

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO AFONSO JULIO MOREIRA

TECNOLOGIA DE ASPERSÃO TÉRMICA POR *COLD SPRAY*: REVISÃO DO
PROCESSO, ANÁLISES E APLICAÇÕES

CURITIBA
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO AFONSO JULIO MOREIRA

TECNOLOGIA DE ASPERSÃO TÉRMICA POR *COLD SPRAY*: REVISÃO DO
PROCESSO, ANÁLISES E APLICAÇÕES

Trabalho apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico no
curso de Engenharia Mecânica, do Departamento
Acadêmico de Engenharia Mecânica, do Centro
Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

Orientador de Conteúdo: Prof. Dr. Ramón Sigifredo
Cortés Paredes.

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

CAIO AFONSO JULIO MOREIRA

TECNOLOGIA DE ASPERSÃO TÉRMICA POR *COLD SPRAY*: REVISÃO DO PROCESSO, ANÁLISES E APLICAÇÕES

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico no Curso de Engenharia Mecânica, pela seguinte banca examinadora:

Professor Doutor Ramón Sigifredo Cortés Paredes
Orientador – Departamento Acadêmico de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal, UFPR.

Professor Doutor Sergio Henke
Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal, UFPR.

Engenheiro Ângelo Marge
Gerente Industrial Revestell.

Curitiba, 16 de dezembro de 2016

À minha amada família, ao meu pai Lucimar, à minha mãe Sandra, à minha irmã Rafaela, à minha vó Carolina, à minha vó Tereza, por seu amor e dedicação ao longo dos anos. Aos meus amigos Sara, Gabriel, Evelyn, Lucas, Ester, Davi e Tallyta, por estarem sempre presentes. A todos os tios, primos, amigos e colegas, por seu carinho e apoio.

Em especial a Deus, a razão do meu existir.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pela atenção, acompanhamento e amizade.

Ao Curso de Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do Coordenador Professor Helio Padilha, pelo conhecimento concedido e pela contribuição em minha formação pessoal e acadêmica.

Aos colegas Guilherme e Oliveira, pela sua amizade e apoio nos estudos.

Ao docentes e demais funcionários do Curso de Engenharia Mecânica, pelo desprendimento e paixão demonstrados em suas funções.

À minha família e à minha amiga Sara, pelas sugestões, opiniões e apoio demonstrados para o desenvolvimento deste trabalho.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.”

Abraham Lincoln

RESUMO

A tecnologia *Cold Spray* (ou *Cold Gas Dynamic Spray*) é um método emergente de aspersão térmica que vem ganhando seu espaço na indústria por conta de uma série de características que o tornam competitivo. Este texto contém uma revisão bibliográfica do processo, coletada de obras técnicas desenvolvidas pelos próprios pioneiros da tecnologia, como Anatolii Papyrin, Vladimir Kosarev, Sergey Klinkov, Anatolii Alkhimov, Vasily M. Fomin, além de outros pesquisadores, apresentando suas principais considerações, estudos de parâmetros, aplicações e materiais, análise comparativas com outros processos e oportunidades de pesquisa e desenvolvimento.

Essa tecnologia tem como principais diferenças em relação aos outros métodos a deposição em alta velocidade de material ainda em estado sólido (baixa temperatura), segundo os resultados obtidos por pesquisadores do processo. Essa característica traz vantagens e levanta novas questões a serem exploradas, as quais tem sido objeto de estudo atualmente. Este trabalho, além de explicar o mecanismo de deposição das partículas observado em simulações, fará uma revisão quanto aos parâmetros e variáveis do processo, assim como a forma com que elas se relacionam e influenciam na qualidade final do revestimento. Um capítulo do presente texto será dedicado à análise dos materiais mais utilizados nessa tecnologia, dadas as condições de deposição do *Cold Spray*, e um status sobre o avanço de pesquisas de novos materiais. Assuntos como aplicação, equipamentos e suas variações, custos, vantagens e desvantagens da tecnologia também serão abordados.

Tudo isto é, em sua maioria, informação já existente porém disponível de forma esparsa e em idioma estrangeiro. Esta obra visa compilar tais informações entendendo que a implementação da tecnologia *Cold Spray* no Brasil configura-se como uma possibilidade próxima, aumentando a necessidade de um material introdutório em idioma local. Mesmo que não contenha toda a informação técnica existente, este trabalho é capaz de dar um primeiro direcionamento para um posterior conhecimento mais amplo e aprofundado do tema, fornecendo como referências uma literatura rica e atual.

Palavras-Chave: *Cold Spray*. Aspersão térmica. Revestimento de superfície.

ABSTRACT

The Cold Spray (or Cold Gas Dynamic Spray) technology is an emerging thermal spraying method that has earned ground on today industry thanks to its good features, which make it very competitive. This text contains a bibliographic review of this process, collected from technical publications written by the pioneers of this technology, such as Anatolii Papyrin, Vladimir Kosarev, Sergey Klinkov, Anatolii Alkhimov, Vasily M. Fomin, besides other researchers, presenting their main considerations, parameters, applications and material studies, comparative analysis and R&D opportunities.

This technology has as main differences to other conventional methods the high-speed deposition of a solid-state material (at relatively low temperatures), as reported by researchers of this technology. These characteristics bring on some advantages and bring up new issues to be explored, which currently have been study object. This paper, besides explaining the simulated particles deposition mechanism, will give a review about the process variables and parameters, even as the way they are related and they influence the final coating quality. One chapter of this paper is devoted to an analysis of the mainly used materials given the Cold Spray's deposition conditions, and shows a status report about the new material research progress. Subjects such as application, equipment and its variations, costs, quality pros and cons will also be discussed.

All of these are mostly already existing information, but they are available sparsely and in foreign language. This work aims to digest that information seeing that the implementation of Cold Spray technology in Brazil is a close possibility, increasing the need for an introductory material in local language. Even if it does not contain all the existing technical information, this work is capable of giving a first direction to a later and more detailed knowledge of this theme, providing as references some rich and recent literature.

Keywords: Cold Spray. Thermal spray. Surface coating.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - MORFOLOGIAS PARA PANQUECAS DEPOSITADAS. ASPERSÃO POR PLASMA - APS DE NI-CR EM SUBSTRATO DE AISI 304L; IMAGENS EM M.E.V.: (A) PANQUECA EM DISCO APRESENTANDO CONTORNO DISTINTO E VAZIOS NO CENTRO; (B) PANQUECA EM DISCO COM VAZIO CENTRAL E CONTORNO DISTINTO; (C) PANQUECA EM “FLOR”; (D) PANQUECA FRAGMENTADA; (E) PANQUECA MUITO FRAGMENTADA.	18
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO LABATS DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA. ADAPTADO DE “THERMAL SPRAY – PRACTICE, THEORY AND APPLICATIONS – 1997” – AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS.	18
FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO <i>COLD SPRAY</i> (SISTEMA ESTACIONÁRIO)	20
FIGURA 4 – COMPARAÇÃO DO PROCESSO <i>COLD SPRAY</i> E DEMAIS PROCESSOS DE ASPERSÃO QUANTO A VELOCIDADE DE PARTÍCULA E TEMPERATURA DE GÁS	21
FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE REVESTIMENTO DE COBRE APLICADO PELO PROCESSO <i>COLD SPRAY</i>	21
FIGURA 6 – INCIDÊNCIA E REFLEXÃO DE PARTÍCULAS DE ACRÍLICO SOBRE AS SUPERFÍCIES FRONTAL E LATERAL DE UM CORPO CILÍNDRICO.	26
FIGURA 7 – INCIDÊNCIA E REFLEXÃO DE PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO SOBRE AS SUPERFÍCIES FRONTAL E LATERAL DE UM CORPO CILÍNDRICO.	27
FIGURA 8 – VELOCIDADE DA PARTÍCULA PRÓXIMA AO SUBSTRATO X RAZÃO HÉLIO/AR (k_H) DO GAS DE FLUXO, PARA DIFERENTES TAMANHOS MÉDIOS DE PARTÍCULA.	29
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO COM AUMENTO DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA. PARTÍCULAS ACELERADAS COM MISTURA AR-HÉLIO (1-3) E AR PURO (4-6). MATERIAIS UTILIZADOS FORAM ALUMÍNIO (1 E 4), COBRE (2 E 5) E NÍQUEL (3 E 6)	31

FIGURA 10 – TRAJETÓRIA DAS PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO INCIDINDO SOBRE O SUBSTRATO DA FACE SUPERIOR DE UM CILINDRO. VELOCIDADE DE PARTÍCULAS DE: a) 250 m/s; b) 900 m/s	31
FIGURA 11 – MUDANÇA NA INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO ($d_{pm} = 30,2 \mu\text{m}$) COM SUBSTRATO DE COBRE COM O AUMENTO DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA: a) 730 m/s; b) 780 m/s; c) 850 m/s.....	32
FIGURA 12 – EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DE DIFERENTES MATERIAIS ASPERGIDOS EM SUBSTRATO DE COBRE VERSUS TEMPERATURA DE ESTAGNAÇÃO DO GÁS DE ASPERSÃO.....	33
FIGURA 13 – SIMULAÇÃO DE IMPACTO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE 25 μm E VELOCIDADE DE 600 m/s CONTRA UM SUBSTRATO DE AÇO BAIXO CARBONO. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E CAMPO DE TEMPERATURAS APÓS a) 15 ns; b) 30 ns. c) VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO APÓS O IMPACTO, PARA DIFERENTES VELOCIDADES. d) FORMAÇÃO DO ESGUICHO (OU “JET”).....	36
FIGURA 14 – SIMULAÇÃO DE IMPACTO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE VELOCIDADE DE 500 m/s CONTRA UM SUBSTRATO DE COBRE A UMA TEMPERATURA DE 20°C. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E CAMPO DE TEMPERATURAS APÓS a) 0,01 μs ; b), c) 0,05 μs ; d) 0,5 μs	37
FIGURA 15 – EVOLUÇÃO DO FORMATO DE UMA PARTÍCULA DE ALUMÍNIO DE 20 μm E VELOCIDADE DE 650 m/s E FORMAÇÃO DE CAVIDADE NO SUBSTRATO DE COBRE APÓS a) 5 ns; b) 20 ns; c) 35 ns; e d) 50 ns DE CONTATO NA INTERFACE	38
FIGURA 16 – EVOLUÇÃO DO FORMATO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE 20 μm E VELOCIDADE DE 650 m/s E FORMAÇÃO DE CAVIDADE NO SUBSTRATO DE ALUMÍNIO APÓS a) 5 ns; b) 20 ns; c) 35 ns; e d) 50 ns DE CONTATO NA INTERFACE	39

FIGURA 17 – FORMAÇÃO DE ESGUICHO COMPOSTO DE UM MATERIAL APENAS. a) PARTÍCULA DE ALUMÍNIO ASPERGIDA SOBRE SUBSTRATO DE COBRE; b) PARTÍCULA DE COBRE ASPERGIDA SOBRE SUBSTRATO DE ALUMÍNIO.....	40
FIGURA 18 – TEMPERATURA MÁXIMA NA INTERFACE PARTÍCULA / SUBSTRATO EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE PARTÍCULA NO PROCESSO DE ASPERSÃO DE a) SUBSTRATO DE COBRE COM PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO E b) SUBSTRATO DE ALUMÍNIO COM PARTÍCULAS DE COBRE.....	41
FIGURA 19 – EVOLUÇÃO DAS INSTABILIDADES INTERFACIAIS (VÓRTICES) ENTRE DOIS MATERIAIS DE CARÁTER VISCOZO EM MOVIMENTO PARALELO RELATIVO.....	43
FIGURA 20 – VELOCIDADE DA PARTÍCULA NO IMPACTO E VELOCIDADE CRÍTICA DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA.....	47
FIGURA 21 – TEMPERATURA MÁXIMA NA INTERFACE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO DA PARTÍCULA E DO TAMANHO DE PARTÍCULA .	48
FIGURA 22 – INTERVALO ÓTIMO DE TAMANHO DE PARTÍCULA, DENTRO DO QUAL A VELOCIDADE DE PARTÍCULA SUPERA A VELOCIDADE CRÍTICA, PROMOVENDO ADERÊNCIA EFETIVA E DENSIDADE ADEQUADA DO REVESTIMENTO.....	49
FIGURA 23 – TAXAS DE CONSUMO DOS GASES COMUMENTE UTILIZADOS NO PROCESSO COLD SPRAY PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (PRESSÃO, TEMPERATURA DE AQUECIMENTO E DIÂMETRO DA GARGANTA DO BOCAL).....	52
FIGURA 24 – VELOCIDADE CRÍTICA DE ASPERSÃO DE COBRE SOBRE SUBSTRATO DE COBRE NO PROCESSO COLD SPRAY EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE PARTÍCULA (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALORES ESTIMADOS).....	54

FIGURA 25 – OTIMIZAÇÃO DO INTERVALO ÓTIMO DE TAMANHO DE PARTÍCULA, DENTRO DO QUAL A VELOCIDADE DE PARTÍCULA SUPERA A VELOCIDADE CRÍTICA, PROMOVENDO ADERÊNCIA EFETIVA E DENSIDADE ADEQUADA DO REVESTIMENTO.....	54
FIGURA 26 – MÁXIMA ESPESSURA DO PERFIL DE REVESTIMENTO E DESVIO PADRÃO, PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE PISTOLA E SUBSTRATO ..	57
FIGURA 27 – PERFIL DO REVESTIMENTO DE CARÁTER ONDULADO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS PASSADAS	58
FIGURA 28 – ESPESSURA MÉDIA DE REVESTIMENTO E HOMOGENEIDADE DA ESPESSURA (PLANICIDADE) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE PASSADAS (PASSO DE SCAN).....	58
FIGURA 29 – ILUSTRAÇÃO DO CONCEITO DE ÂNGULO DE ASPERSÃO	59
FIGURA 30 – VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO RELATIVA DE COBRE SOBRE COBRE, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ASPERSÃO COM AS SEGUINTESS CONDIÇÕES DE GÁS: a) N ₂ , p = 2 MPa, T = 265 °C; b) N ₂ , p = 2 MPa, T = 400 °C	60
FIGURA 31 – ASPERSÃO COM PISTOLA INCLINADA E OS EFEITOS SOBRE O ESCOAMENTO DO GÁS	62
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DE ESCOAMENTO (NÚMERO DE MACH) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO.....	62
FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS (EM KELVIN) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO – VISTA LATERAL ..	63
FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS (EM KELVIN) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO – VISTA SUPERIOR	64
FIGURA 35 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE COBRE SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR COLD SPRAY	66

FIGURA 36 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE AÇO INOXIDÁVEL 316L SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR COLD SPRAY	66
FIGURA 37 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE LIGA MONEL SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR COLD SPRAY	67
FIGURA 38 – TAXA DE DEFORMAÇÃO DE PARTÍCULA DE COBRE DE 25 μm EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO CONSIDERANDO UMA VELOCIDADE DE IMPACTO DE 570 m/s	69
FIGURA 39 – VARIAÇÃO NO ASPECTO DA PARTÍCULA DEFORMADA (DIFERENTES NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO) PARA DIFERENTES NÍVEIS DE RUGOSIDADE DO SUBSTRATO. VALORES DE RUGOSIDADE: a,e) SUPERFÍCIE LISA; b,f) 12,5 μm ; c,g) 25 μm ; d,h) 50 μm	70
FIGURA 40 – EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE SUBSTRATO, PARA DOIS NÍVEIS DE PRESSÃO DE GÁS.....	70
FIGURA 41 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE REVESTIMENTO DE TI DEPOSITADO SOBRE SUBSTRATO DE PEEK EXEMPLIFICANDO O EFEITO DE PEENING	72
FIGURA 42 – DEPOSIÇÃO DE COBRE EM SUBSTRATO DE ALUMÍNIO.....	74
FIGURA 43 – DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL POR COLD SPRAY.....	74
FIGURA 44 – ASPECTO DE UMA PARTÍCULA DE BMG APÓS IMPACTO EM DIFERENTES TEMPERATURAS: a) TEMPERATURA AMBIENTE; b) ENTRE TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL; c) ACIMA DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL	75
FIGURA 45 – DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS DE MATERIAL CERÂMICO (SiC). NA COLISÃO, O AGLOMERADO DE MATERIAL CERÂMICO SE QUEBRA EM FRAGMENTOS MENORES, QUE SÃO REVESTIDOS PELO MATERIAL DO SUBSTRATO DEFORMADO. REVESTIMENTO FORMADO DE MATRIZ COM MATERIAL DO SUBSTRATO ENVOLVENDO O PARTICULADO CERÂMICO.....	78

FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM EQUIPAMENTO DE COLD SPRAY	82
FIGURA 47 – REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLD SPRAY DE BAIXA PRESSÃO.....	83
FIGURA 48 – REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE COLD SPRAY DE ALTA PRESSÃO.....	85
FIGURA 49 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE DIFERENTES MODELOS DE BOCAL: a) BOCAL CONVERGENTE-CILÍNDRICO; b) BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE; c) BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE-CILÍNDRICO.....	89
FIGURA 50 – EVOLUÇÃO DE PARÂMETROS DE GÁS E PARTÍCULA AO LONGO DE BOCAL CONVERGENTE-CILÍNDRICO, CONVERGENTE-DIVERGENTE E CONVERGENTE-DIVERGENTE-CILÍNDRICO. a) RAIOS DA SEÇÃO; b) VELOCIDADE DE GÁS E DE PARTÍCULA; c) PRESSÃO DO GÁS; d) TEMPERATURA DE GÁS E DE PARTÍCULA	90
FIGURA 51 – RESTAURAÇÃO DE UM CABEÇOTE DE MOTOR DE AUTOMÓVEL COM PROCESSO COLD SPRAY.....	91
FIGURA 52 – a) ANTES e b) DEPOIS DE UMA RESTAURAÇÃO DE PEÇA FUNDIDA EM AÇO COM DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO POR PROCESSO COLD SPRAY. DEFEITO SURTIU DURANTE PROCESSO DE ACABAMENTO POR USINAGEM	92
FIGURA 53 – RECUPERAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE CAMES a) DEFEITO; b) ASPECTO APÓS JATO DE ABRASIVO; c) PÓ A BASE DE COBRE E ZINCO DEPOSITADO SOBRE O DEFEITO VIA COLD SPRAY; d) PEÇA RECUPERADA APÓS COLD SPRAY SEGUIDO DE TORNEAMENTO E ESMERILHAMENTO	93
FIGURA 54 – SEGMENTO DO PERÍODO DE DEPRECIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE COLD SPRAY E SEUS EVENTOS PRODUTIVOS E IMPRODUTIVOS.....	98

FIGURA 55 – PERCURSO DA PISTOLA DE COLD SPRAY SOBRE UMA PEÇA. OS SEGMENTOS DO PERCURSO EM VERDE INDICAM AS PARTES ONDE A ASPERSÃO DE MATERIAL OCORREU SOBRE A PEÇA. OS SEGMENTOS EM VERMELHO INDICAM OS TRECHOS ONDE A PISTOLA ULTRAPASSA OS LIMITES DA PEÇA E A ASPERSÃO DE MATERIAL OCORRE FORA DELA.99

FIGURA 56 – VELOCIDADE DE PARTÍCULA E TEMPERATURA DO GÁS EM DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO 101

FIGURA 57 – REVESTIMENTO DE COBRE DEPOSITADO POR a) COLD SPRAY; b) PLASMA SPRAY 102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS E CUSTO QUALITATIVO DE GASES CANDIDATOS AO PROCESSO COLD SPRAY	50
TABELA 2 – CUSTO APROXIMADO DOS GASES MAIS UTILIZADOS NO PROCESSO COLD SPRAY	51
TABELA 3 – ÁREA DA SUPERFÍCIE DO PERFIL 2D DE REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE PISTOLA E SUBSTRATO.....	57
TABELA 4 – TABELA COMPARATIVA DA RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE CRÍTICA REPORTADA POR DIFERENTES AUTORES EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE ASPERSÃO. MATERIAL: COBRE	65
TABELA 5 – POROSIDADE DO REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO	102
TABELA 6 – RESISTÊNCIA ADESIVA DO REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO	103
TABELA 7 – ESPESSURA DE REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO.....	104

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 <i>COLD SPRAY</i> NO BRASIL	23
1.2 JUSTIFICATIVA / MOTIVAÇÃO	23
2 REVISÃO DO PROCESSO <i>COLD SPRAY</i>	25
2.1 ORIGEM DA TECNOLOGIA <i>COLD SPRAY</i>	25
2.2 ESTUDOS DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS	27
2.2.1 Velocidade de partícula, velocidade crítica e eficiência de deposição	28
2.2.2 Efeito da temperatura de aquecimento do gás	33
2.3 MECANISMO DE IMPACTO E ADERÊNCIA DAS PARTÍCULAS	34
2.4 VARIÁVEIS E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E SUAS CORRELAÇÕES	46
2.4.1 Diâmetro de partícula	46
2.4.2 Gás de processo	49
2.4.3 Temperatura do Gás e Partículas	52
2.4.4 Propriedades Físicas dos Materiais	55
2.4.5 Distância de aspersão	56
2.4.6 Distância entre passadas	57
2.4.7 Ângulo de aspersão	59
2.4.8 Oxidação da partícula	64
2.4.9 Condições da superfície do substrato	68
2.4.10 Densidade x porosidade	71
3 ESTUDO DE MATERIAIS	73
3.1 METAIS	73
3.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)	76
3.3 CERÂMICOS	78
3.4 POLÍMEROS	79

3.5 SUBSTRATOS POLIMÉRICOS / COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.....	80
.....	80
4 EQUIPAMENTO.....	82
4.1 <i>COLD SPRAY</i> DE BAIXA PRESSÃO	83
4.2 <i>COLD SPRAY</i> DE ALTA PRESSÃO	85
4.3 VARIAÇÕES NO EQUIPAMENTO.....	87
5 APLICAÇÕES.....	91
6 ANÁLISE FUNDAMENTAL DE CUSTOS DO <i>COLD SPRAY</i>.....	95
7 ANÁLISE COMPARATIVA DO <i>COLD SPRAY</i> E OUTROS PROCESSOS DE ASPERSÃO	101
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
REFERÊNCIAS.....	107
ANEXO 1 – Tabela dos materiais utilizados no processo <i>Cold Spray</i>, os substratos onde são geralmente depositados e as suas principais aplicações ...	111
.....	111

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de Aspersão Térmica ao longo dos anos tem se consolidado como uma satisfatória alternativa de conferir proteção superficial com uso em indústrias de variados tipos. A proteção requerida inicialmente era contra a corrosão, porém com o avanço tecnológico e a intensificação das pesquisas na área metalúrgica, desencadeando o desenvolvimento de novos materiais com propriedades otimizadas, outras características passaram a ser desejadas nos revestimentos produzidos por estes processos, em função de sua aplicação e as solicitações que esta promoverá: resistência ao desgaste (erosão, abrasão, cavitação, fricção, entre outros), isolamento térmico/elétrico, resistência química, biocompatibilidade, entre outros.

Através da aspersão térmica são depositados revestimentos por vários processos, nos quais o material na forma de arame ou pó é aquecido e/ou fundido e pulverizado pelo uso de um gás que o transfere a elevada velocidade sobre um substrato previamente preparado, formando um revestimentos com microestrutura que decorre da sua solidificação e compactação. Os processos utilizam como fontes de calor a combustão de gases, arco elétrico ou plasma para fundir o material. Os revestimentos obtidos têm uma microestrutura lamelar, que determina muitas das propriedades dos revestimentos. A otimização das propriedades de aderência para uma determinada especificação necessita de um controle cuidadoso dos parâmetros operacionais e da deposição (distância, demãos, pré-aquecimento, etc.).

Especificamente a formação de um revestimento ocorre sobre uma superfície preparada, onde eles impactam no substrato com alta velocidade, deformando-se em forma de panquecas (*splats*), como observado na Figura 1, e de acordo à temperatura da partícula e do substrato permite diferentes formatos de panquecas. Assim é formada uma fina camada. Também recorre-se à utilização de pré-aquecimento do substrato que facilita a deposição de panquecas formando discos circulares. Aumentando a temperatura do substrato aumenta a eficiência de deposição e aderência.

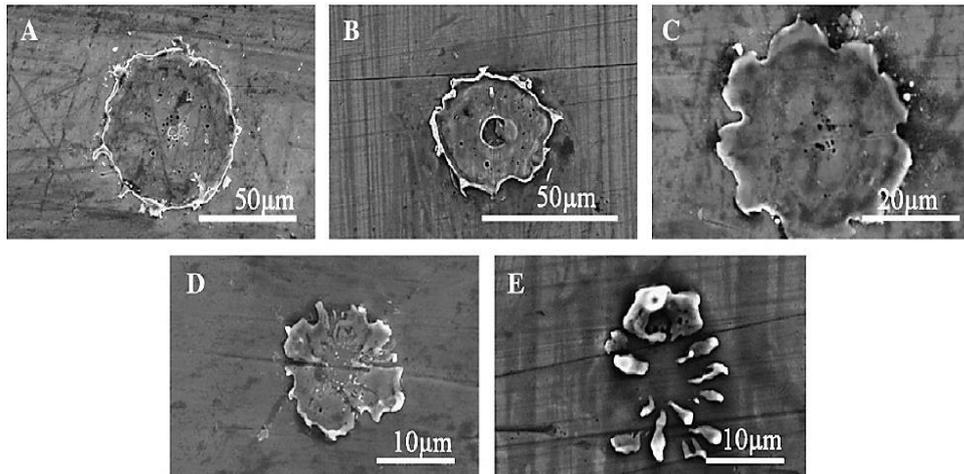


FIGURA 1 - MORFOLOGIAS PARA PANQUECAS DEPOSITADAS. ASPERSÃO POR PLASMA - APS DE NI-CR EM SUBSTRATO DE AISI 304L; IMAGENS EM M.E.V.: (A) PANQUECA EM DISCO APRESENTANDO CONTOURO DISTINTO E VAZIOS NO CENTRO; (B) PANQUECA EM DISCO COM VAZIO CENTRAL E CONTOURO DISTINTO; (C) PANQUECA EM “FLOR”; (D) PANQUECA FRAGMENTADA; (E) PANQUECA MUITO FRAGMENTADA.

FONTE: Brossard *et al.*, (2010).

A Aspersão Térmica – AT é constituída por um conjunto de diferentes processos utilizados para depositar, numa superfície preparada anteriormente, as camadas de materiais metálicos ou não metálicos (cerâmico, metálico, polimérico ou composto) em quase qualquer material de substrato. A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se entre os que usam a chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia, como observado através da Figura 2.

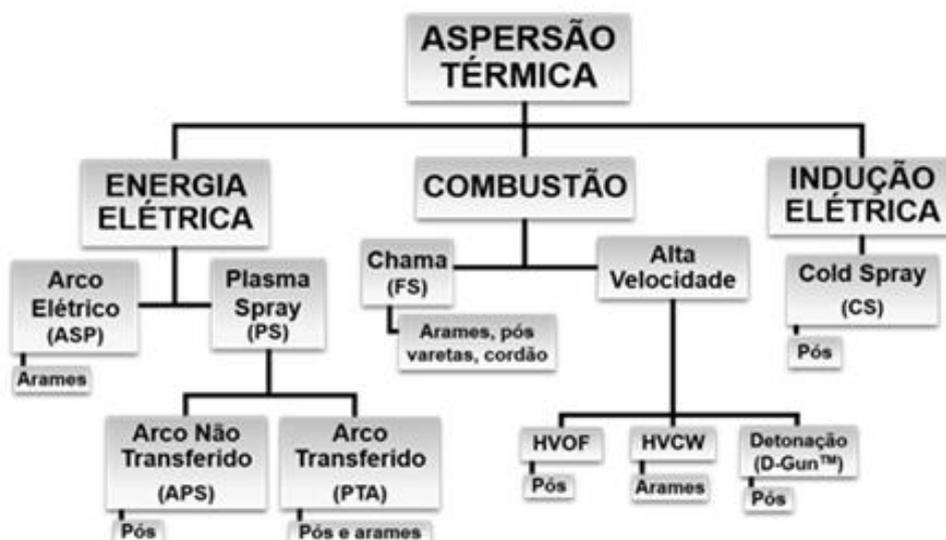


FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO LABATS DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA. ADAPTADO DE “THERMAL SPRAY – PRACTICE, THEORY AND APLICATIONS – 1997” – AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS.

FONTE: Sucharski (2016).

