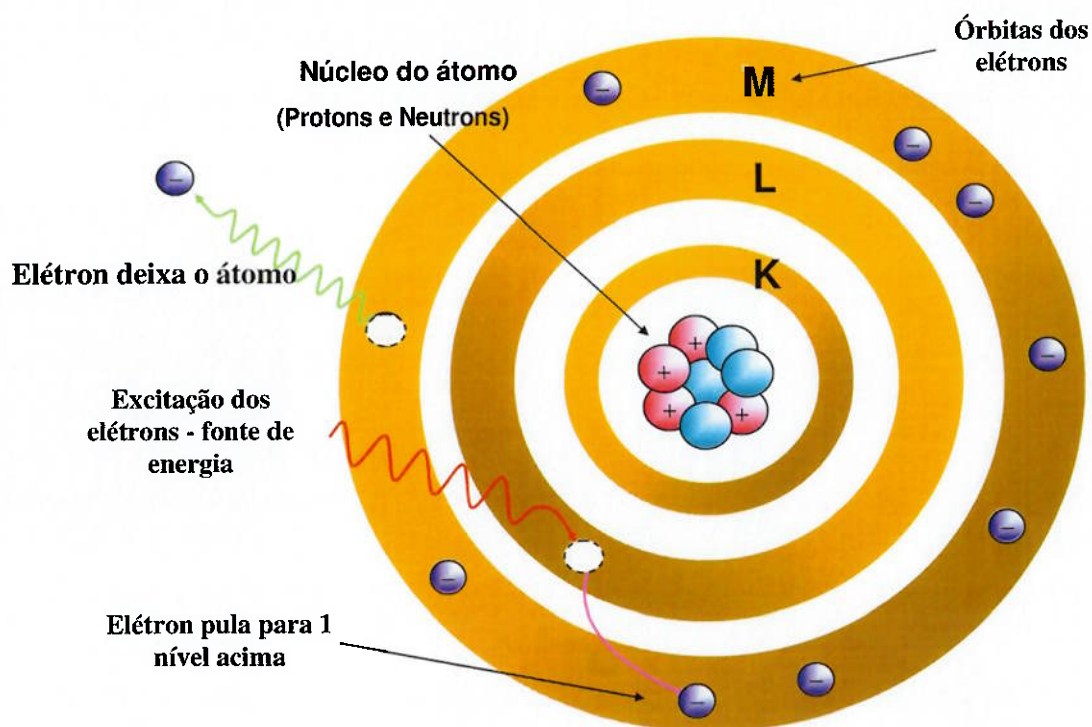


Figura 2.14 – Ionização do gás argônio (Ar) – gás monoatômico. Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup> e RUSSELL<sup>[33]</sup>

#### 2.4.4.2 GASES MONOATÔMICOS E DIATÔMICOS<sup>[2]</sup>

Gases monoatômicos, como o argônio (Ar), são compostos por um único átomo por molécula, e requerem um baixo nível de energia para ocorrer a ionização. Por este motivo são preferencialmente utilizados para o início do arco plasma, conforme ilustrado na figura 2.14.

Gases diatômicos ou moleculares, como o hidrogênio ( $H_2$ ), são compostos por 2 átomos por molécula e devem ser primeiramente dissociados por separação dos átomos das moléculas, para então ocorrer a ionização, conforme mostrado na

figura 2.15. Esta dupla mudança de estados libera grande quantidade de energia, portanto promovendo melhor e mais eficiente aquecimento do plasma quando comparado com os gases monoatômicos.

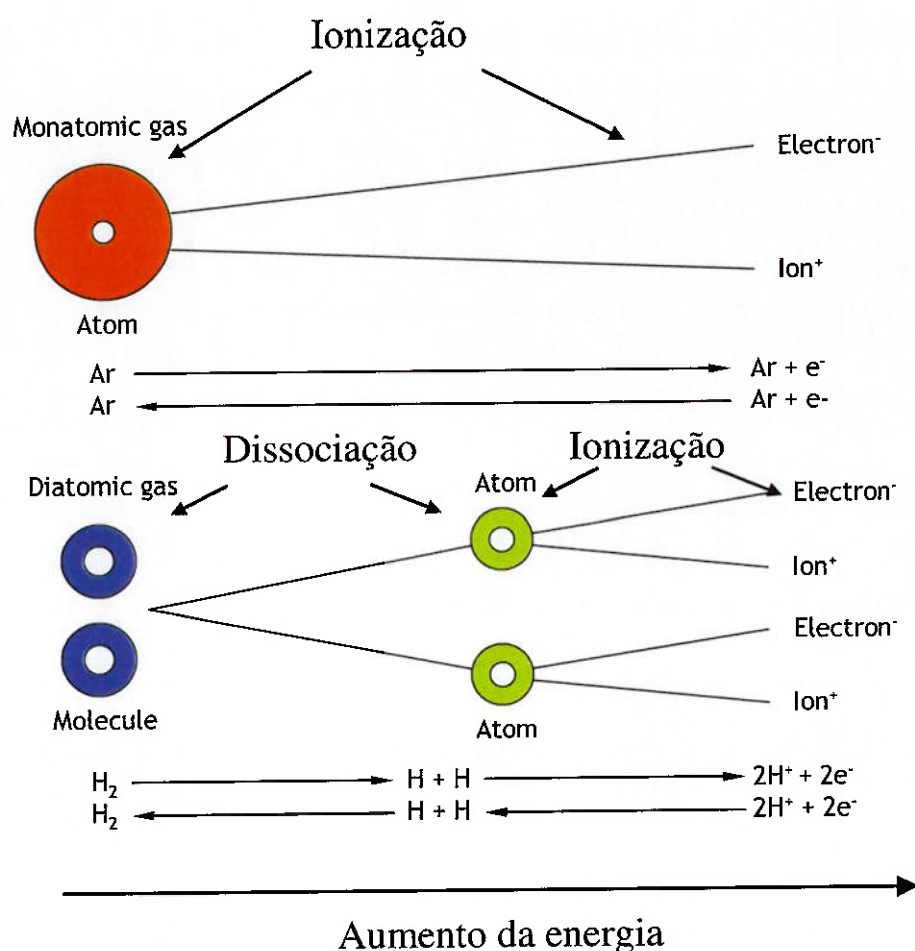


Figura 2.15 – Representação dos fenômenos de ionização e ionização / dissociação dos gases. Adaptado de BOMFORD<sup>[2]</sup>

Pelas razões já abordadas, a grande maioria dos sistemas plasma spray aproveita os benefícios dos gases monoatômicos para a abertura do arco (nestas condições classificado como gases primários), seguido pela introdução de uma pequena quantidade de gás diatômico de liberação de grande quantidade de

energia (classificados como gases secundários), condição facilmente observada pelo aumento no nível de ruído do arco durante processo.

O fenômeno detalhado acima pode também ser comprovado na figura 2.8. Observar que quando há mudança de estado, a curva se apresenta mais acentuada, indicando que a quantidade de energia disponível para aquecimento é maior com um menor aumento na temperatura do gás.

Neste gráfico pode ser também observado que tanto para o nitrogênio como para o hidrogênio há duas curvas acentuadas, indicando o fenômeno de dissociação e, em seguida, o de ionização, enquanto para o argônio e o hélio há somente a curva de ionização.

Por fim, observa-se também que para estes últimos a quantidade de energia a uma determinada temperatura é muito menor, quando comparado com o nitrogênio e o hidrogênio.

#### **2.4.4.3 QUALIDADE DOS GASES**

É de suma importância observar a qualidade dos gases utilizados no processo. Os níveis de oxigênio e umidade dos gases têm grande influência na vida útil dos componentes da pistola – bico e eletrodo – e, conseqüentemente, na qualidade da camada e no risco da operação. A tabela 2.2 mostra os níveis mínimos recomendados de concentração de gases de processo.

TABELA 2.2 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES DO PROCESSO PLASMA. ADAPTADO DE METCO<sup>[13]</sup>

GÁS	CONCENTRAÇÃO (%)	CONTAMINANTE	QUANTIDADE (PPM)
Argônio	99,998	---	---
		Oxigênio	<5
		Nitrogênio	<10
		Água	<5
		Cloro	<0,2
		Dióxido de Carbono	<0,2
Hidrogênio / Nitrogênio	99,998	---	---
		Oxigênio	<5
		Água	<5
Hélio	99,998	---	---

#### 2.4.4.4 OUTRAS PROPRIEDADES DOS GASES PLASMA

Além dos aspectos já abordados de capacidade de aquecimento, o gás plasma deve também apresentar densidade suficiente para acelerar as partículas de forma a produzir nestas altas energias de impacto, formando camadas densas e com níveis de oxidação aceitáveis.

Outro requisito fundamental do gás plasma é proteger o bocal e o eletrodo da pistola, e também as partículas do pó de adição contra as reações químicas indesejadas durante a viagem até o substrato. Somente de 5 a 10% do gás plasma

é efetivamente ionizado. Por natureza, o arco plasma é não-oxidante, além disto o uso do hidrogênio como gás secundário irá agir também como redutor de oxigênio, promovendo proteção adicional.

#### **2.4.4.5 GÁSES PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO**

Como gás primário normalmente é utilizado o argônio (Ar) ou nitrogênio ( $N_2$ ), e como gás secundário, o hidrogênio ( $H_2$ ) ou o hélio (He), dependendo da energia requerida no plasma e das propriedades da camada a ser aplicada. Estes gases requerem regulagens de pressão (PSI) e vazão (SCFH ou SLPM) em manômetros e fluxômetros no painel da unidade de controle principal.

Conforme já mencionado em 2.4.4, todos os parâmetros já foram extensivamente estudados e desenvolvidos e são especificados pelo fabricante do pó através de boletins técnicos devendo ser seguidos para que se obtenha camadas com a qualidade esperada uma vez que as vazões dos gases estão diretamente ligadas com a velocidade e tempo de permanência das partículas no plasma.

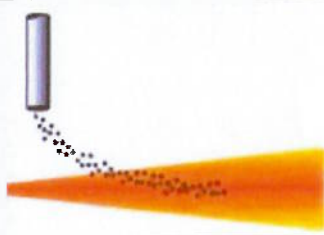
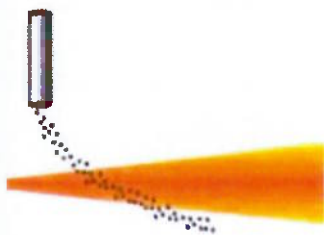
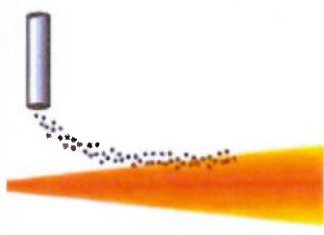
#### **2.4.5 GÁS CARREGADOR DE PÓ<sup>[2,12]</sup>**

Os alimentadores de pó dos sistemas plasma spray têm a finalidade de fornecer o pó de metalização até o bico injetor, montado na pistola. Para que o sistema trabalhe contínua e estabilizadamente, faz-se uso do gás carregador de pó. Porém, a precisa seleção de sua vazão é fundamental para que os resultados da



camada sejam os esperados. A tabela 2.3 ilustra as causas e efeitos da incorreta regulagem da vazão do gás carregador.

TABELA 2.3 – CAUSAS E EFEITOS DAS INJEÇÕES INCORRETAS DO PÓ. ADAPTADO DE BOMFORD<sup>[2]</sup>

REPRESENTAÇÃO	POSSÍVEL CAUSA	EFEITO
	Fluxo de gás correto	O pó é injetado no centro do arco plasma (zona de maior calor), as partículas são aquecidas apropriadamente e viajam a velocidade desejada. Camada com ótimos resultados.
	Fluxo de gás em excesso Bico injetor com diâmetro menor que o especificado Bico injetor incorretamente posicionado	O pó atravessa o arco sem ser completamente aquecido. Reduz a velocidade da partícula, prejudicando a adesão. Diminui a deposição de material sobre o substrato. Alto nível de porosidade na camada. Perda de (pó) e menor taxa de deposição.
	Fluxo de gás insuficiente Bloqueio ou vazamento na linha de alimentação de pó Bico injetor com diâmetro maior que o especificado Bico injetor incorretamente posicionado	O pó é injetado na zona mais fria do arco. Menores aquecimento e velocidade de aspersão das partículas. Excesso de porosidade e de partículas não fundidas na camada. Adesão pobre no substrato. Perda de material de adição (pó) e menores taxas de deposição.

Problemas com entupimento ou vazamento na linha (mangueira) de alimentação ou nos componentes do alimentador de pó podem causar variações no fluxo do gás carregador, e por este motivo checagens freqüentes destes sistemas devem ser executadas.

Assim como os demais parâmetros, cada especificação de material possui sua adequada vazão de gás carregador, desenvolvida pelo fabricante e encontrada nos respectivos boletins técnicos. Usa-se o mesmo gás primário (inerte) do plasma, e sua pressão (PSI) e vazão (SCFH ou SLMP) são regulados respectivamente no manômetro e no fluxômetro no painel do alimentador do pó.

#### **2.4.6 TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE PÓ<sup>[2,12]</sup>**

Os valores de taxa de alimentação de pó também são parâmetros desenvolvidos pelos fabricantes e devem ser seguidos para se obter os melhores resultados da camada uma vez que há relação direta entre volume de pó alimentado no arco plasma com o aquecimento e velocidade apropriados das partículas. Adicionalmente, baixas taxas de alimentação irão causar pulsos na linha de alimentação e conseqüentemente no arco plasma. Altas taxas de alimentação irão causar bloqueios na linha (mangueira) ou no bico injetor de pó, além de causar aquecimento excessivo do material base devido ao grande número de partículas aquecidas projetadas contra sua superfície.

Nos equipamentos mais antigos o pó é alimentado através de uma roldana dosadora com rebaxos no diâmetro, sendo a taxa de alimentação de pó regulada alterando a velocidade de rotação desta roldana. Vários avanços foram incorporados a estes equipamentos e hoje, com auxílio da eletrônica e utilizando um sistema pressurizado sem acessórios rotativos, basta selecionar no painel do

equipamento a vazão desejada. Os valores são expressos normalmente em g/min com opções em outras escalas, dependendo do fabricante do equipamento.

#### **2.4.7 BICO INJETOR DE PÓ<sup>[2]</sup>**

O bico injetor de pó é responsável por lançar o pó na posição ideal do plasma que deve ser específica para cada tipo de material a ser aplicado. Uma eventual falha na sua especificação ou mesmo no posicionamento na pistola acarretará os mesmos problemas já apresentados em 2.4.5.

Na maioria dos sistemas encontrados, os suportes onde os injetores são fixados na pistola possuem a angulação correta de instalação (em referência ao eixo do plasma) ou então o próprio injetor já incorpora este ângulo, ficando a cargo do operador posicionar e fixar corretamente.

Os fabricantes indicam nos boletins técnicos os bicos injetores ideais – com representação numeral - para cada material. A tabela 2.4 apresenta as especificações técnicas de alguns bicos injetores de pó disponíveis atualmente no mercado.

TABELA 2.4 – EXEMPLOS DE ESPECIFICAÇÕES DE BICOS INJETORES DE PÓ.  
ADAPTADO DE METCO<sup>[13]</sup>

INJETOR DE PÓ	ÂNGULO (graus)	DIÂMETRO (mm)	DIÂMETRO (pol.)
#1	110	1,59	0,063
#2	90	1,85	0,073
#3	83	2,08	0,082
#4	90	2,44	0,096
#5	83	1,51	0,060
#6	95	1,85	0,073

#### 2.4.8 DISTÂNCIA BICO/PEÇA<sup>[12]</sup>

Os efeitos da distância do bico para a superfície da peça podem ser novamente relacionados com o tempo de permanência das partículas do pó no arco plasma. Distâncias menores que as especificadas irão provocar, por exemplo, o superaquecimento do substrato. Distâncias maiores podem permitir a oxidação das partículas durante a viagem, resultando em camadas com adesão pobre.

Porém, conforme conclusão de PATSIAS<sup>[15]</sup>, pequenas reduções na distância bico/peça podem ser executadas com resultados positivos nas características de determinadas camadas, desde que comprovados por ensaios de laboratório. Mas o mesmo trabalho constatou o aumento na temperatura do substrato, que foi inclusive o limitador na redução da distância (máxima de 20%).

O peso da pistola e a pouca visão do operador contribuem para que a distância do bico para a peça varie durante a aplicação, situação eliminada com o uso de robôs no processo. É um parâmetro desenvolvido para cada tipo de pó, especificado em milímetros (mm) ou polegadas (inches).

#### **2.4.9 BICO E ELETRODO<sup>[2,7]</sup>**

Os eletrodos utilizados na pistola de plasma spray são do tipo tungstênio com thório com o corpo em cobre (para facilitar a refrigeração). São fornecidos com a face usinada nos ângulos ideais de trabalho - usualmente os eletrodos são especificados em função da pistola, não havendo opções. É um item importante para a abertura do arco e para a manutenção dos parâmetros de aplicação, pois com os desgastes algumas correções nos parâmetros de aplicação serão necessárias e a abertura de arco fica suscetível a falhas. Portanto, verificações constantes devem ser efetuadas quanto a desgaste ou trincas, sendo a sua refrigeração fundamental para a sua conservação.

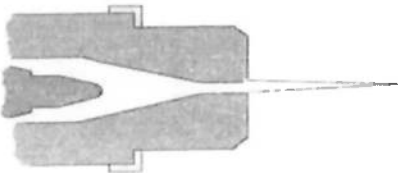
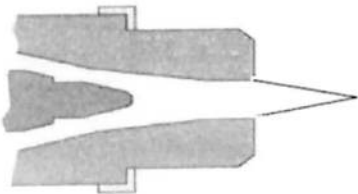
Os bicos para pistola plasma spray são em grande parte fabricados em ligas de cobre, embora alguns fabricantes produzam os bicos com um inserto de tungstênio o que melhora as condutividades elétrica e térmica além de garantir maior durabilidade ao componente.

Assim como nos eletrodos, os bicos sofrem desgaste durante o trabalho e devem receber inspeções periódicas, pois do contrário podem "romper" a parede causando curto circuito e vazamento do líquido refrigerante.

Assim como já discutido no item 2.4.4.5 – vazão dos gases primário e secundário – o diâmetro de saída do bico está diretamente ligado com a velocidade dos gases e, conseqüentemente, das partículas em aspersão e tempo de permanência no plasma. A tabela 2.5 ilustra as diferenças nos diâmetros de saída dos bicos disponíveis no mercado e seus possíveis efeitos na camada.

TABELA 2.5 – DIFERENÇAS NOS DIÂMETROS DOS BICOS E SEUS EFEITOS.

ADAPTADO DE BOMFORD<sup>[2]</sup> e METCO<sup>[13]</sup>

REPRESENTAÇÃO	DIÂMETRO (somente referência)	EFEITO
	4,75 mm	<p>Plasma mais estreito e de maior velocidade.</p> <p>Partículas permanecem menor tempo no plasma.</p> <p>Aplicado quando a velocidade da partícula é fator preponderante (função da composição do pó).</p>
	7,14 mm	<p>Plasma mais largo e de menor velocidade.</p> <p>Partículas permanecem maior tempo no plasma, absorvendo maior calor e maior energia cinética.</p> <p>Aplicado quando a transferência de calor ao pó é fator preponderante (função da composição do pó).</p>

### 2.4.10 ÂNGULO DE APLICAÇÃO<sup>[15]</sup>

O ângulo de aplicação em relação à face do substrato deve ser próximo de 90°, e nunca menor que 45°. Conforme evidenciado por PATSIAS<sup>[15]</sup>, a integridade de uma camada cerâmica aplicada por plasma spray é reduzida significativamente quando o ângulo de aplicação é alterado para 45°, em comparação com os resultados com ângulo de 90°.

Ainda conforme este autor a queda na qualidade do recobrimento pode ocorrer em função de maiores níveis de oxidação e porosidade (constatados em ensaios metalográficos) e da “desorganização” das partículas do pó aderidas no substrato (constatadas em análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)). Estes fatores podem ainda ocorrer de forma simultânea.

A figura 2.16 mostra a metalização de um eixo com ângulo de 90°.



Figura 2.16 – Metalização de eixo em ângulo de aplicação de 90°. Adaptado de WONDEREN<sup>[16]</sup>

## **2.4.11 PRÉ-AQUECIMENTO**

O pré-aquecimento é uma importante operação que tem a função de, entre outras finalidades, remover umidade da superfície do substrato e prevenir a formação de nova condensação, expandir o componente e contribuir nas micro-ligações metalúrgicas com o material de recobrimento, resultando em camadas com níveis superiores de adesão, prevenindo os destacamentos da camada<sup>[2,12]</sup>.

### **2.4.11.1 INTERAÇÃO PARTÍCULAS X SUBSTRATO**

Os efeitos da interação das partículas em aspersão com o substrato já foram estudados e assim como os benefícios do pré-aquecimento do metal base que são amplamente abordados em literatura. Conforme PATSIAS<sup>[15]</sup>, a melhor ancoragem do material aspergido na superfície do substrato se deve, principalmente, a dissipação de energia da gotícula de material semi-fundido ao colidir com a superfície do material base, resultando num recobrimento com menores níveis de tensão residual e em consequência, melhores valores de resistência a tração.

Já JIANG<sup>[19]</sup> estudou a morfologia das partículas de pó de molibdênio semi-fundidas ao colidirem com a superfície de substratos de barras de aço previamente preparadas, tanto na temperatura ambiente como também pré-aquecidos a 200°C. Os "splats", denominação dada às gotas após a colisão, foram analisados em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A figura 2.17 ilustra em "a" e "b" a morfologia das partículas formadas e em "c" e "d" os perfis em 3D das superfícies encontradas.