Os processos de AT são amplamente utilizados em indústria de fabricação de componentes, preparação de superfícies protetivas, preenchimento de peças com problemas de usinagem e reparo de peças danificadas. Os processos convencionais de AT apresentam bons resultados, porém possuem uma limitação. Por envolverem considerável aporte de calor aos materiais a serem depositados, comumente provocam neste fenômenos indesejáveis, tal como alguns efeitos nocivos da oxidação, fusão significativa de material, rápida solidificação, tensões residuais, entre outros (PAPYRIN *et al.*, 2007). Isto por sua vez limita certos tipos de materiais a um leque mais restrito de processos de AT. Alguns destes são mais termicamente sensíveis que outros, inviabilizando a deposição de camada pelos processos normais de aspersão térmica. Sabendo disto, pesquisas e estudos passaram a ser realizados no intuito de desenvolver processos que ao menos minimizassem estes efeitos nocivos do calor excessivo, buscando novos mecanismos de aderência das partículas depositadas que não precisasse envolver uma energia térmica elevada.

Devido a estas necessidades, a tecnologia *Cold Spray* revela-se como uma alternativa atraente de tecnologia de deposição. Não deve ser compreendida como uma tecnologia que *substitui* os demais processos de aspersão, e sim como uma alternativa mais lógica frente a determinadas aplicações (CHAMPAGNE e ZIEGLER). O *Cold Spray* é uma técnica relativamente recente de deposição que utiliza alta velocidade e baixa energia térmica da partícula para promover aderência mecânica das partículas no substrato, de forma semelhante à soldagem explosiva, e deposição envolvendo tensões residuais de natureza compressiva, benéfica para a qualidade mecânica do revestimento (CHAMPAGNE, 2007). Nesta tecnologia, a alta energia cinética, ou seja, a alta velocidade, cumpre um papel mais importante do que a energia térmica em si, mesmo que não descartando esta segunda, característica esta que a difere das demais tecnologias de aspersão. Por conta disto, a degradação térmica e modificação estrutural indesejada do material revestido é grandemente reduzida ou até mesmo anulada (PAPYRIN *et al.*, 2007). Além desta vantagem, a tecnologia *Cold Spray* permite a produção de revestimentos de alta densidade, praticamente livre de óxidos e inclusões metálicas, permitindo atingir uma aderência entre partícula e substrato e coesão entre partículas elevada o suficiente para grande parte das aplicações (KARTHIKEYAN, 2004). O método de deposição por *Cold Spray*, entretanto, supre não somente demandas de produção de camadas protetoras, mas também de restauração e produção de itens com um excelente nível de acabamento

e forma próxima à final, algumas vezes praticamente descartando procedimentos de usinagem (*Near Net Shapes*).

Por envolver uma menor temperatura na saída do bocal (principalmente nos sistemas *Cold Spray* de baixa pressão), a tecnologia é comportada também por equipamentos menores e portáteis, o que facilita o uso no campo. Na Figura 3 observa-se um diagrama esquemático do processo *Cold Spray* (sistema estacionário). Por outro lado, pode também ser automatizada e robotizada, de forma a conseguir maior controle do processo e revestimentos de maior qualidade (CHAMPAGNE, 2007).

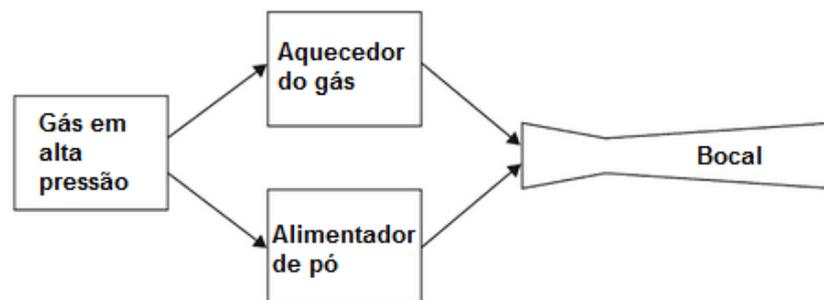


FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO *COLD SPRAY* (SISTEMA ESTACIONÁRIO)

FONTE: Adaptado de Champagne (2007).

O intuito deste trabalho é apresentar o processo *Cold Spray* como uma técnica com excelentes propriedades e características quando comparadas com as outras técnicas de Aspersão Térmica, como observado na Figura 4.

Frente a estas vantagens e características, o *Cold Spray* tem sido utilizado como método de deposição de variados materiais, como metálicos (Al, Cu, Ni, Ti, Ag, Zn, entre outros), ligas (aços inoxidáveis, ligas e superligas de Ni, MCrAlY, etc.), cerâmicos (Nano WC, por exemplo), e compósitos (MMCs, cobre-tungstênio, Al-SiC, etc.) (KARTHIKEYAN, 2004). Na Figura 5 observa-se a microestrutura de um revestimento de cobre depositado pelo processo *Cold Spray*. A microestrutura é bastante homogênea e praticamente sem porosidade.

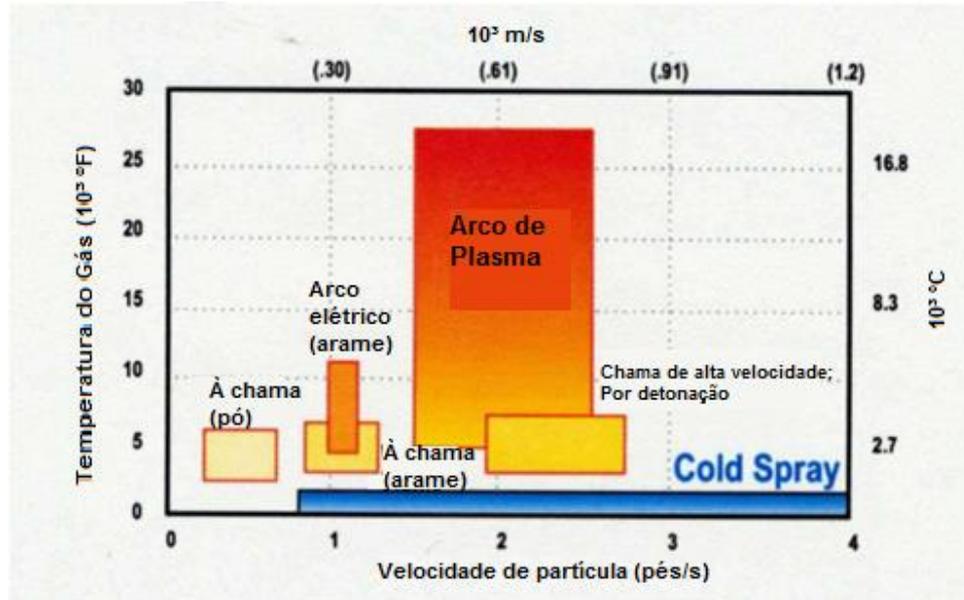


FIGURA 4 – COMPARAÇÃO DO PROCESSO COLD SPRAY E DEMAIS PROCESSOS DE ASPERSÃO QUANTO A VELOCIDADE DE PARTÍCULA E TEMPERATURA DE GÁS
 FONTE: Adaptado de U.S. ARL (2016).

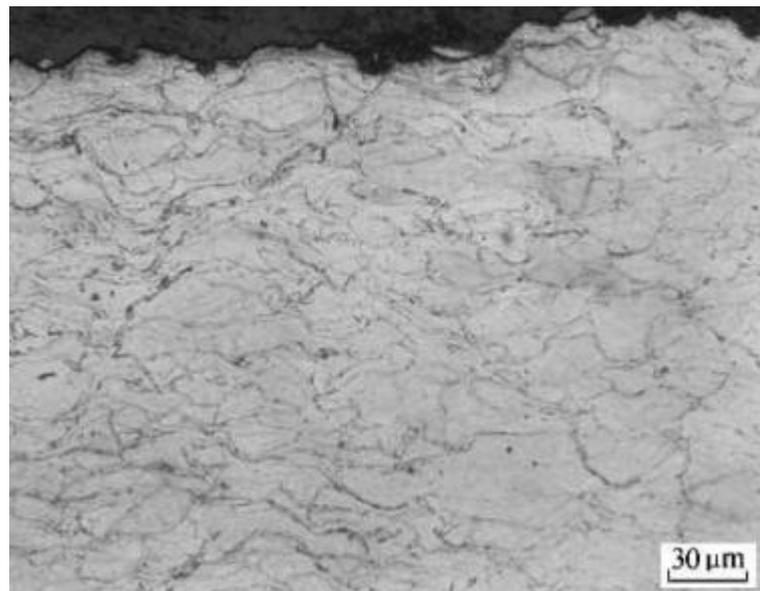


FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE REVESTIMENTO DE COBRE APLICADO PELO PROCESSO COLD SPRAY
 FONTE: Li *et al.*, (2005).

A escolha do material de revestimento deve ser criteriosa, levando em consideração todos os aspectos da aplicação. O material escolhido deve possuir propriedades físicas, mecânicas, químicas e magnéticas que sejam apropriadas para sua função. Fatores como custo, segurança do operador e preservação ambiental também tem sua devida importância. O baixo aporte térmico ao substrato,

característica do processo *Cold Spray*, permite também a aspersão de material sobre substratos que, se submetidos aos processos convencionais de aspersão térmica, sofreriam degradação, como é o caso de alguns polímeros.

Por ser uma tecnologia ainda nova, ainda existem muitas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento a fim de ampliar o entendimento e o controle sobre o *Cold Spray*. Nos últimos anos houve uma intensificação nas pesquisas sobre o processo, em muitas instituições, indústrias e laboratórios do mundo. Aspectos como otimização da aspersão, remodelagem do processo, novos *designs* de bocais, novos materiais utilizados como revestimento e outras inovações são apenas alguns exemplos de aprimoramentos em estudo atualmente.

Segundo Karthikeyan (2004), apesar de ter surgido na Rússia, a tecnologia *Cold Spray* vê seu maior avanço atualmente na Alemanha. Os Estados Unidos também têm se mostrado fortes em pesquisa e desenvolvimento desta modalidade de deposição, mesmo que de certa forma restrita à iniciativa privada e pouco fomentada pelo governo. Empresas como Alcoa, ASB Industries, Ford, entre outras, fundaram em parceria a Sandia National Lab, uma rede de laboratórios, a fim de executarem atividades cooperativas de pesquisa e desenvolvimento do processo *Cold Spray* por meio de um CRADA (*Cooperative Research and Development Agreement*). De igual modo, algumas universidades também se dedicaram à pesquisa da nova tecnologia, como por exemplo a Penn State University, a qual também contou com fundos da iniciativa privada (KARTHIKEYAN, 2004).

Ainda segundo Karthikeyan (2004), outros países, tanto com iniciativa do governo quanto através de companhias privadas, têm colaborado com o desenvolvimento da tecnologia, criando e executando programas de pesquisa. Uma conferência realizada em 2002 em Albuquerque (EUA) reuniu 75 participantes, tanto dos EUA quanto de fora. Uma nova edição da conferência foi realizada dois anos depois e reuniu o dobro de participantes, vindo de 14 países diferentes, mostrando o quanto a tecnologia cresce e se difunde com o passar dos anos, tornando-se um processo industrial essencial visto as vantagens que o mesmo fornece. Nas últimas duas décadas a tecnologia tem recebido uma maior atenção de cientistas e pesquisadores ao redor do mundo. Além de Alemanha e EUA, já citados, Canadá, Bélgica, França, Japão, Rússia, Coreia do Sul e Reino Unido possuem companhias, centros de pesquisa, universidades e outras instituições envolvidas com pesquisa e

desenvolvimento do *Cold Spray*. Dentre estas estão algumas companhias de renome internacional, como a NASA, EADS, Toyota e Ford (KARTHIKEYAN, 2004).

Pesquisas atualmente são direcionadas também para tornar a tecnologia *Cold Spray* economicamente mais viável e competitivo. Para isto, redução dos custos envolvidos e do lead-time do processo. Mas, sob outro ponto de vista, é importante também conhecer os ganhos que o *Cold Spray* proporciona comparativamente aos demais métodos. Assim, é importante conhecer as fases de produção de um componente (acabamento, fundição, retrabalho, e outros) e o custo de uma delas, em termos relativos, para assim avaliar a economia que o uso do *Cold Spray* proporciona para cada etapa da produção.

1.1 COLD SPRAY NO BRASIL

Karthikeyan (2004), ao citar o *status* internacional do processo *Cold Spray* ao redor do mundo, cita brevemente o Brasil. Segundo informações fornecidas por Helmut Hoell, em 2004, até aquele ano pesquisadores brasileiros já haviam adquirido do inventor do processo a licença para utilização do *Cold Spray*. Helmut também relatou que o país já tem iniciado alguns testes na área de reparo de componentes, porém não há informações disponíveis sobre tais experimentos. Mesmo assim, devido à motivação recebida pelos resultados destes experimentos, o Brasil já começava a comprar equipamentos dedicados à tecnologia *Cold Spray* da Alemanha.

Estas informações apontam que a implementação industrial da tecnologia no Brasil ainda não aconteceu, mas tende a acontecer num futuro próximo, visto o interesse em atividades de pesquisa revelado nas constatações apresentadas.

1.2 JUSTIFICATIVA / MOTIVAÇÃO

O presente texto terá como finalidade apresentar em aspectos gerais a tecnologia *Cold Spray*, explicando o mecanismo de deposição envolvido, o equipamento utilizado e suas variações, os parâmetros importantes do processo e sua relação com a qualidade final de deposição, os materiais atualmente utilizados ou em desenvolvimento, análises econômicas comparativas do processo e dos demais processos de aspersão e alguns exemplos especiais. Este trabalho não apresenta novos resultados de pesquisas tampouco desenvolvimento de novos métodos para a

tecnologia, porém tem o intuito de apresentar de forma compilada e facilitada informações hoje existentes pertinentes ao processo recente *Cold Spray*, abordando aquilo que já existe no mercado ou as tendências para o futuro próximo. Crê-se que o presente trabalho será de grande utilidade uma vez implantada e difundida a tecnologia no Brasil.

2 REVISÃO DO PROCESSO *COLD SPRAY*

O presente capítulo estrutura-se em tópicos que abordarão de forma correlata os conceitos teóricos inerentes à tecnologia *Cold Spray*, apresentando o desenvolvimento da mesma desde seu descobrimento até os estudos atuais. Este capítulo também visa fornecer de forma acessível o princípio de funcionamento do processo, sem deter-se a aplicações específicas, as quais terão a devida atenção nos capítulos subsequentes.

2.1 ORIGEM DA TECNOLOGIA *COLD SPRAY*

Papiryn *et al.*, (2007) e Champagne (2007), em suas respectivas obras, narram os primórdios dos estudos da tecnologia *Cold Spray*. Segundo estes autores, o estudo da técnica *Cold Spray* iniciou-se de forma indireta, ou seja, em estudos não dedicados à metalurgia. Primeiramente observou-se o fenômeno de deposição balística de partículas metálicas sólidas sobre uma superfície, e então concluiu-se que era possível usufruir deste fenômeno no campo da aspersão térmica. Tudo começou com alguns estudos realizados no início dos anos 80 pelo *Institute of Theoretical and Applied Mechanics* (ITAM), da *Russian Academy of Sciences* (RAS), sobre a análise do comportamento de fluxos supersônico bifásico, contendo gás e partículas sólidas, incidindo sobre um corpo. Estas pesquisas eram realizadas devido ao interesse de diversas áreas da tecnologia. Não apenas a engenharia de tecnologia de deposição de materiais havia necessidade de conhecer o processo, mas também a indústria da aviação, cosmonáutica, e também da própria metalurgia de aspersão. Anatolii Papiryn e outros pesquisadores da RAS simulavam estes fluxos em túneis de vento com a presença de corpos geométricos (esferas, cilindros, por exemplo) em seu interior e compararam o perfil do fluxo e outras propriedades destes casos com aqueles desenvolvidos pelos fluxos puros, compostos apenas de gás. Havia o intuito de formular experimentos que permitissem uma análise por diagnóstico a laser, com resolução espacial e temporal disponível na época.

Além dos parâmetros de fluxo, como campos de escoamento, arrasto, campo de temperatura, entre outros, também foi observado nestes estudos o comportamento das partículas sólidas (materiais metálicos foram utilizados) no ato da colisão com a superfície do corpo perpendicular ao fluxo. Notou-se que o comportamento variava

conforme as características do fluxo e a geometria da interface do corpo presente. Para alguns casos observou-se uma grande quantidade de partículas colidindo com o substrato e sendo “refletidas”. Algumas colidiam apenas uma vez e, após rebatidas, não tornavam a colidir com o corpo. Porém algumas delas eram submetidas novamente ao fluxo e colidiam uma segunda vez com a superfície. Isto, para algumas partículas, se repetia múltiplas vezes, fazendo com que estas a cada vez que eram rebatidas pelo substrato perdessem energia e se distanciassem cada vez menos da superfície, até o momento em que se acumulavam permanentemente na região da superfície frontal do corpo (Figura 6).

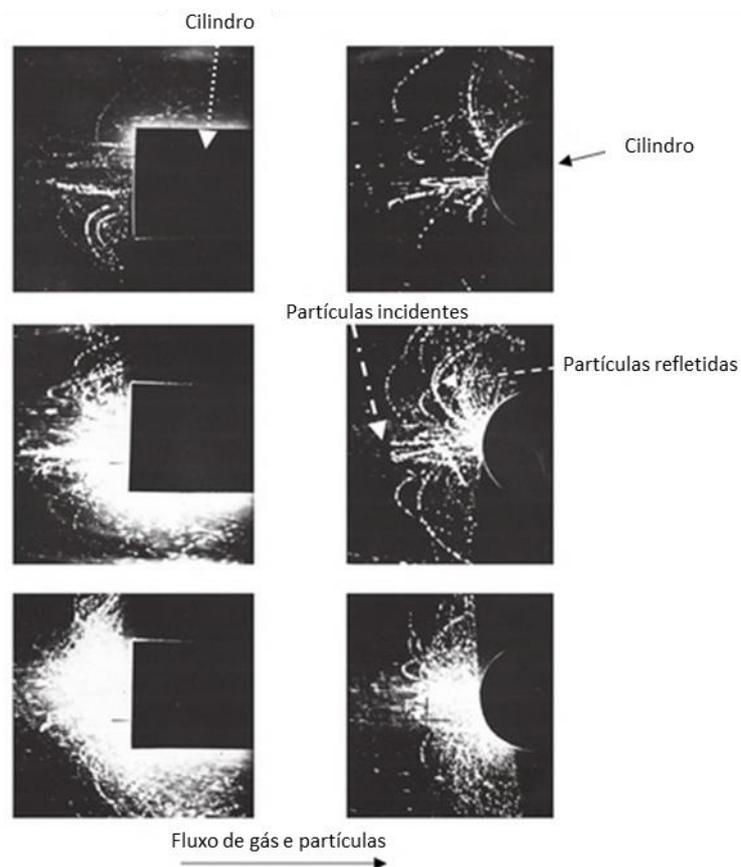


FIGURA 6 – INCIDÊNCIA E REFLEXÃO DE PARTÍCULAS DE ACRÍLICO SOBRE AS SUPERFÍCIES FRONTAL E LATERAL DE UM CORPO CILÍNDRICO.

FONTE: Adaptado de Papiryn *et al.*, (2007).

Porém, um outro fenômeno que ocorreu foi o da deposição de camadas contínuas e uniformes do particulado sobre a superfície do corpo, fato que ocorreu quando utilizou-se um fluxo contendo partículas de alumínio incidindo contra a superfície frontal de um cilindro. A temperatura fria de 280K em velocidade

supersônica provocou energia suficiente para a deformação das partículas no substrato, de forma a criar uma espécie de revestimento uniforme. A nível de comparação, o mesmo fenômeno não foi observado, por exemplo, quando utilizou-se partículas de acrílico ou bronze no fluxo. Para o caso das partículas de bronze, houve a erosão e mudanças de forma do corpo-alvo. Estes resultados obtidos com o uso de partículas de alumínio a baixa temperatura, conduzidas por um fluxo de gás a baixa temperatura, despertaram o interesse da área de pesquisa de métodos de aspersão e serviram de “pontapé inicial” a subsequentes estudos a fim de desenvolver uma possível nova tecnologia de aspersão a baixa temperatura, que hoje chamamos de *Cold Spray*.

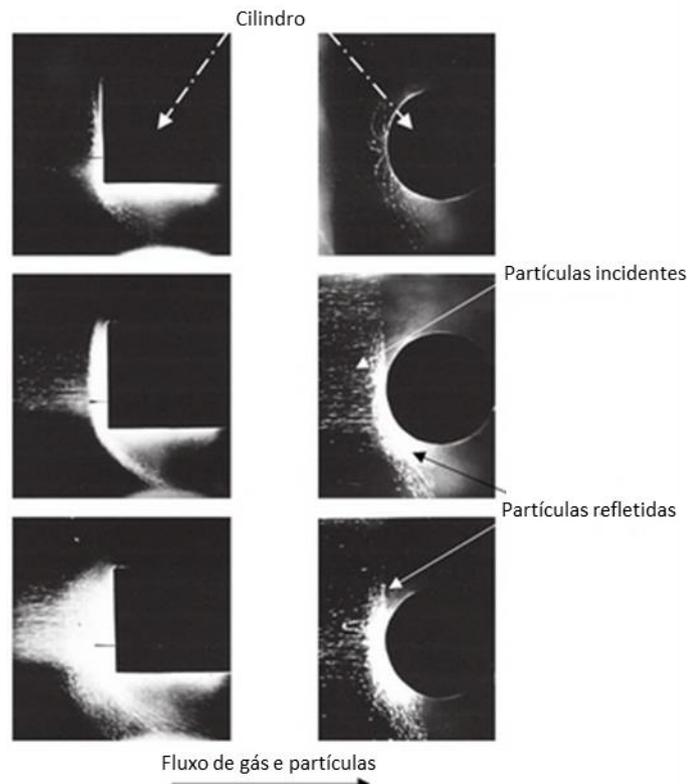


FIGURA 7 – INCIDÊNCIA E REFLEXÃO DE PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO SOBRE AS SUPERFÍCIES FRONTAL E LATERAL DE UM CORPO CILÍNDRICO.
 FONTE: Adaptado de Papiryn *et al.*, (2007).

2.2 ESTUDOS DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS

Os estudos subsequentes, desta vez com objetivos claramente metalúrgicos, foram realizados com algumas modificações. Passou-se a utilizar jateamento localizado como forma de fluxo, utilizando pequenos bocais ao invés de grandes

túneis de vento, uma vez que túneis de vento são economicamente inviáveis por promoverem uma grande perda de particulado. A taxa de partículas depositadas na superfície do corpo é muito baixa já que este é significativamente menor que o túnel. Também utilizou-se corpos-alvos do jateamento em movimento relativo à saída do bocal, a fim de aumentar a área aspergida, já que nas configurações anteriores esta área era limitada à seção do fluxo do teste. Estando o fluxo direcionado e o corpo aspergido em movimento, permite-se a deposição em diferentes regiões e superfícies do corpo. Uma outra razão para estas modificações na configuração dos testes é a perda na qualidade de deposição do material com um fluxo de maior seção, devido à perda de aceleração das partículas e, conseqüentemente, de energia no impacto (PAPIRYN *et al.*, 2007).

2.2.1 Velocidade de partícula, velocidade crítica e eficiência de deposição

Segundo Papiryn *et al.*, (2007), a primeira onda de experimentos visava estabelecer a transição do efeito de erosão do substrato do corpo-alvo para o efeito de formação de revestimento, alterando-se a velocidade dentro da faixa de 100 – 1000 m/s, sabendo-se que, utilizando partículas em estado sólido, as baixas velocidades não resultavam numa deformação da partícula e do substrato suficiente para a deposição mecânica das partículas e, portanto, apenas promovem a erosão do material do substrato e velocidades maiores conferem deformação suficiente para a aderência e conseqüente formação da camada.

A variação da velocidade era controlada através da alteração da composição do gás de teste. Diferentes teores de ar e Hélio promoviam a variação da velocidade média das partículas dentro de uma faixa de 200 – 1200 m/s. Além de depender desta composição, constatou-se também que a variação da velocidade média das partículas próxima do impacto de um determinado material depende também do tamanho de partícula, conforme a Figura 8.

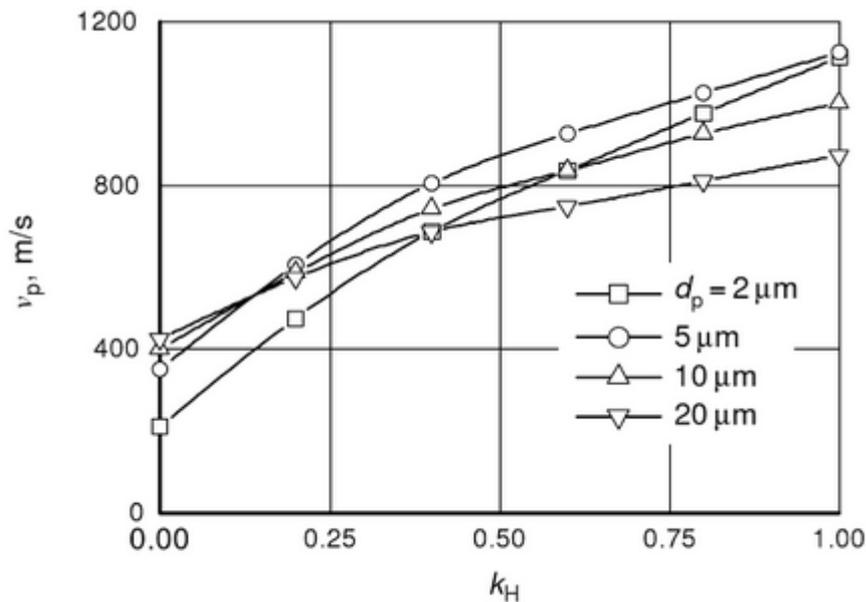


FIGURA 8 – VELOCIDADE DA PARTÍCULA PRÓXIMA AO SUBSTRATO X RAZÃO HÉLIO/AR (k_H) DO GAS DE FLUXO, PARA DIFERENTES TAMANHOS MÉDIOS DE PARTÍCULA. FONTE: Papiryn *et al.*, (2007).

Segundo Champagne (2007), outros estudos posteriores mostraram também que a velocidade de partícula era dependente de outros fatores além da composição do gás e do tamanho de partícula. Cálculos numéricos e experimentais forneceram uma determinação acurada da velocidade de partícula como função de diversos parâmetros de processo, como pressão, temperatura e velocidade do gás de processo, material da partícula e comprimento do bocal.

A análise das superfícies submetidas à aspersão por *Cold Spray*, testando diferentes velocidades de partícula, variando os parâmetros do processo, permitiu a observação do comportamento individual das partículas e sua interação com o substrato. Os resultados mostraram que, para cada combinação de parâmetros (material das partículas e do substrato, temperatura e tamanho das partículas, estado da superfície do substrato), obteve-se um valor crítico de velocidade, que representava uma transição na interação partícula-substrato quando ambos estão em baixas temperaturas. Tal valor caracteriza o que chamamos de *velocidade crítica*, ou seja, a velocidade de transição da erosão do substrato (devido ao fenômeno de rebatimento das partículas) para formação de revestimento uniforme (devido ao fenômeno de aderência mecânica das partículas) (PAPIRYN *et al.*, 2007).

A determinação de um valor empírico para a velocidade crítica foi por meio da análise da variação da eficiência de deposição. Esta pode ser expressa da seguinte forma:

$$k_d = \frac{\Delta m_s}{M_p} \quad (1)$$

Onde:

k_d = Eficiência de deposição

Δm_s = Variação de massa de um substrato (kg)

M_p = Massa total de partículas interagindo com o substrato (kg)

Esta relação mostra claramente que a eficiência aumenta conforme maior quantidade de partículas envolvidas no processo aderem ao substrato, adicionando sua massa à massa do mesmo. Conforme a velocidade das partículas aumenta, a eficiência tende também a aumentar (Figura 9). Ao superar a velocidade crítica, todavia, observou-se um rápido acréscimo desta eficiência, atingindo valores de 50 – 70%. A Figura 10 mostra este fenômeno no procedimento de deposição de partículas de alumínio sobre o substrato de um corpo cilíndrico. Para velocidades abaixo da velocidade crítica (aprox. 250 m/s, Figura 10a), houve a reflexão da totalidade das partículas. Já para uma velocidade de partícula superior à velocidade crítica (aprox. 900 m/s, Figura 10b), houve a formação de uma camada (PAPIRYN *et al.*, 2007). A Figura 11 mostra o aspecto da superfície de cobre coberta por partículas de alumínio de diâmetro médio igual a 30,2 μm . Nota-se que com velocidade de 730 m/s (abaixo da crítica) houve apenas formação de cavidades no substrato, sem a aderência de nenhuma partícula (Figura 11a). Com o aumento da velocidade, a probabilidade de uma partícula aderir ao substrato vai aumentando (Figura 11b e c).

A velocidade crítica pode ser semi-empiricamente estipulada por meio de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para uma dada relação de parâmetros. A velocidade do processo, por sua vez, pode ser medida utilizando um anemômetro a raio laser (ASSADI *et al.*, 2003). Logo, controlando o range de velocidades e a eficiência de deposição, um valor para velocidade crítica pode ser assumido.

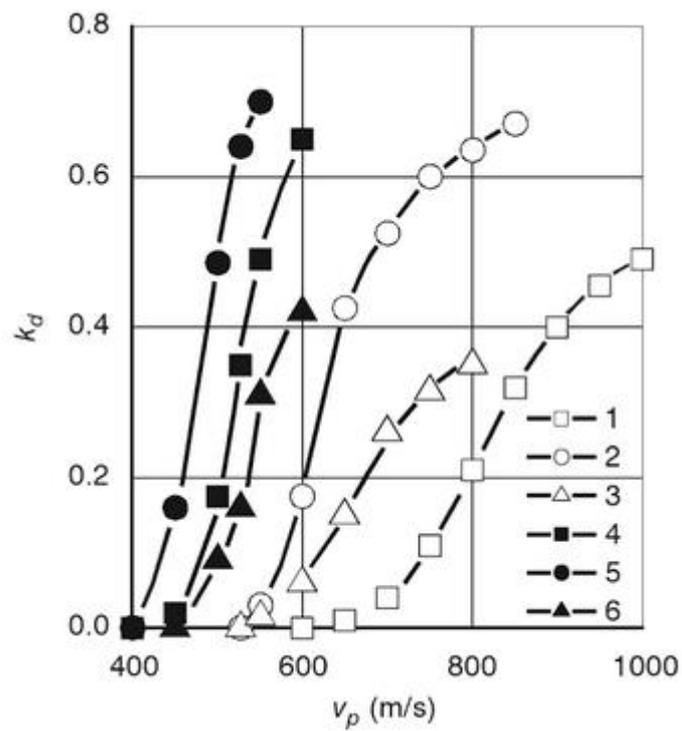


FIGURA 9 – VARIACÃO DA EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO COM AUMENTO DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA. PARTÍCULAS ACELERADAS COM MISTURA AR-HÉLIO (1-3) E AR PURO (4-6). MATERIAIS UTILIZADOS FORAM ALUMÍNIO (1 E 4), COBRE (2 E 5) E NÍQUEL (3 E 6). FONTE: Papiryn *et al.*, (2007).

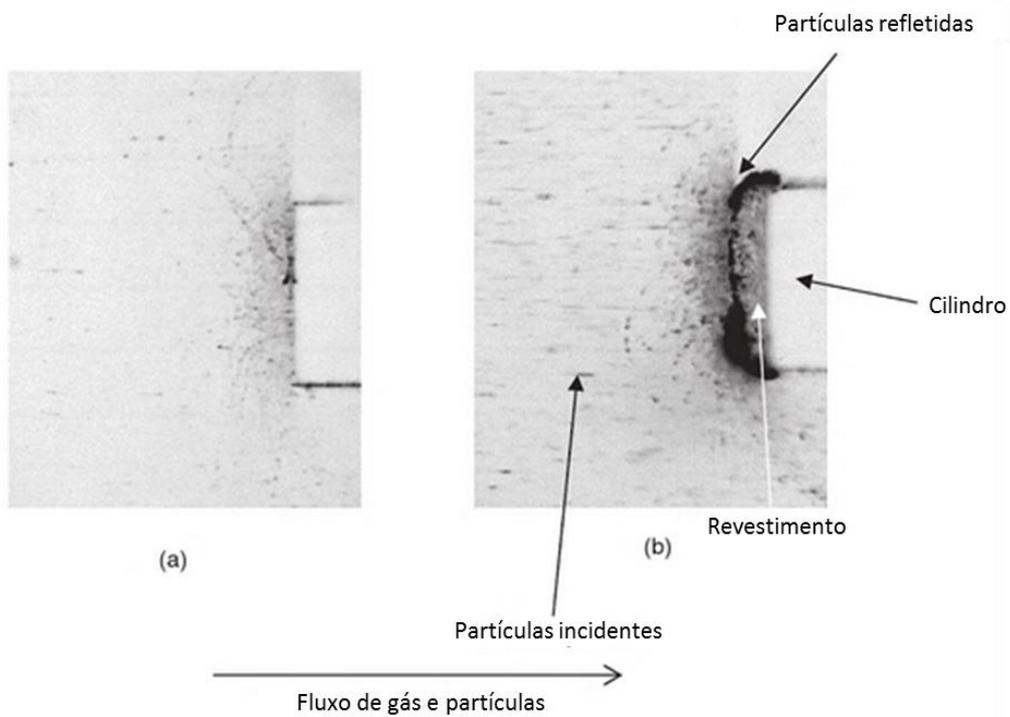


FIGURA 10 – TRAJETÓRIA DAS PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO INCIDINDO SOBRE O SUBSTRATO DA FACE SUPERIOR DE UM CILINDRO. VELOCIDADE DE PARTÍCULAS DE: a) 250 m/s; b) 900 m/s. FONTE: Adaptado de Papiryn *et al.*, (2007).

Quando trata-se do processo *Cold Spray*, não há como determinar os níveis de velocidade de partícula usual e velocidade crítica de forma generalizada, pois estas grandezas dependerão fortemente dos materiais envolvidos (tanto da composição química quanto condições físicas) e dos parâmetros de processo (relacionados ao gás, ao substrato, ao ambiente, e outros). Porém, é essencial entender que a velocidade de partícula cumpre um papel importantíssimo no processo de aderência do revestimento, e que a velocidade crítica determina a velocidade que deve ser atingida pela partícula para que haja aderência ao invés de rebatimento das partículas. Desta forma, ajusta-se os demais parâmetros de forma que se alcance as condições necessárias para formação do revestimento. Deve-se lembrar que estar acima da velocidade crítica não significa sucesso no processo de deposição. Velocidades extremas podem gerar a perda de material no substrato e prejudicar sua integridade.

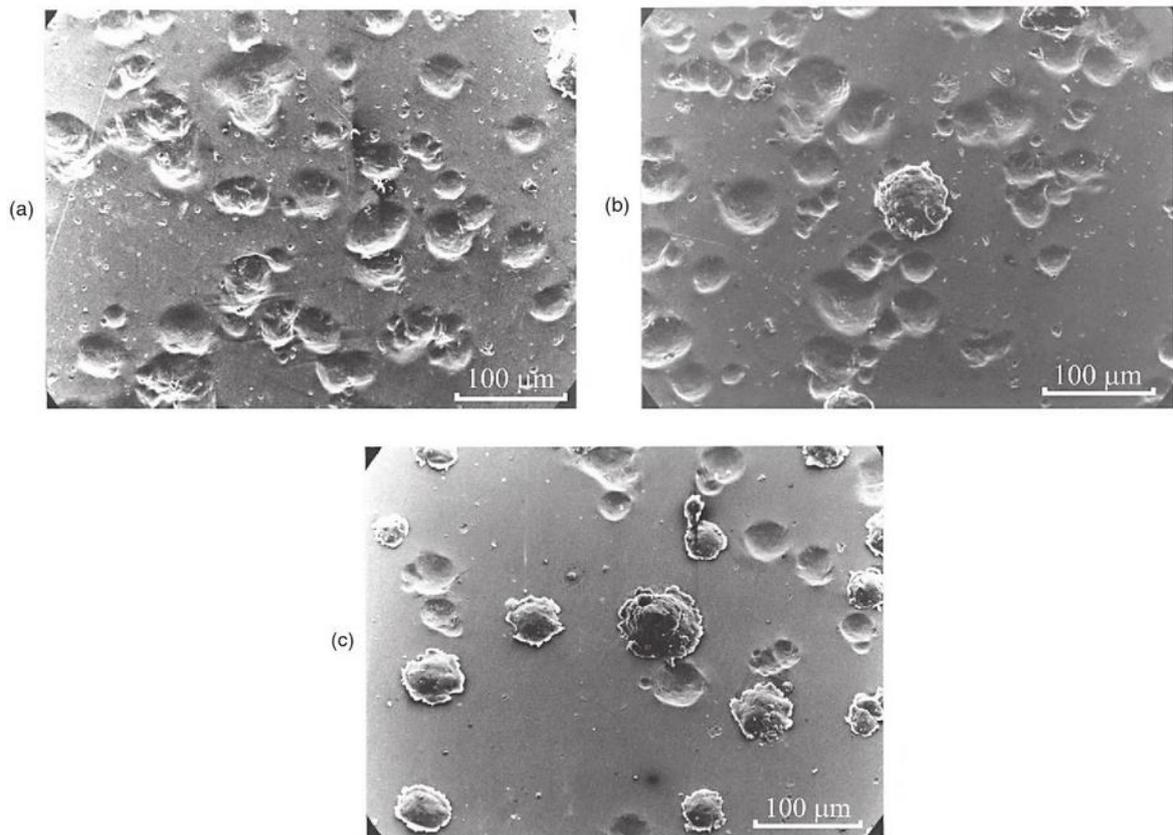


FIGURA 11 – MUDANÇA NA INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO ($d_{pm} = 30,2 \mu\text{m}$) COM SUBSTRATO DE COBRE COM O AUMENTO DA VELOCIDADE DE PARTÍCULA: a) 730 m/s; b) 780 m/s; c) 850 m/s

FONTE: Papiryn *et al.*, (2007).

2.2.2 Efeito da temperatura de aquecimento do gás

Mesmo que a energia cinética seja o “carro chefe” do mecanismo de deposição desta nova tecnologia, Papiryn *et al.*, (2007) se preocupam também em analisar os efeitos da temperatura de gás e das partículas sobre os resultados de deposição (aderência e coesão). Os experimentos anteriormente citados foram realizados utilizando como gás de processo a mistura ar-hélio a uma temperatura baixa, próxima à ambiente. Esta mistura, ainda que com baixas temperatura e velocidade, apresentou bons resultados quanto a eficiência de deposição. Entretanto sabe-se que o gás hélio é caro e economicamente injustificável para determinadas aplicações, logo cabe a consideração de uma alternativa mais barata. O ar puro, comprimido, então surge como uma opção, todavia sabe-se também que este não assegura uma formação de camada quando utilizado em temperatura ambiente, uma vez que não promove uma aceleração satisfatória das partículas, de forma a leva-las a velocidades acima da crítica. Assim, experimentos foram realizados utilizando ar aquecido em uma pré-câmara. Observou-se que, diferente do que acontecia com ar à temperatura ambiente, o ar aquecido promovia a aderência das partículas no substrato e, por consequência, aumentava a eficiência de deposição. Esta mesma análise foi realizada para particulados de diferentes materiais (Figura 12).

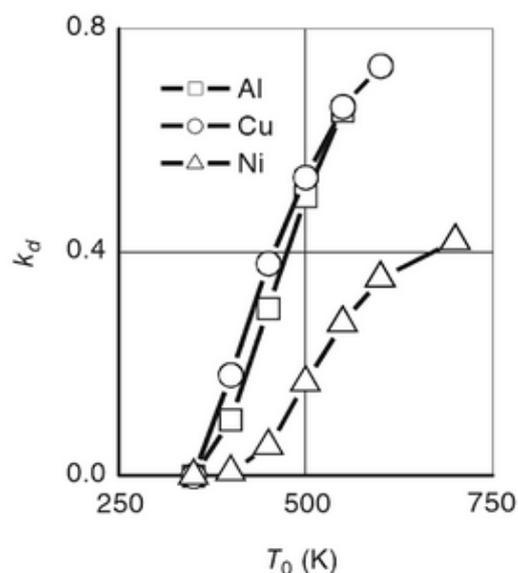


FIGURA 12 – EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DE DIFERENTES MATERIAIS ASPERGIDOS EM SUBSTRATO DE COBRE VERSUS TEMPERATURA DE ESTAGNAÇÃO DO GÁS DE ASPERSÃO
 FONTE: Papiryn *et al.*, (2007).

O que explica este fenômeno é que a alta temperatura causa um leve amolecimento da partícula, o que facilita a sua aderência no substrato e diminui o efeito de rebatimento desta quando atinge a superfície. Porém é importante ressaltar que este aquecimento do ar se dá de tal forma que não promove a fusão do material das partículas. Ou seja, o processo com o uso de ar aquecido como gás de processo continua sendo um método de deposição de partículas no estado sólido. Se fundidas, estas partículas não terão a solidez suficiente para promover a deformação mecânica no substrato, necessária para o efeito de ancoragem e aderência da camada. Este é o motivo pelo qual o termo “cold” é utilizado para definir esta tecnologia.

As curvas mostradas anteriormente e os resultados obtidos nos experimentos dos autores conduzem a algumas conclusões. A primeira e mais geral delas é a de que a temperatura exerce influência no processo de deposição. Outra conclusão foi a de que o aquecimento do gás de processo na pré-câmara não somente provoca a aceleração das partículas, mas também leva ao aquecimento e amolecimento térmico da partícula e do substrato. Como já visto, todas estas modificações conduzem ao aumento da probabilidade de aderência da partícula e, portanto, aumentam a eficiência de deposição, conforme mostram os diagramas. Por fim, conclui-se também que, por promover o aquecimento do conjunto partícula-substrato e o aumento da eficiência de deposição, a temperatura do gás mantém uma relação com a velocidade crítica. Assim sendo, o aquecimento do gás na pré-câmara faz com que haja a diminuição da velocidade crítica de deposição para um determinado tipo de material.

2.3 MECANISMO DE IMPACTO E ADERÊNCIA DAS PARTÍCULAS

Compreendidos os parâmetros de velocidade e temperatura envolvidos no processo, pode-se então abordar como estes se relacionam com o mecanismo de aderência das partículas aspergidas sobre um substrato. É importante saber como funciona este mecanismo a fim de entender como formam-se as camadas de revestimento, quais suas características físicas por conta disto, quais as vantagens logradas, quais as limitações, e outras importantes informações.

Assadi *et al.*, (2003) reafirmam que em processos convencionais de aspersão térmica, a qualidade dos revestimentos estão intimamente ligada com as variáveis de velocidade da partícula e temperatura de fusão do material da partícula. Porém, tais autores ressaltam que no processo à chama de alta velocidade (*HVOF*), por exemplo,

algumas das partículas que colidem com o substrato ainda encontram-se em estado sólido. Logo, é reforçado o conceito já apresentado por este texto de que não apenas a energia térmica é importante na formação de densos revestimentos, mas também a energia cinética no instante do impacto. No processo *Cold Spray*, como já mencionado, a velocidade de partícula é o parâmetro responsável por promover a aderência das partículas no substrato. O aquecimento causa, sim, um certo amolecimento das partículas, porém não as funde, tendo como função principal facilitar a aceleração das partículas, como explicado anteriormente.

Como já dito na introdução deste trabalho, a tecnologia *Cold Spray* conta com um mecanismo de aderência de partículas essencialmente mecânico, a partir da deformação plástica extensiva da interface partícula-substrato, assim como ocorre no processo de *cladding* explosivo e também no processo de compactação de pó por ondas de impacto. No *Cold Spray*, este mecanismo é muitas vezes atribuído a um fenômeno chamado “instabilidade de cisalhamento”, como citam Grujicic *et al.*, (2004) e revisam Moridi *et al.*, (2014). Este fenômeno, segundo estes autores, ocorre quando a velocidade de partícula é igual ou superior à crítica, o que explica o fato de não haver aderência, em geral, em velocidades de partículas abaixo da velocidade crítica.

Este fenômeno de instabilidade de cisalhamento ocorre na interface entre a partícula e o substrato, e consiste na criação de um campo de pressão como resultado do impacto da partícula no substrato. Tal campo de pressão, por sua vez, provoca um carregamento cisalhante no material do substrato, gerando uma aceleração lateral do material, o qual deforma-se plasticamente. Como sabe-se, a deformação acentuada do material metálico causa o efeito de encruamento, porém sabe-se também que uma alta taxa de deformação leva a uma liberação de energia, a qual se dá por natureza térmica. No processo de encruamento, ocorre a distorção da estrutura granular do material e multiplicação de discordâncias. Porém, assume-se que 90% da energia gerada no impacto e envolvida na deformação plástica é dissipada na forma de calor. As Figuras 13 e 14 ilustram a deformação plástica e a liberação de energia térmica em função desta deformação, para o caso de um substrato de aço baixo carbono sendo atingido por uma partícula de cobre de 25 μm a uma velocidade de 600 m/s (Figura 13) e outro caso de um substrato de cobre sendo atingido por uma partícula de cobre a 500 m/s (Figura 14). Este aquecimento causa então o amolecimento do material. Desta forma, há uma certa “disputa” entre os fenômenos de encruamento e amolecimento, porém o amolecimento térmico ligeiramente sobrepuja o encruamento,

fazendo com que ocorra um processo em cadeia, localmente instável. (MORIDI *et al.*, 2014). A deformação contínua do material do substrato resulta na formação de uma espécie de cavidade, na qual o material tanto da partícula quanto do substrato levemente escoam lateralmente, formando uma região fina que circunda a interface de contato na qual a deformação plástica se concentra. Essa região forma-se sob aspecto de esguicho (“jet”) e escoam para fora da interface, conforme ilustram as Figuras 13 e 14. Este esguicho de material tem sua devida importância na qualidade de aderência, a qual será logo mais abordada.

Apesar do aquecimento localizado gerado pelo impacto, o processo *Cold Spray* apresentou nas simulações realizadas (SCHMIDT *et al.*, 2007) uma rápida compensação térmica. Na simulação do substrato de cobre atingido por partícula de cobre, observou-se um rápido resfriamento do sistema partícula-substrato, em que 0,5 μ s após o impacto o sistema já estava em temperatura próxima à ambiente (Figura 14d).

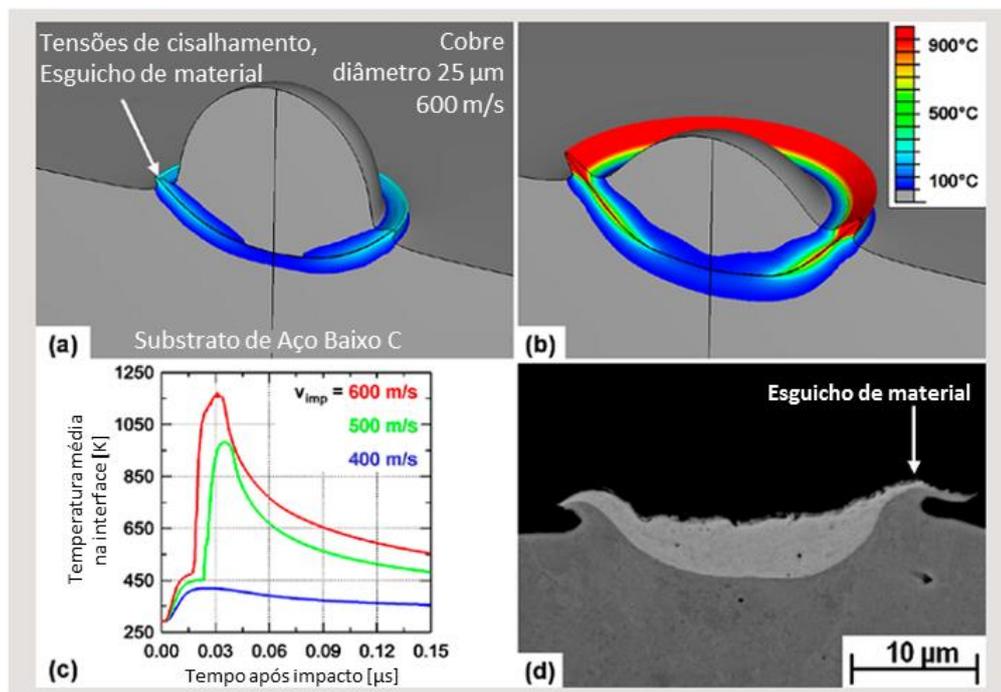


FIGURA 13 – SIMULAÇÃO DE IMPACTO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE 25 μ m E VELOCIDADE DE 600 m/s CONTRA UM SUBSTRATO DE AÇO BAIXO CARBONO. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E CAMPO DE TEMPERATURAS APÓS a) 15 ns; b) 30 ns. c) VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO APÓS O IMPACTO, PARA DIFERENTES VELOCIDADES. d) FORMAÇÃO DO ESGUICHO (OU “JET”)

FONTE: Adaptado de Klassen e Kreye (2006).

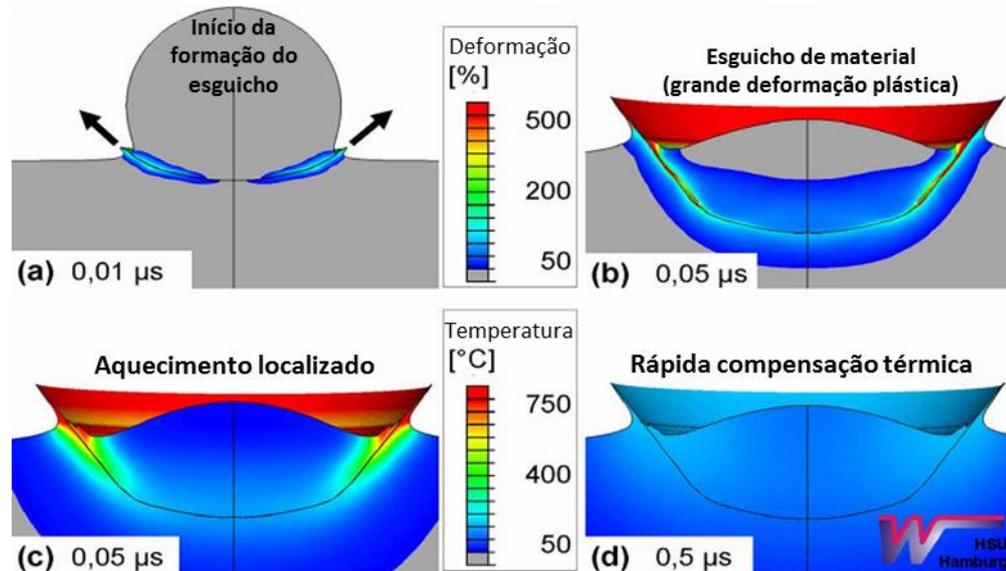


FIGURA 14 – SIMULAÇÃO DE IMPACTO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE VELOCIDADE DE 500 m/s CONTRA UM SUBSTRATO DE COBRE A UMA TEMPERATURA DE 20°C. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E CAMPO DE TEMPERATURAS APÓS a) 0,01 μ s; b), c) 0,05 μ s; d) 0,5 μ s.
 FONTE: Adaptado de Schmidt *et al.*, (2007).

A Figura 15 mostra que, assim como ocorre a formação da cavidade no substrato, ocorre também a deformação da partícula aspergida. Em outras palavras, conforme o tempo de contato entre partícula e substrato aumenta, a razão altura/largura da partícula diminui enquanto que a profundidade e a largura da cavidade formada no substrato aumentam. As imagens das Figuras 15, 16 e 17, tal como os gráficos da Figura 18, foram gerados das análises de Grujicic *et al.*, (2003), em modelagem e simulação computacional utilizando o código CTH, desenvolvido pela *Sandia National Laboratories*, utilizado para simulação de impacto em alta velocidade e fenômeno de penetração envolvendo uma variedade de materiais.

A Figura 16 mostra uma simulação similar, a qual apresentou comportamentos semelhantes. Nesta segunda simulação, porém, alterou-se o material do pó e do substrato. No primeiro caso utilizou-se pó de alumínio e um substrato de cobre. No segundo caso, foi utilizado pó de cobre e substrato de alumínio. Esta inversão de materiais realizada por Grujicic *et al.*, (2003) em suas simulações e análises de impacto comprovou que o aspecto da partícula deformada e da cavidade formada dependem do material do substrato e da partícula. Nestas simulações, apenas os materiais foram modificados, os demais parâmetros desta comparação (tamanho e velocidade de partícula) foram mantidos inalterados.

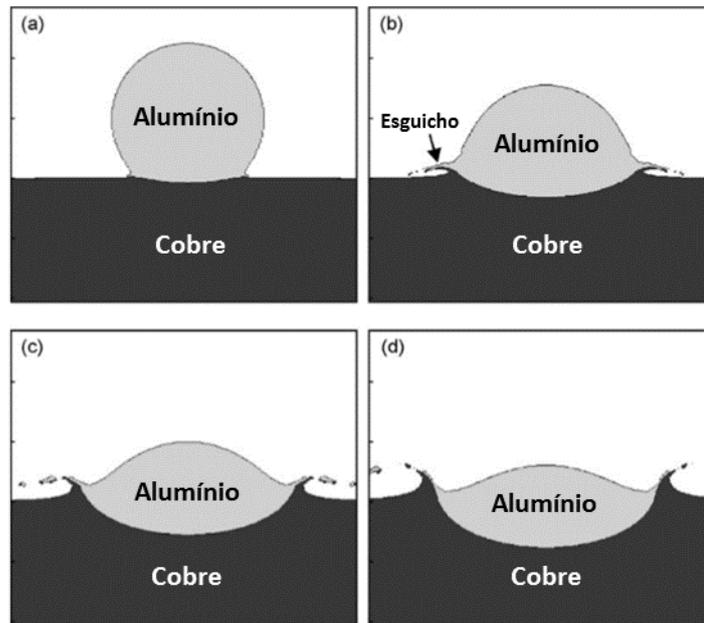


FIGURA 15 – EVOLUÇÃO DO FORMATO DE UMA PARTÍCULA DE ALUMÍNIO DE 20 μm E VELOCIDADE DE 650 m/s E FORMAÇÃO DE CAVIDADE NO SUBSTRATO DE COBRE APÓS a) 5 ns; b) 20 ns; c) 35 ns; e d) 50 ns DE CONTATO NA INTERFACE
 FONTE: Adaptado de Grujicic *et al.*, (2003).

Neste estudo específico, viu-se que a maior resistência mecânica do cobre e a menor resistência do alumínio determinaram a formação de uma cavidade mais profunda no segundo caso se comparada ao primeiro. Nota-se também ao comparar as Figura 15 e 16 uma diferença de aspecto do esguicho (ou “jet”) no entorno da interface. O aspecto do esguicho do substrato, segundo a conclusão de Grujicic *et al.*, (2004), depende dos materiais utilizados. Se como substrato e partícula dois materiais diferentes são utilizados (como é o caso mostrado nas Figuras 15 e 16), quando o material de maior massa específica é utilizado como partícula, geralmente a espessura do esguicho interfacial formado é maior.

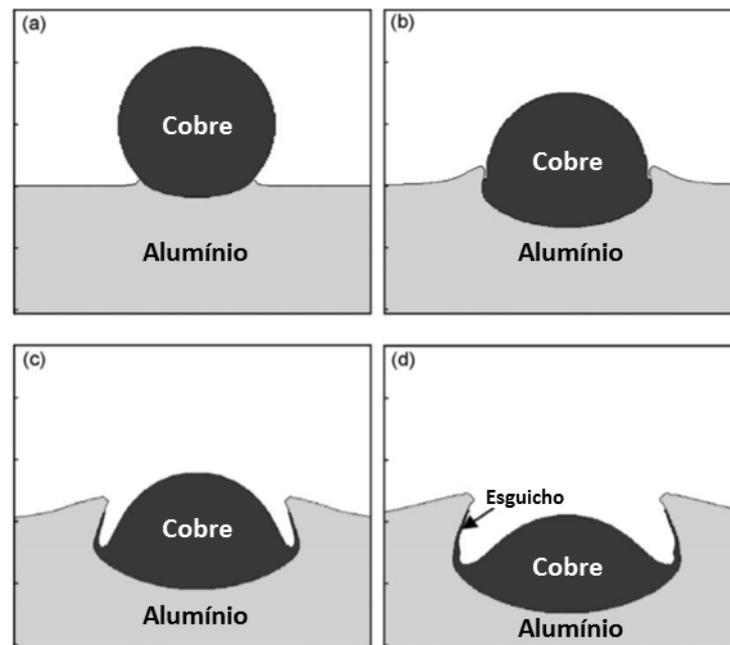


FIGURA 16 – EVOLUÇÃO DO FORMATO DE UMA PARTÍCULA DE COBRE DE 20 μm E VELOCIDADE DE 650 m/s E FORMAÇÃO DE CAVIDADE NO SUBSTRATO DE ALUMÍNIO APÓS a) 5 ns; b) 20 ns; c) 35 ns; e d) 50 ns DE CONTATO NA INTERFACE

FONTE: Adaptado de Grujicic *et al.*, (2003).