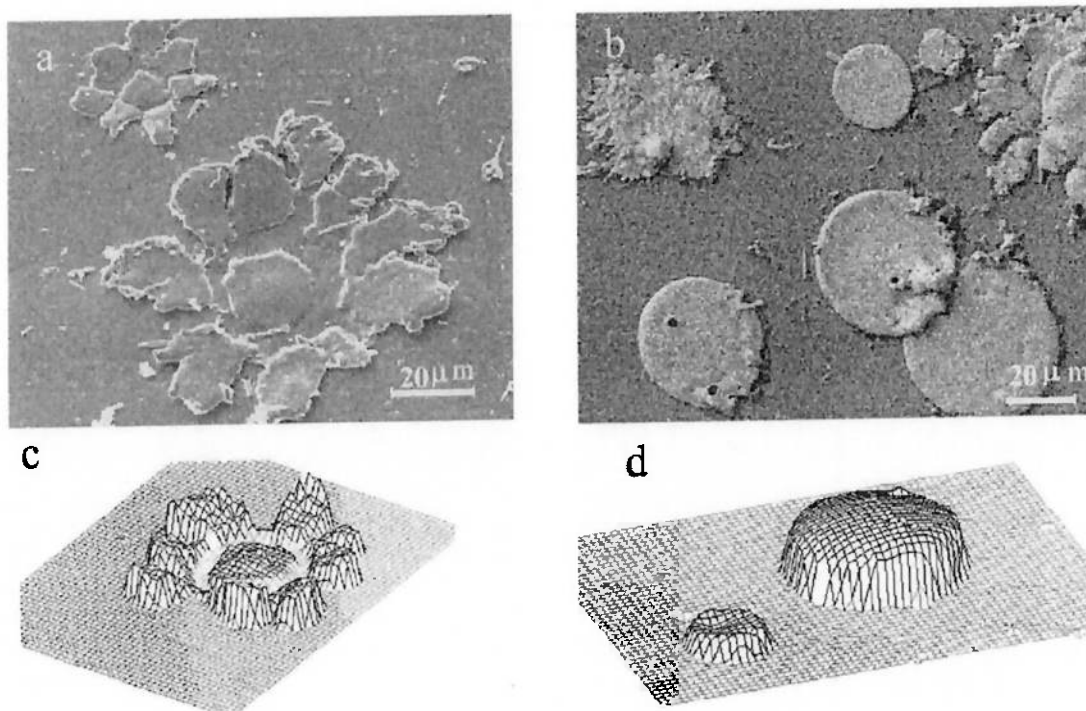


Figura 2.17 – Partículas de pó de molibdênio após colisão com o substrato – splats. "a" e "c (3D)" – temperatura ambiente, "b" e "d (3D)" – 200°C<sup>[19]</sup>

Conforme constatado por JIANG<sup>[19]</sup> na figura acima (a), os splats formados no substrato a temperatura ambiente apresentam formato irregular, com vários fragmentos que deveriam compor uma única forma geométrica. Já no substrato pré-aquecido a 200°C (c), observa-se uma mistura de splats fragmentados com outros em formato de disco, preservados. Outras amostras preparadas com pré-aquecimento de 400°C resultaram em morfologias de splats semelhantes, porém proporcionalmente com mais splats preservados. O mesmo trabalho comprovou que o tipo do material base também tem influência na formação dos splats.

Já MOSTAGHIMI<sup>[20]</sup> concluiu que a fragmentação dos splats é causada principalmente pelo rápido resfriamento da partícula semi-fundida quando toca o substrato a temperatura ambiente. O pré-aquecimento provoca uma diminuição na

velocidade de resfriamento resultando em splats preservados com formato de disco, sem fragmentos.

Os splats fragmentados acabam atuando como “respingos” (guardadas as devidas proporções) e não permitem a formação de uma estrutura organizada<sup>[15]</sup>, provocando um aumento o nível de porosidade e oxidação entre eles, mais uma vez resultando em camadas com menor adesão e com menor poder de dissipação de energia.

#### **2.4.11.2 TENSÕES RESIDUAIS**

Conforme evidenciado por JIANG<sup>[19]</sup>, a temperatura do substrato tem grande influência no nível de tensão residual da camada. Tanto que as tensões residuais de tração (que ocorrem a temperatura ambiente) mudam para tensão de compressão conforme a temperatura do substrato aumenta, fenômeno explicado pelas diferentes proporções de resfriamento (tensão de tração) e tensão térmica, desde que o coeficiente de expansão térmica do molibdênio seja menor que o do substrato (como no caso estudado, tensão de compressão). Este autor mostra em seu trabalho que com o aumento na temperatura do metal base, a tensão térmica durante o resfriamento é maior resultando em uma tensão de compressão que vem a ser bastante benéfica para a resistência a tração da camada metalizada.

### 2.4.11.3 MÉTODOS E CUIDADOS NO PRÉ-AQUECIMENTO

Várias são as formas possíveis de se efetuar o pré-aquecimento: em forno, com lâmpada infravermelha ou usando um maçarico - mas aqui deve-se ter um cuidado: a chama ou arco não deve ser aplicada diretamente na área a ser metalizada, para que se evite contaminação ou oxidação. Porém, a forma mais prática e usual de efetuar o pré-aquecimento é utilizando a própria tocha de metalização, sem o acionamento do alimentador de pó.

Certos materiais como titânio e alumínio são muito suscetíveis a oxidação superficial e por isso, cuidados adicionais devem ser tomados<sup>[2,12]</sup>. O magnésio por exemplo nunca deve ser pré-aquecido.

As temperaturas ideais de pré-aquecimento são aquelas que a peça irá atingir durante a metalização, porém a faixa entre 90°C e 150°C pode ser utilizada como ponto referencial. Por todas as razões já descritas anteriormente, o pré-aquecimento também deve ser executado entre os ciclos de operação (paradas), até o término do processo.

O instrumento mais comumente utilizado no processo plasma spray como meio de controle e monitoramento da temperatura é o termômetro digital com mira a laser, que executa a leitura aproximando-o da área desejada. Podem ser utilizados também termopares de contato, porém estes podem provocar contaminação na superfície de trabalho, e devem ser evitados.

## 2.4.12 TEMPERATURA DE PROCESSO

Outra variável fundamental do processo a ser controlada é a temperatura do substrato, com a finalidade de evitar empenamentos, oxidação da camada metalizada ou do substrato ou ainda possíveis alterações de estrutura do metal base. Conforme FIORETTI<sup>[1]</sup>, esta temperatura não deve exceder 120°C. Já BOMFORD<sup>[2]</sup> cita como temperatura máxima 170°C. A condição ideal para otimizar o processo é manter a temperatura entre 40°C e 120°C, pois isso evita paradas para resfriamento da peça, preserva o mascaramento e minimiza também os riscos de ocorrência de trincas nas camadas devido aos ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento.

Para medição da temperatura podem ser utilizados termopares de contato, porém o método ideal e muito comum na aspersão térmica é a utilização de termômetro digital com mira a laser, onde a medição é feita a distância e por isso evita possíveis contaminações à camada, conforme já mencionado em 2.4.11.3.

Os meios comuns utilizados para controle da temperatura da peça durante o processo são jatos de ar comprimido montados na pistola, direcionados ao substrato, ou resfriadores externos, conforme ilustrado nas figuras 2.18 e 2.19 respectivamente. Alternativamente ao ar comprimido, que deve ser limpo e seco, em aplicações onde o aporte térmico é muito alto ou a geometria da peça não favorece o resfriamento, podem ser usados CO<sub>2</sub> ou vapor de nitrogênio líquido<sup>[2,17]</sup>. A figura 2.20 exemplifica o uso de resfriadores de vapor de nitrogênio líquido.

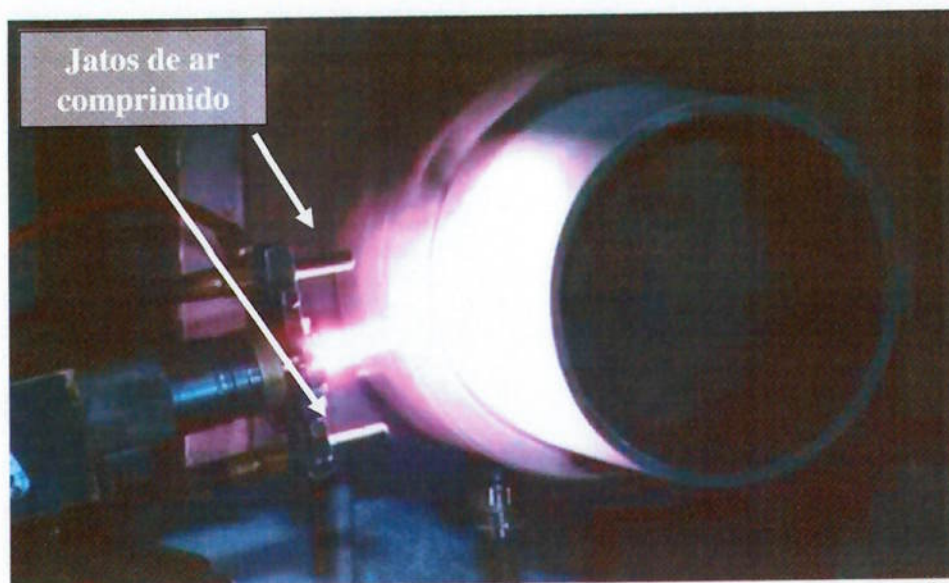


Figura 2.18 – Jatos de ar montados na pistola. Adaptado de ENGLAND<sup>[18]</sup>

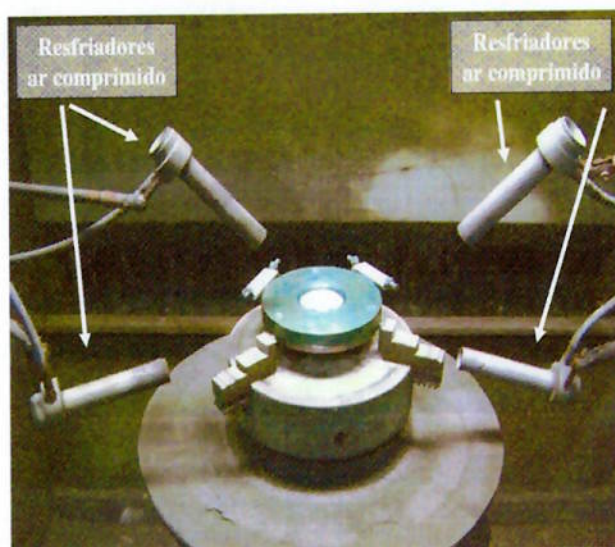


Figura 2.19 – Sopradores de ar externos



Figura 2.20 – Resfriador de vapor de nitrogênio líquido. Adaptado de SPRAYTIME<sup>[17]</sup>

### **2.4.13 VELOCIDADE ROTACIONAL E TRANSVERSAL**

A velocidade rotacional é especificada quando a aspersão ocorre em peças cilíndricas ou peças planas posicionadas em mesa rotativa, possibilitando a aplicação de revestimentos em diâmetros e faces. Esta variável deve ser determinada em função da dimensão da área a ser trabalhada, tendo como objetivo principal reduzir o superaquecimento do substrato<sup>[2]</sup>.

A variável velocidade transversal tem a mesma finalidade descrita acima, porém neste caso está diretamente relacionada com o deslocamento da pistola sobre a área a ser metalizada. Normalmente especificada em m/min, é difícil de ser seguida nas operações manuais, mas perfeitamente adequada para o uso automatizado.

A combinação destas duas variáveis permite que seja determinada a deposição por passe do processo. Este valor depende de fatores como materiais e especificação utilizada, mas em média é de 0,0005" para a maioria dos pós, exceto para os chamados "abradáveis", onde normalmente se usa de 0,002" a 0,003".

### **2.4.14 REFRIGERAÇÃO DA PISTOLA**

O equipamento de plasma spray trabalha com altas potências e conseqüentemente gera grande aquecimento em seus componentes, sendo o mais crítico a pistola de metalização. Conforme já visto em 2.4.9, o eletrodo de tungstênio e o bico da pistola devem ser constantemente refrigerados com água

desmineralizada com pressão, vazão e temperatura adequados. Caso contrário, graves danos à pistola e até mesmo a peça sendo trabalhada podem ocorrer, inclusive com risco de acidentes pessoais caso a operação não seja robotizada.

É fundamental manter a qualidade da água dentro das especificações de condutividade e nível de pH para que a vida útil dos seus componentes seja maximizada. Conforme manuais de pistolas disponíveis no mercado, a condutividade deve ser menor que 5µS/cm, e o pH de 6,6<sup>[13,14]</sup>.

O sistema mais comumente encontrado é formado por uma bomba de água em conjunto com um chiller / unidade de refrigeração ou trocador de calor, em circuito fechado. A tabela 2.6 ilustra algumas especificações para os sistemas de refrigeração de pistolas disponíveis no mercado.

Tabela 2.6 – REQUERIMENTOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO<sup>[8,13,14]</sup>

MODELO PISTOLA	ÁGUA TEMPERATURA (°C)	ÁGUA PRESSÃO (bar)	ÁGUA FLUXO (l/min)
Metco F4	20	13,5	10-14
Metco 3MB	18	9	15-23
Metco TriplexPro	18	13,8-17	18 (mínimo)

## **2.5 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE**

Como variável que antecede o processo de metalização por plasma spray, a preparação da superfície compreende um conjunto de tarefas fundamentais para o sucesso da aplicação e para a que o revestimento tenha o desempenho desejado.

### **2.5.1 LIMPEZA E DESCONTAMINAÇÃO<sup>[2,6,12]</sup>**

Uma cuidadosa e completa limpeza deve ser efetuada na peça antes de ser enviada a célula de metalização. Graxa, óleo, tinta, resíduos de adesivos, umidade ou qualquer outro tipo de contaminante devem ser removidos. Caso a área a ser metalizada já tenha sido metalizada em ocasiões anteriores, deve ser efetuada a completa remoção desta camada, seja por jateamento, usinagem ou decapagem. Qualquer tipo de resíduo irá comprometer seriamente a adesão da nova camada.

O desengraxe a quente em vapor é um dos métodos mais eficientes para remoção de contaminantes orgânicos<sup>[6]</sup>. Os solventes clorados são os que proporcionam os melhores resultados, porém são ambientalmente não recomendados e estão gradativamente sendo substituídos por solventes comuns ou detergentes. Um cuidadoso enxágüe também deve ser feito, seguido por secagem em água quente (85°C) e jato de ar comprimido limpo e seco.

Já na célula de metalização, imediatamente antes de processar a peça, o operador deve executar nova limpeza focando a área a ser reparada, utilizando preferencialmente acetona com um pano limpo descartável. A partir deste



momento a peça deve ser protegida e, inclusive, ser manipulada corretamente para preservar a limpeza.

## 2.5.2 MASCARAMENTO

O mascaramento é aplicado nas áreas adjacentes às que serão metalizadas para prevenir a aderência ou contaminação com o material aspergido. Atenção especial deve ser dada a faces e diâmetros usinados, galerias e prisioneiros. Podem ser utilizadas fitas (com reforço, específicas para o processo plasma spray), mascaramentos metálicos, borracha, tinta antiaderente ou ainda mascaramentos pré-moldados. Importante observar que qualquer meio utilizado deve ser capaz de resistir à agressão do jateamento abrasivo e também ao calor do arco plasma. As figuras 2.21 e 2.22 mostram alguns exemplos de mascaramentos aplicados em uma mesma peça, em preparação para o jateamento e metalização respectivamente.

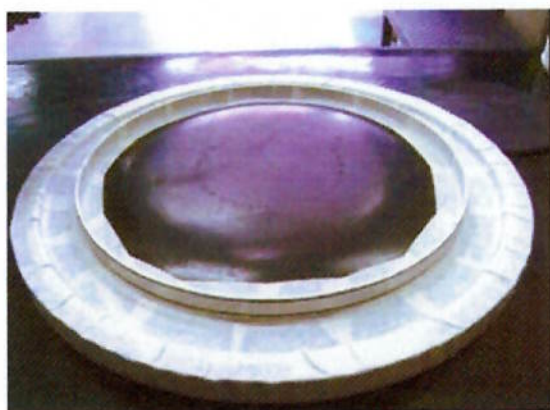


Figura 2.21 – Peça mascarada com fita e com borracha (no centro)



Figura 2.22 – Peça mascarada com fita e com tinta antiaderente (preta)

### **2.5.3 JATEAMENTO ABRASIVO**

O jateamento abrasivo tem a finalidade de provocar rugosidades na superfície do substrato para promover uma boa ancoragem do material aspergido, e alguns detalhes e características técnicas devem ser abordados. Outras técnicas, como por exemplo uma usinagem rústica, podem ser utilizadas, porém o jateamento é considerado o mais eficiente e deve ser preferencialmente escolhido.

#### **2.5.3.1 MECANISMO DE ADESÃO**

O processo plasma spray, assim como a maioria dos processos de aspersão térmica, tem como um dos maiores benefícios a não alteração da estrutura metalúrgica do substrato, consequência da baixa temperatura atingida durante processo, na faixa entre 120°C a 150°C máximo. Em consequência, a coesão entre as partículas e o substrato não garante ótima resistência a tração como encontrado nas operações de soldagem. Portanto, a princípio, camadas metalizadas por plasma spray não devem ser solicitadas por tração.

A interação entre as partículas semi-fundidas e o substrato já foi estudada em 2.4.11.1. Já o mecanismo de ancoragem entre a camada metalizada e a superfície do substrato ainda é muito discutido e tem várias influências, como: limpeza da superfície, área da peça a ser revestida, rugosidade superficial do substrato, energia térmica e velocidade das partículas, taxa de resfriamento e propriedades e reações físicas e químicas<sup>[21]</sup>.

O mecanismo de adesão da aspersão térmica por plasma spray é basicamente mecânico, onde as partículas aspergidas são ancoradas na superfície previamente preparada tomando a forma entre os picos e vales provocados pelo jateamento. A geração de uma superfície rugosa tem a finalidade de aumentar a aderência e a coesão entre as partículas do revestimento<sup>[6]</sup>. A figura 2.23 ilustra a representação esquemática do mecanismo de adesão e mostra também que, para alguns materiais de aspersão, como Níquel/Alumínio, pode ocorrer interação química com o substrato (etapa nº6)<sup>[12]</sup>. As seguintes etapas da formação da camada e do mecanismo de adesão são mostradas na figura:

1. Partículas semi-fundidas em “voo” em direção ao substrato;
2. Impacto com a superfície;
3. Transferência de calor para o metal base;
4. Novas gotas se sobrepõem, há o resfriamento e contração do material de revestimento na superfície do substrato;
5. Ancoragem mecânica nos “picos” e “vales” provocados pelo jateamento;
6. Micro-fusões localizadas (para materiais específicos, como Ni/Al).

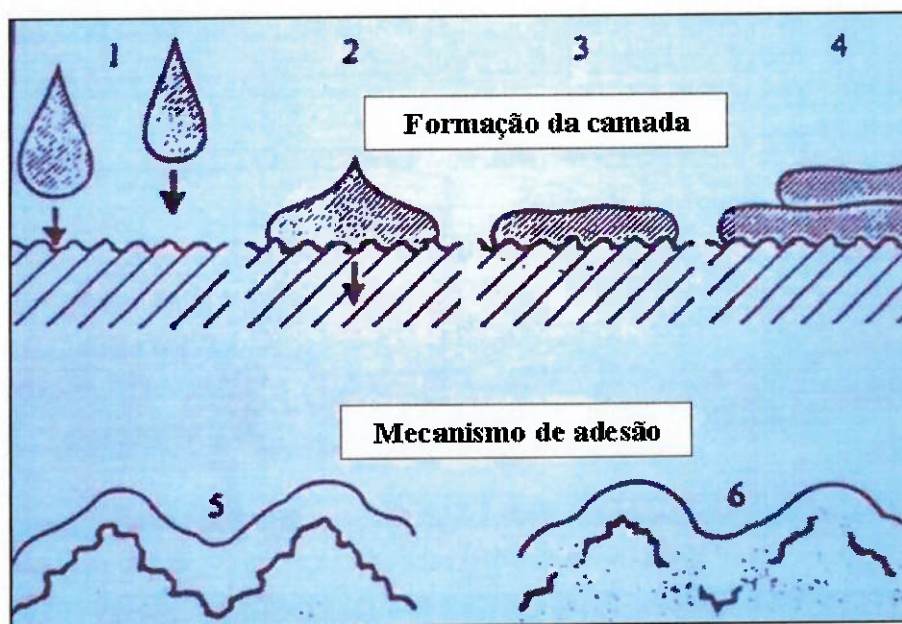


Figura 2.23 – Mecanismo de adesão e formação da camada. Adaptado de RR<sup>[12]</sup>

Outros dois fatores podem contribuir no entendimento dos mecanismos de adesão<sup>[2,21]</sup>, somados ao fator ancoragem mecânica, que são:

- Adesão por difusão, que pode ocorrer quando um material é aspergido sobre um substrato de mesma composição química;
- Adesão física por dispersão de forças, quando dois materiais em forte contato físico desenvolvem atração mútua devido às forças de Van der Waals.

O molibdênio e outros materiais refratários que possuem alto ponto de fusão requerem que as partículas permaneçam por tempo maior no arco plasma e propiciam um ciclo maior de resfriamento, melhorando a interação entre o metal base e as partículas aspergidas<sup>[21]</sup>. Este fenômeno também foi mostrado no trabalho de MATEJICEK<sup>[22]</sup> onde pó de molibdênio foi aplicado sobre um substrato de aço carbono. Análises efetuadas em Microscópio Eletrônico de Transmissão

(MET) na interface indicaram, conforme mostrado na figura 2.24, a presença de molibdênio misturado com ferro na zona fundida e também a formação de uma fase intermetálica, sendo responsáveis por promover uma melhora na adesão deste tipo de camada.

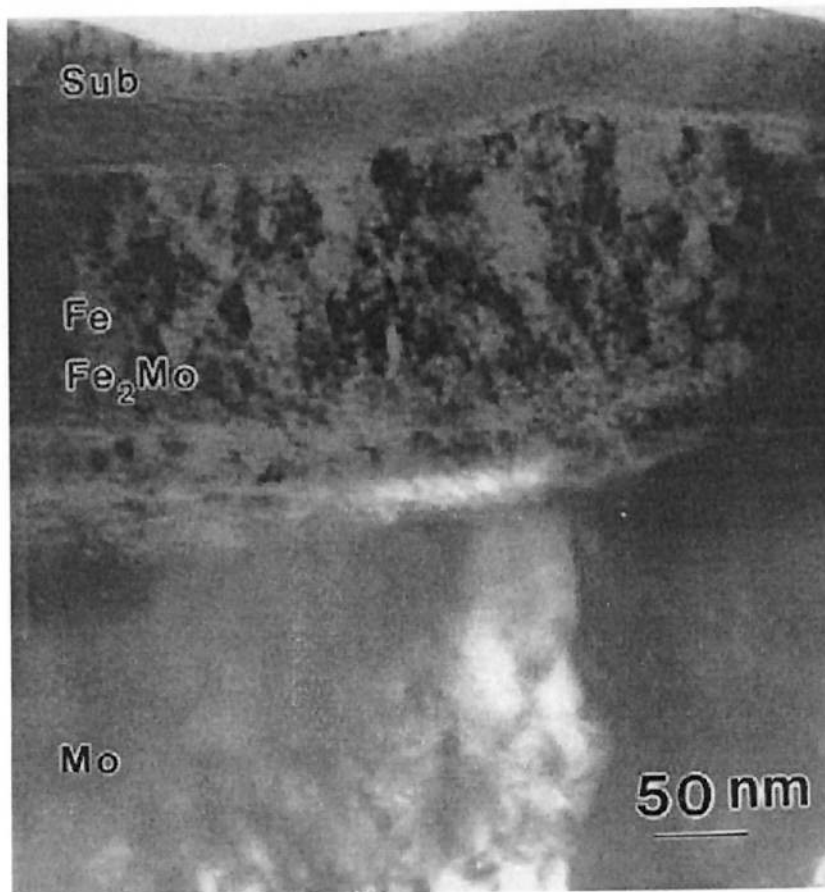


Figura 2.24 – Imagem da interface substrato / camada de molibdênio, obtida com microscopia eletrônica de transmissão<sup>[22]</sup>

### 2.5.3.2 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade da superfície a ser metalizada é obtida pela ação do material utilizado no jateamento, que promove o arrancamento do material na face do substrato. A eficiência do jateamento e conseqüente obtenção da rugosidade ideal

dependem primeiramente do tipo e tamanho da granalha de jateamento, mas outros fatores também devem ser considerados, como<sup>[2,6]</sup>:

- Dureza do metal base;
- Rugosidade requerida;
- Pressão de ar comprimido;
- Tipo de equipamento de jateamento;
- Ângulo e distância do bico para a peça.

A figura 2.25 ilustra a representação de uma superfície jateada, com seus respectivos picos e vales.

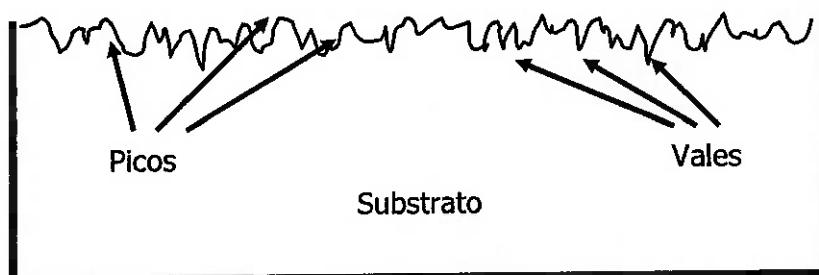


Figura 2.25 – Rugosidade provocada pela ação do jateamento

A inspeção quanto a eficiência do jateamento pode ser feita observando-se cuidadosamente a área afeta. Deve ser checado se a superfície está uniforme em cor (normalmente um cinza metálico) e aparência<sup>[6]</sup>, e livre de áreas brilhantes (o que evidencia que a cobertura do jateamento não foi eficiente), tarefa esta que é executada com facilidade por operadores experientes. Porém, a medição da rugosidade superficial usando um rugosímetro é a forma tecnicamente recomendada de garantir que a área jateada está em perfeitas condições de

receber o revestimento<sup>[2]</sup>, e deve ser executada pelo menos 1 vez a cada turno de trabalho. Valores de rugosidade superficial típicos das granas mais utilizadas no processo plasma spray podem ser encontrados na tabela 2.7.

TABELA 2.7 – RUGOSIDADE SUPERFICIAL TÍPICA EM FUNÇÃO DA GRANA DE JATEAMENTO. ADAPTADO DE RR<sup>[12]</sup>

TAMANHO GRANA (mesh)	Ra MÍNIMO (média entre picos e vales)
20	530 µinches
60	180 µinches

### 2.5.3.3 ABRASIVO DE JATEAMENTO

O abrasivo de jateamento é responsável pela criação das rugosidades na superfície do substrato e sua escolha deve ser feita primeiramente em função da dureza do material base<sup>[2,6]</sup>. Os mais comuns encontrados são a Alumina, Óxido de Alumínio (Alumina) com 3% de Óxido de Titânio (Titânia) – comumente conhecido como Óxido de Alumínio - e Carbetto de Silício. Por uma série de vantagens, incluindo qualidade e econômica, o mais utilizado em plasma spray, principalmente nas áreas aeronáutica e medicinal, é o Óxido de Alumínio, nas granas Mesh 16 a 24 ou Mesh 60.

As principais qualidades das granalhas de Óxido de Alumínio são:

- Possuem cantos vivos, proporcionando bom arrancamento do material e criação dos picos e vales;

- Quando em uso, quebram-se em outras partes menores, que também possuem cantos vivos;
- Tem bom valor de dureza e não se degradam com facilidade;
- Baixo custo de aquisição.

A escolha da grana a ser utilizada, em linhas gerais, é feita em função da espessura do material base. As granas Mesh 16 a 24 são utilizadas na maioria dos materiais, enquanto a Mesh 60 é utilizada principalmente em materiais de pequena espessura (para evitar empenamentos) ou materiais com grande tendência a reter as granalhas de jateamento, como o titânio<sup>[2]</sup>.

Como já visto em 2.5.3.2, o teste de rugosidade da superfície irá determinar o momento da troca do abrasivo de jateamento. Este é um cuidado importante, pois com o constante uso a granalha se deteriora e passa a apresentar cantos arredondados e deixa de produzir os picos e vales para ancoragem da camada.

#### **2.5.3.4 EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS DE JATEAMENTO**

O procedimento ou técnica de jateamento de uma superfície em preparação ao processo plasma spray é influenciado por vários fatores, entre eles o tipo do equipamento e seus acessórios, o tipo e tamanho da granalha e a espessura da peça. A tabela 2.8 ilustra algumas particularidades e especificações<sup>[2,6,12]</sup>.



TABELA 2.8 – PARTICULARIDADES DOS EQUIPAMENTOS DE JATEAMENTO

TIPO DE EQUIPAMENTO	FUNCIONAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>SUCÇÃO</b>	Por arraste ou sucção das granalhas	Custo de aquisição e manutenção baixos	Menor eficiência, demanda maior tempo de jateamento
	Pressão de ar (limpo e seco): 60 a 80 psi	Menos agressivo, ideal para peças de espessura fina	Menor distância bico/peça
	Distância bico/peça: 100 a 120mm	N/A	Difícil regulagem, provoca interrupções no fornecimento das granalhas
<b>PRESSÃO</b>	Pressão proporcionada pelo uso de um vaso de pressão anexo ao equipamento principal	Menor tempo de processo devido à força do jato e quantidade de granalhas fornecidas	Equipamento caro
	Pressão de ar (limpo e seco): 40 a 50 psi	Ideal para peças grandes e de grande espessura	Requer 50% mais volume de ar comprimido
	Distância bico/peça: 200 a 300mm	Distância bico/peça duas vezes maior	Requer volume 10 vezes maior de granalha em processo
	N/A	Garante alimentação contínua das granalhas	Menor vida útil do bico da pistola

O bico da pistola de jateamento, normalmente fabricado em carbetto de tungstênio, é um item que merece atenção periódica quanto a desgaste, pois bicos danificados requerem maior quantidade de ar comprimido para manter a mesma pressão, diminuindo a produtividade e encarecendo o processo.

Como técnica comum aos dois equipamentos (sucção e pressão), o ângulo da pistola de jateamento deve ser de 70° a 80° em relação ao plano, para evitar o

efeito do retorno das granalhas. Esta inclinação deve ser feita para ambos os lados, ou seja, o jateamento deve ser feito em pelo menos duas direções do plano da peça.

Finalmente, um detalhe importante deve ser observado: deve-se evitar o sobre-jateamento, pois irá arredondar os cantos vivos (picos) já criados e prejudicará a adesão da camada, além de aumentar as chances de incrustação das pontas das granalhas no metal base (estes são observados nas análises metalográficas e são motivos de rejeição da camada metalizada).

#### **2.5.4 CUIDADOS PÓS-JATEAMENTO**

Para a finalização da preparação da superfície, alguns cuidados são mandatórios e fundamentais para que a metalização tenha o resultado desejado:

- Após a operação de jateamento, a peça deve ser cuidadosamente limpa com jato de ar comprimido limpo e seco para remoção de resíduos e incrustações do óxido de jateamento;
- Se necessário, caso o jateamento tenha danificado o material de mascaramento, este deverá ser trocado em preparação à metalização;
- Muita atenção com o manuseio da peça. É terminantemente proibido tocar as áreas jateadas com as mãos, pois a oleosidade da pele pode contaminar as superfícies e prejudicar aderência da camada;

- Como as superfícies jateadas estão ainda mais sujeitas a oxidação, a metalização deve acontecer num período máximo de 2 horas após o jateamento, do contrário as áreas deverão ser jateadas novamente. Cuidados ainda maiores devem ser tomados quando se trabalha com peças de materiais altamente reativos como magnésio ou titânio, onde o processo de oxidação é iniciado assim que o jateamento é finalizado.

## **2.6 MATERIAIS DE BASE**

A aspersão térmica pelo processo plasma spray pode ser aplicada em praticamente todos os materiais metálicos disponíveis, sem restrições. Uma abordagem mais restrita será efetuada sobre os materiais utilizados na construção de motores aeronáuticos, um dos objetivos deste estudo.

### **2.6.1 MOTORES A REAÇÃO**

Na aviação são utilizados basicamente, quanto a sua construção, dois tipos de motores: à explosão e à reação. Nos motores a explosão, o processo de funcionamento é similar a um motor de automóvel, com quatro tempos distintos, a saber: admissão (da mistura ar/combustível), compressão, explosão (combustão) e exaustão. No motor à reação, as mesmas quatro fases ocorrem simultaneamente, sem sofrer interrupção, em cada módulo do motor: Entrada de Ar, Compressor, Câmara de Combustão, Turbina e Exaustão<sup>[24]</sup>. A figura 2.26 ilustra a posição de cada módulo no motor (algumas partes acessórias como caixa de engrenagens com bomba de combustível, não são mostradas).

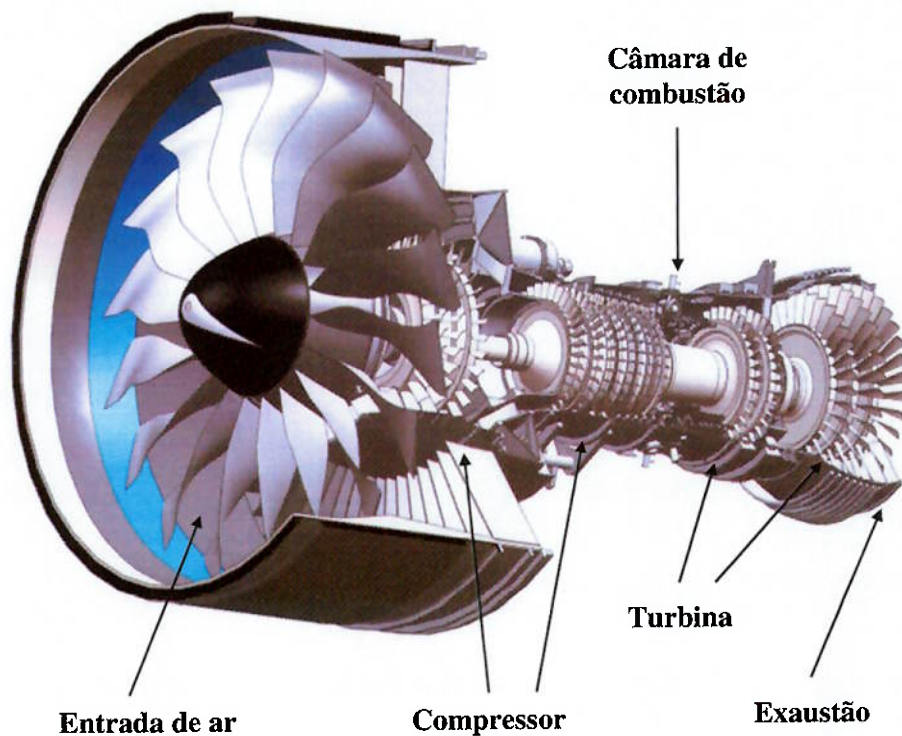


Figura 2.26 – Principais módulos de um motor à reação. Adaptado de EBLINGER<sup>[25]</sup>

Os motores à reação, devido à tecnologia, complexidade e materiais empregados, têm um custo de aquisição, operação e manutenção muito maiores que os a explosão. Em contrapartida, a confiabilidade e o desempenho são muito superiores, graças às altas temperaturas internas durante trabalho. Para se ter uma idéia do grau de influência, o aumento da temperatura na turbina de 927°C (valor típico) para 1.370°C poderia resultar em um aumento de empuxo de aproximadamente 130%, com grande economia de combustível. Daí a importância do uso e desenvolvimento de novos materiais e revestimentos que suportem temperaturas cada vez mais altas<sup>[26]</sup>.

## 2.6.2 MATERIAIS DE BASE - MÓDULOS

O tipo de material aplicado na fabricação de um motor aeronáutico à reação depende do módulo em que será aplicado, o que tem relação direta com o regime de temperatura, solicitação mecânica e agressividade do meio durante a operação. A figura 2.27 ilustra os principais materiais / ligas aplicadas em cada módulo do motor.

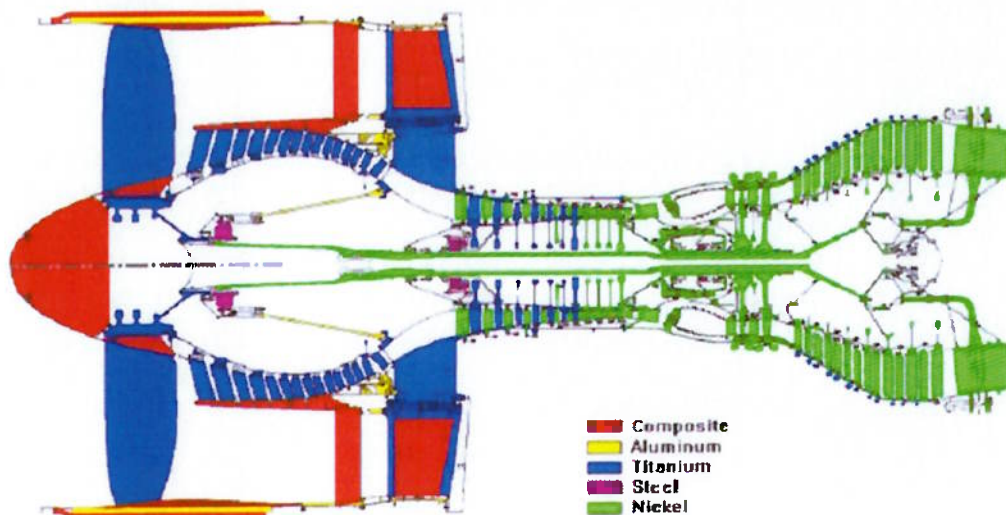


Figura 2.27 – Materiais aplicados em cada módulo do motor<sup>[26]</sup>

Em linhas gerais, podem-se citar os principais componentes<sup>[23,26]</sup>:

### 1. ENTRADA DE AR

- a) Palhetas do Fan: Fabricadas em materiais de baixo peso como compostos ou titânio. O titânio em combinação com outros elementos (alumínio, por exemplo) possui elevada resistência mecânica. Para trabalhos em regiões “frias” do motor;

- b) Carcaça do Fan: Normalmente fabricada em alumínio com revestimento externo de compósito.

## 2. COMPRESSOR

- a) Discos e palhetas: Normalmente fabricados em titânio, devido ao baixo peso e boa resistência mecânica;
- b) Estatores e Eixos: Fabricados em aços ligados com alto teor de Níquel ou Cromo, com alta resistência mecânica.

## 3. COMBUSTÃO

- a) Câmara de combustão: Requer a utilização de ligas de níquel com algum tipo de revestimento (normalmente barreiras térmicas), para suportar as altas temperaturas.

## 4. TURBINA

- a) Discos e espaçadores: Fabricados com ligas de níquel, alta resistência a temperatura, à fluência e ao escoamento;
- b) Palhetas e estatores: Fabricados em ligas de cobalto, possuem elevada resistência mecânica, a temperatura, a fluência e a corrosão. Ambiente muito agressivo devido a presença de enxofre do combustível. Sempre devem receber algum tipo de revestimento para suportar o regime de trabalho.

## 5. EXAUSTÃO

- a) Cone de exaustão: Fabricado em liga de níquel, localizado onde as temperaturas já não são tão agressivas, componente estático, não sofre fluência;
- b) Misturador: Fabricado em liga de titânio ou liga de níquel.

### **2.6.3 MATERIAIS DE BASE – ENGRENAGENS**

Material de interesse deste trabalho, grande parte das engrenagens, eixos-engrenagens e pinhões, bem como rolamentos utilizados em motores aeronáuticos, são fabricados de material AISI 9310<sup>[27]</sup> conforme a norma ASTM A534, caracterizado por ser um aço temperável e que atinge alta dureza após a cementação<sup>[28]</sup>. Com composição níquel-cromo-molibdênio e endurecíveis a uma determinada espessura abaixo da superfície, possuem o núcleo com menor dureza, tornando-o um material com excelente resistência ao impacto.

Apesar destas excelentes características, há históricos na indústria aeronáutica de falhas de engrenagens após determinado tempo em serviço, provocadas por vibração, possivelmente por terem espessura de parede menor que o necessário (erro de projeto). A forma comum encontrada para corrigir este problema foi a aplicação de uma camada de alumina/magnésia ou molibdênio em uma face ou ambas as faces das engrenagens, sendo que estas camadas são capazes de absorver a vibração e atenuá-las, através da abertura e fechamento das microfissuras internas<sup>[2,15]</sup>.

Este trabalho tem o objetivo de reproduzir em corpos de provas a aplicação da camada de molibdênio e efetuar as análises de dureza e metalográficas. Portanto, os corpos de provas devem ser de material com as mesmas características da peça. Pela indisponibilidade do material AISI 9310, foi utilizado um material que atende a mesma norma, tem a mesma finalidade, o SAE 8620. Segue na tabela 2.9 a composição química de ambos.

TABELA 2.9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO SAE 8620 E AISI 9310<sup>[28]</sup>

NORMA	ESPECIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
ASTM A 534	SAE 8620	0,12 0,23	0,15 0,35	0,70 0,90	< 0,035	< 0,040	0,40 0,70	0,40 0,60	0,15 0,25
	AISI 9310	0,08 0,13	0,15 0,35	0,45 0,65	< 0,035	< 0,040	3,00 3,50	1,00 1,40	0,08 0,15

## 2.6.4 MATERIAIS DE BASE – DESENVOLVIMENTOS

Para que os motores possam ser ainda mais eficientes gastando menos combustível e conseqüentemente com operação mais barata, maiores temperaturas de trabalho são requeridas. Esta necessidade é o que motiva o desenvolvimento de novos materiais com excelentes características mecânicas e também novas camadas ou recobrimentos que possam proteger o material base dos efeitos da temperatura e da corrosão e ainda melhorar o seu desempenho.



## **2.7 MATERIAIS DE ASPERSÃO**

Os pós utilizados no processo plasma spray possuem variadas especificações conforme a finalidade da camada. Para facilitar o entendimento, serão exemplificados os tipos de camadas dentro da finalidade principal: camadas de adesão (bond coat) e camadas de trabalho (top coat).

### **2.7.1 CAMADAS DE ADESÃO (BOND COAT)**

A aplicação de camadas de adesão intermediárias em sistemas com múltiplas camadas têm sido utilizada com muito sucesso por mais de 50 anos. São camadas metálicas que atuam como “almofada” ou “amantegamento” do material base para recebimento da camada de trabalho (top coat), e se caracterizam por<sup>[2]</sup>:

- São utilizados materiais com características de auto-adesão com o metal base devido às reações exotérmicas, conforme mencionado em 2.5.3.1, provendo bons resultados de aderência. Camadas cerâmicas, por exemplo, não interagem adequadamente com o substrato resultando em adesões pobres, situação contornável com o uso do bond coat;
- A aplicação de uma camada metálica com coeficiente de expansão intermediário entre o substrato e o top coat irá compensar os efeitos das dilatações e contrações que ocorrem nas altas temperaturas, contribuindo novamente com a adesão e desempenho da camada;

- A camada de bond coat age como uma excelente barreira contra os efeitos da oxidação da interface a altas temperaturas, que causam problemas de adesão e até soltura da camada de metalização;
- Os materiais mais utilizados são o NiAl e o NiCrAl, aplicados com 0,002" a 0,007" (0,05mm a 0,18mm) de espessura de camada.

A figura 2.28 ilustra um sistema bond coat NiAl / top coat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aplicados por plasma spray, com ampliação de 50 vezes.

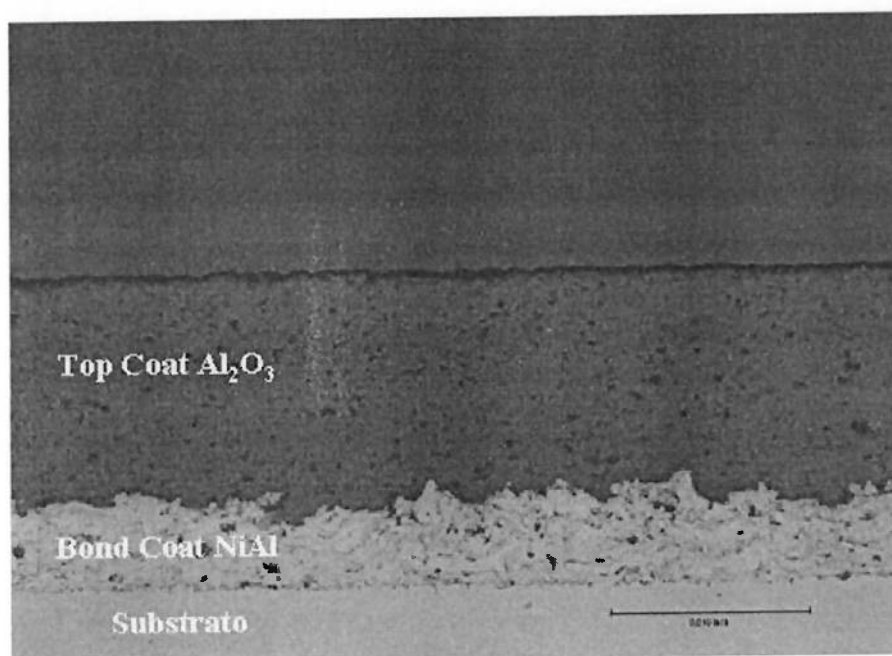


Figura 2.28 – Sistema bond coat NiAl / top coat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Imagem do autor)

## **2.7.2 CAMADAS DE TRABALHO – TOP COAT**

Na indústria aeronáutica a aspersão térmica tem como finalidade primária o controle e ajuste de folgas (rotativo x estático), restauração dimensional (peças em contato durante serviço), aplicação de camadas duras (desgaste ou atrito) e barreiras térmicas<sup>[23]</sup>. Para cada uma destas necessidades há materiais com características específicas, como será exposto a seguir.

### **2.7.2.1 CAMADAS ABRADÁVEIS**

Uma outra forma de melhorar o desempenho de um motor aeronáutico é diminuindo as folgas nas áreas onde há a necessidade de vedação de ar. Esta é a principal finalidade de uma camada abrasível, aplicadas amplamente em carcaças estáticas para fazer a vedação com o conjunto rotativo – as pontas das palhetas<sup>[12]</sup>.