Em seu estudo, Grujicic *et al.*, (2003) notaram também a relação entre a formação do esguicho (“jet”) com a eficácia da adesão da partícula no substrato. Testando velocidades mais baixas de deposição (abaixo da crítica), observaram que o esguicho gerado não mais era formado por ambos os materiais, da partícula e do substrato, mas por apenas um deles (Figura 17).

A formação do esguicho, como já visto, provem de um deslocamento de material a partir do impacto. Este deslocamento, segundo Grujicic *et al.*, (2003), serve como mecanismo para limpar a superfície do material em questão, removendo possíveis óxidos ou outros contaminantes presentes naquela superfície. Tendo o esguicho removido as impurezas, o contato de alta pressão entre partícula e substrato se dá de forma mais limpa. Para que ambas as superfícies sejam submetidas a esta remoção de impurezas, todavia, é necessária a formação de esguicho tanto do material da partícula quanto no material do substrato. Logo, o esguicho de ambos os materiais mostra-se crítico, pois uma deficiência na limpeza das superfícies compromete a adesão da partícula e por consequência diminui a eficiência de deposição do processo.

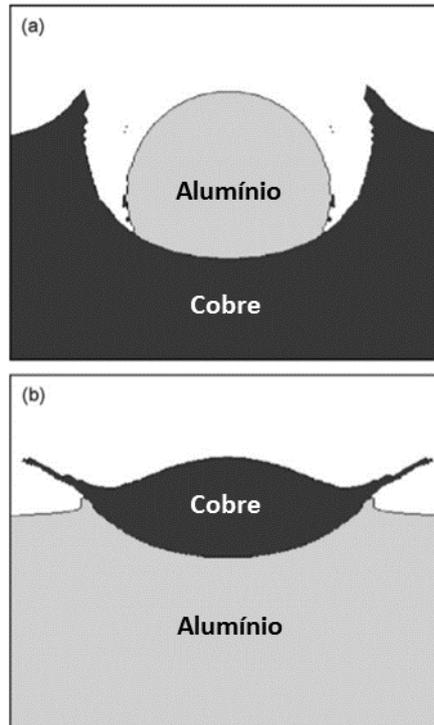


FIGURA 17 – FORMAÇÃO DE ESGUICHO COMPOSTO DE UM MATERIAL APENAS. a) PARTÍCULA DE ALUMÍNIO ASPERGIDA SOBRE SUBSTRATO DE COBRE; b) PARTÍCULA DE COBRE ASPERGIDA SOBRE SUBSTRATO DE ALUMÍNIO.

FONTE: Adaptado de Grujicic *et al.*, (2003).

Ainda sobre o mecanismo de aderência, outros apontamentos interessantes foram feitos por Grujicic *et al.*, (2003). Um deles é com relação à temperatura de fusão e sua influência no mecanismo de aderência. Nas duas simulações citadas, com intercâmbio entre o cobre e o alumínio como material da partícula ou do substrato, observou-se que a temperatura máxima nas interfaces, estimada pelo código computacional ao longo das simulações, brevemente ultrapassou as temperaturas de fusão dos materiais envolvidos. A temperatura de fusão do alumínio (933 K) foi muito brevemente ultrapassada (por no máximo 20 ns, na aspersão de pó de cobre sobre o substrato de alumínio), enquanto que a temperatura de fusão do cobre (1358 K) não foi em momento algum atingida, em nenhum dos dois casos. Ainda, considerou-se a possibilidade de estas máximas temperaturas estarem superestimadas, por razões de limitação do código computacional utilizado, o qual não incluía na análise a transferência de energia térmica que certamente existiria da interface geradora do calor para regiões adjacentes, o que certamente reduziria a temperatura no local.

Os gráficos da Figura 18 apontam a variação da temperatura máxima medida na interface ao longo do tempo, partindo do instante do contato, para diferentes velocidades de partícula na aspersão de alumínio com pó de cobre e também na

aspersão de cobre com pó de alumínio. Percebe-se neles que a temperatura de fusão do alumínio é atingida apenas para a maior velocidade de partícula utilizada (1000 m/s), por um período curto de tempo.

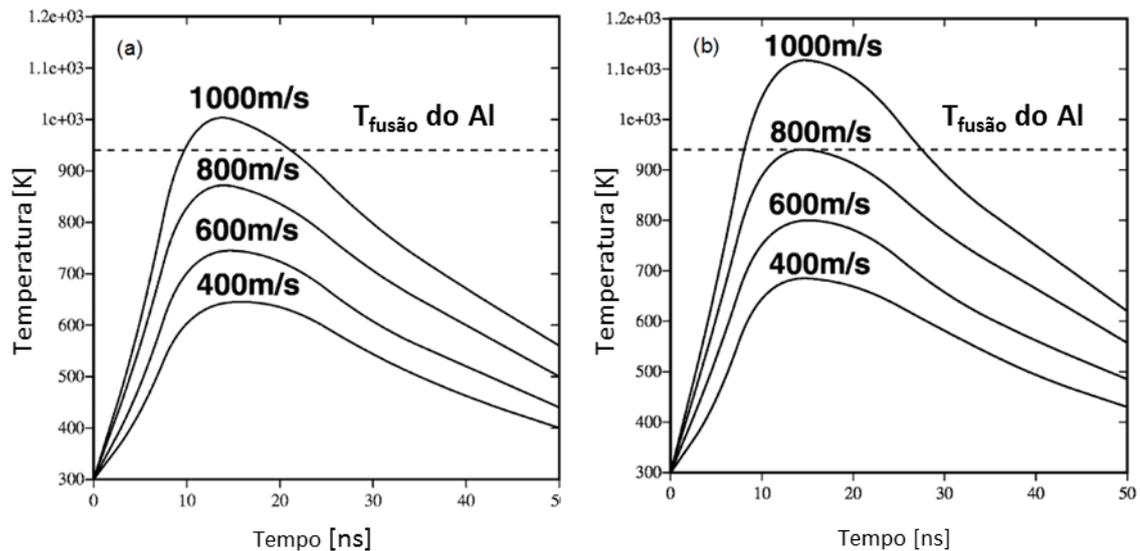


FIGURA 18 – TEMPERATURA MÁXIMA NA INTERFACE PARTÍCULA / SUBSTRATO EM FUNÇÃO DO TEMPO, PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE PARTÍCULA NO PROCESSO DE ASPERSÃO DE a) SUBSTRATO DE COBRE COM PARTÍCULAS DE ALUMÍNIO E b) SUBSTRATO DE ALUMÍNIO COM PARTÍCULAS DE COBRE.
 FONTE: Adaptado de Grujicic *et al.*, (2003).

Com estes dados coletados, Grujicic *et al.*, (2003) sugeriram que, mesmo que possa ocorrer de forma muito localizada, a fusão dos materiais não desempenha um papel chave para a aderência da partícula no processo *Cold Spray*. Resultados de metalografia reforçam tal conclusão, as quais evidenciaram trabalho a frio na estrutura granular na região próxima à interface e apontam uma aderência mecânica entre os materiais.

Devido às altas taxas de pressão e tensão envolvidas nas proximidades da interface, Grujicic *et al.*, (2003), sob os mesmos argumentos utilizados no estudo previamente publicado por El-Sobky (1983) sobre o mecanismo da soldagem explosiva, sugeriu que o material nessas regiões adjacentes, no fenômeno do impacto, pode ser tratado como viscoso ao invés de um material sólido com transição elasto-plástica. Esta suposição abre um leque de possibilidades a respeito de fenômenos característicos de materiais viscosos com potencial de influenciar na aderência das partículas ao substrato, como algumas instabilidades interfaciais, que serão mais tarde incluídas na presente análise.

O mecanismo dominante de aderência da partícula no substrato em um processo *Cold Spray* ainda é tema de discussão. Algumas suposições, neste caso, são feitas de forma a explicar o fenômeno. Como já abordado, acredita-se que a liquefação dos materiais é possível de forma localizada, e pode contribuir em pequena parte com a aderência, porém não é o principal mecanismo. A formação do esguicho, o qual se forma com a deformação e escoamento dos materiais, causando uma fricção relativa entre as superfícies e uma remoção de substâncias indesejadas, também contribui com a aderência, porém de igual modo não é o mecanismo dominante.

Grujicic *et al.*, (2003) afirmam em uma de suas publicações sobre mecanismo de aderência de partícula no processo *Cold Spray* que os principais mecanismos geralmente considerados são: difusão atômica, adesão superficial e deformação plástica. A primeira foi de antemão descartada por tais pesquisadores como principal mecanismo, pois foi observada uma distância pequena de difusão (de no máximo 0,1 nm, ou seja, menor que a distância interatômica), durante o intervalo de tempo no qual o par Al-Cu foi submetido às mais altas temperaturas da simulação. A adesão superficial, por sua vez, é um fenômeno dependente de algumas condições dos materiais, como a limpeza das superfícies e a pressão de contato. Estas condições farão com que as superfícies em contato se conformem mutuamente. A força desta adesão superficial dependerá não somente da morfologia cristalográfica das superfícies, mas também do caráter de interação atômica. Esta interação pode ser de atração ou de repulsão, dependendo da natureza dos materiais. A força total da adesão pode também ser influenciada pela extensão e geometria da interface de contato. Superfícies que apresentam um turbilhonamento viscoso que mistura os materiais envolvidos tendem a promover uma adesão mais forte. Os turbilhões aumentam a superfície de contato e portanto aumentam a mistura de material em escala atômica, além de mecanicamente favorecer o intertravamento entre os materiais. A deformação plástica, segundo Grujicic *et al.*, (2003), tem um papel de dissipação de energia, porém como já visto, a energia térmica não é suficiente a ponto de elevar a difusão atômica ou a fusão de material a um papel chave no mecanismo de aderência.

Com as ponderações até aqui feitas, em resumo diz-se que para uma partícula lançada contra um substrato acima de uma determinada velocidade crítica promove uma boa aderência interfacial entre os materiais como fruto de uma interação microscópica entre os mesmos, que envolve mistura de material e intertravamento.

Esta mistura e intertravamento entre os materiais ocorre através dos mecanismos de instabilidades superficiais, citados anteriormente neste texto, os quais são possíveis graças ao comportamento semelhante ao de líquidos viscosos adotado pelos materiais nas proximidades da interface, ao longo do impacto.

A ocorrência das instabilidades segue o princípio de Kevin–Helmholtz, que prevê a formação de instabilidades na interface de dois fluidos em contato, movendo-se paralelamente com velocidades diferentes. Para a ocorrência deste fenômeno, não é necessário que as viscosidades sejam diferentes. Em outras palavras, tal fenômeno pode acontecer quando utiliza-se pó e substrato do mesmo material. A Figura 19 ilustra a evolução destas instabilidades. Conforme um material é perturbado pelo outro, ambos escoam ao redor do outro por ação centrífuga, e há a formação de turbilhões, que aumentarão a área de contato, e por consequência, de adesão, e também promoverão uma pequena mistura de materiais e intertravamento mecânico.

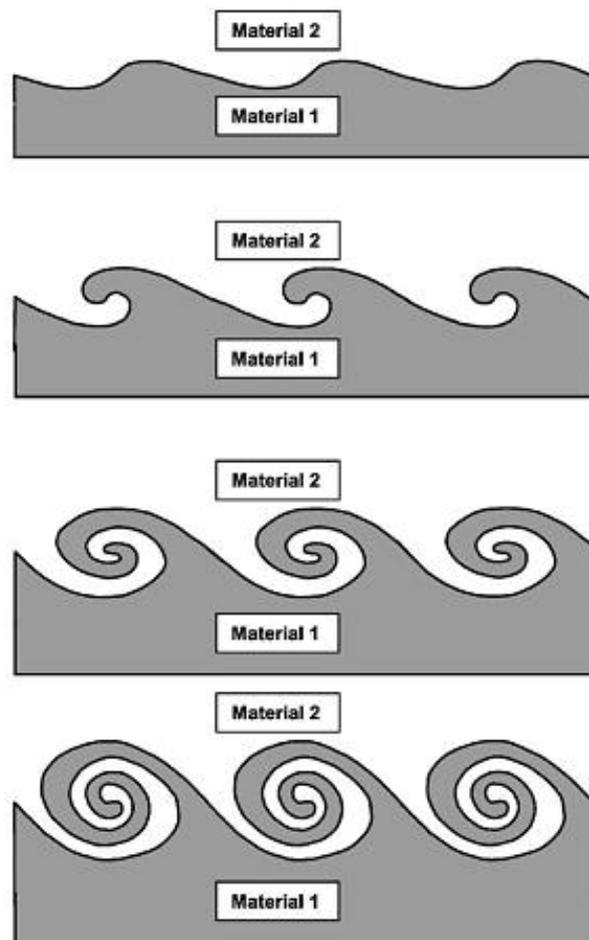


FIGURA 19 – EVOLUÇÃO DAS INSTABILIDADES INTERFACIAIS (VÓRTICES) ENTRE DOIS MATERIAIS DE CARÁTER VISCOZO EM MOVIMENTO PARALELO RELATIVO.

FONTE: Grujicic *et al.*, (2003).

Nas simulações de Grujicic *et al.*, (2003), observou-se uma maior eficiência de aspersão no caso de cobre aspergido sobre o alumínio do que no caso de alumínio aspergido sobre o cobre, o que acarreta a conclusão de que neste último a adesão interfacial entre partícula e substrato foi menor. Através da abordagem de Yih (1967), buscou-se relacionar este fato com o papel das instabilidades superficiais sobre a força de adesão. Yih (1967), em sua análise de mecânica dos fluidos focada em formação de instabilidades, apontou que o período de tempo de evolução de uma perturbação (vórtice) com menor comprimento de onda (maior vetor de onda) é menor do que naqueles com maior comprimento de onda (menor vetor de onda). As Equações de 2 a 4, utilizadas por Yih (1967), mostram isto matematicamente. A Equação 3 é uma função temporal da amplitude de uma perturbação interfacial. Já a Equação 4 é uma equação do período de evolução da amplitude da perturbação.

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

$$\eta \sim e^{i\alpha(x'+ct)} \quad (3)$$

$$\tau \sim \frac{1}{\alpha^2 Re} \quad (4)$$

Onde:

α = Vetor de onda

λ = Comprimento de onda

η = Intensidade da perturbação

x' = posição ao longo da interface

η = velocidade de crescimento da onda

τ = Período de evolução de uma perturbação

Re = Número de Reynolds do material

Nos casos estudados pela simulação de Grujicic *et al.*, (2003), sabe-se que o cobre, por ter maior massa específica que o alumínio, detém uma maior energia cinética sob a forma de partícula de tamanho d incidindo contra o substrato com velocidade v . Logo, a colisão das partículas de cobre sobre o alumínio tendem a gerar

perturbações com menor comprimento de onda do que no caso de deposição de alumínio sobre o cobre. Portanto, com um menor vetor de onda, a taxa de crescimento das perturbações na aspensão de cobre sobre alumínio serão maiores, resultando numa maior ocorrência de vórtices. Assim, aliando resultados empíricos obtidos pela simulação às considerações de Yih (1967), há consistência ao dizer que estes fenômenos contribuem na adesão das partículas ao substrato. Outros estudos realizados por outros pesquisadores, que incluíram micrografia da região da interface, comprovaram que há maior ocorrência de perturbações interfaciais na deposição de cobre sobre alumínio do que na deposição de alumínio sobre cobre (Grujicic *et al.*, 2003).

Apesar das considerações de Grujicic *et al.*, (2003) apontarem a interação entre instabilidades superficiais como sendo chave, outro fator é citado por estes estudiosos como contribuinte no processo de aderência entre partícula e substrato, além dos demais fenômenos até aqui citados: a forma geométrica das cavidades formadas com a colisão das partículas. A própria Figura 16 mostrou a formação de uma cavidade mais reentrante no substrato de alumínio e a conformação acentuada da partícula de cobre no interior da mesma. Esta geometria especial na interface previne a separação dos materiais mesmo para os casos em que não há uma boa aderência entre os mesmos nos termos apresentados anteriormente. Este fenômeno pode explicar a transição da eficiência de deposição igual a zero para uma eficiência de deposição maior que zero. Ao aumentar a velocidade de incidência da partícula, uma energia maior no impacto será produzida, e mais reentrante tenderá a ser a cavidade formada.

Toda a informação sobre o mecanismo de aderência até aqui exposta tratou da interação entre partícula e substrato. Dito isto, é comum imaginar em primeira mão a partícula colidindo contra a superfície original do componente a ser revestido. Porém vale ressaltar que após as primeiras camadas serem depositadas, nas próximas passadas as partículas aspergidas colidirão não mais com a superfície original, mas com a superfície de revestimento depositado. Assim, é importante considerar todos estes fenômenos não só para o par de materiais do substrato original e do pó, mas também o comportamento do pó colidindo com uma superfície já revestida. No exemplo estudado por Grujicic *et al.*, (2003), considerou-se aspensão de cobre sobre alumínio, ou vice-versa. Porém, se supostamente passadas extras fossem

necessárias, seria necessário estudar os mesmos fenômenos, porém para cobre depositado sobre cobre e alumínio depositado sobre o alumínio, respectivamente.

Correlacionando o assunto apresentado no presente tópico com o que foi abordado sobre velocidade crítica no tópico 2.2.1, pode-se assumir como velocidade crítica a velocidade mínima necessária para a ocorrência desses fenômenos de deformação e instabilidade na interface.

2.4 VARIÁVEIS E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E SUAS CORRELAÇÕES

No presente tópico serão comentados outras variáveis, fatores e características do processo de aspersão *Cold Spray*, além das fundamentais já abordadas, dando ênfase nos valores usualmente aplicados para cada das variáveis e na forma como estes fatores influenciam uns aos outros.

2.4.1 Diâmetro de partícula

O tamanho de partícula utilizado na tecnologia *Cold Spray*, segundo Pawlowski (2008), geralmente fica no intervalo 5 – 20 μm , similar ao processo de aspersão por plasma no vácuo, embora alguns casos foram reportados como bem sucedidos utilizando partículas maiores, de até 200 μm .

O diâmetro de partícula (ou em outras palavras, o volume da partícula) utilizada no processo *Cold Spray*, independente do material do qual esta é composta, afeta a velocidade da partícula no processo. O tamanho de partícula é inversamente proporcional ao valor da velocidade de partícula, respeitando a seguinte relação:

$$V_p = \frac{k}{d^n} \quad (5)$$

Onde:

V_p = Velocidade de partícula

d = Diâmetro da partícula

k, n = Coeficientes relacionados às condições do gás para determinado material

Além da influência sobre a velocidade da partícula, o tamanho de partícula influencia a velocidade crítica do processo. Para que ocorra o início das instabilidades

interfaciais comentadas anteriormente, uma certa quantidade de energia é necessária no impacto. Sabendo, portanto, que a energia cinética envolvida no impacto é uma função tanto da velocidade de impacto quanto da massa da partícula que incide contra o substrato, partículas maiores tendem a aumentar a energia de impacto. O impacto de partículas maiores e a consequente liberação de energia provoca um aquecimento interfacial e um amolecimento térmico mais efetivo no substrato, o que favorece a aderência da partícula. Desta forma, a probabilidade de aderência da partícula aumenta, aumentando então a eficiência de deposição, para aquela dada velocidade de impacto. A Figura 20 apresenta um gráfico que mostra a relação estabelecida entre o tamanho de partícula e a velocidade de impacto e também a velocidade crítica como função do tamanho de partícula e da temperatura na interface. A Figura 21 por sua vez apresenta, para o caso de deposição Cu-Cu, a temperatura na interface como função do tamanho de partícula e da velocidade desta no impacto, fatores estes que determinam a energia envolvida no fenômeno. Observa-se no gráfico da Figura 21 que em nenhum dos casos simulados, para qualquer velocidade de impacto e tamanho de partícula, a temperatura de fusão do cobre foi atingida.

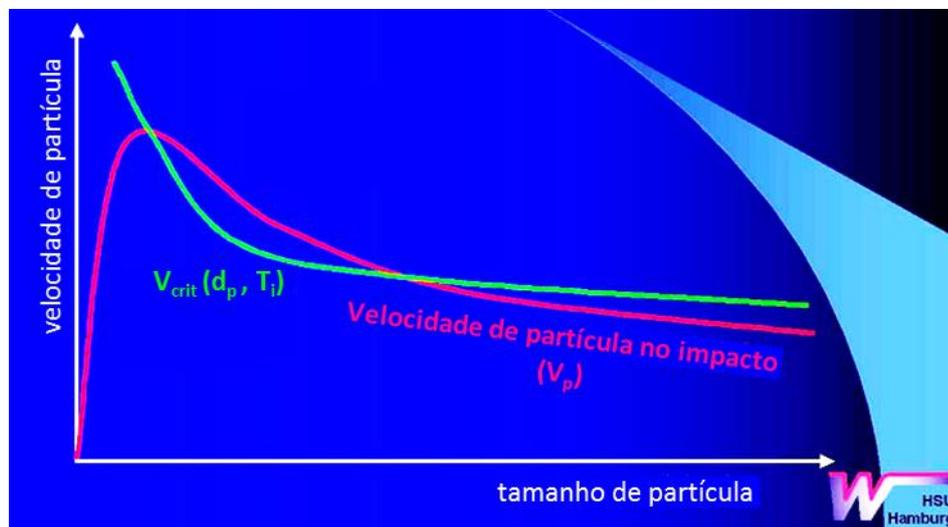


FIGURA 20 – VELOCIDADE DA PARTÍCULA NO IMPACTO E VELOCIDADE CRÍTICA DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA

FONTE: Adaptado de Schmidt *et al.*, (2007).

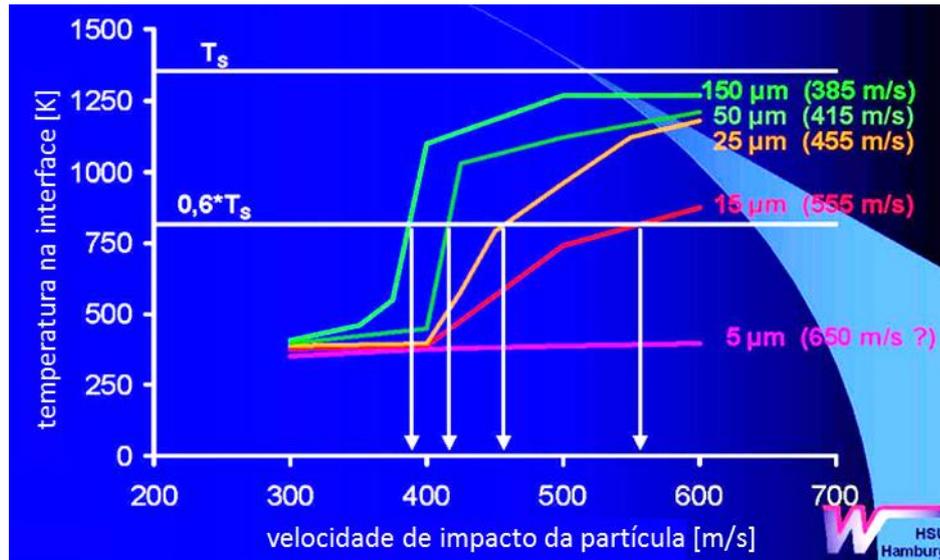


FIGURA 21 – TEMPERATURA MÁXIMA NA INTERFACE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO DA PARTÍCULA E DO TAMANHO DE PARTÍCULA
 FONTE: Adaptado de Schmidt *et al.*, (2007).

Recordando o que foi dito sobre a relação entre velocidade de partícula e velocidade crítica, sabe-se que para a aderência da partícula acontecer a velocidade de impacto deve superar a velocidade crítica. Se assim não for, haverá maior probabilidade de a partícula atingir o substrato e ser rebatida. Sabendo disto e voltando a analisar o gráfico da Figura 20, percebe-se que a velocidade de impacto supera a velocidade crítica apenas em um determinado intervalo de tamanho de partícula, dadas condições fixas de processo. A Figura 22 indica este intervalo numa forma mais visual. Fora dele, há uma queda na eficiência de deposição e um incremento na porosidade do revestimento por motivos já mencionados.

Uma forma de otimização do processo está em aumentar esse intervalo ótimo de tamanho de partícula. Isto pode ser conseguido aumentando a velocidade da partícula e/ou diminuindo a velocidade crítica. Estes efeitos podem ser obtidos modificando as variáveis do processo. Estas modificações serão comentadas nos tópicos correspondentes a cada uma dessas variáveis.

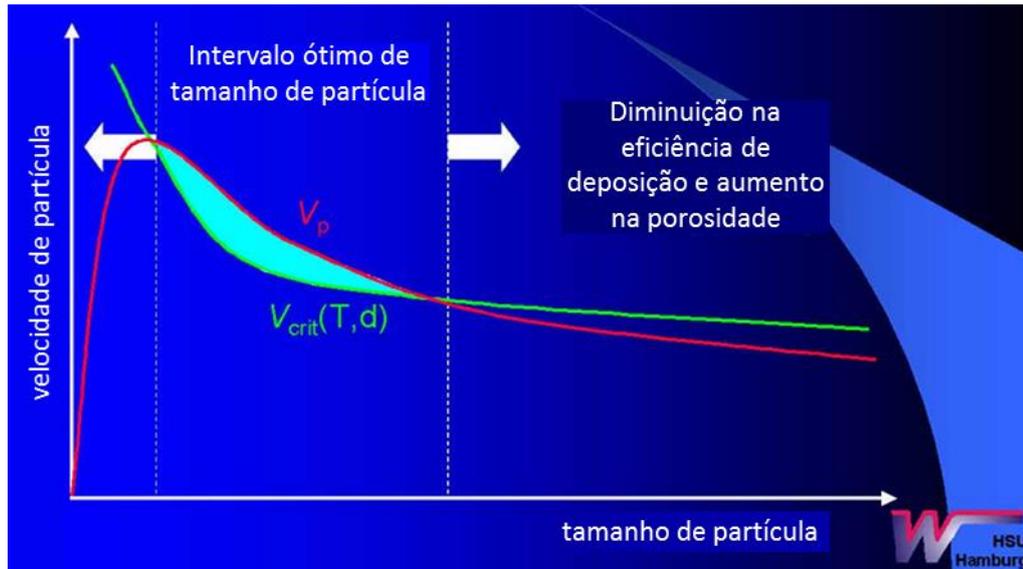


FIGURA 22 – INTERVALO ÓTIMO DE TAMANHO DE PARTÍCULA, DENTRO DO QUAL A VELOCIDADE DE PARTÍCULA SUPERA A VELOCIDADE CRÍTICA, PROMOVENDO ADERÊNCIA EFETIVA E DENSIDADE ADEQUADA DO REVESTIMENTO.

FONTE: Adaptado de Schmidt *et al.*, (2007).

2.4.2 Gás de processo

Será visto mais adiante que, dependendo do sistema, podem ser utilizados dois gases diferentes (ou de fontes diferentes), um para aporte das partículas até o bocal apenas e outro como gás principal de processo, ou um gás apenas que cumpre ambas as funções. Tratando-se da escolha do gás de processo a ser utilizado, a principal consideração levantada é a qualidade do revestimento. A natureza do gás de processo pode influenciar diversas características do revestimento, como força de aderência, densidade do revestimento, integridade estrutural interna ao revestimento, microestrutura são exemplos de fatores que podem ser afetados pela natureza do gás. Alguns pré-requisitos são impostos para escolha do gás do processo: inerte, para que se evite acidente com pó de materiais de natureza explosiva e também se evite alterações nas propriedades dos materiais envolvidos; e de baixo custo, devida ao alto consumo envolvido. Outros aspectos desejados num gás é que ele tenha elevada velocidade sônica e massa, de forma que consiga transmitir tal energia cinética às partículas, conforme demanda o processo *Cold Spray*. (CHAMPAGNE, 2007)

Sabendo de tais exigências e analisando-se a Tabela 1, nota-se que nem sempre um gás cumpre todos os requisitos. O gás hidrogênio, por exemplo, possui elevada velocidade sônica, porém é reativo em contato com o ar em alta velocidade,

com potencial de combustão e explosão. O argônio por sua vez é inerte e possui elevada massa, porém sua velocidade sônica é baixa e possui um alto custo.