Uma das características destas camadas é ter dureza inferior à peça que irá eventualmente entrar em atrito durante operação (o processo que provoca as vedações), se desgastando e preservando o componente. São camadas que apresentam fases não-metálicas, que devem estar apropriadamente distribuídas entre as fases metálicas e a porosidade<sup>[2,12,23]</sup>.

As camadas abrasíveis são sistemas multilayer - (aplicadas sobre bond coat) com espessuras máximas entre 0,100" a 0,120" (2,5mm a 3,0mm), e os pós comumente utilizados são: Níquel Grafite, AISi Poliéster, NiCrAl Bentonita, Alumínio

Grafite, MCrAlY, YSZ (Yttria Zircônia estabilizada) e Nitreto de Boro / Silício / Alumínio com polímero.

A figura 2.29 mostra uma camada típica de alumínio grafite sobre bond coat de níquel alumínio aplicados por plasma spray, ampliado em 200 vezes.

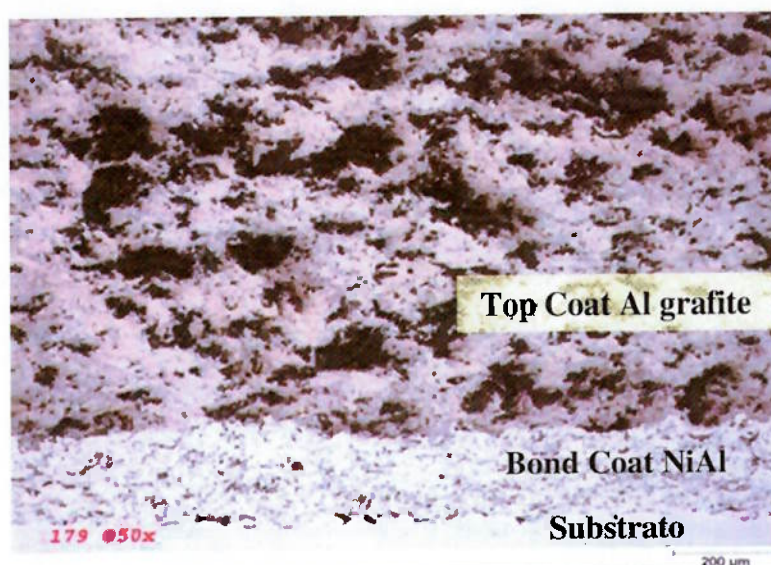


Figura 2.29 – Camada típica de alumínio grafite sobre bond coat de NiAl<sup>[23]</sup>

### 2.7.2.2 CAMADAS DURAS (HARDCOATS)

As camadas duras ou hardcoats são aplicadas primariamente nas áreas sujeitas a desgaste por atrito, deslizamento ou vibração<sup>[12,23]</sup>. Embora seja possível a aplicação pelo processo plasma spray, o processo preferencial para este tipo de camada é o HVOF, pois produz camadas mais densas devido ao maior nível de energia cinética envolvida.

Nas aplicações para resistência ao desgaste usam-se normalmente os pós de WC, WCCo<sup>[5]</sup>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>NiCr e Triballoys, que resultam em depósitos com alto valor de dureza e por isso tem a espessura de aplicação limitada em até 0,025" (0,64mm) máximo, sem aplicação da camada de bond coat (single layer).

A figura 2.30 mostra uma camada típica de WCCo aplicados por plasma spray em ampliação de 100 vezes.

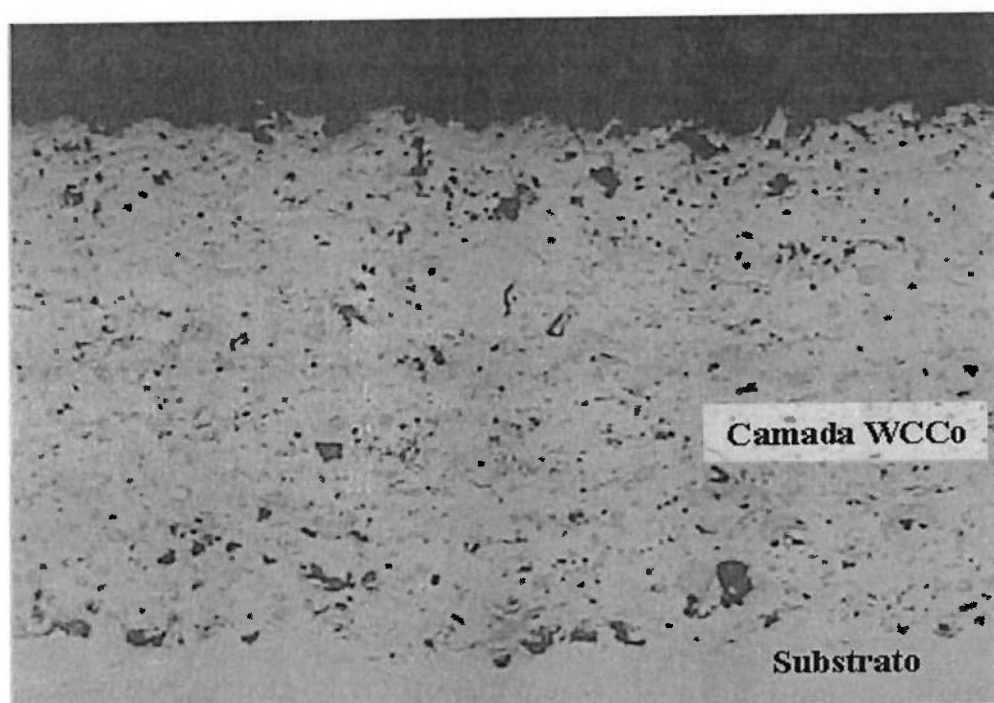


Figura 2.30 – Camada típica de WCCo<sup>[23]</sup>

### 2.7.2.3 CAMADAS CERÂMICAS

As camadas cerâmicas têm grande aplicação nos motores aeronáuticos, pois uma de suas principais finalidades é atuar como barreira térmica nas áreas mais

quentes dos módulos de combustão e turbina, possibilitando trabalhar com temperaturas cada vez maiores e, portanto, com melhor eficiência<sup>[12]</sup>. Entre as características das camadas cerâmicas estão a baixa condutividade térmica, alta resistência ao choque térmico e boa resistência a erosão<sup>[5]</sup>.

Camadas de magnésia/alumina podem também ser usadas como amortecedores de vibração (chamado de damping), sendo que os movimentos das micro-fissuras da camada absorvem e dispersam a energia. A zircônia e os óxidos são amplamente empregados nas camadas cerâmicas, como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e zircônia/yttria<sup>[2]</sup>. A figura 2.28 ilustra uma camada típica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre bond coat de NiAl, com ampliação de 50 vezes.

As altas temperaturas atingidas no processo plasma o fazem o processo ideal para aplicação dos pós cerâmicos. Graças às características de isolamento térmico, os materiais cerâmicos têm coeficiente de dilatação muito diferente dos substratos, e sempre devem ser aplicados sobre uma camada de bond coat, que também tem a função de resistência à oxidação. Os limites de espessura de camada são de 0,025" a 0,035" (0,64mm a 0,89mm).

#### **2.7.2.4 CAMADAS METÁLICAS**

As camadas metálicas são aplicadas nos motores aeronáuticos com as seguintes finalidades: restauração dimensional, resistência a atrito, amortecedores

de vibração e também como bond coat. Para simples restauração dimensional e como bond coat são mais comumente utilizados o NiAl e o NiCrAl<sup>[2,23]</sup>.

Com o objetivo de oferecer proteção quanto ao atrito, alguns mecanismos devem ser comentados. Como proteção passiva, camadas com dureza ligeiramente inferiores ao do metal base são aplicadas nestes com o objetivo de se desgastarem no lugar do substrato, preservando e aumentando a vida útil da peças. Caso a camada metalizada se danifique, esta pode ser removida por um processo de decapagem e posteriormente reaplicada. Os materiais mais utilizados com esta finalidade são o alumínio/bronze (com espessuras de até 0,040" (1,27mm) com bond coat), CuNiIn e CuNi (com espessuras típicas de até 0,005" (0,127mm) sem bond coat)<sup>[23]</sup>. O outro importante mecanismo de aplicação é o de proteção ativa contra o desgaste, onde se aplicam materiais com maior dureza para minimizar os efeitos dos atritos, protegendo as peças.

A figura 2.31 mostra um exemplo de uma camada típica de CuNiIn sobre substrato de titânio aplicados por plasma spray, com ampliação de 200 vezes, com uma última camada de lubrificante seco no topo, que garante menores níveis de desgaste durante o trabalho.

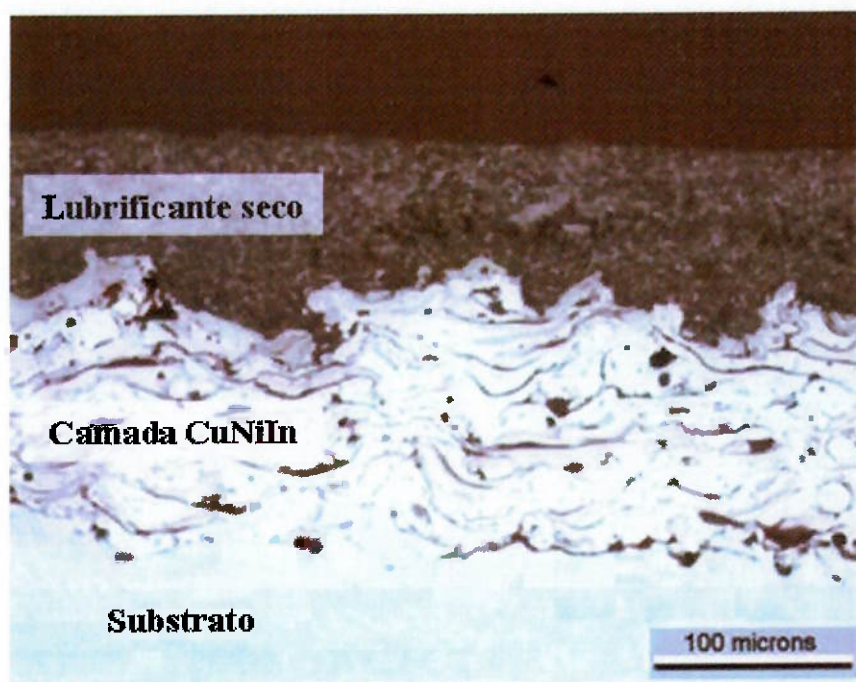


Figura 2.31 – Camada típica de CuNiIn + lubrificante seco<sup>[23]</sup>

### 2.7.3 CAMADAS DE MOLIBDÊNIO

Ainda classificado dentro do grupo das camadas metálicas, o molibdênio possui outras particularidades e, como este tipo de camada é um dos objetos de estudo deste trabalho, ele será tratado separadamente.

Além de oferecer a proteção ativa contra o desgaste conforme visto em 2.7.2.4, outras características do molibdênio são<sup>[2,12]</sup>:

- Garante boa adesão no substrato graças às reações exotérmicas e ligações químicas;
- Produz camadas com bom valor de dureza e resistência ao desgaste, sendo mais usináveis que as camadas duras (hardcoats);



- Oxida facilmente em temperaturas acima de 350°C e forma uma “camada ensaboada” superficial de dióxido de molibdênio, que possui algumas características de lubrificação, o que garante menores desgastes;
- Pode ser mantido em contato com óleo, sem problemas de contaminação cruzada.

Assim como os materiais cerâmicos, as camadas de molibdênio podem atuar como amortecedor de vibração (damping), sendo esta energia absorvida pelos movimentos das micro-fissuras da camada, e dispersando-as<sup>[2,15]</sup>. Como já mencionado em 2.6.3, este recurso é muito utilizado na indústria aeronáutica na recuperação de engrenagens que, possivelmente por terem espessura de parede subdimensionadas, apresentam falha catastrófica após um determinado tempo de trabalho, devido à vibração.

As camadas são aplicadas sem a necessidade de bond coat, pois o molibdênio possui as mesmas qualidades do NiAl e NiCrAl, em espessuras de 0,025” a 0,035” (0,64mm a 0,89mm). A figura 2.32 mostra uma camada típica de molibdênio sobre substrato de aço SAE 8620 aplicada pelo processo plasma spray, com ampliação de 100 vezes.

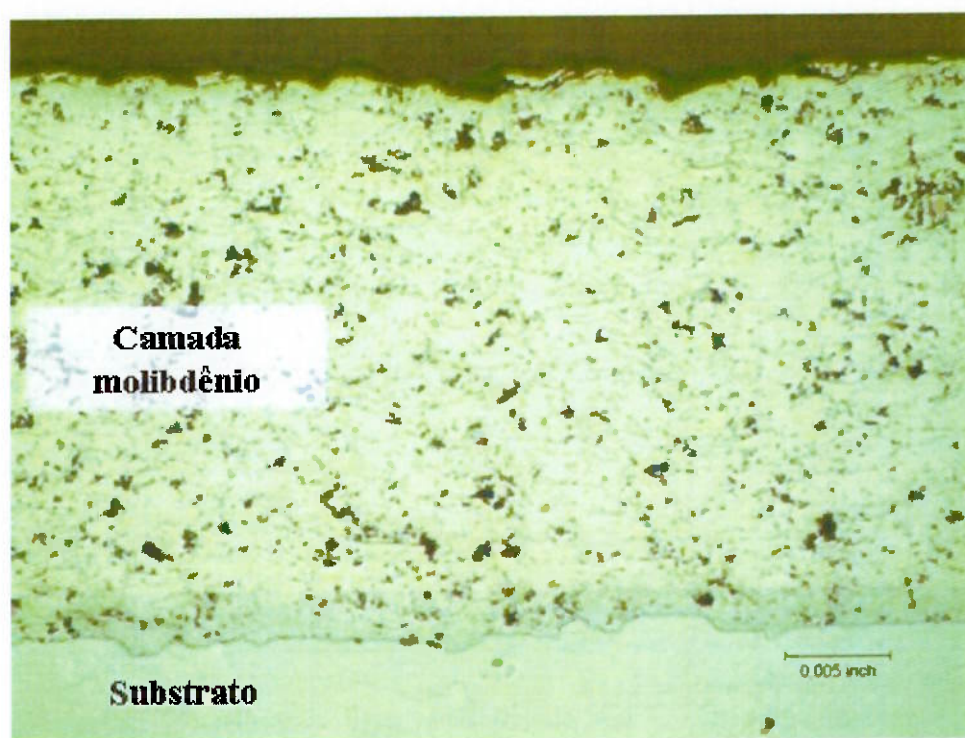


Figura 2.32 – Camada típica de molibdênio (Corpo de prova deste trabalho)

### **3. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é pesquisar a influência que a alteração dos valores de três variáveis do processo de metalização plasma spray podem proporcionar nos valores obtidos das propriedades dos revestimentos de molibdênio em chapas de aço SAE 8620.

As variáveis de entrada estudadas são: pré-aquecimento da chapa, tamanho da gralha de jateamento e quantidade de aplicações, enquanto que as características da camada analisadas são: porosidade, percentual de contaminação da interface substrato/camada metalizada, nível de partículas não fundidas e dureza da camada.

Como objetivo secundário são também propostos modelos matemáticos para a representação e medição da influência dos fatores estudados.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização do experimento foram metalizados corpos de provas em aço SAE 8620 pelo processo plasma spray utilizando pó de molibdênio. Os materiais, principais equipamentos e também o procedimento adotado para aplicação são descritos a seguir.

### **4.1 CORPOS DE PROVAS**

As chapas dos corpos de provas foram preparadas de aço chato SAE 8620, nas dimensões de 3" de comprimento x 1" de largura x 3/16" de espessura. Para que os ensaios de dureza pudessem seguir os requerimentos das norma ASTM E18<sup>[29]</sup>, todos os corpos de provas tiveram as faces retificadas, de forma a restabelecer a planicidade. A figura 4.1 mostra 4 peças em início de processo, e a tabela 4.1 a composição química típica do material.

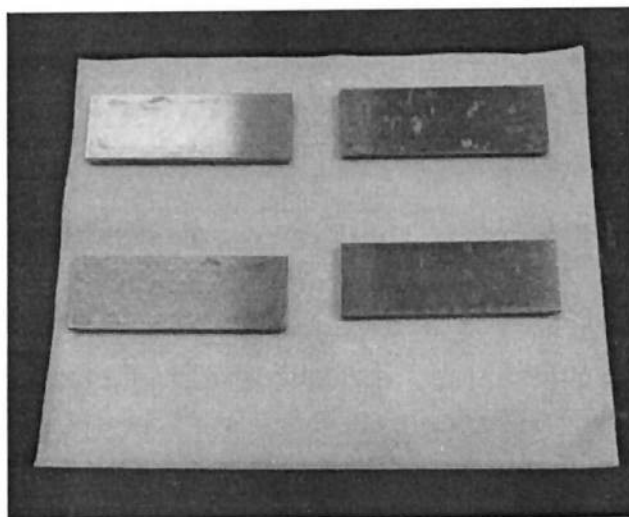


Figura 4.1 – Corpos de provas em preparação para o processo

TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA CORPOS DE PROVAS AÇO SAE 8620

ESPECIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SAE 8620	0,12 0,23	0,15 0,35	0,70 0,90	< 0,035	< 0,040	0,40 0,70	0,40 0,60	0,15 0,25

## 4.2 EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E GASES DE PROCESSO

Para a aplicação das camadas de molibdênio nos corpos de provas deste experimento foi utilizada uma instalação completa de metalização, composta pelos equipamentos e instrumentos listados a seguir. Os respectivos certificados de calibração mandatórios para o processo podem ser vistos nos anexos nº 1 a 3.

- a) Unidade Controladora Sulzer Metco 9MC;
- b) Alimentador de Pó Sulzer Metco 9MP;
- c) Pistola Sulzer Metco 3MB;
- d) Mesa giratória Sulzer Metco 7HE;
- e) Robô ArcMate 120i Fanuc;
- f) Medidor de temperatura digital infravermelho Minipa MT-350;
- g) Medidor de espessura Kroeplin B-220;
- h) Cabine de jateamento por pressão Nortorf (modelo não disponível), com vaso de pressão anexo (óxido grana 20);
- i) Cabine de jateamento por sucção Blastibrás modelo GS9075-X (óxido de alumínio grana 60 e grana 80).

Não menos importante e essencial para o bom desempenho dos trabalhos, a cabine de metalização contava com revestimento acústico e com uma eficiente exaustão. Veja a seguir as figuras 4.2 e 4.3 mostrando a cabine acústica com a mesa giratória e o robô, e o medidor de espessura utilizados no experimento.

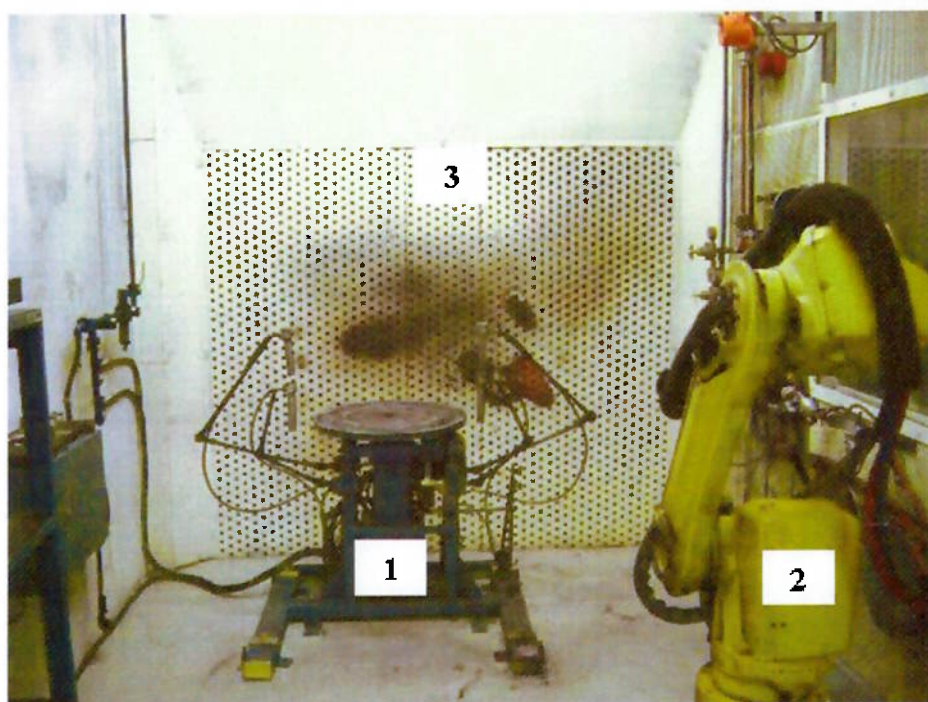


Figura 4.2 – Mesa giratória 7HE (1), robô Fanuc ArcMate 120i (2) e cabine acústica com sistema de exaustão (3)



Figura 4.3 – Medidor de espessura Kroeplin B-220

Os gases utilizados no experimento foram o argônio como gás primário e o hidrogênio como gás secundário, pois além de serem interessantes para o processo, estavam prontamente disponíveis nas instalações. Qualquer alteração no tipo de gás requer grandes mudanças nas linhas dos gases e nos componentes da pistola.

Toda a instalação da célula de metalização contava também com ar comprimido limpo e seco, garantido pelo uso de um secador de ar industrial. A mesma qualidade de ar pôde ser encontrada nas cabines de jateamento abrasivo.

### **4.3 MATERIAIS CONSUMÍVEIS**

Para a execução de todo o processo de deposição da camada de molibdênio, desde a preparação das chapas dos corpos de provas até a conclusão da metalização, foram utilizados os seguintes materiais consumíveis:

- a) Acetona e pano de algodão descartável;
- b) Fita adesiva para mascaramento Sulzer Metco, 25.4mm, dupla face;
- c) Óxido de alumínio Treibacher Schleifmittel, granas 20, 60 e 80;
- d) Pó molibdênio Praxair MO-102 (certificado disponível no anexo 4).

As figuras 4.4 e 4.5 mostram o pote do pó de molibdênio Praxair MO-102 (1), o óxido de alumínio grana 60 (2) e a fita de mascaramento (3) utilizados no processo.





Figura 4.4 – Pó de molibdênio Praxair MO-102 (1) e óxido de alumínio grana 60 (2)

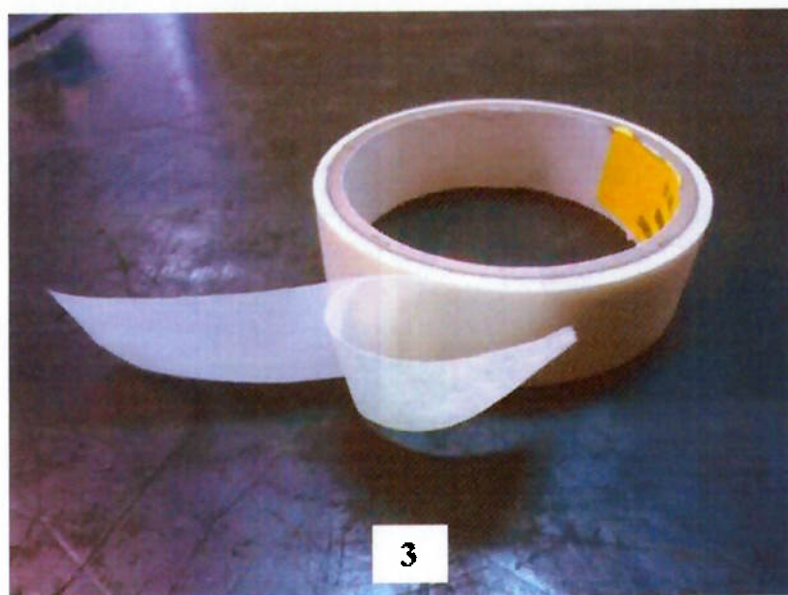


Figura 4.5 – Fita adesiva de mascaramento de 1" (3)



#### 4.4 PARÂMETROS DE PROCESSO

Os parâmetros utilizados tanto na preparação como para a metalização dos corpos de provas são descritos a seguir. Nos campo de temperatura de pré-aquecimento são especificados 2 parâmetros, indicando que estes foram alterados com a finalidade de estudar suas influências no processo.

TABELA 4.2 – PARÂMETROS DE METALIZAÇÃO

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Bico da pistola	GP
Distância bico / peça	101 ± 6 mm
Pressão gás primário (argônio)	75 PSI
Pressão gás secundário (hidrogênio)	50 PSI
Vazão de gás primário	110 SCFH
Vazão de gás secundário	16 SCFH
Corrente	500 A
Tensão	64-66 V
Jatos de ar da pistola (air jets)	40 PSI (paralelos)
Taxa de alimentação de pó	68 g/min
Pressão de gás carregador de pó	50 PSI
Vazão de gás carregador de pó	13,5 SCFH
Bico injetor de pó	#2
Temperatura de pré-aquecimento	90°C e 150°C
Temperatura de processo	150°C máximo

Os parâmetros de movimentação são apresentados na tabela 4.3.

**TABELA 4.3 – PARÂMETROS DE MOVIMENTAÇÃO**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
Rotação da mesa	72 RPM
Deslocamento braço robô	40 mm/seg
Número de passes total	20

E por fim os parâmetros de jateamento são apresentados na tabela 4.4.

**TABELA 4.4 – PARÂMETROS DE JATEAMENTO**

<b>GRANALHA</b>	<b>PARÂMETRO</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
20 mesh	Pressão ar	40 PSI
	Distância bico / peça	150 ± 30 mm
60 mesh	Pressão ar	50 PSI
	Distância bico / peça	100 ± 20 mm
80 mesh	Pressão ar	50 PSI
	Distância bico / peça	80 ± 20 mm

Os parâmetros empregados foram extraídos do boletim técnico do pó de molibdênio Praxair MO-102<sup>[30]</sup> e do manual de operações da pistola de metalização empregada<sup>[13]</sup>.

## 4.5 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO

O procedimento de preparação da superfície e metalização dos corpos de provas seguiu todos os passos necessários para obtenção de uma camada com máximo desempenho, e é descrito resumidamente abaixo:

- a) Desengraxe das superfícies utilizando acetona e pano descartável;
- b) Jateamento da face, utilizando óxido de alumínio grana 20 ou grana 60;

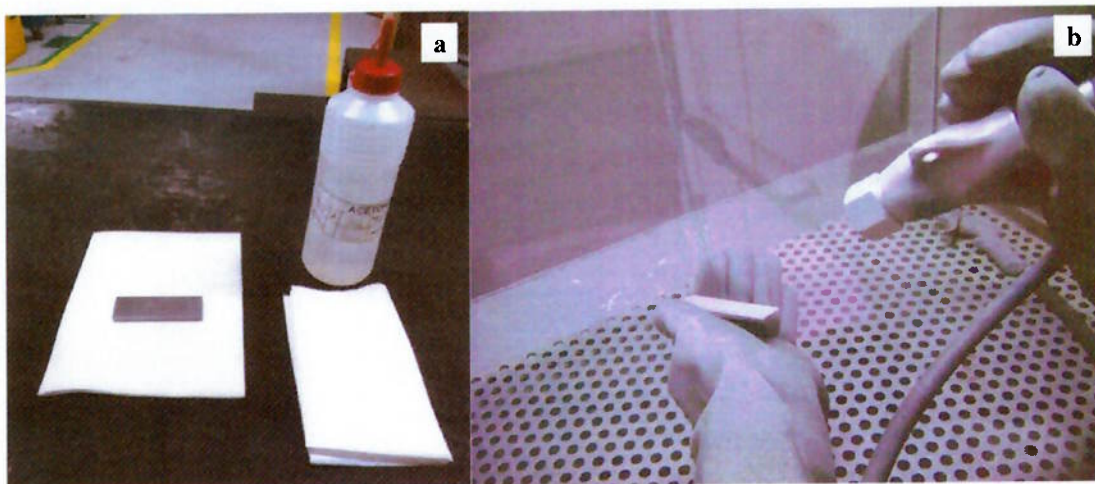


Figura 4.6 – Desengraxe com acetona (a) e jateamento da superfície (b)

- c) Limpeza da superfície jateada utilizando ar comprimido limpo e seco, para remoção de resíduos de óxidos de alumínio de jateamento;
- d) Setup do equipamento de metalização – unidade de controle, alimentador de pó, controlador do robô e teach pendant do robô;



Figura 4.7 – Unidade de controle (1), alimentador de pó (2), controlador do robô (3) e teach pendant (4)

- e) Fixação no dispositivo de metalização, e posicionamento e centralização na mesa giratória;
- f) Pré-aquecimento do substrato, utilizando o calor da própria pistola de metalização, sem alimentação de pó, a temperatura de 90°C ou 150°C (parâmetro estudado no experimento). O monitoramento da temperatura foi efetuado utilizando-se um medidor de temperatura digital infravermelho com mira laser;

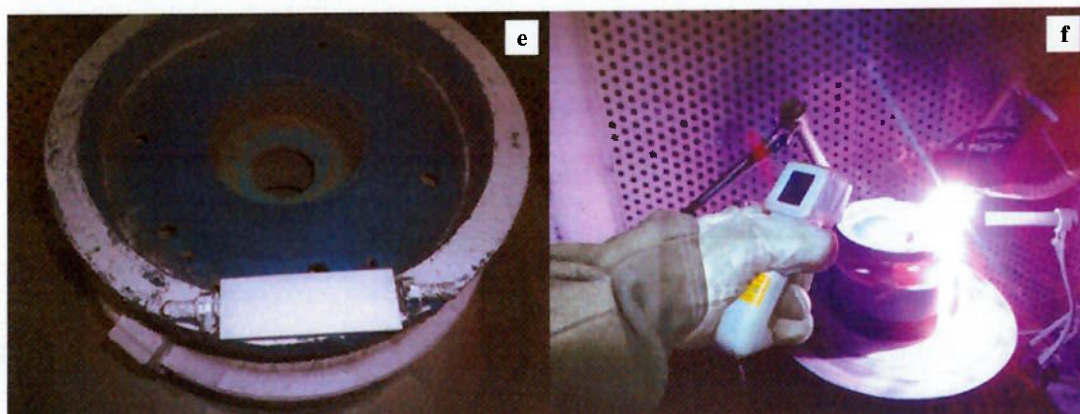


Figura 4.8 – Posicionamento no dispositivo (e) e monitoramento da temperatura de pré-aquecimento (f)

g) Aplicação da camada de molibdênio, com espessura entre 0,015" e 0,030" (0,38 mm a 0,76 mm);



Figura 4.9 – Aplicação do pó de molibdênio nos corpos de provas

h) Remoção do dispositivo e limpeza com ar comprimido.

Todos os corpos de provas foram mantidos na condição “como metalizado”, ou seja, até este momento não houve qualquer remoção de excessos e rebarbas, e desta maneira foram enviados ao laboratório metalográfico para a medição de dureza e posterior preparação metalográfica.

#### **4.6 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO**

O método utilizado no experimento foi o planejamento fatorial  $2^n$  com 3 variáveis e 2 níveis com uma repetição, perfazendo um total de  $2^3 \times 2 = 16$  corpos de prova. Para tanto, de todos os parâmetros de processo, 2 foram alterados:

- A granalha de jateamento de preparação da superfície para metalização, sendo utilizadas as granas 20 e 60. Todo material utilizado era novo;
- A temperatura de pré-aquecimento dos corpos de provas, iniciando com 90°C e posteriormente com 150°C;

De forma a verificar a viabilidade de reaplicação da camada de molibdênio em peças com camadas já aplicadas anteriormente, uma terceira variável de processo foi incluída nos experimentos, sendo que alguns corpos de provas foram metalizados e, na seqüência, a camada aplicada foi removida por jateamento utilizando óxido de alumínio grana 80 (novo), e então o recobrimento foi aplicado novamente utilizando o mesmo procedimento anterior (incluindo o jateamento da superfície com óxido de alumínio grana 20 ou 60).



Todos os demais parâmetros e variáveis de processo foram mantidos constantes, conforme procedimento de metalização aprovado e já historicamente aplicado com sucesso na célula de metalização da empresa. A tabela 4.5 mostra o planejamento dos experimentos e também identifica cada corpo de prova com o parâmetro ou variável que sofreu alteração.

TABELA 4.5 – PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

<b>CORPO DE PROVAS Nº</b>	<b>ÓXIDO JATEAMENTO (GRANA)</b>	<b>TEMPERATURA PRÉ- AQUECIMENTO (°C)</b>	<b>QUANTIDADE DE APLICAÇÕES</b>
1.1	20	90	1
2.1	60	90	1
3.1	20	150	1
4.1	60	150	1
5.1	20	90	2
6.1	60	90	2
7.1	20	150	2
8.1	60	150	2
1.2	20	90	1
2.2	60	90	1
3.2	20	150	1
4.2	60	150	1
5.3	20	90	2
6.3	60	90	2
7.3	20	150	2
8.3	60	150	2

## **4.7 ENSAIOS REALIZADOS**

Para a verificação das principais características das camadas aplicadas foram efetuados 2 ensaios em cada um dos corpos de prova: teste de dureza e avaliação metalográfica para caracterização da camada. Uma abordagem mais detalhada de cada um destes testes é descrita a seguir.

### **4.7.1 ENSAIO DE DUREZA**

Como as camadas aplicadas por aspersão térmica geralmente são frágeis a determinados esforços mecânicos, é recomendado que seja efetuado ensaio de dureza superficial, pois, em caso de efetuar o ensaio na escala Rockwell C com carga de 150 kg, o penetrador pode trincar a camada metalizada e não efetuar a leitura correta. Adicionalmente, como as camadas normalmente têm fina espessura, o penetrador cônico pode tomar a leitura do metal base, e levar a conclusões errôneas. A norma ASTM E-18<sup>[29]</sup> especifica através de um gráfico as mínimas espessuras de camadas necessárias em função do valor de dureza a ser encontrado, para uso com penetradores cônicos de diamante.

Portanto, para desenvolvimento deste trabalho foram efetuados ensaios de dureza superficial na escala Rockwell HR30T, com penetrador esférico de 1/16" e carga de 30kg, garantindo a preservação da camada com resultados acurados. O equipamento utilizado foi um durômetro Mitutoyo modelo ATK-600, vide figura 4.10, calibrado conforme certificado de calibração encontrado no anexo 5.





Figura 4.10 – Durômetro ATK-600 para ensaio de dureza superficial

O procedimento aplicado para o teste de dureza foi idêntico para todos os corpos de provas, e pode ser demonstrado como segue:

- a) Limpeza da face não metalizada do corpo de provas para remover oxidação ou resíduos de materiais indesejáveis, para permitir ótimo assentamento na base do durômetro;
- b) Lixamento da superfície metalizada utilizando lixa de óxido de alumínio grana 120-320, com leve pressão, até obter um acabamento opaco com remoção das asperezas naturalmente encontradas nas superfícies metalizadas, em uma área suficiente para realização dos ensaios – vide figura 4.11;

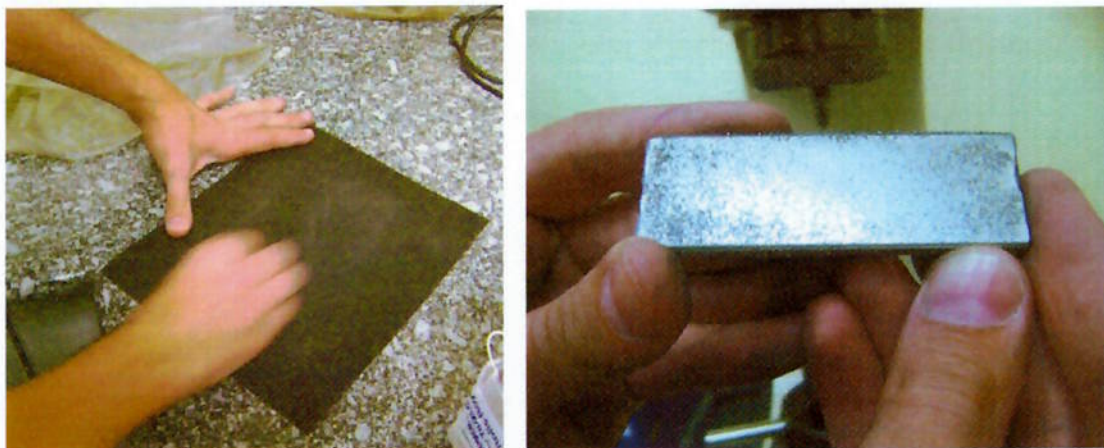


Figura 4.11 – Preparação da superfície para ensaio de dureza

- c) Setup do equipamento com carga de 30kg, e montagem do penetrador esférico de 1/16”;
- d) Medição da dureza em bloco padrão, para check da acuracidade do equipamento;
- e) Execução de 5 medições de dureza da camada, com análise do desvio padrão para aceitação sendo a média aritmética adotada como resultado final;
- f) Nova medição da dureza em bloco padrão.

Conforme especificação do fabricante, o valor de dureza para a camada de molibdênio aplicada por plasma spray é de 77 HR30T mínimo. Assim que todos os corpos de provas tiveram a medição da dureza da camada concluída, estes foram disponibilizados para que fossem efetuadas as preparações metalográficas.

## **4.7.2 AVALIAÇÃO METALOGRÁFICA**

A avaliação metalográfica de uma camada metalizada é efetuada para permitir que sejam inspecionadas algumas características que podem influir no desempenho da camada durante o serviço, como por exemplo, o nível de porosidade, ou até indicar se há riscos de destacamento da camada do substrato, através da verificação do nível de contaminação da interface.

### **4.7.2.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS**

Para possibilitar a correta interpretação das características da camada, uma adequada preparação metalográfica do corpo de provas deve ser garantida, uma vez que esta tem grande influência no resultado que será observado no microscópio. Conforme o manual da TSS da ASM<sup>[31]</sup>, as camadas de molibdênio são susceptíveis à ocorrência de “smearing” durante o polimento da amostra, que é quando as características como porosidade, partículas não fundidas e nível de oxidação são mascarados ou diminuídos, podendo levar a conclusões falsas.

A pesquisa desenvolvida por PUERTA<sup>[32]</sup>, onde corpos de provas recobertos com molibdênio aplicado por plasma spray foram submetidos a diferentes processos de embutimento das amostras, sendo embutimento a quente, embutimento a frio sem impregnação à vácuo e embutimento a frio com impregnação à vácuo, comprovou as grandes disparidades de resultados entre elas. Assim como também mostrado no manual da TSS da ASM<sup>[31]</sup>, os melhores e mais

fiéis resultados de preparação metalográfica são obtidos com o embutimento a frio com impregnação à vácuo.

Também seguindo os princípios definidos nos trabalhos anteriores, foram utilizados nas preparações sistemas modernos de desbaste fino (que utilizam diamante como abrasivo) e polimento da amostra, pois estes se mostram eficientes e com excelentes resultados. A figura 4.12 mostra o equipamento utilizado para o polimento das amostras, fabricante Struers modelo Tegrapol-25. O procedimento, juntamente com a descrição dos equipamentos utilizados na preparação metalográfica das amostras de cada corpo de provas, é descrito na tabela 4.6 a seguir.



Figura 4.12 – Equipamento de polimento de amostras Tegrapol-25

TABELA 4.6 – PARÂMETROS DE PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

TABELA 4.0 PARÂMETROS DE PREPARAÇÃO METEOROLÓGICA








PARÂMETROS DE CORTE

EQUIPAMENTO	DISCOTOM 6 (STRUERS)
DISCO DE CORTE	20S25 (STRUERS)
TAXA DE CORTE	0,2 TO 0,5 mm/s
LIMPEZA APÓS CORTE	LAVAR EM ÁGUA + SABÃO

PARÂMETROS DE EMBUTIMENTO

RESINA DE EMBUTIMENTO	AKA RESIN (+ EPODYE) & AKA CURE, QUICK HARDENER
VÁCUO	SIM
CICLO DE CURA	80°C POR 30 MINUTOS

PARÂMETROS DE LIXAMENTO – POLIMENTO

EQUIPAMENTO			TEGRAPOL-25 / TEGRAFORCE-5		
 Step		Planificação	Desbaste fino	Polimento	Sílica Coloidal
	Superfície	SiC paper #180 (3 etapas)	MD – Largo 9µm	MD – Dac 3µm	MD – Chem 0,04µm
	Suspensão	-	DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Dac	OP-S
	Nível (ml/min.)	-	2/4	2/5	4/5
	Lubrificante	Água	-	-	-
	RPM	300 >>	150 >>	150 >>	150 >>
	Força (N)*	30	30	30	20
	Tempo (minutos)	0,50	6,00	5,00	0,50
OBS.:		*Valor por amostra.			

#### 4.7.2.2 AVALIAÇÃO DAS CAMADAS DE MOLIBDÊNIO

As avaliações das camadas de molibdênio dos corpos de provas foram efetuadas utilizando microscopia ótica, inicialmente com ampliação de 100 vezes para uma visualização geral quanto a defeitos óbvios e também para a medição da espessura da camada, e posteriormente ampliação de 200 vezes com foco nas

seguintes características e respectivos limites demonstrados na tabela 4.7 abaixo. O critério de avaliação adotado foi fornecido pelo fabricante do componente.

TABELA 4.7 – CARACTERÍSTICAS AVALIADAS E RESPECTIVOS LIMITES DE ACEITAÇÃO

CARACTERÍSTICA	LIMITE ACEITAÇÃO	PADRÃO REFERÊNCIA
Porosidade	7,5% máximo	Figuras 1305 a 1316
Contaminação de Interface	30% máximo	Figuras 1317 a 1321
Partículas não fundidas	3 por FOV máximo	Figura 1322
Espessura camada	0,015" a 0,030"	Não aplicável

O equipamento utilizado para as avaliações foi um microscópio Zeiss modelo AxioVert 40 MAT (vide figura 4.13), dedicado para análises metalográficas de corpos de provas. Importante destacar que para as inspeções de camadas metalizadas não é necessário qualquer tipo de ataque da superfície das amostras.



Figura 4.13 – Microscópio AxioVert 40 MAT



Neste trabalho foi estudada a variação do pré-aquecimento em 2 temperaturas – 90°C e 150°C - e também a granalha de jateamento de preparação da superfície – grana 20 e grana 60 -, e para isto todos os demais parâmetros e variáveis do processo foram mantidos constantes. A viabilidade de remoção e reaplicação das camadas também foi avaliada.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Realizados os ensaios com as técnicas e materiais já descritos e detalhados anteriormente, os resultados dos corpos de provas nos ensaios de dureza e metalografia foram analisados e serão discutidos a seguir.

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS**

A caracterização metalográfica das camadas foi efetuada por comparação utilizando-se padrões fotográficos diretamente no microscópio, para eliminar possíveis interferências do software de visualização. Estes resultados e também a média das medições da dureza da camada podem ser constatados na tabela 5.1.

**TABELA 5.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS METALGRÁFICOS E DUREZA MÉDIA**

Corpo de Prova (nº)	Grana do óxido de jateamento (Mesh)	Temp. de pré aquec. (°C)	Quantidade de aplicações	Porosidade (% volumétrica)	Contaminação de interface (%)	Partículas não fundidas (nº)	Dureza da camada metalizada (HR30T)	Espessura da camada metalizada (Pol.)
1.1	20	90	1	5,0	10	0	79,70	0,0265
1.2	20	90	1	7,5	20	0	80,08	0,0250
2.1	60	90	1	5,0	10	1	80,62	0,0242
2.2	60	90	1	5,0	20	0	80,54	0,0246
3.1	20	150	1	2,0	10	0	78,62	0,0258
3.2	20	150	1	5,0	10	1	78,88	0,0250
4.1	60	150	1	2,0	10	1	80,92	0,0245
4.2	60	150	1	2,0	10	0	79,16	0,0247
5.1	20	90	2	5,0	30	0	79,08	0,0254
5.3	20	90	2	5,0	35	0	79,00	0,0223
6.1	60	90	2	5,0	35	1	78,76	0,0235
6.3	60	90	2	5,0	30	0	79,50	0,0188
7.1	20	150	2	2,0	30	0	79,56	0,0245
7.3	20	150	2	5,0	20	0	79,86	0,0242
8.1	60	150	2	2,0	35	0	79,86	0,0240
8.3	60	150	2	2,0	30	0	81,86	0,0217



Como pode ser observado, para os casos dos experimentos 5, 6, 7 e 8 foi feito um corpo de prova adicional (x.3) pois foi identificado que na confecção do segundo corpo de provas ocorreu uma contaminação interfacial bem acima dos valores previstos. Tal fato foi analisado e as possíveis causas da contaminação foram associadas à falta de cuidados no processo de jateamento de preparação da superfície e à possível presença de resíduos de camadas metalizadas anteriores.

Visando dirimir estas dúvidas e tendo em vista que este experimento não se propõe a investigar as causas de contaminação em particular e sim o efeito da variação da contaminação quando alterados os parâmetros escolhidos no planejamento do experimento, optou-se por repetir toda a preparação, desta vez seguindo minuciosamente os procedimentos de preparo das superfícies. Os resultados das amostras (x.2) para estes casos foram descartadas.

## **5.2 DUREZA DA CAMADA**

Cada corpo de provas foi submetido a ensaio de dureza da camada metalizada conforme a norma ASTM E-18<sup>[29]</sup>. O valor mínimo especificado de dureza da camada é de 77 HR30T, conforme procedimento adotado pela empresa e comprovado com sucesso por vários anos de trabalho das engrenagens metalizadas com molibdênio.