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS E CUSTO QUALITATIVO DE GASES CANDIDATOS AO PROCESSO *COLD SPRAY*

Gas	Velocidade sônica (m/s)	Massa específica na CNTP* (kg/m ³)	Inerte ou Reativo	Custo
Ar comprimido (80% N ₂ + 20% O ₂)	343	1,125	Reativo	Baixo
Nitrogênio (N ₂)	349	1,185	Parcialmente inerte	Baixo
Hidrogênio (H ₂)	1303	0,085	Reativo	Alto
Argônio (Ar)	319	1,69	Inerte	Alto
Hélio (He)	989	0,168	Inerte	Muito Alto
*Condições Normais de Temperatura e Pressão (101325 Pa e 15°C)				

FONTE: Adaptado de Champagne *et al.*, (2007).

Segundo Pawlowski (2008), o gás de serviço responsável por transportar as partículas no processo *Cold Spray* pode ser o ar comprimido, N₂, He e misturas envolvendo estes gases. A vantagem do N₂ e do He e suas misturas sobre o ar é que eles reduzem o nível de oxidação da superfície das partículas se comparado ao nível de oxidação que estas teriam se expostas a um fluxo de ar, fenômeno que prejudica a aderência das mesmas no material do substrato. Deve-se, porém, ressaltar que a formação de óxido na superfície pode sim ocorrer, com menor intensidade, utilizando-se N₂ e He, uma vez que as partículas tem contato com o ar do ambiente e são expostas a temperaturas que contribuem com a oxidação superficial. Outra vantagem do He e N₂ é que são inertes, diferentemente do ar, que consiste na mistura de nitrogênio (inerte) com o oxigênio (reativo). Desta forma, o uso do ar como gás de processo acarreta problemas de qualidade de deposição e de segurança. A vantagem do ar é o baixo custo, caracterizando a solução disponível economicamente mais viável, muito utilizada em sistemas de *Cold Spray* portáteis.

Assim como observado nos primeiros estudos sobre a tecnologia, o He é o gás mais vantajoso em alguns aspectos, uma vez que um leque maior de materiais é possível ser utilizado quando o He atua como gás de processo. Para certos tipos de material a velocidade crítica é muito alta, e torna-se difícil obter-se um revestimento de alta qualidade utilizando o gás nitrogênio, mesmo que com um maior aquecimento do gás. E, mesmo com um alto aquecimento, o uso do gás nitrogênio ainda é problemático, já que em temperaturas elevadas não pode ser mais considerado inerte, principalmente com Titânio e suas ligas. O gás hélio permite aos particulados uma

maior aceleração graças a seu baixo peso molecular (gás monoatômico), o que é necessário para alguns materiais mais duros. Alguns estudos apontam que o uso do He gera uma eficiência de deposição maior do que quando utilizado o N₂, conforme cita Singh *et al.*, (2012), mesmo sem aquecimento.

Mesmo com os bons resultados, nem sempre o gás hélio é viável, pois é muito caro, sendo este um recurso muito menos abundante que o nitrogênio. A Tabela 2 apresenta o custo aproximado dos gases He, N₂ e do ar, em €/kg. Para aplicações industriais, sua utilização vale mais a pena em sistemas de tanque fechado nos quais é possível sua recuperação parcial e reutilização. Alguns sistemas permitem a recuperação do gás hélio com uma alta pureza (>99%) com uma taxa de recuperação de até 85% (SINGH *et al.*, 2012).

TABELA 2 – CUSTO APROXIMADO DOS GASES MAIS UTILIZADOS NO PROCESSO *COLD SPRAY*

Gás	Custo (€/kg)
He	20 a 65
N ₂	0,13
Ar comprimido	≈ 0

FONTE: Adaptado de Stier (2012).

Quanto à taxa de consumo de gás no processo *Cold Spray*, a mesma depende tanto do gás utilizado quanto da configuração dos parâmetros de processo (temperatura e pressão) e diâmetro da garganta do bocal. O diagrama da Figura 23 mostra uma relação de diferentes taxas de consumo para diferentes combinações de gás, parâmetros e diâmetro de bocal. Apesar da comparação utilizar parâmetros semelhantes para ambos os gases (nitrogênio e hélio), sabe-se que na prática os parâmetros de processo para ambos é diferente. Para o gás hélio, utiliza-se pressões mais baixas (entre 15 e 20 bar, em sistemas *Cold Spray* de alta pressão) e menores diâmetros de garganta do bocal (até aprox. 2 mm), com aquecimento praticamente desnecessário. As faixas de pressão, diâmetro do bocal e temperatura de aquecimento para sistemas com nitrogênio são de 30-40 bar, 2-3 mm e 300-800°C, respectivamente. Utilizando os parâmetros comuns para cada um deles, por prática nota-se que a taxa de consumo de gás varia entre 50 e 200 m³/h (CHAMPAGNE, 2007).

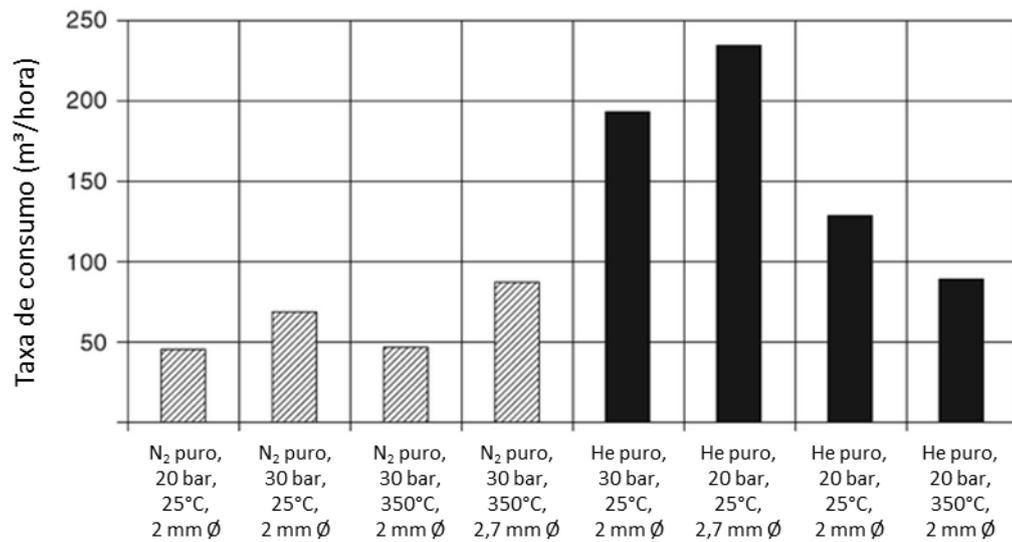


FIGURA 23 – TAXAS DE CONSUMO DOS GASES COMUMENTE UTILIZADOS NO PROCESSO COLD SPRAY PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO (PRESSÃO, TEMPERATURA DE AQUECIMENTO E DIÂMETRO DA GARGANTA DO BOCAL)
 FONTE: Adaptado de Champagne e Ziegler (2007).

2.4.3 Temperatura do Gás e Partículas

A temperatura do gás de serviço tem sua importância não somente no aquecimento das partículas, mas como já dito, influencia na velocidade do gás ao passar pela garganta do bocal, que por sua vez afeta diretamente a aceleração das partículas do processo. A equação 6 mostra a relação entre a velocidade do gás na garganta do bocal e a temperatura do mesmo no local (DYKHUIZEN e SMITH, 1998):

$$V_T = (\gamma R T_T)^{0,5} \quad (6)$$

Onde:

V_T = Velocidade do gás na garganta do bocal

γ = Coeficiente de expansão adiabática

R = Constante de gás específica

T_T = Temperatura do gás na garganta do bocal

Esta relação é estabelecida sabendo-se que na garganta do bocal existe a condição sônica ($Mach = 1$). Sabe-se também que, para fins de aspersão, pode-se assumir o gás de processo como gás ideal. Desta forma, para gases ideais monoatômicos, assume-se que $\gamma = 1,66$, e para gases ideais diatômicos, $\gamma = 1,4$.

Esta mesma equação prova matematicamente também o que foi mencionado no tópico anterior, sobre a vantagem do gás hélio como gás de processo. O gás hélio (monoatômico) possui um coeficiente de expansão térmica maior que o gás nitrogênio (diatômico). Além disso, o gás hélio possui uma massa molecular menor que o gás nitrogênio. Como o constante de gás específica é uma divisão da constante de gás universal pela massa molecular, a constante específica do gás hélio é maior que a do gás nitrogênio. Estes dois fatores, segundo a expressão 6, fazem com que o gás hélio ganhe uma maior velocidade no bocal do que o gás nitrogênio, mesmo sem ser aquecido às mesmas temperaturas que o gás nitrogênio (DYKHUIZEN e SMITH, 1998).

Uma vez que influencie a velocidade, a temperatura do gás automaticamente tem importância na qualidade de deposição, no que diz respeito a presença de porosidade e densidade do revestimento. Maiores velocidades promovem um maior efeito de deformação das partículas, aumentando portanto a densidade e reduzindo a porosidade, já que é maior a quantidade de pontos de contato entre as “panquecas” (i. e. partículas achatadas). Assim, por conta deste aumento nos pontos de contato, aumenta-se também a coesão entre camadas, a microdureza e o módulo elástico (LIMA *et al.*, 2002).

Além do aumento na velocidade de partícula, o aumento da temperatura do gás também causa uma diminuição da velocidade crítica por conta do efeito de amolecimento térmico quando do maior aquecimento das partículas, conforme mostra o gráfico da Figura 24. Estes dois efeitos do aumento da temperatura do gás acarretam o aumento da faixa ótima de tamanho de partículas, ou seja, faixa na qual a velocidade de partícula é maior que a velocidade crítica, conforme mostra a Figura 25.

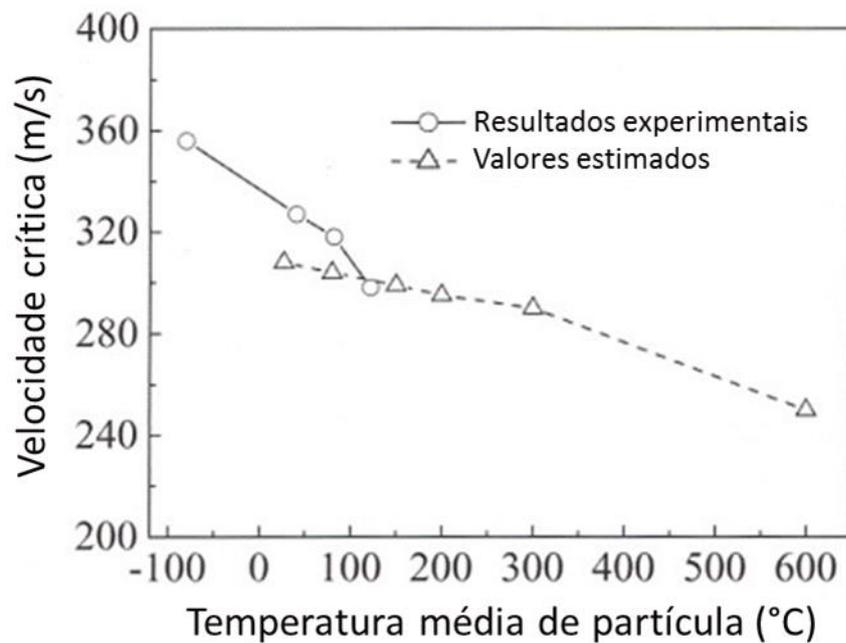


FIGURA 24 – VELOCIDADE CRÍTICA DE ASPERSÃO DE COBRE SOBRE SUBSTRATO DE COBRE NO PROCESSO *COLD SPRAY* EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE PARTÍCULA (RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALORES ESTIMADOS)
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2006).

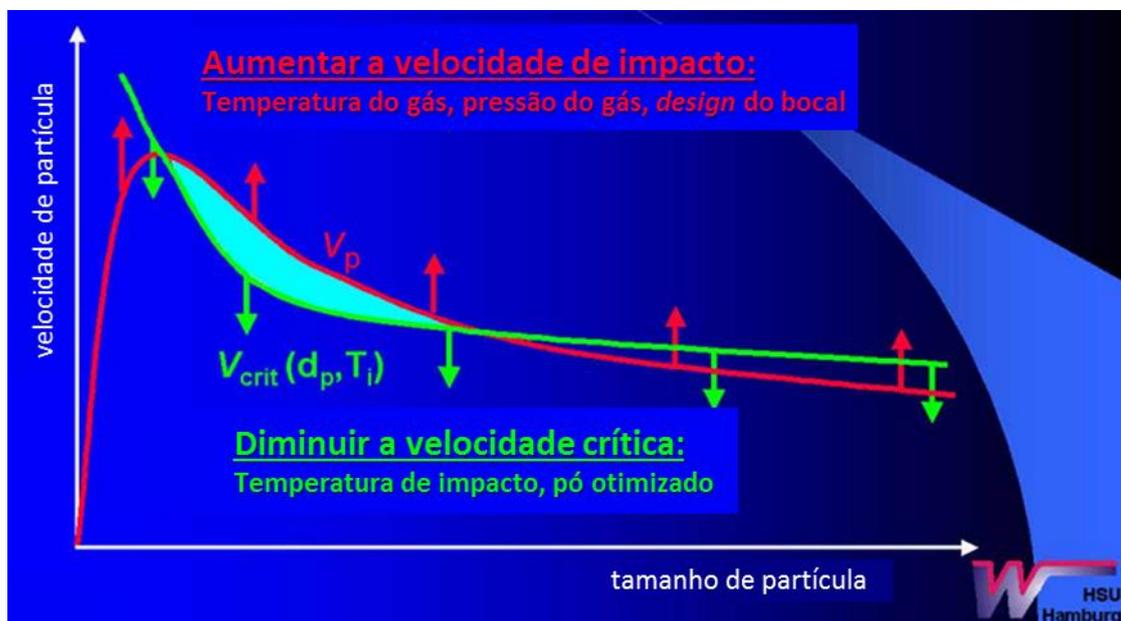


FIGURA 25 – OTIMIZAÇÃO DO INTERVALO ÓTIMO DE TAMANHO DE PARTÍCULA, DENTRO DO QUAL A VELOCIDADE DE PARTÍCULA SUPERA A VELOCIDADE CRÍTICA, PROMOVENDO ADERÊNCIA EFETIVA E DENSIDADE ADEQUADA DO REVESTIMENTO.
 FONTE: Adaptado de Schmidt *et al.*, (2007).

Uma outra análise importante com relação à temperatura do gás é feita por Lima *et al.*, (2002). Segundo tais autores bem apontam, o aquecimento do gás excessivo, além de prejudicar as partículas do processo modificando suas

propriedades, pode também ser responsável por uma diminuição na densidade e viscosidade do gás. Desta forma, o gás perderá seu poder de transporte, o que compromete a aceleração das partículas. Além da perda da capacidade de transportar as partículas, questões de segurança devem ser levados em consideração. O aumento excessivo da temperatura, portanto, deve ser evitado mediante tais argumentos. Desta forma, outras formas de otimização da velocidade são estudados, como melhorias no projeto do bocal, entre outros.

2.4.4 Propriedades Físicas dos Materiais

As propriedades físicas do material das partículas e do substrato, mais especificamente o comportamento elástico, são de suma importância para a eficiência de deposição de camadas por processo *Cold Spray*. Como viu-se no tópico 2.3, referente ao mecanismo de aderência da partícula, o fenômeno de deformação plástica dos materiais é necessário para que ocorra a união entre os materiais, uma vez que a união mecânica é o mecanismo principal pelo qual as partículas aderem-se ao substrato.

A estrutura cristalina de um material pode dizer muito sobre o comportamento físico deste. É sabido que a estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) possui maior número de direções de escorregamento do que outros tipos de estrutura, logo materiais com esta estrutura tendem a ter um comportamento plástico mais acentuado. Materiais com estrutura hexagonal compacta (HC) possuem menos direções de escorregamento, ao passo que possuem comportamento menos plástico. Por fim, a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) também possui comportamento pouco plástico. Outras estruturas, como tetragonais ou trigonais envolvem presença de óxidos de baixa plasticidade, tornando a aplicação do *Cold Spray* limitada para materiais com tais morfologias cristalinas.

Em geral, materiais com um ponto de fusão menos elevado apresentam uma menor resistência à deformação plástica. Assim, estes materiais são considerados mais apropriados quanto a aplicação no processo *Cold Spray*. O cobre, por exemplo, é considerado como um excelente material para o processo, pois tem baixa resistência à deformação plástica e um ponto de fusão não muito elevado (1358 K). Estes materiais com menor ponto de fusão e maior plasticidade normalmente permitem

produzir revestimentos de boa densidade, pois têm fácil compactação e o efeito de *peening* é mais acentuado (GHELICHI *et al.*, 2009)

Nos materiais com estrutura CCC, a movimentação de discordâncias de forma a gerar alta taxa de deformação é dificultada. Esta dificuldade na movimentação de discordâncias está relacionada com diversos fatores, como distância entre planos de escorregamento e largura da discordância. Esta resistência que uma rede cristalina oferece a uma discordância recebe o nome de tensão de Peierls-Nabarro. Pode-se dizer que então que a aplicabilidade de um material na tecnologia *Cold Spray* está relacionada com a intensidade da tensão de Peierls-Nabarro da sua estrutura cristalina. Nos materiais cerâmicos, esta tensão é muito alta. Nos metais de estrutura CCC, tal força é moderada e, nos de estrutura CFC, é baixa. Assim, segundo este princípio, os metais de estrutura CFC são os com melhor aplicabilidade no processo, por terem maior plasticidade. (GHELICHI *et al.*, 2009).

2.4.5 Distância de aspersão

A distância de aspersão, ou a distância entre a saída da pistola e o substrato a ser revestido, também chamada de *stand-off*, é um parâmetro importante para a eficiência de deposição. Cai *et al.*, (2014) realizaram experimentos envolvendo deposição de pó de Al 5056 sobre substratos também de alumínio, utilizando o mesmo equipamento e mantendo parâmetros de processo fixos (velocidade de passada, ângulo da pistola, gás de serviço, gás de alimentação do pó, temperatura e pressão, e outros), variando apenas a distância entre a saída da pistola e o substrato (10, 30, 50 e 70 mm). Constatou-se que diferentes distâncias produziam camadas com diferentes espessuras médias, conforme mostra o gráfico da Figuras 26. Também mediu-se a área dos perfis aproximados de revestimento, conforme a Tabela 3.

Como a quantidade de pó saindo da pistola era igual, uma vez que os parâmetros eram os mesmos para todas as amostras, concluiu-se que a distância influenciava na eficiência de deposição, ou seja, na porcentagem de partículas que aderiu ao substrato. Para as diferentes distâncias obteve-se diferentes perfis de revestimento, variando não somente espessura mas também a largura. No experimento em questão, a distância de 50 mm foi a que gerou o perfil revestimento de maior área, ou seja, com maior quantidade de pó efetivamente utilizado (maior eficiência).

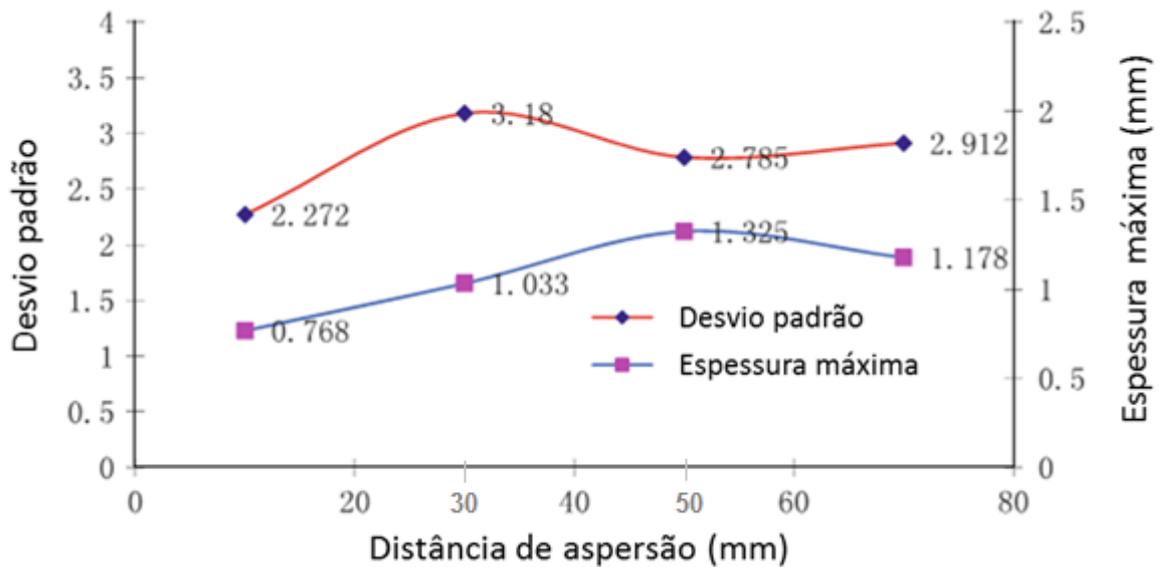


FIGURA 26 – MÁXIMA ESPESSURA DO PERFIL DE REVESTIMENTO E DESVIO PADRÃO, PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE PISTOLA E SUBSTRATO
 FONTE: Adaptado de Cai *et al.*, (2014).

TABELA 3 – ÁREA DA SUPERFÍCIE DO PERFIL 2D DE REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE PISTOLA E SUBSTRATO

Distância de aspersão (mm)	10	30	50	70
Área da superfície do perfil 2D (mm ²)	5,68	7,8	9,462	8,394

FONTE: Adaptado de Cai *et al.*, (2014).

Como nem a menor nem a maior distância apresentou o melhor resultado, porém um valor intermediário, constata-se que para dados materiais existe uma distância ótima. Para distâncias menores que a ótima, não há aceleração suficiente das partículas de forma a conseguir-se a melhor eficiência. Para distâncias maiores, as partículas são desaceleradas (por conta de colisões entre elas durante o trajeto ou então devido à resistência do ar) e perde-se energia cinética de impacto, reduzindo também a eficiência.

2.4.6 Distância entre passadas

Uma das características desejadas em revestimentos por *Cold Spray* é uma boa homogeneidade na espessura do revestimento. Ou seja, para cada demão é formado um perfil de revestimento. Na linha central de cada passada (o qual, segundo Cai *et al.*, (2014) pode ser aproximado a um perfil gaussiano) encontra-se a espessura máxima. Isto significa que as regiões entre uma demão e outra tendem a ter menor

quantidade de pó depositado e, com isto, espessuras menores, fazendo com que o revestimento possua um aspecto ondulado, conforme a Figura 27. A distância entre passadas tem sua importância neste ponto. Cai *et al.*, (2014), em seus experimentos, além de avaliarem a influência da distância de aspersão sobre o resultado, avaliaram também o que a variação na distância entre passadas provoca no aspecto do revestimento. Variou-se o valor do passo entre 2 e 8 mm. Os resultados estão representados no gráfico da Figura 28. Percebe-se que quanto menor a distância, maior foi a espessura média do revestimento e maior também a homogeneidade da espessura (planicidade), o que afeta diretamente a topologia da camada de revestimento. Para menores passos, consegue-se uma superfície mais plana e regular, ideal para aplicações que exigem tolerâncias mais restritas.

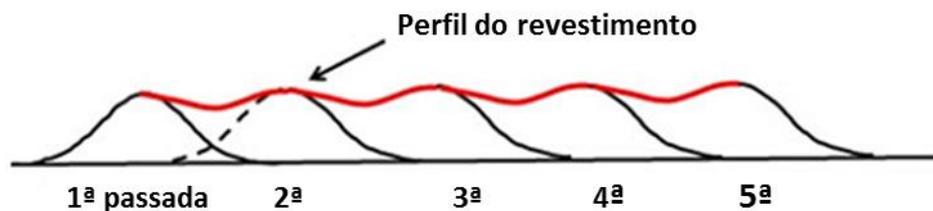


FIGURA 27 – PERFIL DO REVESTIMENTO DE CARÁTER ONDULADO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS PASSADAS
 FONTE: Adaptado de Cai *et al.*, (2014).

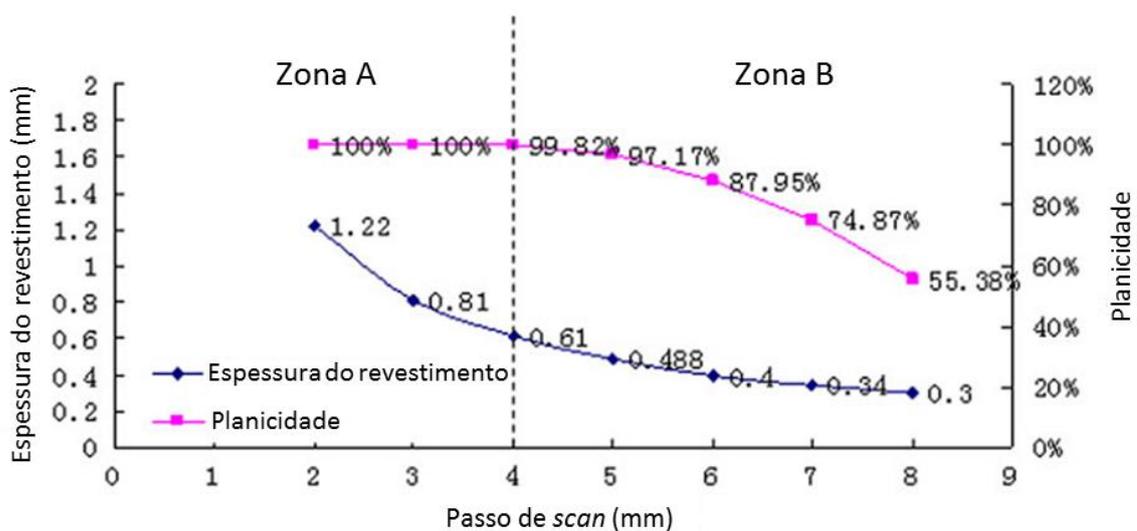


FIGURA 28 – ESPESSURA MÉDIA DE REVESTIMENTO E HOMOGENEIDADE DA ESPESSURA (PLANICIDADE) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE PASSADAS (PASSO DE SCAN)
 FONTE: Adaptado de Cai *et al.*, (2014).

2.4.7 Ângulo de aspersão

O processo *Cold Spray* é um processo de deposição de revestimentos que conta principalmente com a energia cinética. Assim, sabemos que a velocidade de partícula tem papel fundamental na formação ou não formação da camada de revestimento. Porém, quando se fala em velocidade das partículas, sabe-se que esta pode ter componente normal e tangencial em relação à superfície do substrato. Quando varia-se o ângulo da pistola com relação à superfície, assim como ilustra a Figura 29, altera-se o valor destas componentes de velocidade. Para a deposição das partículas, a componente normal é a mais importante. Numa aproximação, o efeito da componente tangencial sobre a deposição pode ser desconsiderada. Uma relação entre a componente normal da velocidade de partícula e o ângulo de aspersão é expressa na Equação 7 (Li *et al.*, 2006).