Os valores das medições de dureza individuais bem como a média e o desvio padrão encontrados são apresentados na tabela 5.2 a seguir.

TABELA 5.2 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE DUREZA E DESVIO PADRÃO

CP	1ª Medição (HR30T)	2ª Medição (HR30T)	3ª Medição (HR30T)	4ª Medição (HR30T)	5ª Medição (HR30T)	Dureza média (HR30T)	DESVIO PADRÃO
1.1	77,5	79,5	80,4	81,0	80,1	79,7	1,344
1.2	80,1	79,3	79,6	80,4	81,0	80,1	0,669
2.1	77,4	82,8	79,4	81,5	82,0	80,6	2,196
2.2	82,1	81,0	79,8	79,4	80,4	80,5	1,062
3.1	79,8	77,4	78,4	77,6	79,9	78,6	1,184
3.2	78,2	77,4	80,4	79,6	78,8	78,9	1,171
4.1	78,3	83,1	81,0	79,8	82,4	80,9	1,941
4.2	79,1	77,5	79,6	80,1	79,5	79,2	0,994
5.1	78,9	80,7	78,7	78,0	79,1	79,1	0,996
5.3	77,8	77,1	80,1	80,4	79,6	79,0	1,465
6.1	77,9	81,7	77,4	78,0	78,8	78,8	1,718
6.3	77,5	79,2	81,0	79,8	80,0	79,5	1,292
7.1	80,3	77,4	78,9	81,1	80,1	79,6	1,442
7.3	78,0	77,2	79,9	81,2	83,0	79,9	2,355
8.1	80,7	80,5	81,1	79,1	77,9	79,9	1,330
8.3	79,4	82,4	84,1	81,0	82,4	81,9	1,760

Como pode ser observado na tabela 5.2, os valores de dureza foram obtidos com 5 medições e foi analisado o desvio padrão apresentado entre as medições. O valor médio encontrado nas durezas foi da ordem de 79,80 HR30T, enquanto o valor médio dos desvios padrão encontrado foi da ordem de 1,43, ou 1,79% da variação total entre medições, valor este que permite aceitar com segurança os valores de dureza encontrados.

No processo foram observados cuidados com a calibração do aparelho, (certificado anexo nº 5), e foi utilizado um procedimento que tinha como uma de suas etapas a medição do bloco padrão a cada 5 leituras realizadas. Os valores das

medições do bloco padrão ficaram dentro da faixa 5% de desvio padrão apresentado nas diversas leituras realizadas.

Ainda observando a tabela 5.2, conclui-se que todos os corpos de provas apresentaram valores de dureza de camada acima do mínimo especificado anteriormente citado, o que comprova que todos os parâmetros de aplicação utilizados nos experimentos são apropriados para o pó de molibdênio. Devido ao baixo valor percentual de variação total entre as medições de 1,79%, também é possível concluir que as alterações nos valores dos parâmetros de aplicação, objeto deste estudo, não exercem influência significativa nos valores de dureza da camada de molibdênio encontrada.

Tanto a metodologia empregada quanto o baixo valor de desvio padrão apresentado permitem afirmar com segurança que as variações foram apenas decorrentes da aleatoriedade não sendo evidenciadas variações entre as leituras que pudessem comprometer as conclusões tendo em vista repetibilidade apresentada de 98,21%.

### **5.3 POROSIDADE**

A porosidade é uma característica inerente de qualquer camada metalizada, e o seu controle é fundamental para que o revestimento tenha um bom desempenho em trabalho. Conforme o procedimento de análise adotado, as avaliações da porosidade foram efetuadas quanto a porcentagem volumétrica das áreas analisadas dos corpos de provas e devem ser executadas por comparação

utilizando-se padrões fotográficos, sendo o limite mínimo de 2% e o máximo permitido de 7,5%, em ampliação de 200 vezes. Uma distribuição uniforme das porosidades foi observada em todos os corpos de provas.

Os valores de porosidade volumétrica encontrados nas avaliações de cada corpo de provas podem ser conferidos na tabela 5.3 a seguir.

**TABELA 5.3 – PORCENTAGEM DE POROSIDADE DAS CAMADAS**

Corpo de Prova (nº)	Grana do óxido de jateamento (Mesh)	Temperatura de Pré-aquecimento (°C)	Quantidade de aplicações	Porosidade (% volumétrica)
1.1	20	90	1	5,0
1.2	20	90	1	7,5
2.1	60	90	1	5,0
2.2	60	90	1	5,0
3.1	20	150	1	2,0
3.2	20	150	1	5,0
4.1	60	150	1	2,0
4.2	60	150	1	2,0
5.1	20	90	2	5,0
5.3	20	90	2	5,0
6.1	60	90	2	5,0
6.3	60	90	2	5,0
7.1	20	150	2	2,0
7.3	20	150	2	5,0
8.1	60	150	2	2,0
8.3	60	150	2	2,0

Um cuidado muito importante que foi considerado neste experimento está relacionado à preparação metalográfica da amostra (polimento), pois esta pode causar danos nas camadas, conhecidos como "voids", que podem ser confundidos com a porosidade inerente da camada. Para tanto, foi seguido rigorosamente o procedimento de preparação de forma a minimizar a ocorrência dos danos e permitir uma avaliação com precisão.

Conforme observado na tabela 5.3, todos os corpos de provas apresentaram níveis de porosidade dentro dos limites especificados, ficando somente uma amostra com porosidade de 7,5%. Observa-se também que a granalha de jateamento e a quantidade de aplicações, quando analisadas isoladamente, não têm relação com o nível de porosidade encontrado.

Já quanto à temperatura de pré-aquecimento foi constatado que todos os 6 corpos de provas com porosidade de 2% foram pré-aquecidos a temperatura de 150°C, correspondendo a 37,5% do total das amostras. Ainda na mesma linha de análise, foi constatado que em outras 7 amostras que sofreram pré-aquecimento à temperatura de 90°C apresentaram nível de porosidade de 5%, equivalente a 43,7% do total das amostras.

Portanto, percebe-se que há uma tendência ao aumento da porosidade da camada de molibdênio quanto menor for a temperatura de pré-aquecimento do corpo de provas, embora 2 corpos de provas pré-aquecidos a temperatura de 150°C tenham apresentado porosidade de 5%, o que indica que a preparação metalográfica pode ter induzido alguns “voids” nas camadas metalizadas de molibdênio. Finalizando, 1 único corpo de provas pré-aquecido a 90°C apresentou nível de porosidade de 7,5%.

As estruturas das camadas de molibdênio dos corpos de provas com nível de porosidade de 2% (corpo de provas 4.1) e 5% (corpo de provas 3.2) podem ser observadas nas figuras 5.1 e 5.2 a seguir. As fotos foram efetuadas com ampliação

de 100 vezes para ilustrar também o substrato.

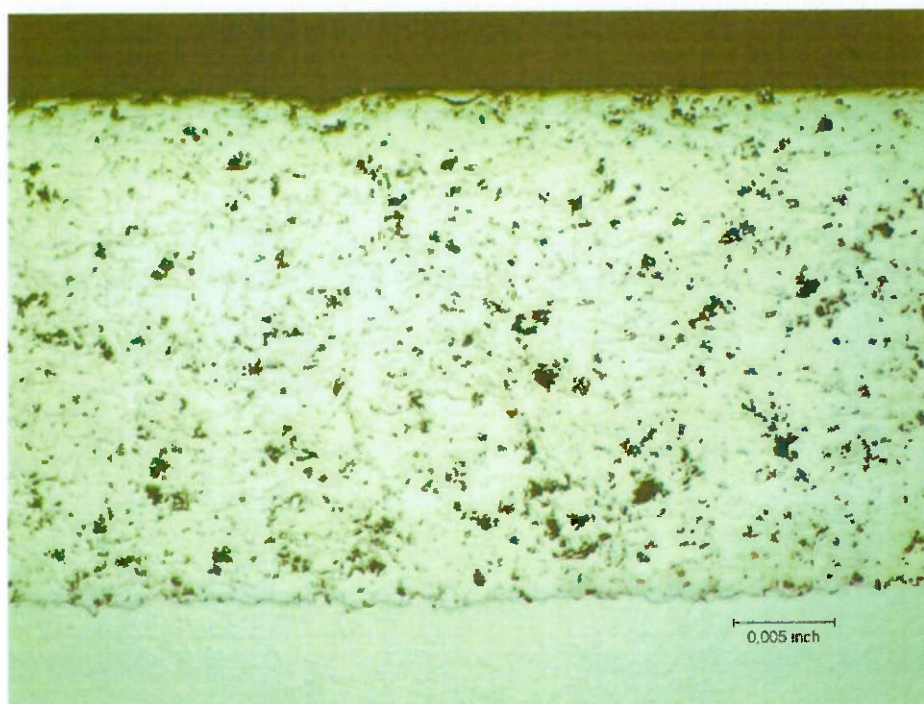


Figura 5.1 – Porosidade de 2% - cp. nº 4.1

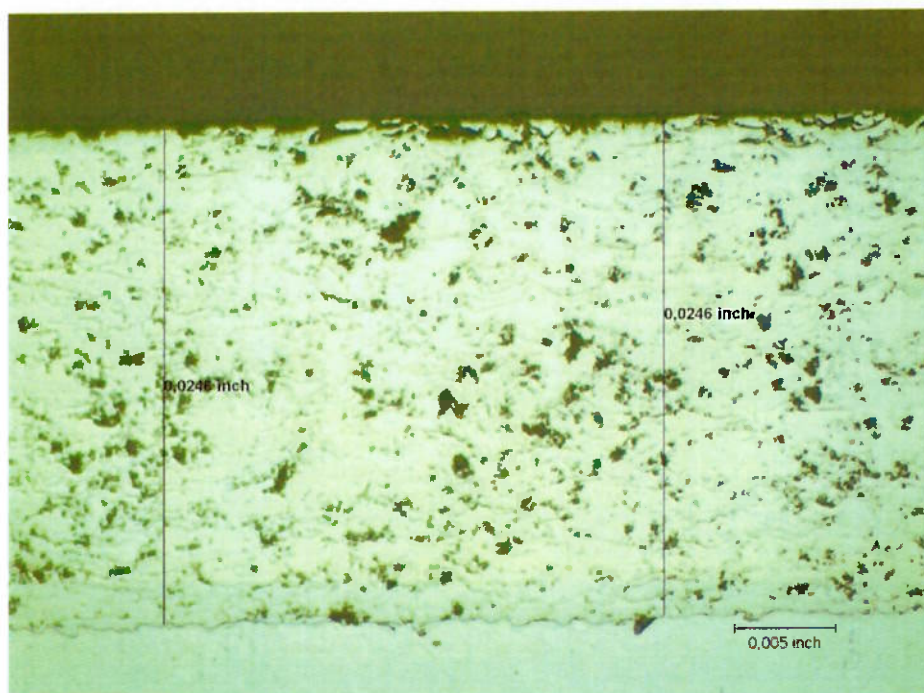


Figura 5.2 – Porosidade de camada de 5% – cp. nº 3.2

A tendência dos resultados encontrados neste experimento também ocorreu no trabalho de pesquisa de JIANG<sup>[19]</sup>, onde foi evidenciado que uma maior temperatura de pré-aquecimento do substrato favorece a formação geométrica ideal dos “splats” das partículas de molibdênio ao colidirem com a superfície da peça, provocando menor geração de fragmentos.

Concluindo, uma maior temperatura de pré-aquecimento favorece a sobreposição dos “splats” com formato ideal durante a metalização, provocando menos espaços vazios entre si resultando em menor nível de porosidade da camada.

## **5.4 CONTAMINAÇÃO INTERFACIAL**

Como o mecanismo de aderência da camada no substrato no processo plasma spray de aspersão térmica é basicamente mecânico, a observação de mínimos requisitos de qualidade quanto a contaminação de interface devem ser seguidos. Uma camada com níveis ruins de contaminação de interface poderá sofrer falhas catastróficas em serviço, pois estará suscetível a destacamentos.

A contaminação de interface pode ser definida basicamente como um material indesejado incrustado entre o metal base e camada de metalização. Pode

ocorrer em formato de óxidos, resíduos de gralha de jateamento de preparação da superfície ou ainda resíduos de camadas metalizadas anteriormente, devido à uma operação de decapagem / remoção ineficiente. Conforme o procedimento adotado pela empresa, e já comprovada sua confiabilidade, a contaminação de interface máxima permitida é de 30% de toda a área do corpo de provas.

Os experimentos tiveram também o objetivo de simular nos corpos de provas a remoção através de jateamento abrasivo de uma camada de molibdênio pré-existente na peça e então reaplicada nova camada, tendo como principal finalidade comprovar a viabilidade de utilização deste procedimento de forma a prolongar a vida útil de peças que seriam, de outra forma, sucateadas, otimizando vários recursos, entre eles humanos e financeiros.

Como já dito anteriormente, durante a avaliação metalográfica dos corpos de prova, foi evidenciado que nos casos dos experimentos 5.2, 6.2, 7.2 e 8.2 submetidos a aplicação, remoção e reaplicação da camada de molibdênio, a contaminação da interface ficou muito acima dos níveis aceitáveis, sendo as possíveis causas: a falta de cuidados no processo de jateamento ou, ainda mais provável, à possível presença de resíduos de camadas metalizadas anteriores.

Novos experimentos foram preparados seguindo cuidadosamente os procedimentos de preparação da superfície e do jateamento abrasivo, resultando nos corpos de provas 5.3, 6.3, 7.3 e 8.3. A tabela 5.4 mostra os resultados obtidos em cada corpo de provas.



TABELA 5.4 – PORCENTAGEM DE CONTAMINAÇÃO DE INTERFACE DAS CAMADAS

Corpo de Prova (nº)	Grana do óxido de jateamento (Mesh)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Quantidade de aplicações	Contaminação de interface (%)
1.1	20	90	1	10
1.2	20	90	1	20
2.1	60	90	1	10
2.2	60	90	1	20
3.1	20	150	1	10
3.2	20	150	1	10
4.1	60	150	1	10
4.2	60	150	1	10
5.1	20	90	2	30
5.3	20	90	2	35
6.1	60	90	2	35
6.3	60	90	2	30
7.1	20	150	2	30
7.3	20	150	2	20
8.1	60	150	2	35
8.3	60	150	2	30

Conforme evidenciado na tabela 5.4, nos experimentos onde foram efetuados somente 1 aplicação, os resultados de contaminação de interface foram satisfatórios, dentro dos limites pré-estabelecidos. Mostra também que alguns corpos de provas apresentaram contaminação de interface de 35%, sendo considerados rejeitados caso fossem representativos de peças de produção.

Além do limite de 30% máximo permitido de contaminação de interface, o procedimento utilizado na avaliação metalográfica ainda rejeitava as separações de camada, evidenciando uma possível falta de aderência devido a vários fatores, dentre eles, uma preparação inadequada da superfície do substrato. No entanto, não foi evidenciada qualquer separação em nenhum dos experimentos. Todos os casos com contaminação interfacial  $\geq 30\%$  foram encontrados nos experimentos com 2 aplicações de camada, o que leva à conclusão que dois fatores principais foram contribuintes para esta condição indesejável nos corpos de provas.

O primeiro é que resíduos das camadas de molibdênio anteriores ainda estavam presentes na interface, determinando que a operação de decapagem por jateamento não foi totalmente eficiente. Isto em parte pode ser explicado devido às características do pó de molibdênio, que por possuir alto ponto de fusão requer que as partículas permaneçam por tempo maior no arco plasma e propiciam um ciclo maior de resfriamento, melhorando a interação entre o metal base e as partículas aspergidas, fenômeno também foi mostrado no trabalho de MATEJICEK<sup>[22]</sup>, tornando a remoção da camada existente uma operação de difícil execução.

O segundo está relacionado às granalhas de óxido de alumínio de jateamento que podem ficar incrustadas no substrato, efeito potencializado devido aos 3 ciclos de jateamento que a peça é submetida: o primeiro na preparação para metalização, o segundo na remoção da camada existente e o terceiro na preparação da superfície para a aplicação da segunda camada. Nas peças com uma única aplicação, a peça é submetida a somente uma etapa de jateamento.

As figura 5.3 mostra a interface do corpo de provas 8.1 com alto nível de contaminação por resíduos de camada anterior, e a figura 5.4 mostra a interface do corpo de provas 5.3, apresentando contaminação por incrustação de granalha de óxido de alumínio de jateamento com largura de 0,0024", e também por resíduos de camadas pré-existentes. A ampliação utilizada nestas imagens foi de 200 vezes.

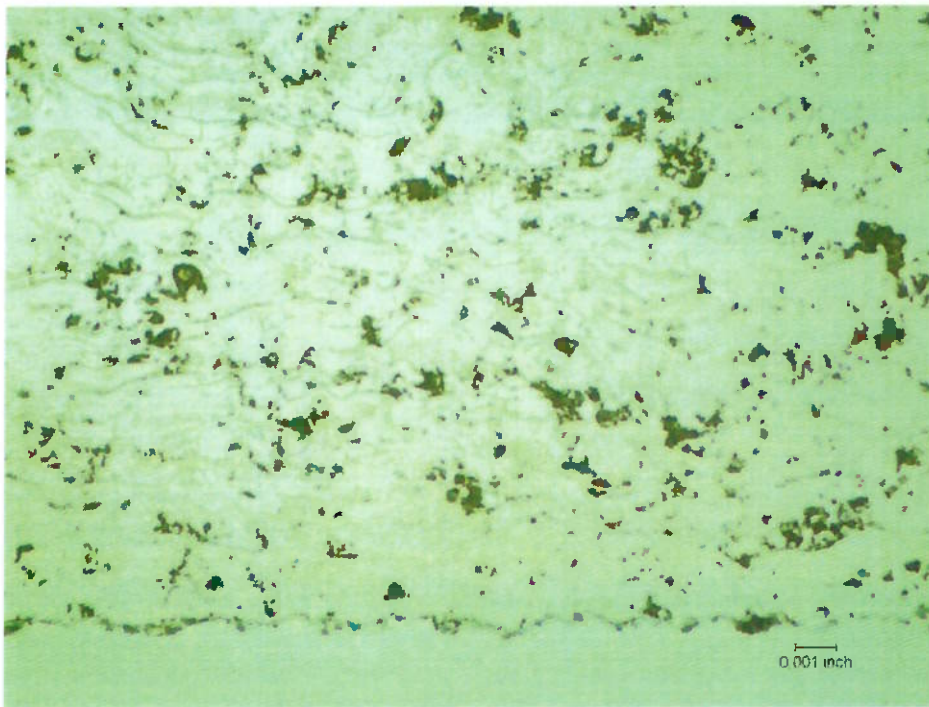


Figura 5.3 – Contaminação de interface por resíduos de camadas – cp. nº 8.1

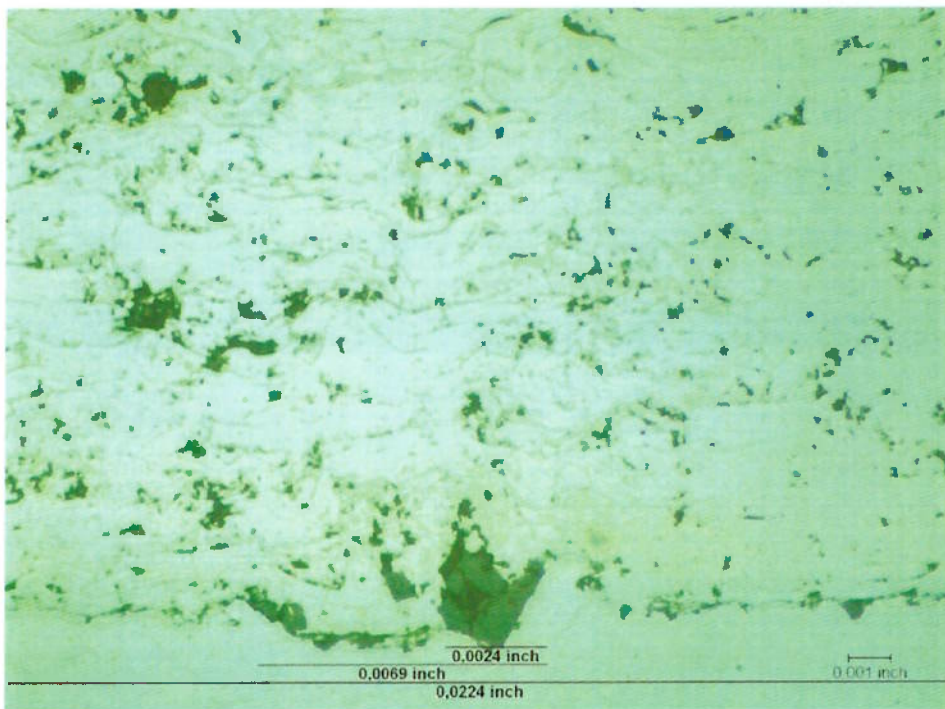


Figura 5.4 – Contaminação de interface por resíduos de camadas e incrustação de granalha de jateamento – cp. nº 5.3

Por outro lado, a maioria dos experimentos que tiveram a camada aplicada duas vezes apresentaram resultados satisfatórios de contaminação de interface dentro nos níveis de aceitação, provando que, desde que atenção e cuidados sejam tomados durante a operação de jateamento abrasivo para remoção da camada pré-existente, é possível efetuar este procedimento em peças atualmente metalizadas com molibdênio que necessitem reparo com este processo de revestimento.

Analisando conjuntamente os resultados de contaminação com a dimensão da gralha de jateamento de preparação de superfície utilizada, conclui-se que nos experimentos com níveis de contaminação de 10% e 30%, o efeito foi neutro. Para os experimentos com contaminação de 20%, observa-se na maioria dos casos a utilização do óxido grana 20, sendo o inverso nos casos de contaminação de 35%, onde a maior participação foi do óxido grana 60.

As figuras 5.5 e 5.6 mostram, respectivamente, resultados de contaminação de interface considerados aceitáveis, com preparação com óxido de alumínio grana 20 – corpo de provas 1.1 - e com grana 60 – corpo de provas 4.1. Em ambas a ampliação utilizada foi de 100 vezes.

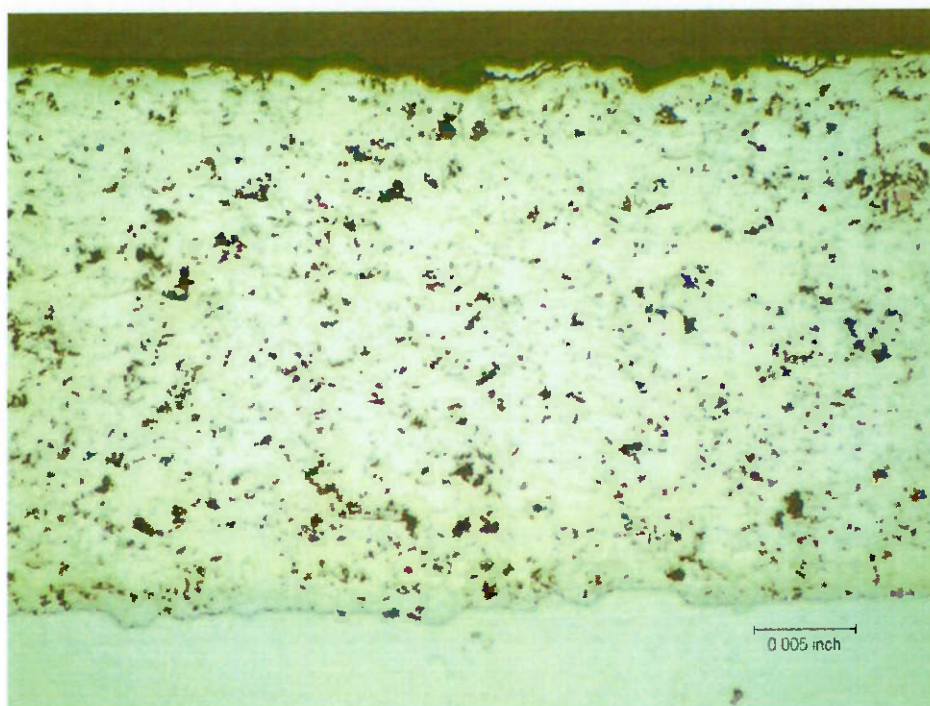


Figura 5.5 – Jateamento com grana 20 - contaminação de interface aceitável  
cp. nº 1.1

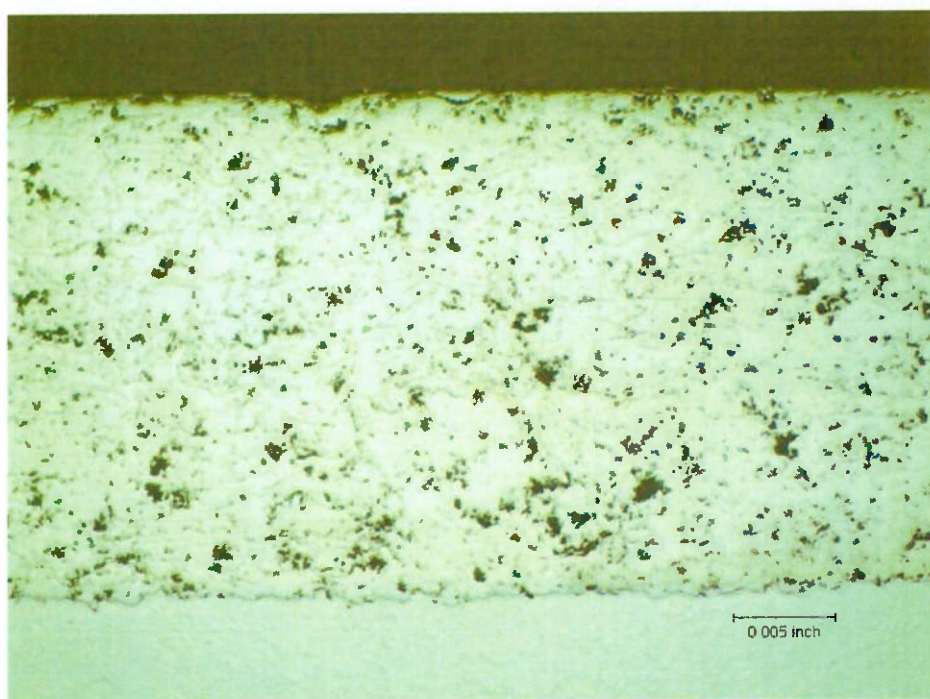


Figura 5.6 – Jateamento com grana 60 - contaminação de interface aceitável  
cp. nº 4.1



Considerando que em todos os casos de remoção da camada existente foi utilizado óxido de alumínio grana 80, a conclusão é que devido ao baixo poder de remoção de material do óxido grana 60 na preparação da superfície para metalização, eventuais resíduos de revestimentos anteriores podem não ter sido totalmente removidos. Como os melhores resultados foram obtidos com o óxido grana 20, este fato evidencia que a maior capacidade de remoção de material, propiciado pelo óxido de maior dimensão, justifica os melhores resultados obtidos com o óxido grana 20.

Quanto aos efeitos do pré-aquecimento na contaminação de interface, foi observada pequena tendência de corpos de prova com interfaces de melhor qualidade nos casos em que foi realizado o pré-aquecimento na temperatura de 150°C, responsável pelos casos com a menor contaminação interfacial de 10%. Considerando todos os experimentos com contaminação interfacial aprovada pelo procedimento utilizado, o pré-aquecimento a 150°C está presente em apenas 53,8% dos resultados, o que não propicia afirmar com segurança que, na variação estudada, este tenha uma inequívoca influencia nos resultados.

É de conhecimento os efeitos benéficos do correto pré-aquecimento no substrato no intuito de eliminar resíduos de poeira ou umidade que tenham se formado na superfície jateada, mas como nos experimentos as metalizações foram executadas imediatamente após as operações de jateamento, ficou comprovado que a alteração do valor deste parâmetro, nas faixas estudadas, tem pouca influência nos resultados de contaminação interfacial.

## 5.5 NÚMERO DE PARTÍCULAS NÃO FUNDIDAS

As partículas do pó de molibdênio que não foram suficientemente aquecidas durante a aspersão em direção ao metal base podem se incorporar à camada metalizada. Esta característica é conhecida como partículas não fundidas e podem ser encontradas em praticamente todo tipo de material aspergido pelo processo plasma spray. Se encontradas em grande número em uma mesma camada podem comprometer a integridade do revestimento.

Durante a avaliação da camada no microscópio, as partículas não fundidas são identificadas pelo formato (circular ou oval com razão de 3:2), tamanho (devem ser maiores que 0,002" na maior diagonal) e adesão na camada metalizada, pois forma-se uma camada de óxidos ao redor destas. Caso a característica encontrada não satisfaça estas três condições ela não deve ser considerada como partícula não fundida.

Conforme procedimento adotado para avaliação dos corpos de provas neste experimento, o número máximo permitido de partículas não fundidas em cada campo de visão (FOV) é de 3 unidades. Porém, se esta condição fosse observada em vários "FOVs" em uma mesma camada durante a avaliação no microscópio, o revestimento deveria ser rejeitado.

Os resultados das avaliações das camadas de cada corpo de provas, quanto ao número de partículas não fundidas, podem ser observados na tabela 5.5.

TABELA 5.5 – QUANTIDADE DE PARTÍCULAS NÃO FUNDIDAS NAS CAMADAS

Corpo de Prova (nº)	Grana do óxido de jateamento (Mesh)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Quantidade de aplicações	Partículas não fundidas (nº)
1.1	20	90	1	0
1.2	20	90	1	0
2.1	60	90	1	1
2.2	60	90	1	0
3.1	20	150	1	0
3.2	20	150	1	1
4.1	60	150	1	1
4.2	60	150	1	0
5.1	20	90	2	0
5.3	20	90	2	0
6.1	60	90	2	1
6.3	60	90	2	0
7.1	20	150	2	0
7.3	20	150	2	0
8.1	60	150	2	0
8.3	60	150	2	0

Nos corpos de provas preparados para este experimento, o maior número de partículas não fundidas encontrado foi de 1 por "FOV", determinando a excelente qualidade das camadas e comprovando que, tanto os parâmetros de metalização quanto o procedimento adotado, foram adequados à camada de molibdênio.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram, em ampliação de 200 vezes, exemplos de partículas não fundidas encontradas nas camadas dos corpos de provas 2.1 e 4.1 respectivamente. É importante observar que estas apresentam o formato oval e também as camadas de óxidos que envolvem as partículas e as tornam de fácil caracterização.



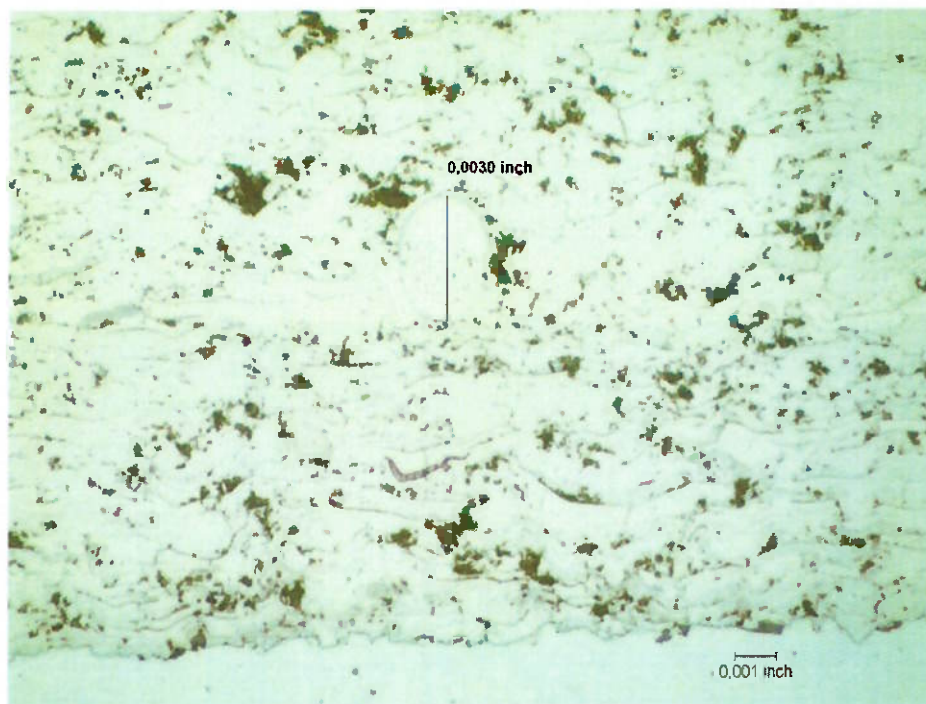


Figura 5.7 – Partícula não fundida com diagonal de 0,003" – cp. nº 2.1

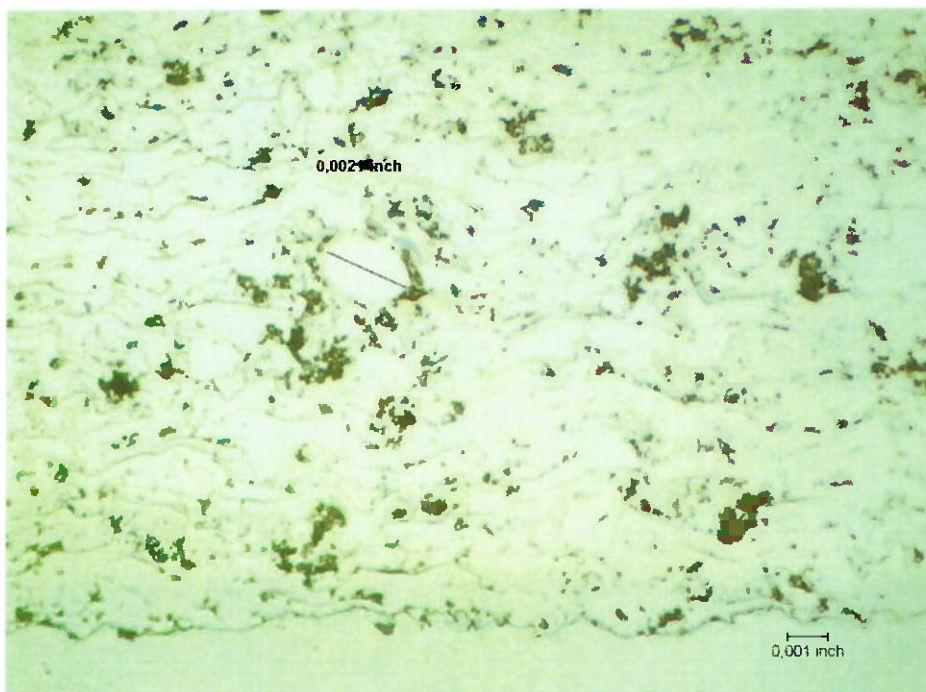


Figura 5.8 – Partícula não fundida com diagonal de 0,0021" – cp. nº 4.1

Do total de amostras onde foram encontrados no máximo 1 partícula não fundida por "FOV", a maioria delas apresentou porosidade de camada de 5%, indicando que há a tendência de ocorrência desta característica em camadas com maior nível de porosidade. Como já foi comprovado que o nível de porosidade está também relacionado à temperatura de pré-aquecimento do substrato, entende-se que há uma relação de maior ocorrência de partículas não fundidas em peças submetidas a menor temperatura de pré-aquecimento. Porém, o número de amostras deste experimento não permite afirmar com segurança esta conclusão.

Em alguns casos foram evidenciadas características semelhantes, porém não satisfaziam as 3 condições necessárias para classificá-las como partículas não fundidas. As figuras 5.9 e 5.10 ilustram a condição descrita, com ampliação de 200 vezes, referentes aos corpos de provas 2.2 e 4.2 respectivamente.

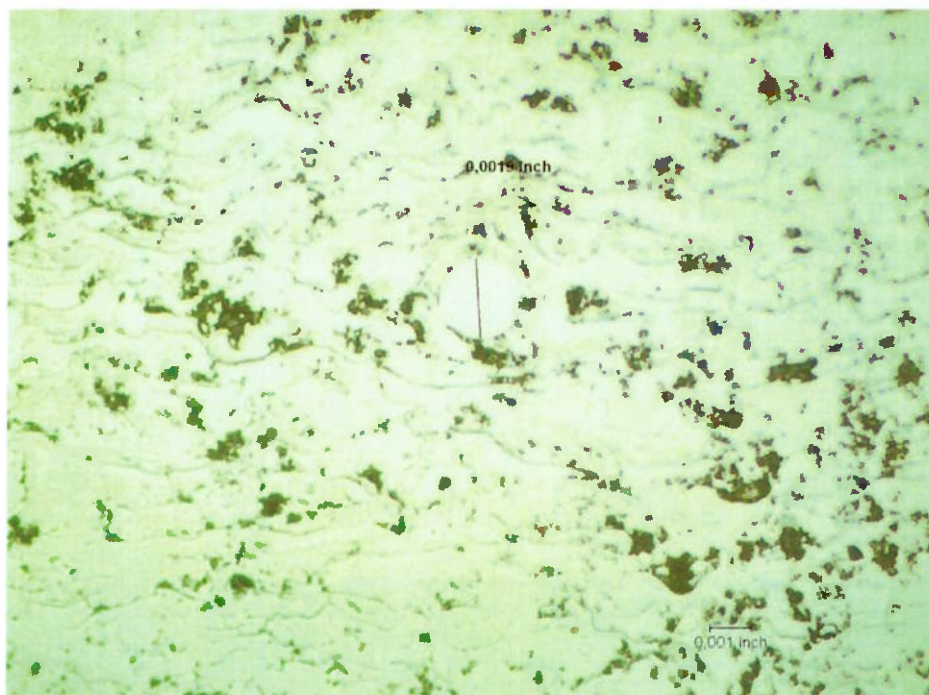


Figura 5.9 – Partícula de molibdênio com diagonal de 0,0019" – cp. nº 2.2

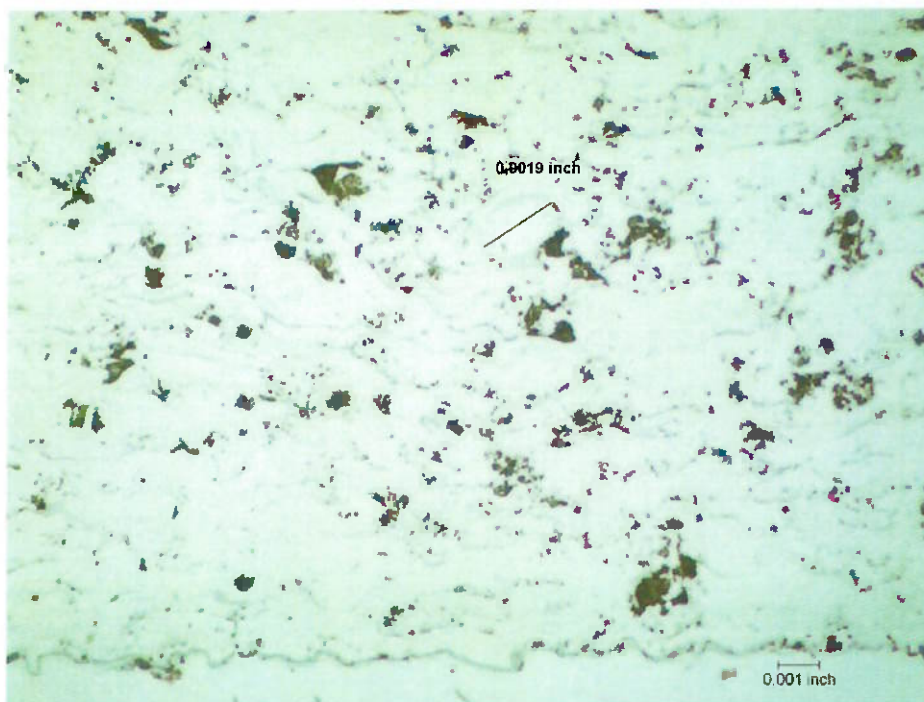


Figura 5.10 – Partícula de molibdênio com diagonal de 0,0019" – cp. nº 4.2

## 5.6 MODELAMENTO MATEMÁTICO DO EXPERIMENTO

Visando a compreensão e o entendimento do processo de metalização deste trabalho, foi feito o modelamento matemático das variações estudadas.

Para isto, foi utilizada a técnica de valores médios citada por BOX<sup>[34]</sup>, onde as repetições são executadas para dar maior robustez ao modelo. Os valores médios utilizados para o modelamento matemático são apresentados na tabela 5.6 a seguir.

TABELA 5.6 – VALORES MÉDIOS PARA O MODELAMENTO MATEMÁTICO

Corpo de Prova (nº)	Grana do óxido de jateamento (Mesh)	Temperatura de pré aquecimento	Quantidade de aplicações	Porosidade (% volumétrica)	Contaminação de interface (%)	Partículas não fundidas (nº)	Dureza da camada metalizada (HR30T)
1	20	90	1	6,3	15,0	0,0	79,89
2	20	90	2	5,0	32,5	0,0	79,04
3	20	150	1	3,5	10,0	0,5	78,75
4	20	150	2	3,5	25,0	0,0	79,71
5	60	90	1	5,0	15,0	0,5	80,58
6	60	90	2	5,0	32,5	0,5	79,13
7	60	150	1	2,0	10,0	0,5	80,04
8	60	150	2	2,0	32,5	0,0	80,86

De posse destes dados, foram feitos os modelos com a técnica de regressão linear simples.

Para incluir no modelo os valores da quantidade de aplicações este atributo foi informado com a adição de uma dezena, respectivamente números 11 e 12, conforme primeira ou segunda aplicação da metalização. Este artifício visou minimizar a influencia que os números das quantidades originais 1 e 2 teriam no modelo por informar a este, erroneamente, que os resultados de 2 aplicações seriam duas vezes maiores. Foram também testados modelos com adições de centena (101 e 102) e milhar (1001 e 1002), porém os resultados foram praticamente os mesmos.

Os modelos resultantes para a quantidade de aplicações, pré-aquecimento, granalha de jateamento e os respectivos coeficientes de correlação R2 e seus efeitos sobre a porosidade da camada, contaminação superficial, partículas não fundidas e dureza da camada são apresentados na tabela 5.7:



TABELA 5.7– MODELOS DE REGRESSÃO PROPOSTOS

Modelo proposto	R2	Quantidade de aplicações	Temperatura de Pré-aquecimento	Grana do óxido de jateamento	Constante
Porosidade da camada	0,9414	-0,3125	-0,0427	-0,0266	13,8125
Contaminação interfacial	0,9697	18,1250	-0,0729	0,0469	-180,0000
Partículas não fundidas	0,5000	-0,2500	0,0000	0,0063	2,8750
Dureza da camada	0,3562	-0,1300	0,0030	0,0201	80,0800

Destes modelos foram considerados aceitáveis os modelos da porosidade da camada e o da contaminação interfacial, respectivamente os maiores valores do coeficiente de correlação R2. A relação entre os dados obtidos e os dados estimados com os modelos é apresentada nas figuras 5.11 e 5.12 a seguir.

Na figura 5.11 é apresentada a comparação dos dados previstos x dados obtidos com o modelo desenvolvido para a previsão da contaminação interfacial.

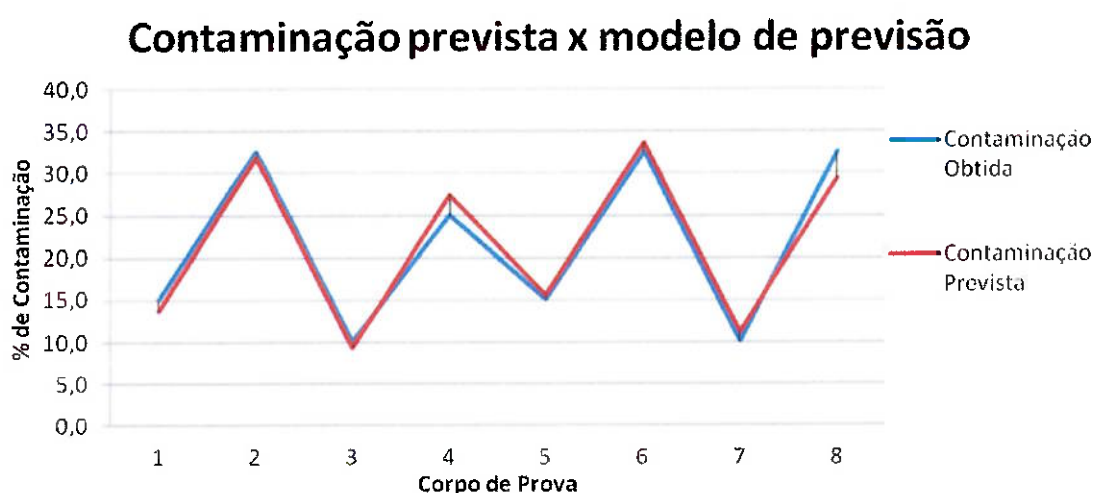


Figura 5.11 – Modelo proposto para a previsão da contaminação interfacial

Na interpretação dos resultados da contaminação interfacial foi identificada a influência de cada fator estudado, tendo sido apresentados os valores de  $21,56 \pm 1,210$  para a média dos valores e  $1,875$  para a influência do fator 1 (dimensão da granalha de jateamento),  $-4,375$  para a influência do fator 2 (temperatura de pré aquecimento) e  $18,125$  para a influência do fator 3 (1ª ou 2ª aplicação). As interações entre fatores também foram calculadas e seus resultados foram: interação de fatores 12 =  $1,875$ , fatores 13 =  $1,875$ , fatores 23 =  $0,625$  e interação de fatores 123 =  $1,875$ . Todos os fatores apresentam o erro estimado de  $\pm 2,420$  o que permitiu seguramente desprezar todas as interações por terem apresentado como resultados valores menores que o valor do erro estimado.