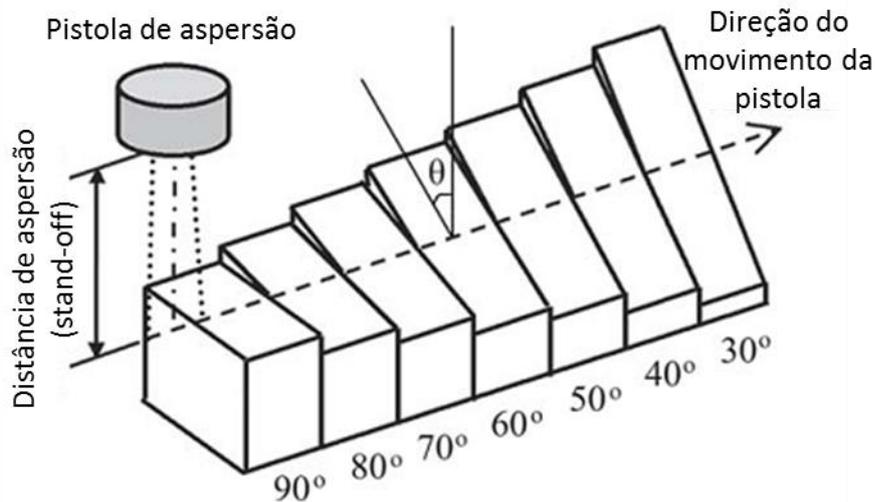


FIGURA 29 – ILUSTRAÇÃO DO CONCEITO DE ÂNGULO DE ASPERSÃO
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2006).

$$V_N = \frac{k}{d^n} \sin(\theta) \quad (7)$$

Onde:

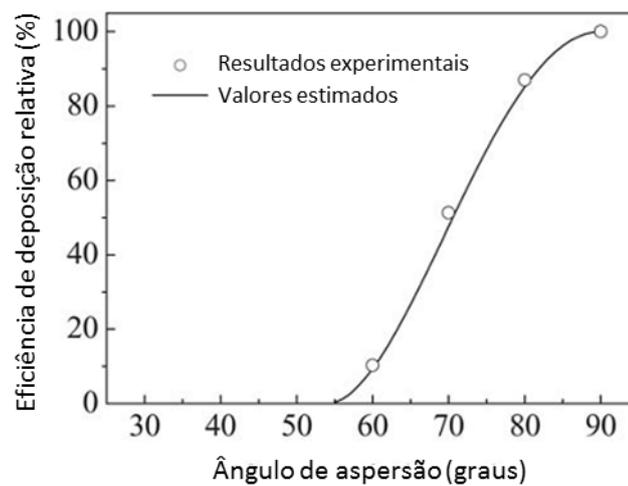
V_N = Componente normal da velocidade de partícula

θ = Ângulo de aspersão (ângulo entre o eixo do bocal e o plano do substrato)

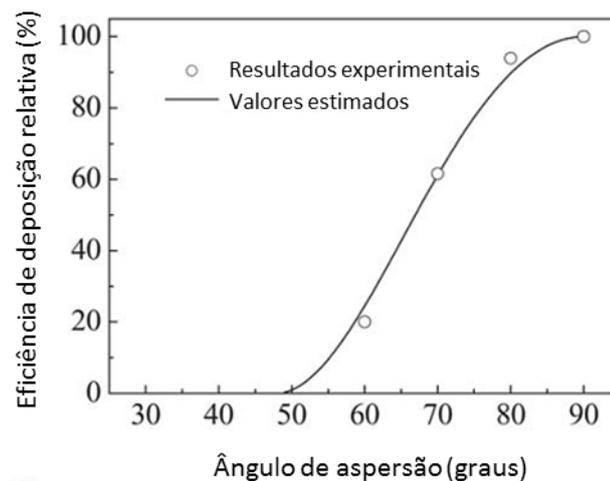
d_p = Diâmetro da partícula

$k, n =$ Coeficientes relacionados às condições do gás para determinado material

Nota-se que, variando o ângulo de 0° a 90° , quanto maior o ângulo, maior a componente normal da velocidade. Assim, a posição da pistola que favorece a componente normal da velocidade (ângulo de 90° entre o eixo da pistola e o plano da superfície do substrato) é a que obtém a melhor eficiência de deposição, conforme mostram os gráficos da Figura 30. Cada um dos gráficos da Figura 30 foi gerado com condições de gás diferentes, conforme descrição na legenda.



(a)

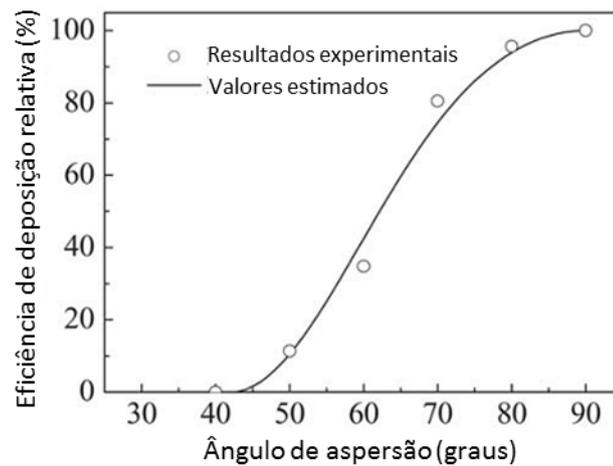


(b)

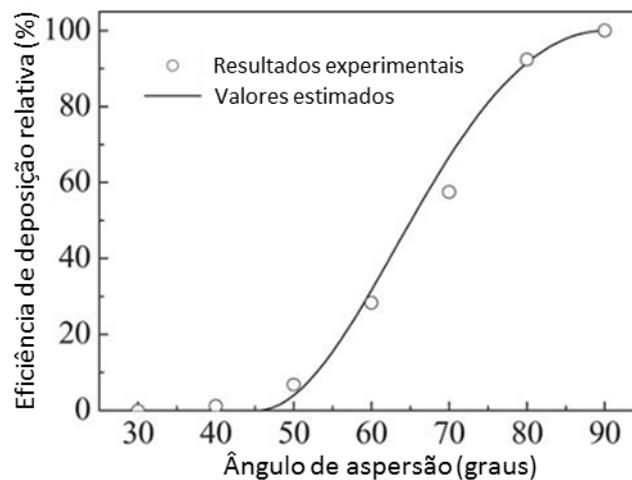
FIGURA 30 – VARIÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO RELATIVA DE COBRE SOBRE COBRE, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ASPERSÃO COM AS SEGUINTE CONDIÇÕES DE GÁS:

a) N₂, p = 2 MPa, T = 265 °C; b) N₂, p = 2 MPa, T = 400 °C

FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2006).



(c)



(d)

FIGURA 30 (cont.) – VARIACÃO DA EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO RELATIVA DE COBRE SOBRE COBRE, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ASPERSÃO COM AS SEGUINTE CONDIÇÕES DE GÁS: c) N₂, p = 2 MPa, T = 540 °C; d) He, p = 1 MPa, T = 165 °C
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2006).

Analisando cada um deles, percebe-se que eles tem em comum o comportamento de atingir maior eficiência de deposição ao passo que o ângulo de aspersão vai se aproximando de 90°. Porém, percebe-se que para cada caso existe um ângulo crítico, abaixo do qual não há deposição (eficiência de deposição $k_d = 0$). Assim, deduz-se que os parâmetros escolhidos para o gás de processo e outros fatores como teor de oxigênio no pó, influenciam no ângulo crítico (LI *et al.*, 2006).

Outros fenômenos sobre os quais o ângulo de aspersão influencia é a natureza do escoamento do gás após o impacto com o substrato e a distribuição de temperatura no substrato. A Figura 31 mostra de forma esquemática a inclinação da pistola de aspersão. Já a Figura 32 mostra os efeitos da inclinação da pistola sobre a

velocidade de escoamento em diferentes regiões antes e depois do encontro do fluxo com o substrato. Nota-se que antes da colisão do fluxo com o substrato, no trajeto da saída até a superfície, não há diferenças perceptíveis entre os diferentes ângulos. As diferenças ocorrem após a colisão, começando pela região de choque em arco. Nesta região, a velocidade do fluxo é bruscamente desacelerada conforme se aproxima do substrato. A forma desta região difere entre os casos apresentados, com diferentes ângulos de aspersão. Quando o ângulo é de 90° e a aspersão é, portanto, perpendicular, esta região tem formato hemisférico regular. Nos demais casos, esta região tem um formato hemisférico irregular (YIN *et al.*, 2013).

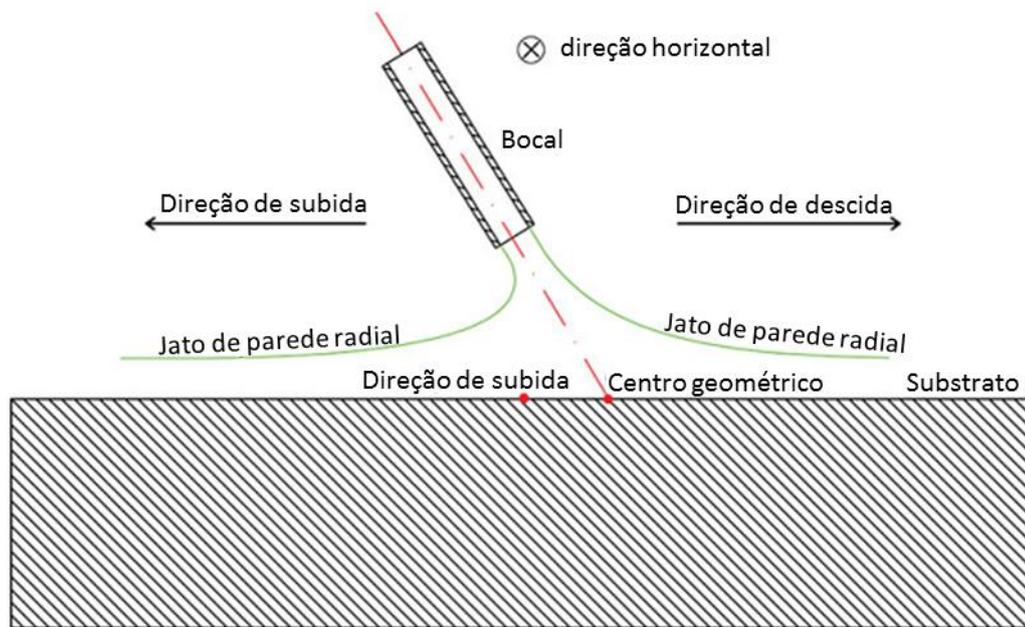


FIGURA 31 – ASPERSÃO COM PISTOLA INCLINADA E OS EFEITOS SOBRE O ESCOAMENTO DO GÁS

FONTE: Adaptado de Yin *et al.*, (2013).

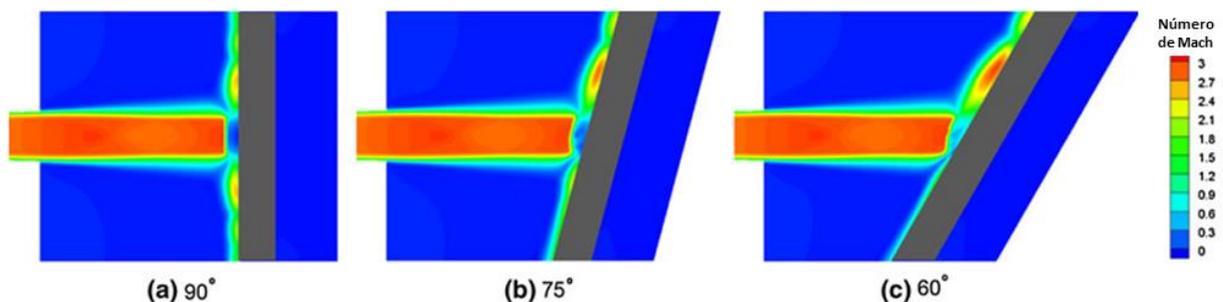


FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES DE ESCOAMENTO (NÚMERO DE MACH) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO

FONTE: Adaptado de Yin *et al.*, (2013).

Após o contato com o substrato, o fluxo passa a escoar radialmente. Este fluxo radial também difere para diferentes ângulos de aspersão. Para a aspersão perpendicular, o fluxo radial ocorre simetricamente para todos os lados, com o mesmo padrão. Como o fluxo radial mantém-se supersônico, ondas de choque oblíquas e de expansão continuam surgindo, resultando numa flutuação da velocidade no fluxo. Conforme inclina-se a pistola de aspersão, diminuindo o ângulo de aspersão, ocorre uma diferença de fluxo entre o lado para o qual foi feita a inclinação (ou direção de subida) e o lado oposto à inclinação (ou direção de descida). Quanto mais se inclina, mas o fluxo rebatido tende a escoar pelo lado de descida e menos para o lado de descida, aumentando a diferença de velocidade entre eles. As ondas de choque e de expansão tenderão a se propagar para o lado de descida conforme a inclinação aumenta.

Tratando-se de distribuição de temperaturas, um efeito semelhante acontece, porém oposto ao de velocidades. Nas regiões onde a velocidade do fluxo é maior, a temperatura tende a ser mais baixa, e vice versa. No caso de aspersão perpendicular, a distribuição de temperaturas no substrato respeita um padrão radial para todas as direções, sendo que as temperaturas na zona circular central são evidentemente mais elevadas do que no entorno, conforme a Figura 33a. Conforme a inclinação aumenta, a distribuição fica gradativamente mais desigual, conforme a Figura 33b,c. A Figura 34 mostra o mesmo efeito, porém em vista superior.

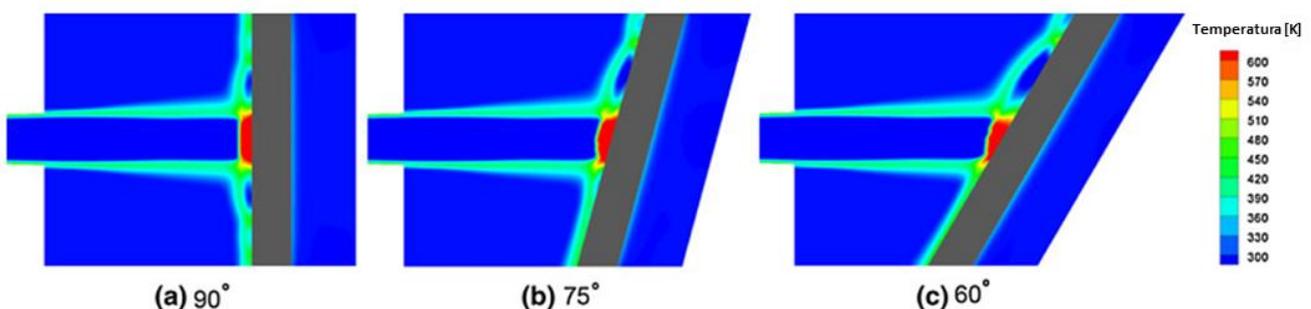


FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS (EM KELVIN) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO – VISTA LATERAL
 FONTE: Adaptado de Yin *et al.*, (2013).

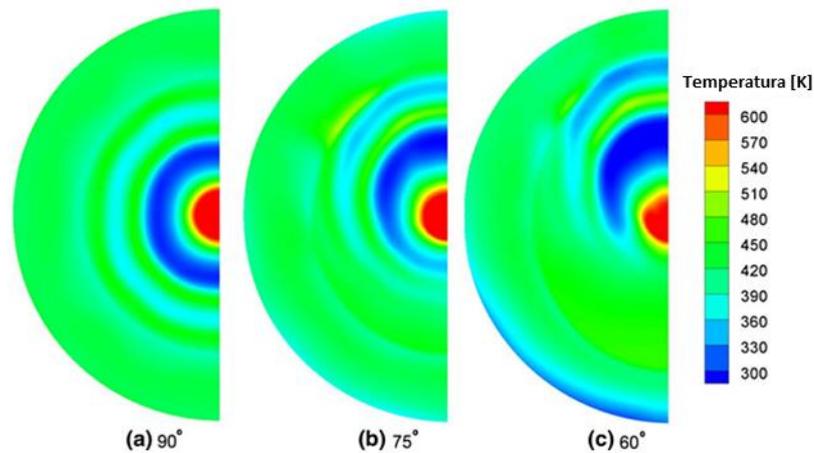


FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS (EM KELVIN) EM DIFERENTES REGIÕES, PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ASPERSÃO – VISTA SUPERIOR
 FONTE: Adaptado de Yin *et al.*, (2013).

2.4.8 Oxidação da partícula

O grau de oxidação da superfície material do pó deve ser avaliado num processo de revestimento através de *Cold Spray*, pois este pode modificar a velocidade crítica de um processo com determinados materiais e parâmetros. Li *et al.*, (2010) observam atentamente que diversos estudos utilizam o cobre por ser um material com propriedades apropriadas para o processo *Cold Spray* e que muitas vezes os diferentes pesquisadores chegam a valores discrepantes para a velocidade crítica, mesmo com os mesmos materiais e parâmetros próximos. Li *et al.*, (2010) afirmam que tal diferença pode ter relação com o teor de oxigênio no pó de aspersão e julgam necessário entender qual a influência que o oxigênio presente pode exercer sobre a velocidade crítica.

Li *et al.*, (2010) realizaram experimentos utilizando diferentes materiais (cobre, aço inoxidável 316L, liga Monel, e outros, em diferentes condições de oxidação, e também compararam os resultados com os obtidos por outros autores. Chegou-se à conclusão de que o teor do oxigênio realmente afeta a velocidade crítica. A Tabela 4 mostra pós de cobre utilizados por diferentes grupos de estudiosos e também por Li *et al.*, (2010) seus teores de oxigênio e as respectivas velocidades críticas reportadas em cada um desses estudos. Nota-se, a despeito de alguns desvios entre os resultados devido à variações entre os procedimentos, que de uma forma geral há uma relação entre o teor de oxigênio e a velocidade crítica. Via de regra, quanto maior o teor, maior a velocidade crítica.

TABELA 4 – TABELA COMPARATIVA DA RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE CRÍTICA REPORTADA POR DIFERENTES AUTORES EM FUNÇÃO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE ASPERSÃO.
MATERIAL: COBRE

Autores	Teor de O (%p)	Vel. Crítica (m/s)
Li <i>et al.</i> , (2010)	0,02	310
Van Steekiste <i>et al.</i> , (1999)	0,1	470
Gilmore <i>et al.</i> , (1999)	0,14	550
Li <i>et al.</i> , (2010)	0,14	550
Stoltenhoff <i>et al.</i> , (2002)	0,2	550
Gilmore <i>et al.</i> , (1999)	0,336	640
Li <i>et al.</i> , (2010)	0,38	610

FONTE: O Autor (2016).

Os gráficos das Figura 35, 36 e 37 mostram os resultados do estudo de Li *et al.*, (2010) utilizando o pó de cobre, aço inoxidável 316L e liga Monel, respectivamente, com diferentes teores de oxigênio. É importante ressaltar em tais experimentos variou-se apenas o teor de oxigênio. Os demais parâmetros foram mantidos constantes, a fim de identificar a relação existente tão somente com o a oxidação do material.

Um aspecto interessante observado por Li *et al.*, (2010) com relação ao efeito da oxidação sobre a velocidade crítica dos materiais é que, nos casos em que o teor de oxidação do material de aspersão é baixo, há uma maior relação entre a natureza do material e a velocidade crítica. Conforme o teor de oxigênio aumenta, a velocidade crítica encaminha-se a uma faixa estreita na qual todos os materiais testados apresentaram em comum. Desta forma, com o aumento severo no teor de oxigênio, o tipo de material torna-se gradativamente menos significativo, pois passa a considerar-se cada vez mais a influência da camada de óxido no impacto com o substrato.

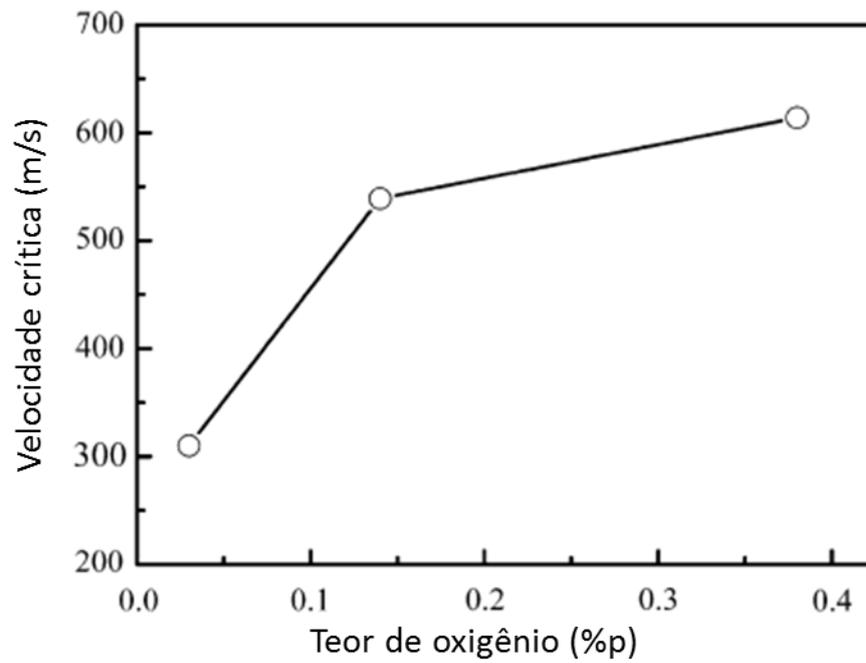


FIGURA 35 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE COBRE SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR *COLD SPRAY*
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2010).

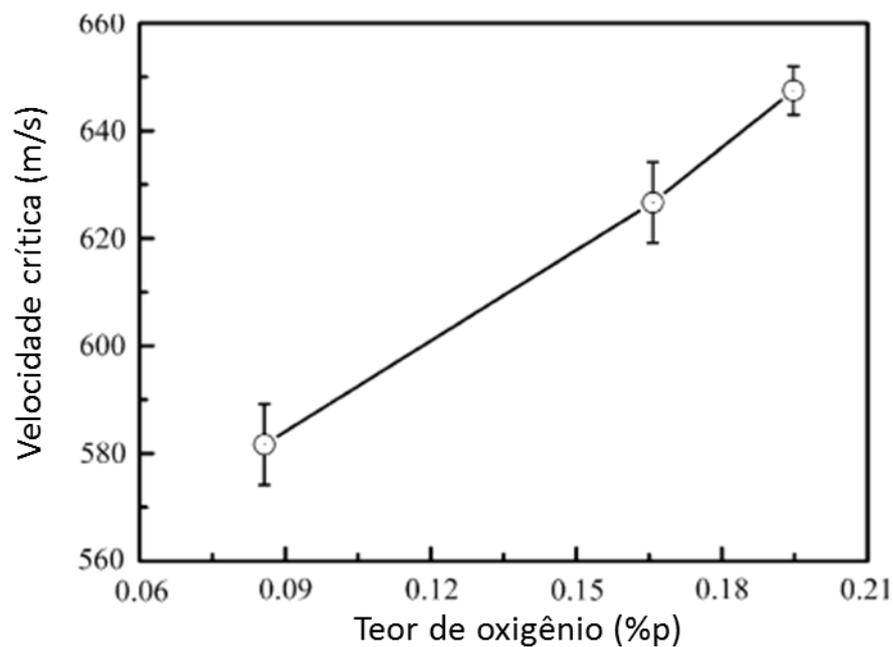


FIGURA 36 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE AÇO INOXIDÁVEL 316L SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR *COLD SPRAY*
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2010).

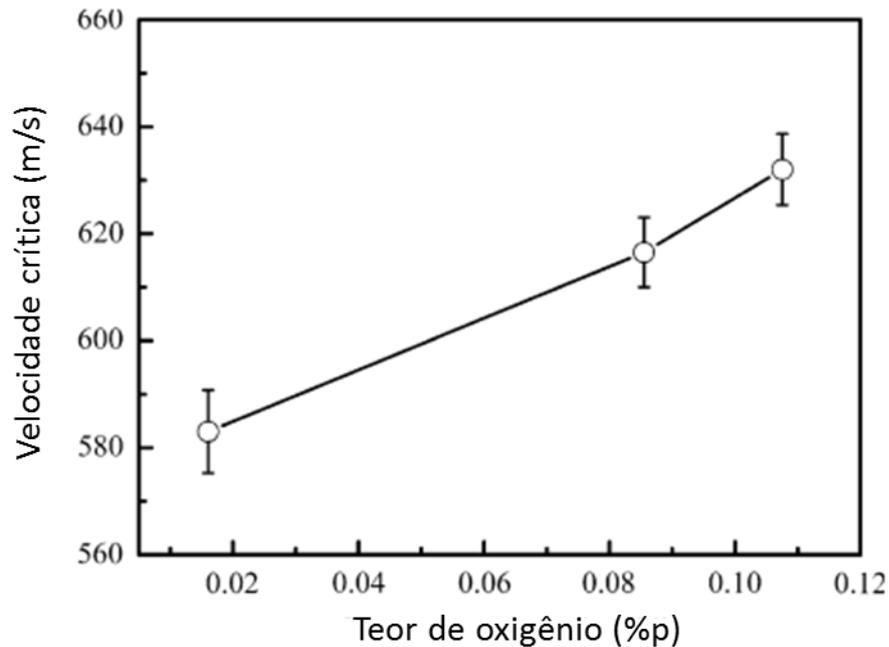


FIGURA 37 – EFEITO DO TEOR DE OXIGÊNIO DO PÓ DE LIGA MONEL SOBRE A VELOCIDADE CRÍTICA NA DEPOSIÇÃO POR *COLD SPRAY*
 FONTE: Adaptado de Li *et al.*, (2010).

Supõe-se duas partículas esféricas de mesmo material e mesmas condições de oxidação, porém uma maior do que a outra. Fazendo uma razão entre a área da superfície e o volume da esfera, sabe-se que esta razão será maior para a esfera de menor volume. Isto significa que a partícula menor possui uma maior área superficial específica. Desta forma, como estão às mesmas condições de oxidação, o teor de oxigênio nesta partícula (%p) será maior do que na partícula de maior volume, o que significa que na aspersão de partículas menores o efeito da oxidação é mais significativo. Assim, conclui-se que existe um aumento da velocidade crítica com a diminuição do tamanho de partícula de aspersão. A influência do tamanho de partícula é pequena, segundo Li *et al.*, (2010), mas existe. Isto leva a crer que a real influência da oxidação sobre a velocidade crítica (i. e. sobre a facilidade da deposição) não é simplesmente a quantidade de oxigênio em si, mas sim a espessura da camada de óxido que envolve a partícula. Quando há esta camada, o processo de aderência da partícula metálica envolve uma quebra prévia desta camada que a envolve. Isto justifica o fato de maiores teores de oxigênio conduzirem a uma menor dependência da composição do material utilizado.

2.4.9 Condições da superfície do substrato

O sucesso da deposição no *Cold Spray*, assim como em outros processos de aspersão térmica, depende tanto das condições do material depositado quanto do material de base, que compõe o substrato. Tal como ocorre nos processos convencionais, a topografia da superfície no substrato afeta diretamente na aderência da partícula. Ghelichi *et al.*, (2009) citam estudos realizados que comprovam esta relação. Segundo eles, superfícies com certa rugosidade tendem a estabelecer uma aderência mais forte com o material aspergido do que superfícies lisas. O que explica isto é a maior ancoragem e intertravamento mecânico que ocorre quando é maior rugosidade. Outro motivo é a que com uma maior rugosidade a área de contato entre o substrato e a partícula deformada é maior, logo o maior número de pontos de contato entre os materiais favorece a aderência. Na aspersão de superfícies mais lisas, Tokarev (1996) reportou a possibilidade de que inicialmente as partículas lançadas contra o substrato não necessariamente formam o revestimento, mas bombardeiam-no de tal forma que lhe conferem certa rugosidade. Daí em diante, as partículas subsequentes encontram uma superfície de rugosidade mais adequada e o revestimento começa então a ser formado efetivamente. É possível considerar que essas primeiras partículas que colidem com a superfície e não aderem, mas sim provocam a abrasão do substrato, desempenham um papel semelhante aos abrasivos utilizados na limpeza e preparação do material a ser revestido.

KUMAR *et al.*, (2009) em seus experimentos de deposição de partículas de cobre sobre substratos de alumínio com diferentes rugosidades, notaram que a deformação das partículas no impacto atingia diferentes níveis para diferentes rugosidades superficiais. Essas diferentes rugosidades foram possíveis por meio da preparação inicial com abrasivos de diferentes diâmetros e formatos. As partículas de cobre foram aspergidas com a mesma velocidade em todas essas superfícies e manteve-se os mesmos parâmetros de processo para todos os casos. Então, comparou-se as taxas de deformação (ou de achatamento). Os resultados sugeriram que na superfície polida (i.e com ausência de rugosidade) a taxa de deformação foi menor. Nas superfícies rugosas, ao passo que a rugosidade aumentava, aumentava também a taxa de deformação da partícula, até um valor ótimo de rugosidade. O tamanho médio de rugosidade que os resultados apresentaram como ótimo foi o equivalente ao tamanho da partícula. No caso específico do estudo, estimou-se que o

tamanho médio de partículas era de 25 μm . As rugosidades médias das superfícies utilizadas no experimento foram de 0 μm (superfície lisa), 12,5 μm (metade do tamanho de partícula), 25 μm (do tamanho da partícula) e 50 μm (duas vezes o tamanho da partícula). A maior taxa de deformação de partícula ocorreu no caso da rugosidade de 25 μm , conforme mostra o gráfico da Figura 38. Para rugosidades maiores que esta, a taxa foi menor. A Figura 39 apresenta os diferentes aspectos da partícula deformada para cada caso de rugosidade citado, tanto por meio de imagens microscópicas quanto em imagens de simulação.

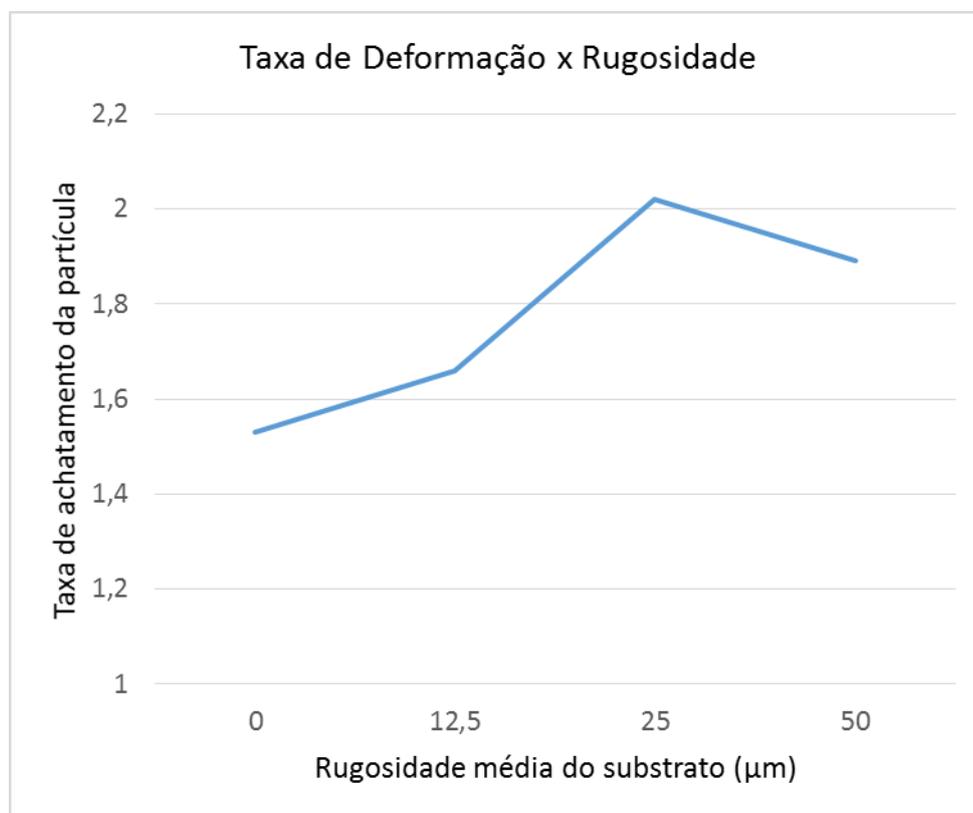


FIGURA 38 – TAXA DE DEFORMAÇÃO DE PARTÍCULA DE COBRE DE 25 μm EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO CONSIDERANDO UMA VELOCIDADE DE IMPACTO DE 570 m/s
FONTE: O Autor (2016).

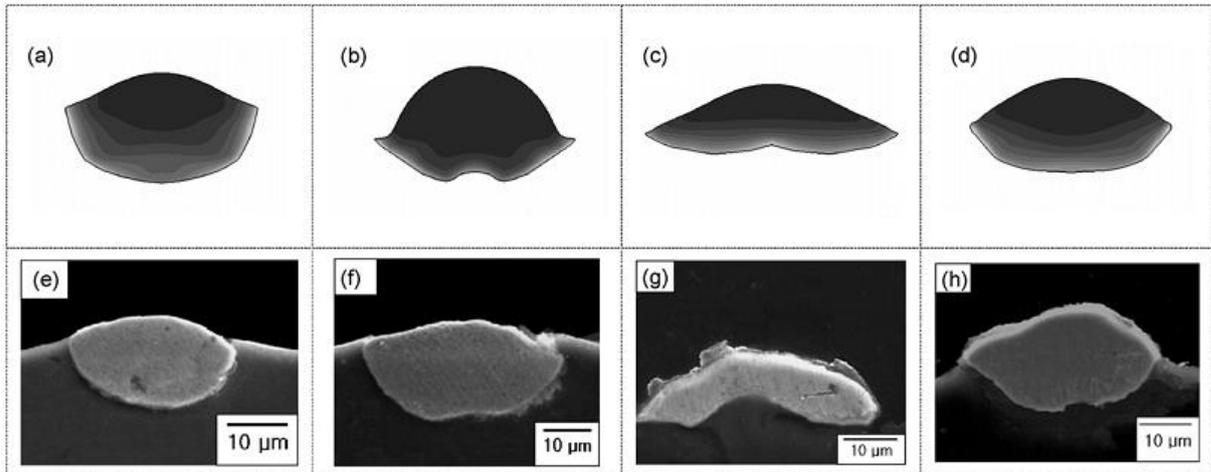


FIGURA 39 – VARIAÇÃO NO ASPECTO DA PARTÍCULA DEFORMADA (DIFERENTES NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO) PARA DIFERENTES NÍVEIS DE RUGOSIDADE DO SUBSTRATO. VALORES DE RUGOSIDADE: a, e) SUPERFÍCIE LISA; b, f) 12,5 μm ; c, g) 25 μm ; d, h) 50 μm
 FONTE: Kumar *et al.*, (2009).

O aquecimento do substrato favorece também a aderência das partículas e aumenta a eficiência de deposição. A Figura 40 é resultado de uma análise do efeito da temperatura do substrato em um processo de deposição envolvendo cobre. Observa-se que a eficiência sofre alterações de acordo com a temperatura do substrato e com a pressão do gás no processo (GHELICHI *et al.*, 2009).

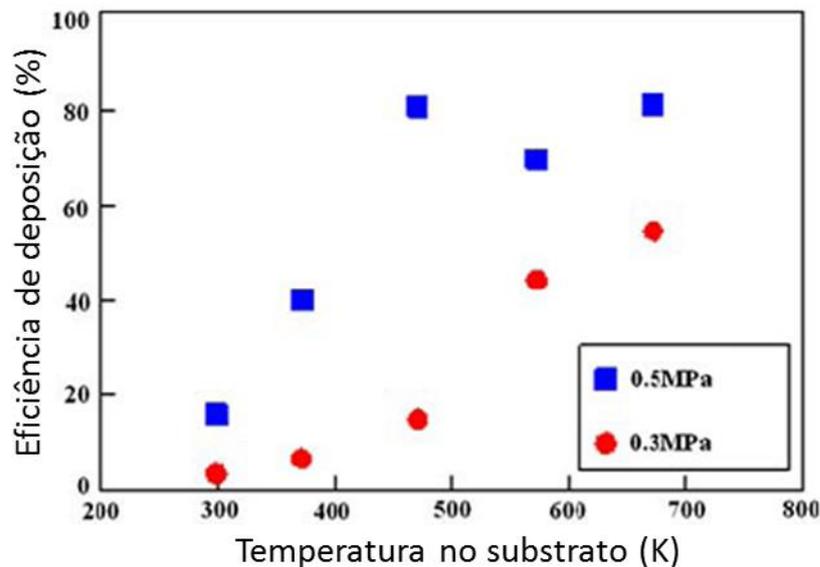


FIGURA 40 – EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE SUBSTRATO, PARA DOIS NÍVEIS DE PRESSÃO DE GÁS.
 FONTE: Adaptado de Ghelichi *et al.*, (2009).

2.4.10 Densidade x porosidade

Como mencionado no tópico 2.4.4, no *Cold Spray* existe um fenômeno chamado *peening*, que é a deformação mecânica causada nas partículas de uma camada a partir da colisão das partículas da próxima camada a ser formada. Este fenômeno ocorre em cascata, pois cada nova camada causa a compactação das camadas inferiores. Logo, as camadas mais inferiores sofrem deformação mecânica mais acentuada que as superiores, pois sofrem mais vezes o efeito do *peening*. As camadas mais externas, por não terem sido tão deformadas por outras partículas, apresentam aspecto mais poroso.

A relação entre a velocidade de partícula e o efeito do *peening* é dedutível. Maiores velocidades culminam em maiores quantidades de energia na colisão, portanto maiores taxas de deformação são geradas nas camadas já depositadas. Assim, processos que envolvem alta velocidade de partícula geram revestimentos mais densos. A diferença de porosidade entre as camadas mais internas e mais externas pode ser tornar-se menos significativa com velocidades de partícula mais altas.

Como a velocidade atingida pelas partículas dependem do gás de aceleração utilizado por conta de suas propriedades físicas, a escolha do gás é um fator importante na questão da microestrutura do revestimento.

A Figura 41 exemplifica o efeito do *peening*. Neste exemplo depositou-se pó de titânio sobre um substrato polimérico. Nota-se nesta fotografia de seção transversal a maior porosidade na região mais externa do revestimento e o caráter mais denso da região interna, próxima à interface com o substrato.

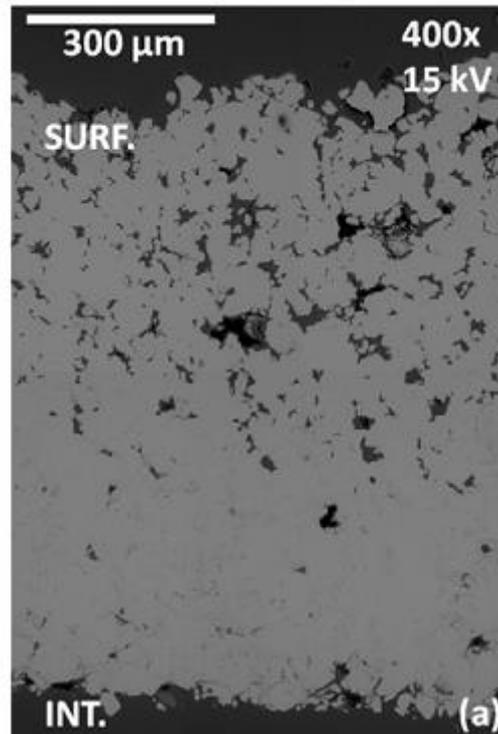


FIGURA 41 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE REVESTIMENTO DE TI DEPOSITADO SOBRE SUBSTRATO DE PEEK EXEMPLIFICANDO O EFEITO DE *PEENING*
FONTE: Gardon *et al.*, (2013).

3 ESTUDO DE MATERIAIS

Conforme já mencionado, a elegibilidade de um material para ser utilizado no processo *Cold Spray* depende de sua capacidade de deformar-se, a qual é regida pela sua estrutura cristalina e os respectivos sistemas de deslocamento de discordâncias. De uma forma geral, metais que apresentam baixo ponto de fusão, baixo limite de escoamento e baixa resistência mecânica são bons materiais para revestimento depositado pelo processo *Cold Spray*. Também é uma qualidade importante a capacidade de amolecimento térmico do material, pois é graças a este fenômeno que ocorre a alta taxa de deformação das partículas, garantindo a formação de uma camada densa. No presente capítulo será tratado os principais sistemas de materiais considerados na tecnologia *Cold Spray* atualmente (metais, compósitos e cerâmicos, polímeros) e alguns estudos realizados sobre eles, segundo publicações recentes. Os comentários sobre tais estudos serão breves, pois não é o objetivo do presente texto aprofundar-se em estudos de casos específicos. Recomenda-se a consulta às referências para um entendimento mais aprofundado

A tabela do Anexo 1 contém uma relação de materiais utilizados atualmente na tecnologia *Cold Spray*, os substratos sobre os quais geralmente são depositados e o papel que geralmente cumprem em sua aplicação.

3.1 METAIS

Os materiais metálicos eram e ainda são os materiais mais utilizados estudos de aplicação do *Cold Spray* a fim de entender o mecanismo de deposição dessa tecnologia. Destacam-se o Cu (Figura 42), Al, Zn e suas ligas, pois apresentam as características físicas mais apropriadas para o processo. Outros materiais que tenham maior resistência mecânica e ponto de fusão, apesar de não serem os ideais para utilização no processo, não deixam de ser utilizados. Alguns exemplos são materiais a base de Fe e Ni (Figura 43), Ti e suas ligas, aços inoxidáveis, tântalo, nióbio, entre outros. Ainda que variando caso a caso, de uma forma geral os revestimentos metálicos produzidos pelo processo *Cold Spray* são densos, apresentando baixa porosidade se comparados aos produzidos por alguns processos convencionais de aspersão menos enérgicos.

Industrialmente, existe o interesse de se conhecer, para cada material, os efeitos e características mecânicas e químicas dos revestimentos, como força de aderência, dureza, aumento do limite de fadiga, nível de oxidação, e outros fenômenos, dependendo da aplicação.

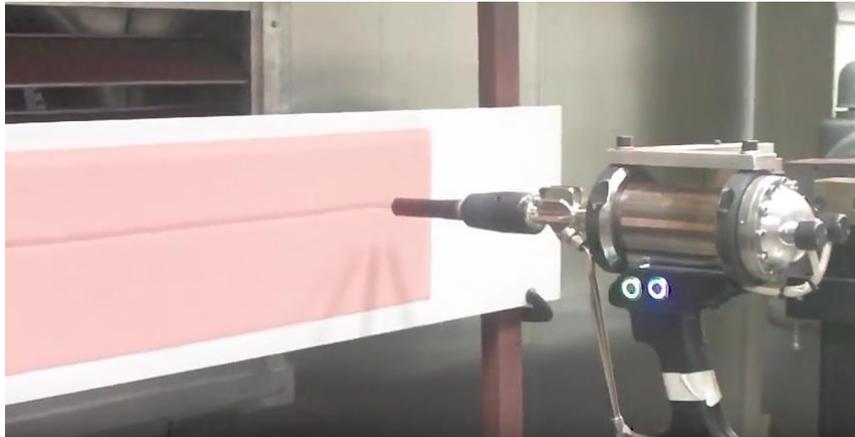


FIGURA 42 – DEPOSIÇÃO DE COBRE EM SUBSTRATO DE ALUMÍNIO
FONTE: Autor Desconhecido (2010).



FIGURA 43 – DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL POR COLD SPRAY
FONTE: Autor Desconhecido (2009).

Estudos recentes envolvendo materiais metálicos têm se dedicado a entender o papel do revestimento no ganho do limite à fadiga, assunto que foi alvo das análises de Moridi *et al.*, (2014). Em sua publicação, Moridi *et al.*, (2014) relatam que a aplicação da tecnologia ainda é limitada, e isto deve-se em partes à falta de conhecimento sobre características mecânicas dos materiais de revestimento utilizados no *Cold Spray*. Segundo relatam estes autores, os estudos realizados sobre o tema e os respectivos resultados nem sempre convergem, mostrando-se muitas

vezes controversos. Moridi *et al.*, (2014), portanto, preocupam-se em identificar todos os parâmetros envolvidos e gerar uma forma analítica que os relacione com a resistência à fadiga.

Segundo Moridi *et al.*, (2014), outros temas que têm sido alvo de diversas análises na última década são a relação entre recozimento posterior e uma possível melhora na aderência entre partícula e substrato através de difusão e formação de compostos intermetálicos nas redondezas da interface e o efeito de tratamento térmico a vácuo sobre a microestrutura e microdureza do revestimento.

Pesquisas têm sido também direcionadas para o desenvolvimento de materiais para produção de revestimentos que sirvam como barreira térmica. Tal demanda vem da fabricação de componentes de motor de turbina à gás. Requer-se maior eficiência destes motores, e para isto é necessária a criação de revestimentos que suportem as altas temperaturas de trabalho. Para isto, geralmente deposita-se uma primeira camada metálica-cerâmica (MCrAlY) seguida de uma camada superior somente cerâmica. Desta forma a camada mais externa serve como isolante térmico enquanto a camada metálica interna atua como aderente e proteção à oxidação e corrosão à quente.

O desenvolvimento de metais amorfos (“vidros metálicos”) e o estudo de sua aplicação no processo *Cold Spray* tem ganhado cada vez mais atenção, segundo Moridi *et al.*, (2014). Uma característica atraente nestes materiais é a excelente capacidade de amolecimento térmico que possuem. Dentre tais materiais, destacam-se os BMGs (do inglês “*Bulk Metallic Glass*”), materiais que apresentam excelente plasticidade em temperaturas entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de transição dúctil-frágil. Este ganho em plasticidade pode ser visto nas imagens da Figura 44 (MORIDI *et al.*, 2014).

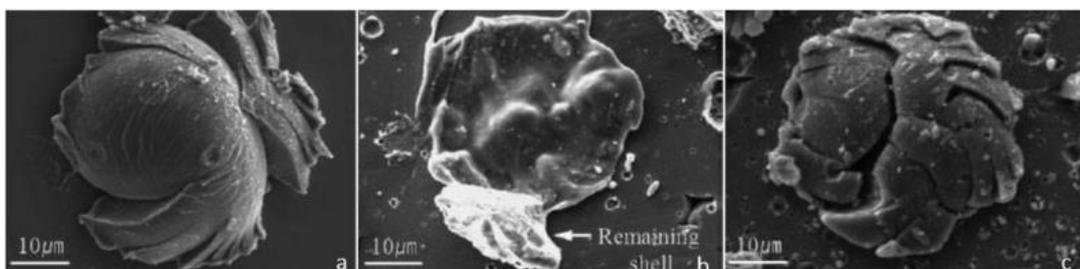


FIGURA 44 – ASPECTO DE UMA PARTÍCULA DE BMG APÓS IMPACTO EM DIFERENTES TEMPERATURAS: a) TEMPERATURA AMBIENTE; b) ENTRE TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL; c) ACIMA DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL
 FONTE: Moridi *et al.*, (2014).

3.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)

Na indústria tem crescido a demanda por revestimentos que forneçam condições tribológicas (ou seja, que envolvem interação de materiais em contato) adequadas. Em função disto, as pesquisas envolvendo compósitos de matriz metálica tem sido realizadas. O emprego de materiais frágeis é difícil, pois como mencionado neste texto, exige-se dos materiais deste processo uma boa plasticidade. Assim, viu-se a necessidade de adicionar partículas de material de alta dureza em matrizes metálicas de maior ductilidade. Apesar destes casos, há também outros que preferem-se compósitos envolvendo dois metais distintos de forma a combinar suas propriedades e atingir resultado que não são possíveis utilizando os metais em forma pura. Desta forma, fala-se de duas categorias de compósitos: os formados por dois metais e os formados por partículas duras envoltas em matriz metálica.

A forma mais comum de produzir camadas de compósitos de matriz metálica é misturando os pós de diferentes materiais na alimentação do sistema e depositando-os juntos no substrato. Como a temperatura de deposição no processo *Cold Spray* é baixa, não ocorre reações entre os materiais tampouco formação de ligas, no caso de compósitos envolvendo dois metais. Em tais casos, faz-se uso de tratamentos térmicos para a criação de compostos intermetálicos. Já no caso de combinação de metal com outro material duro e frágil, o metal cumpre um papel de matriz que envolve o material duro.

Alguns exemplos de MMC compostos de dois ou mais materiais testados com a tecnologia *Cold Spray* são: Ti-Al, Al-Ni, ligas a base de Co misturadas com Ni, aço inoxidável 316L misturado com liga Co-Cr L605, Zn-Al-Si, entre outros (MORIDI *et al.*, 2014). Tem-se avaliado nestes casos o efeito dos tratamentos térmicos sobre a composição do revestimento, como por exemplo, tratamento térmico posterior da camada de Al e Ti, promovendo o aparecimento de matriz intermetálica $TiAl_3$ e de uma camada intermediária entre o substrato e o revestimento que protege o material contra oxidação a altas temperaturas. Também estuda-se as mudanças nas propriedades físicas do revestimento causadas com a adição do segundo material metálico, como no caso do revestimento de substratos de aço carbono com ligas refratárias à base de Co misturadas com Ni. Percebe-se que neste estudo, a adição de Ni aumentou a densidade do revestimento, porém diminuiu a microdureza do mesmo. As quantidades relativas entre os dois materiais metálicos também pode ser um fator determinante em

alguns casos, tratando-se de diferenças nas propriedades do revestimento. No estudo envolvendo deposição de aço inoxidável 316L e liga Co-Cr L605, foi constatado que alteração na porcentagem da liga Co-Cr em volume alteravam propriedades como porosidade, ductilidade e resistência à corrosão.

Exemplos de compósitos envolvendo partículas duras em matriz metálica reportados em estudo da tecnologia *Cold Spray* são: Al-Al₂O₃, Al-SiC, aço inoxidável 316 e Al₂O₃, Cu- Al₂O₃, bronze alumínio e Al₂O₃, Cu-Al₂O₃-SiC, Al-Al₂O₃-SiC, entre outros (MORIDI *et al.*, 2014). Nota-se uma vasta utilização do óxido de alumínio e carbetos de silício como materiais não metálicos nesse tipo de compósito de matriz metálica. De uma forma geral, estas partículas duras não possuem deformabilidade suficiente para, na forma pura, produzirem um revestimento espesso quando depositadas via *Cold Spray*. Por isto, são depositadas juntamente com as partículas de outro material metálico com capacidade de deformação maior. Logo, na deposição da camada, o material metálico é deformado e “aprisiona” o material não metálico menos dúctil, que não se deformou. A adição destes materiais não metálicos podem trazer ao revestimento uma série de ganhos em propriedades. Podem aumentar a força de aderência do revestimento ao substrato, a resistência ao desgaste em geral e à corrosão e também a dureza, como ocorre na adição de Al₂O₃ ao pó de Al para deposição sobre substratos de Al ou Si.

Em muitos casos, há um aumento também na eficiência de deposição, como foi reportado nos estudos envolvendo a mistura de Al₂O₃ e aço inoxidável 316. Neste caso, a adição do óxido fez com que houvesse uma maior deformação das partículas metálicas e com isto uma maior densidade no revestimento. Desta forma aumentou a força de coesão entre as partículas do revestimento, superando a força adesiva na interface entre o revestimento e o substrato. Desta forma, no teste de tração, houve falha na interface (adesiva) em vez de falha entre partículas do revestimento (coesiva).

A combinação entre diferentes materiais tem sido o foco do estudo. São diversas as possibilidades que já foram ou ainda serão exploradas. As considerações relacionadas, como ganho e perda em propriedades, teores dos materiais envolvidos, tamanho e forma das partículas, parâmetros ótimos de processo, aumento de eficiência de deposição, são as principais premissas a serem exploradas (MORIDI *et al.*, 2014).

3.3 CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos não possuem boa deformabilidade plástica, pois são materiais frágeis. Desta forma, sua aplicação na tecnologia *Cold Spray* limita-se a casos de deposição de finas camadas. Destacam-se entre os cerâmicos utilizados em *Cold Spray* o WO_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , SiC (Figura 45) e outros carbonetos e óxidos.

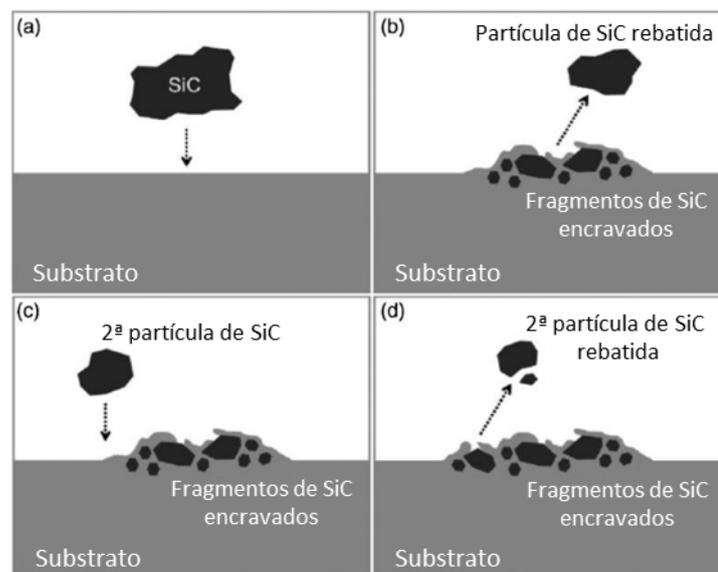


FIGURA 45 – DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS DE MATERIAL CERÂMICO (SiC). NA COLISÃO, O AGLOMERADO DE MATERIAL CERÂMICO SE QUEBRA EM FRAGMENTOS MENORES, QUE SÃO REVESTIDOS PELO MATERIAL DO SUBSTRATO DEFORMADO. REVESTIMENTO FORMADO DE MATRIZ COM MATERIAL DO SUBSTRATO ENVOLVENDO O PARTICULADO CERÂMICO.

FONTE: Adaptado de Moridi *et al.*, (2014).

Diferentemente do que ocorre na deposição de materiais metálicos dúcteis, o mecanismo de deposição destes materiais frágeis quando aspergidos contra um material não dúctil (como no caso de WO_3 depositado sobre substrato de silício) conta com a quebra de uma partícula maior (ou um aglomerado de partículas) em pequenas partículas secundárias durante o impacto. Não há deformação plástica, tampouco formação de cavidade no substrato. Estas partículas encravam no substrato, formando uma camada fina e rugosa. Apesar dos estudos realizados, o entendimento do mecanismo de aderência para partículas frágeis ainda mostra-se muito básico, com várias lacunas a serem preenchidas, sendo um possível foco de estudo para os próximos anos.

A eficiência de deposição de materiais cerâmicos por *Cold Spray*, semelhante aos outros materiais, depende de algumas variáveis do processo, como a temperatura, e também da ductilidade do substrato, como foi observado em experimentos envolvendo deposição de TiO_2 em substratos de Al, Cu e Ti. Outro parâmetro de processo que, embora não afete a ocorrência ou não da formação de revestimento, pode afetar na sua espessura, é o gás de processo. Esta conclusão foi tirada comparando-se os resultados de experimentos de deposição de TiO_2 com gás hélio e com gás nitrogênio (MORIDI *et al.*, 2014).

Com a crescente demanda por deposição de materiais cerâmicos em temperatura ambiente, criou-se o processo *Cold Spray* a vácuo (*Vacuum Cold Spray* - *VPS*). Neste tipo de processo, o material a ser revestido encontra-se no interior de um tanque onde a pressão é substancialmente menor que a atmosférica. Neste tipo de ambiente a vácuo, segundo reportado, consegue-se aumentar a densidade do revestimento (por conta da maior velocidade de partícula) a eficiência de deposição. Assim os revestimentos produzidos podem ter uma maior espessura do que os produzidos em processo de *Cold Spray* convencional (MORIDI *et al.*, 2014).

3.4 POLÍMEROS

Tratando-se de deposição de materiais poliméricos, não há muitos registros. O que sabe-se é que a deposição de partículas poliméricas exigem menos energia cinética, uma vez que materiais poliméricos são mais plásticos que materiais metálicos. Assim, o processo de *Cold Spray* geralmente sofre algumas modificações, a começar pela velocidade de partículas. A velocidade crítica de deposição de materiais poliméricos é consideravelmente menor que a velocidade crítica para materiais metálicos. Por exemplo, a deposição de partículas de poliolefina em sistemas de baixa pressão exigia velocidades de partículas de até 135 m/s, muito mais baixa que as velocidades utilizadas para metais. O design do bocal também era diferente, não sendo convergente-divergente, mas sim cilíndrico. A deposição foi à temperatura ambiente utilizando o ar como gás de processo (MORIDI *et al.*, 2014). Como tendência para futuras pesquisas, tem-se o melhor entendimento da formação de revestimento polimérico, especialmente sobre substratos metálicos. Nos estudo realizado com poliolefina, foi necessário aquecer o substrato de alumínio a uma temperatura acima da temperatura de fusão do polímero de revestimento para que

houvesse formação de camadas de revestimento, já que encontrou-se dificuldades em fazê-lo na temperatura ambiente. Ainda está em processo de descoberta outras possibilidades de adaptação do processo, além dos que foram citados, para a diminuição da velocidade de partícula. Também é interessante a pesquisa de novos sistemas de materiais, com o objetivo de abrir um leque maior de combinações e ampliar a utilização dos polímeros na indústria (MORIDI *et al.*, 2014).