A previsão dos valores de porosidade da camada é apresentada na figura 5.12 onde pode ser observado o gráfico com os dados previstos x dados obtidos com o modelo desenvolvido para este trabalho.

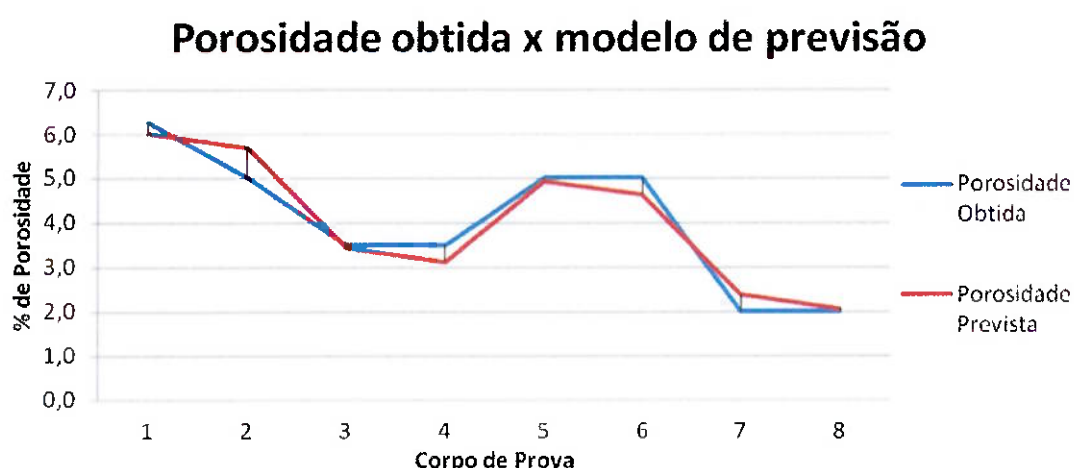


Figura 5.12 – Modelo proposto para a previsão da porosidade da camada

Na interpretação dos resultados da porosidade da camada foi também identificada a influência de cada fator estudado, tendo sido apresentados os valores de  $4,03 \pm 0,307$  para a média dos valores e  $-1,062$  para a influência do fator 1 (dimensão da granalha de jateamento),  $-2,562$  para a influência do fator 2 (temperatura de pré-aquecimento) e  $-0,312$  para a influência do fator 3 (1ª ou 2ª aplicação). As interações entre fatores também foram calculadas e seus resultados foram: interação de fatores 12 =  $-0,437$ , fatores 13 =  $0,312$ , fatores 23 =  $0,312$  e interação de fatores 123 =  $-0,312$ . Todos os fatores apresentam o erro estimado de  $\pm 0,615$  o que permitiu seguramente desprezar todas as interações por terem apresentado como resultados valores menores que o valor do erro estimado.

Em relação aos modelos obtidos para as partículas não fundidas e para a dureza da camada, estes não apresentaram resultados satisfatórios, o que pode ser comprovado pelos baixos coeficientes de correlação apresentados na tabela 5.7.

Sobre estes modelos as seguintes considerações são propostas:

Os dados obtidos para a medição das partículas não fundidas foram no intervalo entre 0 e 1. Dados desta dimensão propiciam modelos que ajustam no ponto médio e so acertem metade dos casos, por isso o coeficiente de correlação  $R^2$  de 0,50. Neste caso, onde os valores poderiam ser qualquer outro número inclusive maior que o valor máximo de 1 encontrado, fica evidente que as variáveis escolhidas para este estudo não propiciaram alterações significativas para os

resultados pesquisados, ou dizendo de outra forma, a variação da quantidade de partículas não fundidas depende mais de outros fatores não considerados neste estudo do que dos fatores temperatura de pré-aquecimento, dimensão da granalha de jateamento e quantidade de aplicações que foram os fatores aqui considerados.

Em relação ao modelo proposto para a estimativa da dureza da camada depositada, que também não gerou um bom resultado, visto seu coeficiente de correlação  $R^2$  ser apenas 0,35, ocorre uma explicação distinta: Os dados resultantes ocorrem num intervalo entre 79,04 e 80,86 e o modelo adiciona uma constante de 80,08. Este fato mostra que a variação obtida na dureza não é significativa de ser reportada com segurança como consequência das alterações dos parâmetros que foram estudados neste trabalho, estando muito mais próximas de ser seguramente reportadas como variações normais do processo e da própria aquisição de dados, não podendo também ser seguramente relacionadas com os parâmetros e variáveis aqui estudados.

Desta forma, este modelo também não foi avaliado como adequado para ser representativo do fenômeno estudado.



## **6. CONCLUSÕES**

Com base no experimento e nos materiais e métodos empregados neste trabalho é possível concluir que:

- 6.1 O pré-aquecimento a uma maior temperatura favorece a sobreposição organizada das partículas de molibdênio ao impactarem com a superfície do substrato, provocando menor quantidade de espaços vazios entre si e resultando em menor nível de porosidade da camada e menor número de partículas não fundidas. Todas as amostras com 2% de nível de porosidade foram pré-aquecidas a 150°C.
- 6.2 A variação da dimensão da granalha de jateamento e da quantidade de aplicações em uma mesma superfície não exercem influência isoladamente nos valores de porosidade da camada de molibdênio.
- 6.3 Em superfícies submetidas à primeira aplicação da camada, o tamanho da granalha de óxido de alumínio de jateamento para preparação da superfície em aço SAE 8620 tem efeito idêntico nos resultados de contaminação de interface, indicando que é possível obter interfaces de boa qualidade seja com óxido de alumínio grana 20 ou grana 60.
- 6.4 Embora as amostras tenham apresentado níveis de contaminação superiores por incrustação de granalhas de jateamento e resíduos das camadas anteriores, é possível efetuar a remoção da camada de molibdênio existente

e reaplicar nova camada com níveis de qualidade aceitáveis, desde que observados todos os cuidados durante os ciclos de jateamento necessários.

- 6.5 Dentre as amostras com duas aplicações de molibdênio com níveis de contaminação de interface acima dos 30% observa-se que estas foram jateadas com óxido de alumínio grana 60 na proporção de 2:1, indicando assim uma necessidade de maiores cuidados ao escolher este tamanho de abrasivo nos casos em que se optar pela reaplicação da camada.
- 6.6 O jateamento com granalha de óxido de alumínio grana 20 foi mais eficiente na preparação da superfície para aplicação da segunda camada de metalização, demonstrando maior poder de remoção de resíduos da primeira camada que não tenham sido removidos pelo jateamento com grana 80.
- 6.7 A variação total dos valores de dureza das camadas estudadas de 1,79% mostra que os fatores estudados neste trabalho, ou as faixas de variação para eles escolhidas não possibilitam afirmar com segurança que possam ser responsáveis por variações significativas nos resultados de dureza da camada de molibdênio.
- 6.8 Do total de amostras onde foram encontrados pelo menos 1 partícula não fundida por "FOV", é importante observar que em 75% destes casos nota-se um valor de porosidade de camada de 5%, indicando que há correlação entre estes dois fatores.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- 7.1 Estudar mais detalhadamente a influência do pré-aquecimento com o valor intermediário de 120°C, que confirmaria o comportamento linear por estar exatamente no ponto médio dos valores estudados, e analisar a viabilidade de se eliminar o mesmo pelas óbvias razões econômicas.
- 7.2 Executar o experimento utilizando óxido de alumínio de jateamento grana 40, no intuito de estudar o nível de contaminação de superfície proporcionado e também o poder de remoção de eventuais resíduos de camadas anteriores nos casos de 2ª aplicação.
- 7.3 Tendo em vista que os valores da dureza obtidos não mostraram ser consequência da variação dos fatores estudados, estudar a influência de outros fatores do processo de metalização na dureza, como por exemplo: distância da aplicação, taxa de alimentação de pó e a vazão de gás primário.
- 7.4 Conforme a observação da correlação apresentada entre partículas não fundidas com o nível de porosidade da camada, aprofundar o estudo da relação entre estes dois fatores separada e isoladamente visando identificar de que maneira podem contribuir para a melhoria da qualidade da camada depositada.

- 7.5 Estudar a correlação do nível da contaminação interfacial com a adesão da camada no substrato, através de ensaios de tração para cada tipo de preparação da superfície executada.
- 7.6 Efetuar medição da rugosidade superficial das superfícies jateadas em preparação para a metalização, de forma a concluir a importância desta característica nos valores de adesão das camadas.
- 7.7 Efetuar a caracterização da energia de adesão das camadas de molibdênio aplicadas nos corpos de provas, determinando a influência de cada variável do processo na produção de camadas com valores de aderência aceitáveis.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. FIORETTI, M.; MALAMAN, L. G. S. Sulzer Metco e o Processo de Metalização. 15 p. Apostila de Curso.
2. BOMFORD, S. Sulzer Metco Thermal Spray Training, 2008. 71 p.
3. CLARA, M. S. Módulo Revestimento, Programa de Cursos Modulares em Tecnologia de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, 1993, p. 89 - 95.
4. AGUIAR, A.; SEGATTO, K. F.; CORREIA, R. Metalização, Seminário sobre Aspersão Térmica, 2004. 18 p.– Universidade do Grande ABC.
5. METCO, S. Thermal Spray – Process description, properties, applications – issue 3, 2005. 23 p.
6. MARQUES, P. V. Aspersão Térmica, artigo 16 p. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/proso105.pdf>> Acessado em: Mar/2009.
7. TAFA, Praxair Surfaces Technologies, Plasma Product Line. 33 p. Catálogo eletrônico. 2004.
8. METCO, Product Data sheet – TriplexPro TM-200, issue 4. 2008. 8 p.
9. SANTOS, E. J. F.; TOLEDO, L. B.; CARRILHO, M. S. Comparativo entre os Processos de Aspersão Térmica na Manutenção, artigo 16p. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/pb.pdf>> Acessado em: Jan/2010.
10. METCO, S. Thermal Spraying – Process description, properties, applications – issue 4, 2008. 24 p.
11. STELLITE, D. Hardfacing Alloys Division – Process Overview. USA. 2007. 23p.
12. RR, Flame Spraying (Thermal Deposition) – Training brochure 01. UK. 1992. 52p.

13. METCO, S. 3MBM / 3MBH Plasma Spraying – Component manual 57600,a – manual eletrônico, 2003. 30 p.
14. METCO, S. Product Data Sheet – F4-MB Plasma spray gun – manual eletrônico – issue 1, 2003. 4 p.
15. PATSIAS, S.; BYRNE, A.; SHIPTON, M. Hard Coatings: Optimization of damping effectiveness by controlling the deposition parameters. UK. 15 p. Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.199.8782> Baixado em Junho de 2012.
16. WONDEREN, M. V. Unique Thermal Spray Cabinet with High Enthalpy. The Netherlands. 6 p. Disponível em [http://www.progressivesurface.com/downloads/casestudies/Unique Thermal Spray Cabinet with 100HE Plasma.pdf](http://www.progressivesurface.com/downloads/casestudies/Unique%20Thermal%20Spray%20Cabinet%20with%20100HE%20Plasma.pdf). Baixado em Junho de 2012.
17. SPRAYTIME, *The International Thermal Spray Association* (ITSA) – Volume 15, number 1. First quarter 2008. p16.
18. ENGLAND, G. Plasma Spray Process. Disponível em <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>. Acessado em Junho de 2012.
19. JIANG, X.; MATEJICEK, J.; SAMPATH, S. Substrate temperature effects on the splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings. Part II: case study for molybdenum. USA, 1999. 10p.
20. MOSTAGHIMI, J.; CHANDRA, S. Splat formation in plasma-spray coating process. Lecture presented at the 15th International Symposium on Plasma Chemistry,. France, 2001. 5p.
21. ENGLAND, G. Plasma Spray Process. Disponível em <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>. Acessado em Junho de 2012.

22. MATEJICEK, J.; SAMPATH, S. Intrinsic Residual Stresses in Single Splats Produced by Thermal Spray. USA, 2001. 7p.
23. IMR TEST LABS Aerospace Metallography & Coating Evaluation Training Program. Revision "B". USA, 2005. 394p.
24. PALHARINI, M. J. A. Motores a Reação. Mecânicos – Pilotos – Engenheiros. 7ª ED. São Paulo, 2006. P. 8-12.
25. EBLINGER, J. Materials for Competitive Aero Engines. MTU Aero Engines GmbH. Shanghai, China, 2011. 23P.
26. EAGLESGATE – Portal português de manutenção de motores aeronáuticos. Materiais utilizados na construção de motores aeronáuticos. Portugal, 2010 Disponível em: <<http://eaglesgate.com/materiais.htm>> Acessado em: Jun./2012.
27. SCHAUBHUT, A.; SUOMI, E.; ESPINOSA, P. Aircraft Engine Bearings and Splines. Mechanics of Contact and Lubrication, ME5656 - Department of Mechanical & Industrial Engineering, Northeastern University. 2009. 15P.
28. NSK Rolamentos Catálogo geral . 71p. Disponível em: <[http://www.nsk.com.br/7\\_catalogo.asp](http://www.nsk.com.br/7_catalogo.asp)> Baixado em: Jun./2012.
29. STANDARD Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials: E18-11, American Society for Testing and Materials. 2011.
30. PRAXAIR, S. T. Thermal Spray Powders – MO-102 Technical Bulletin – High purity, fully densified, spherical molybdenum powder – rev. 5, 1998. 2 p.
31. ASM Thermal Spray Society (TSS) – Accepted Practices Committee on Metallography – Accepted Practice – Molybdenum Thermal Spray Coatings USA. 8p.

32. PUERTA, D.; ANDERSON, F.; GEARY, A. The Metallographic Characterization of Thermal Spray Coating Microstructures. International Thermal Spray Conference & Exposition. USA, 2008. 3p.
33. RUSSELL, J. B. Química geral. Editora McGraw-Hill. 1ª edição. Brasil, 1980. Capítulos 5 e 6.
34. BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S., "Statistics for Experimenters: Design, Discovery and Innovation", 2nd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.



**ANEXO I – Certificado de Calibração Unidade Controladora**  
**Sulzer Metco 9MC**

***9MC CERTIFICATE OF CALIBRATION***

Sulzer Metco (US) Inc.  
1101 Prospect Avenue  
PO Box 1008  
Westbury, NY 11590-0201  
Phone: (516) 338-2316  
Fax: (516) 334-0083

Service Number 330010604  
Calibration Date 7/7/2011  
Serial Number 9MCKM9251000-5 (MP001)  
Calibrated By Rick Lomeli  
Calibration Due 7/2012

Your Plasma console was calibrated using the following equipment:

1. Digital Meter	Serial #	Kit# 3
2. Flowmeter	Serial #	D004.3
3. Amp Clamp Meter	Serial #	Kit #3
4. Pressure Calibrator	Serial #	Kit #3

Copies of the calibration charts are attached. The charts will indicate the standard and percent of error of the calibrated equipment. Also, copies of the NIST traceable certificates of calibration for the above equipment are on file at Sulzer Metco Westbury, New York and are available upon request.

Please do not hesitate to call if we can be of further assistance to you.

Sincerely,



Rick Lomeli  
Field Service Engineer

## **ANEXO II – Certificado de Calibração Medidor de Temperatura Digital Infravermelho Minipa MT-350**

ASSISTÊNCIA TÉCNICA ESPECIALIZADA MITUTOYO, MAHR, STARRETT, DIGIMESS, COMPAG, YEBAL

FILIADO A REMESP

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO NMST RR582 / 2011**

**DADOS DO CONTRATANTE**

CONTRATANTE: O MESMO

**DADOS DO CLIENTE**

<b>DADOS DO INSTRUMENTO</b>				
ORDEN DE SERVIÇO NÚMERO:	09925/2011	ITEM:	2	
INSTRUMENTO CALIBRADO:	TERMOMETRO			
TIPO DO SENSOR:	ÓTICO	SERIE:	0,5 °C	
MAIOR DIVISÃO:	0,5 °C	CAPACIDADE:	-30° a 550 °C	
FABRICANTE:	MINIPA	PATRIMÔNIO:	MT-342	

**CONDIÇÕES AMBIENTAIS:**

TEMPERATURA:	20 °C	± 2 °C
UMIDADE:	55 %UR	± 20 %UR

**PADRÕES UTILIZADOS**

INSTRUMENTO	Nº DO CERTIFICADO	LABORATÓRIO	DATA DA CALIBRAÇÃO	VALIDADE
TERMOMETRO DIGITAL	LV 00864/10	RBC - Nº 127	19/jan-10	Jan-12

**PROCEDIMENTO DA CALIBRAÇÃO**

Para esta calibração foi utilizado o procedimento IC-01, onde o instrumento é calibrado por comparação direta a um padrão e verificando-se os desvios conforme tabela anexa.

**NOTA:** \*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição pelo fator  $K=2$ , que para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

**NORMA DE REFERÊNCIA:** NBR-13522-DE OUTUBRO/95

**\* ANTES DA UTILIZAÇÃO DO INSTRUMENTO / EQUIPAMENTO VERIFICAR O RESULTADO (CALIBRAÇÃO / VERIFICAÇÃO / CONFORMIDADE) CONTIDO NA TABELA DE VALORES, SE ATENDE O SEU CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO / UTILIZAÇÃO.**

## **ANEXO III – Certificado de Calibração Medidor de Espessura Kroeplin B-220**

### **CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 15511-12/SP**

---

**1. Contratante:****1.1 Solicitante: O mesmo.**

---

**2. Descrição****Medidor de Espessura Digital****Marca: Kroeplin****Identificação: RC-332****Série: LD19H001****Faixa de Indicação: 0 a 0,8 pol.****Valor de uma divisão: 0,0005 pol.****Resolução adotada: 0,0005 pol.**

---

**3. Método Utilizado**

**3.1 Procedimentos:** Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 revisão 15 e instrução de processo IPR-066 revisão 01.

**3.2 Norma de referência:** DIN EN ISO 2178.

**3.3 Ciclos de medição:** Os valores foram considerados após média de três medições.

---

**4. Padrão Utilizado/Periodicidade**

Jogo de blocos-padrão, marca Pitter Gauge, nº de série 8984, nosso nº JBP-04, certificado nº 133/10 calibrado pelo Senai em 06.04.10.

Próxima calibração de nosso padrão: Abr/2013.

---

**5. Incerteza das Medições**

A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k$ , para um nível de confiança de aproximadamente 95%, de acordo com EA 4/02, conforme nosso procedimento PGQ-018 revisão 14.

---

**6. Condições Ambientais**

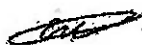
Temperatura:  $20 \pm 1$  °C / Umidade:  $55 \pm 5$  %.

---

Calibração efetuada no local.

Data da calibração: 09/05/2012

Data da Emissão: 14/05/2012



Everton E. Pereira  
Técnico Executante

## **ANEXO IV – Certificado de Conformidade / Composição** **Química do Pó de Molibdênio Praxair MO-102**

Praxair Spec: PS 035009      Shipping Order #: 1715174      Printed Date: 18/JAN/2012  
 Item Number: 035009-05      Customer PO #: 13194-RESELL  
 Lot Number: 85      Quantity: 60      UM: LBS

All elements measured in weight percent unless otherwise specified. Sampling Method per ASTM B215.

Chemistry	Test Method	Test Lab	Min	Max	Result	OK
Molybdenum	XRF	Praxair	99.50		99.80 ✓	Yes
Oxygen		Praxair		0.15	0.08 ✓	Yes
Sieve per ASTM B214	Test Method	Test Lab	Min	Max	Result	OK
+17	ASTM B214	Praxair		1	0 ✓	Yes
+200	ASTM B214	Praxair		15	3 ✓	Yes
+325	ASTM B214	Praxair	80		89 ✓	Yes

### PLI INFORMATION:

The materials meets the following requirements: CS 35-09, PWA 1313-2S Rev. J, PWA 1313 Rev. D, PM 819-13 Issue 9, EMS 56705 Rev. B, CPW 213 Rev. C, MSV-048 Rev. C

### LOT COMMENTS:

PRAXAIR SURFACE TECH VENDOR #90508

### COMMENTS:

MNR #:

*Marina Berzhnev*

Marina Berzhnev  
Chemist

### Statement of Conformity

Praxair Surface Technology certifies that processing, product testing, and inspection control of raw material and formulating procedures are in conformance with all applicable specifications, drawings, and/or standards. Complete test reports as required are on file. Powders do not have a shelf life & the expiration date of slurries is listed in the header above.

PST: 109658      C-6013

*Spec ranges shown above in Italics are target or nominal specifications only.*

\* indicates test is not required for routine acceptance.



(317) 240-2650  
Telefax (317) 240-2225  
Toll-Free Telefax 1-800-234-6738 U.S.A

AS9100 Registered  
Quality System

## ANEXO V – Certificado de Calibração Durômetro Mitutoyo ATK-600

ASSISTÊNCIA TÉCNICA ESPECIALIZADA MITUTOYO, MAHR, STARRETT, DIGIMESS, COMPAC, TESA.

FILIADO A REMESP

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO      NMST      RR51      / 2012

**DADOS DO CONTRATANTE**

CONTRATANTE: O MESMO

**DADOS DO CLIENTE**

CLIENTE:

ENDEREÇO:

**DADOS DO INSTRUMENTO**

ORDEM DE SERVIÇO NÚMERO:	INTERNA	
INSTRUMENTO CALIBRADO:	DUROMETRO DE BANCADA	
CÓDIGO:	810-257	SÉRIE:
MODELO:	ATK-600	40126
FABRICANTE:	MITUTOYO	Nº DE PATRIMÔNIO: DU - 003

**CONDIÇÕES AMBIENTAIS:**

TEMPERATURA:	20 °C
UMIDADE:	55%

**PADRÕES UTILIZADOS**

INSTRUMENTO	Nº DO CERTIFICADO	LABORATÓRIO	DATA DA CALIBRAÇÃO	VALIDADE
PADRÃO DE DUREZA	0260/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0261/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0262/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0263/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0264/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0265/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0266/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0267/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	0268/09	RBC - N°031	22-jan-09	jan-14
PADRÃO DE DUREZA	3566709	STARRETT	9-nov-08	nov-13

**PROCEDIMENTO DA CALIBRAÇÃO**

Material calibrado diretamente contra padrões de dureza.

NOTA: \* A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição pelo fator K=2, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

OBS: "ANTES DA UTILIZAÇÃO DO INSTRUMENTO / EQUIPAMENTO VERIFICAR O RESULTADO (CALIBRAÇÃO / VERIFICAÇÃO / CONFORMIDADE) CONTIDO NA TABELA DE VALORES, SE ATENDE O SEU CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO / UTILIZAÇÃO".