3.5 SUBSTRATOS POLIMÉRICOS / COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Materiais de matriz polimérica tem sido mais e mais comuns com o passar dos anos na indústria militar, aeroespacial e outras que exijam materiais de alta performance. Estes compósitos de matriz polimérica são leves, possuem elevada resistência e por isso são muito apropriados para esses tipos de aplicação. Em muitos casos é interessante estender a variedade de aplicação, principalmente para aquelas que exigem da superfície do material propriedades especiais, como condutividade elétrica e/ou térmica, isolamento eletromagnético, proteção contra corrosão ou contra radiação. Desta forma, pode-se utilizar revestimentos metálicos para conseguir todas essas características, de acordo com a necessidade. Para isto, a tecnologia *Cold Spray* é uma excelente alternativa, visto que outras modalidades de aspersão (*HVOF*, *plasma spray*, entre outros) não são adequados para deposição metálica sobre materiais poliméricos ou compósitos.

Na literatura técnica, encontra-se relatos de deposição eficaz de materiais Sn sobre materiais poliméricos como PC/ABS, PA 6, PP, PS e outros (MORIDI *et al.*, 2014). Outros materiais foram testados como materiais de deposição, porém não tiveram o mesmo sucesso do Sn. O cobre, por exemplo, resultou em uma energia de impacto muito grande em altas velocidades, e portanto promovia a erosão do material polimérico em vez de formar camadas de revestimento. Já o alumínio não atingia a velocidade crítica para formação do revestimento (MORIDI *et al.*, 2014).

Outro estudo foi realizado envolvendo substrato de plástico reforçado com fibra de carbono, revestido por alumínio. Esta combinação é muito utilizada na fabricação de fuselagem de aeronaves, as quais precisam apresentar boa condutividade elétrica a fim de evitar que raios que atinjam a aeronave causem danos ao mesmo e aos passageiros. Porém tal estudo apontou que não era possível a produção de uma camada muito espessa utilizando apenas o processo *Cold Spray*. A

aderência entre o revestimento e o substrato não era forte o suficiente para se conseguir revestimento de mais que 30 μm sem o descolamento do mesmo. Assim, utilizou-se a tecnologia *plasma spray* para deposição de uma camada intermediária e, por cima desta, foi depositado o Al pelo processo *Cold Spray*. A camada intermediária favorecia a deformação das partículas de Al depositadas e portanto contribuía com uma aderência mais adequada, ajudando na formação de revestimentos mais espessos (MORIDI *et al.*, 2014).

A aplicação de camada metálica sobre substrato polimérico também é encontrada na indústria biomédica. Deposição de Ti em um substrato de PEEK, é um bom exemplo. Esta combinação é utilizada na produção de próteses. Nestes estudos constatou-se que o processo não causou degradação do polímero e que o revestimento de Ti formado foi homogêneo e com boa aderência quando utilizados condições de processo menos enérgicas (pressão e temperatura) e distância de aspersão adequada, isto graças ao equilíbrio entre o amolecimento térmico do substrato polimérico e a deformação plástica das partículas no impacto (MORIDI *et al.*, 2014); (GARDON *et al.*, 2013).

Assim como no caso de deposição de materiais cerâmicos, o mecanismo de deposição de materiais sobre substratos poliméricos ainda não é muito bem compreendido e pode ser objeto de futuras pesquisas e experimentos.

4 EQUIPAMENTO

Um diagrama esquemático de um equipamento típico utilizado no processo *Cold Spray* está representado na Figura 46.

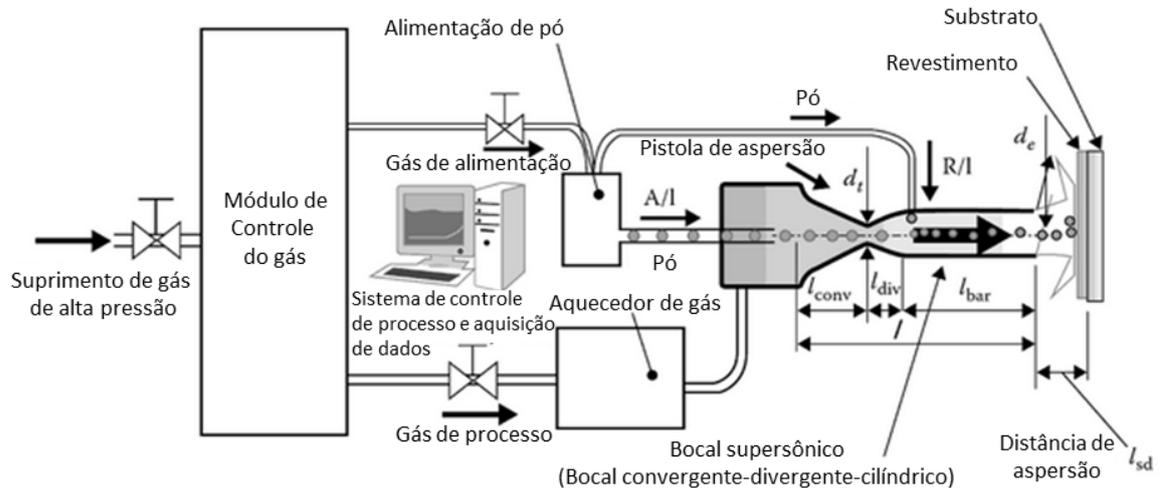


FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM EQUIPAMENTO DE *COLD SPRAY*
 FONTE: Adaptado de Maev e Leshchynsky (2010).

Um equipamento convencional de *Cold Spray* costuma ter os seguintes componentes (MAEV e LESHCHYNSKY, 2010):

- Unidade de suprimento de gás;
- Módulo de controle de gás (controle da pressão, fluxo, etc.);
- Aquecedor de gás de bobina resistiva (aquecimento da bobina por efeito Joule e do gás por convecção);
- Conjunto pré-câmara + bocal;
- Alimentador de pó (a forma de alimentação de material depende do tipo de sistema);
- Sistema de controle de processo e aquisição de dados.

Costuma-se classificar os sistemas *Cold Spray* em duas categorias: os de baixa pressão, também chamados de LPCS (*Low Pressure Cold Spray*), e os de alta pressão ou HPCS (*High Pressure Cold Spray*). Como o próprio nome já sugere, a principal diferença entre ambos os sistemas é a pressão de gás envolvida. Porém outras diferenças também podem existir, como por exemplo na forma de alimentação

do pó. A Figura 46 buscou representar em uma mesma imagem o *layout* de ambas as variações do equipamento.

A seguir será apresentado o princípio de funcionamento de cada um desses sistemas.

4.1 COLD SPRAY DE BAIXA PRESSÃO

A Figura 47 mostra um desenho esquemático de um sistema *Cold Spray* de baixa pressão.

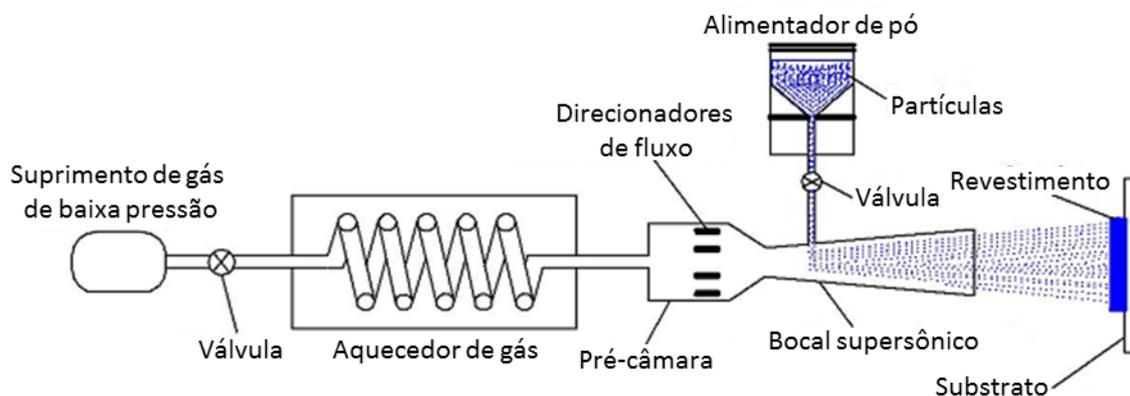


FIGURA 47 – REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE *COLD SPRAY* DE BAIXA PRESSÃO.
FONTE: Adaptado de Tinashe (2010).

Observa-se pela imagem que o sistema contém uma unidade de suprimento de gás, normalmente consiste em um pequeno compressor de ar e um cilindro que confina o gás de processo e também, no caso de equipamentos que utilizam o ar como gás de processo (mais comum). Alguns equipamentos, todavia, utilizam o gás nitrogênio. A pressão do gás de processo no sistema LPCS pode variar entre 5 e 10 bar (TINASHE, 2010); (KOIVULUOTO, 2013).

A etapa seguinte é o aquecimento do gás. O aquecedor possui em seu interior uma bobina por onde passa corrente elétrica. Com a passagem da corrente, a bobina esquenta e, por efeito Joule, aquece o gás que por ali passa. Num sistema de baixa pressão, o gás geralmente é aquecido até 400°C, aproximadamente, embora alguns pesquisadores e fabricantes afirmam que alguns equipamentos podem aquecer o gás a temperaturas mais elevadas, até 650°C (TINASHE, 2010); (KOIVULUOTO, 2013).

O gás já aquecido é então direcionado para a pré-câmara da pistola, onde ocorre o direcionamento do fluxo de gás, até então turbulento, por meio de aletas. O fluxo de gás subsônico adentra o bocal convergente-divergente (ou DeLaval), responsável pela aceleração do fluxo. Da mecânica de escoamento de fluidos, sabe-se que a parte convergente do bocal provoca um aumento na velocidade do fluxo, considerando a vazão constante. O bocal é projetado de forma que ao atingir a garganta do bocal, o fluxo esteja em uma velocidade maior ou igual a Mach 1. Uma vez atingindo a velocidade sônica, o fluido passa a ser acelerado não mais pela diminuição da seção transversal, mas pelo aumento dela. Assim, quando o gás passa para a metade divergente do bocal, ele continua sendo acelerado. A velocidade do fluxo de gás na saída do bocal pode chegar de 300 a 600 m/s (TINASHE, 2010).

Nos sistemas de baixa pressão, a alimentação do pó de material acontece de forma radial, na seção divergente do bocal. Como a pressão estática no interior desta seção do bocal é menor que a atmosférica, o pó proveniente do alimentador é dirigido ao interior do bocal pelo efeito Venturi, sem necessitar de uma linha de alimentação com uma alta pressão para lança-lo para dentro do sistema principal. A equação 8 deve ser satisfeita para que haja alimentação efetiva do pó para o interior do bocal (TINASHE, 2010). Vale ressaltar que em sistemas LPCS a pressão na entrada no bocal geralmente permanece menor que 1 MPa, para que ocorra a alimentação do pó à pressão do ambiente, sem precisar de uma linha de alimentação.

$$\frac{A^i}{A^*} \geq 1,3P_0 - 0,8 \quad (8)$$

Onde:

A^i = Área da seção transversal do ponto de entrada do material (m^2)

A^* = Área da seção transversal da garganta do bocal (m^2)

P_0 = Pressão do gás na entrada do bocal (MPa)

A vantagem do sistema de baixa pressão é que este não necessita de um equipamento tão robusto, uma vez que não envolve pressões tão altas, podendo ser portátil, o que o torna vantajoso em aplicações no campo. Seu processo de deposição é mais barato que o do sistema da alta pressão, além de garantir mais segurança ao operador por envolver pressão e temperaturas mais baixas. Outra vantagem é que os

bocais do sistema de baixa pressão sofrem menos com o desgaste abrasivo, já que as partículas são inseridas no bocal após a garganta, na região divergente onde o fluxo é supersônico. Por não haver desgaste na região da garganta, a performance do sistema não é afetada nem modificada, e a vida útil do bocal é maior (TINASHE, 2010).

As desvantagens deste sistema é a menor eficiência de deposição, a qual dificilmente ultrapassa os 50%, já que o sistema não fornece às partículas uma velocidade tão grande quanto o sistema de alta pressão. Para melhorar essa eficiência, uma alternativa é adicionar partículas cerâmicas na mistura de pó do alimentador (Al_2O_3 , por exemplo), pois estas partículas duras, além de limpar o interior do bocal, removendo partículas metálicas que por ventura fiquem presas às paredes, também servem para ativar a superfície do substrato (melhorando a rugosidade) e para “martelar” a superfície do revestimento, aumentando a densidade e também a eficiência de deposição (TINASHE, 2010); (MORIDI *et al.*, 2014).

4.2 COLD SPRAY DE ALTA PRESSÃO

Um esquema de um sistema *Cold Spray* de alta pressão (HPCS) está representado na Figura 48.

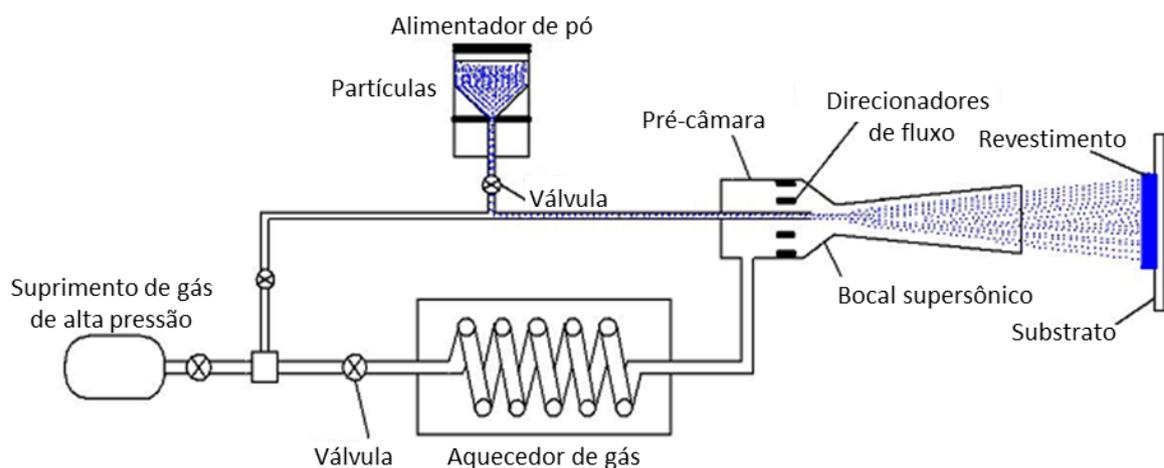


FIGURA 48 – REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE *COLD SPRAY* DE ALTA PRESSÃO.
 FONTE: Adaptado de Tinashe (2010).

A diferença do sistema de alta pressão em relação ao sistema de baixa pressão começa pelo gás utilizado. No sistema de alta pressão, os gases mais utilizados são o N_2 ou He . A pressão do gás neste tipo de sistema pode chegar a até

35 bar. No sistema HPCS, diferente do que ocorre no LPCS, existem duas linhas de alimentação de gás: uma delas tem menor pressão, na qual o gás terá papel propulsor. Esta linha passa pelo aquecedor de gás, mais robusto que o do LPCS, onde a temperatura do gás é elevada a temperaturas de até 1000°C (equipamentos mais recentes) de maneira rápida (estima-se que alguns equipamentos elevam a temperatura de um gás em 800°C entre 1 e 2 minutos). Os módulos que abrigam a bobina aquecedora geralmente são bem robustos, pois devem suportar condições de alta pressão. Alguns equipamentos podem suportar até 50 MPa de pressão (CORTÉS PAREDES, 2014). O aquecimento do gás não serve apenas para o amolecimento térmico das partículas, mas também para melhorar as propriedades aerodinâmicas do gás, de forma que este ganhe mais velocidade quando acelerado no bocal (TINASHE, 2010); (KOIVULUOTO, 2013). O gás aquecido é então conduzido até a pré-câmara da pistola.

A segunda linha de gás possui pressão maior do que a primeira. O motivo disto é que esta tem o papel de alimentação do material, ou seja, de conduzir o pó de material para dentro do fluxo principal. Como neste caso a pressão da linha propulsora (fluxo principal) é mais alta que a atmosfera, mesmo com a alta velocidade, é necessário que esta linha de alimentação tenha uma pressão maior, para que evite-se o refluxo do gás para dentro do alimentador. O gás de ambas as linhas se encontram na pré-câmara, ou seja, o pó de material arrastado com a linha de maior pressão entra antes de região convergente. Comparando as Figuras 47 e 48, observa-se que no LPCS o pó de material é alimentado radialmente, enquanto que no HPCS, é alimentado axialmente na pistola (TINASHE, 2010).

A mistura dos dois fluxos, em seguida, passa pelo bocal DeLaval, e ocorre a aceleração do fluxo, de forma similar ao do sistema de baixa pressão. Ao ser acelerado, o gás pode chegar a velocidades de até 1200 m/s na saída do bocal. No momento da mistura, o gás da linha principal está aquecido a uma alta temperatura (~1000 °C) e as partículas estão em temperatura ambiente. Quando elas são recebidas no fluxo de gás aquecido, a temperatura destas aumenta. Porém, na expansão do gás na região divergente do bocal, a temperatura tanto do gás quanto das partículas cai ao passo que a velocidade aumenta. Outro aspecto importante é que, uma vez que o tempo de contato entre o gás aquecido e as partículas é muito curto, não há tempo suficiente de estas partículas aquecerem substancialmente, de

forma que sua temperatura permanece muito abaixo da temperatura do gás, fazendo jus ao princípio do *Cold Spray* (TINASHE, 2010).

As vantagens do sistema HPCS estão principalmente relacionadas à eficiência de deposição e densidade de revestimento, graças à maior temperatura e maior velocidade de partícula, o que acaba aumentando tanto o efeito de amolecimento térmico quanto a energia cinética no impacto. Desta forma, a eficiência de deposição é muito superior do que a do sistema de baixa pressão, podendo chegar aos 90% (TINASHE, 2010).

Por outro lado, as desvantagens do sistema de alta pressão são: não é portátil, por conta da robustez necessária para que o equipamento aguente as condições de serviço, de pressão e temperaturas elevadas; o equipamento é mais caro que o de baixa pressão; menos segurança, devido à temperatura e pressão elevadas; entupimento da pistola e desgaste abrasivo da garganta do bocal são mais recorrentes, já que a alimentação do material é feita na pré-câmara, antes da região convergente do bocal.

4.3 VARIAÇÕES NO EQUIPAMENTO

Além dos sistemas de *Cold Spray* de alta e baixa pressão apresentados, existem alguns sistemas que apesar de se encaixarem em uma dessas categorias, já que apresentam um nível alto ou baixo de pressão, possuem modificações dedicadas à necessidades especiais da aplicação.

O sistema *Cold Spray* de deposição a vácuo, por exemplo, conta com todo o equipamento descrito e também com a instalação de uma câmara de descompressão (ou tanque de vácuo), de forma que a pressão no interior seja menor que a atmosférica (MAEV e LESHCHYNSKY, 2016).

Alguns fornecedores de equipamentos incluem um aquecimento extra na pré-câmara, aproveitando as próprias aletas que lá existem como direcionadoras de fluxo para também fornecerem calor. Assim, é possível a deposição de materiais mais duros, como misturas de partículas de Co com carbonetos de tungstênio (MAEV e LESHCHYNSKY, 2016).

Existe uma variação do processo *Cold Spray* chamada *Pulsed Gas Dynamic Spray* (PGDS), na qual o equipamento gera ondas ou pulsos não estacionários de pressão e temperatura no gás que promovem a deposição descontínua do material,

diferente do processo convencional que possui um fluxo de gás contínuo. Nesta variação, a temperatura e pressão envolvidas são maiores que as no processo convencional. Por ser a temperatura maior, a velocidade crítica de deposição é menor. Como a velocidade de impacto se mantém, a deformação plástica gerada neste tipo de processo é maior (MORIDI *et al.*, 2014).

As variações de geometria do bocal também são muito comuns de equipamento para equipamento, sempre buscando a otimização da cinética do gás e das partículas de deposição. O bocal de formato convergente-divergente é o mais comum em equipamentos de *Cold Spray*, porém não é o único. Existem também equipamentos com bocal de formato convergente-cilíndrico ou com bocal de formato convergente-divergente-cilíndrico. Os três formatos estão representados esquematicamente na Figura 49. Para cada diferente formato de bocal ocorre comportamentos diferentes do gás e das partículas, quanto a pressão, velocidade e temperatura. Os gráficos da Figura 50 mostram a evolução destes três parâmetros ao longo do comprimento de cada tipo de bocal. Embora sejam resultado de uma simulação com parâmetros específicos de processo, o comportamento é semelhante para diferentes parâmetros de processo, dimensões de bocal, etc.

A Figura 50c evidencia o que foi anteriormente dito quanto a aceleração do gás. Nota-se que a maior aceleração do gás acontece na garganta do bocal e no início da seção divergente. Na garganta, o fluxo atinge a velocidade sônica. Depois disso, o gás é acelerado para velocidade supersônica caso possua uma região divergente (MAEV e LESHCHYNSKY, 2016).

A Figura 50b também comprova outro princípio já constatado no presente texto. Nota-se ao analisar o gráfico que há uma queda de pressão do gás na região após a garganta do bocal, independente do formato deste. Nos casos dos bocais convergente-divergente e convergente-divergente-cilíndrico, a pressão pode chegar até próxima ou abaixo da atmosférica em sistemas de baixa pressão. No caso do bocal convergente-cilíndrico, é comum haver na saída do bocal formação de ondas de expansão cuja existência é comprovada pela ocorrência de oscilações nos parâmetros do gás na saída da pistola (por esta razão não são mostradas nos gráficos da Figura 50, que apenas representa os parâmetros ao longo do interior do bocal). Estas ondas são geradas uma vez que a expansão do gás acontece de forma repentina, diferentemente dos outros modelos, os quais possuem região divergente

que conferem ao gás uma expansão contínua ao longo do bocal (MAEV e LESHCHYNSKY, 2016).

Por fim, a Figura 50d comprova que há uma queda de temperatura na região divergente do bocal, conforme dito. Na simulação que gerou tais gráficos, a temperatura do gás chegou a valores muito abaixo da ambiente, enquanto que as partículas saíram a temperaturas mais altas (ambiente ou superior) (MAEV e LESHCHYNSKY, 2016).

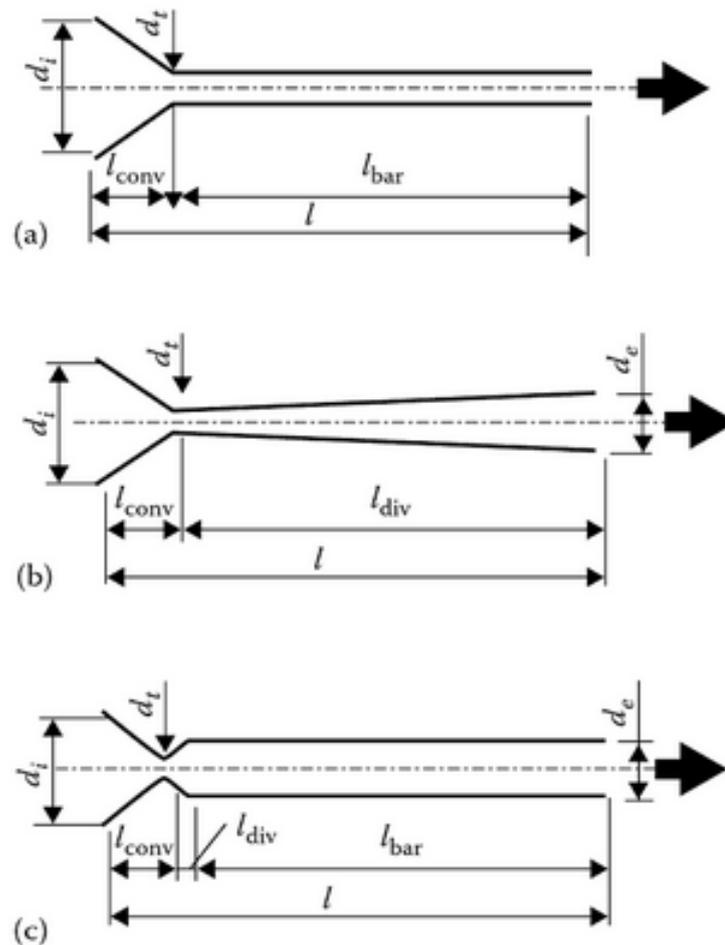


FIGURA 49 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE DIFERENTES MODELOS DE BOCAL: a) BOCAL CONVERGENTE-CILÍNDRICO; b) BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE; c) BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE-CILÍNDRICO.

FONTE: Maev e Leshchynsky (2016).

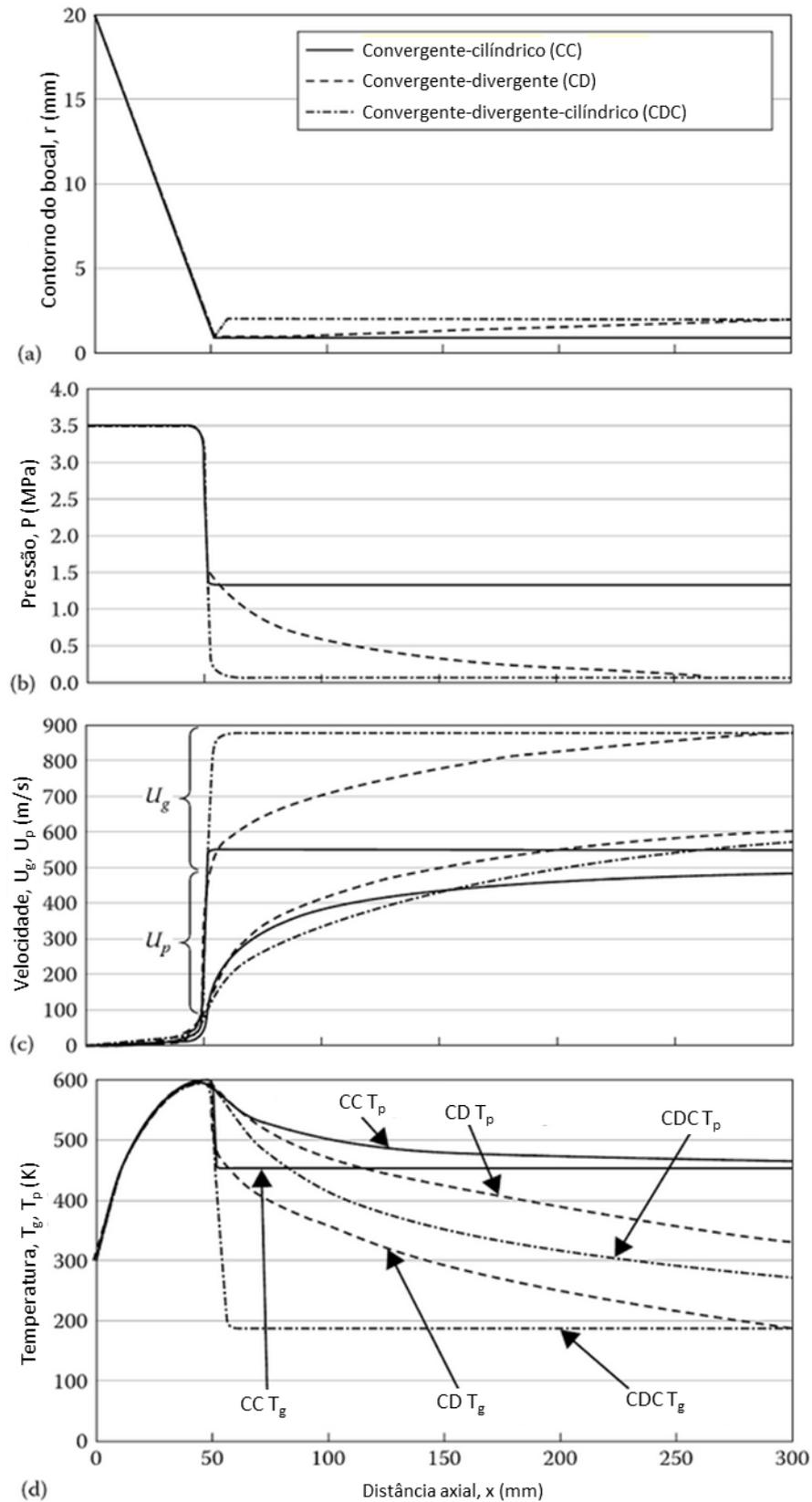


FIGURA 50 – EVOLUÇÃO DE PARÂMETROS DE GÁS E PARTÍCULA AO LONGO DE BOCAL CONVERGENTE-CILÍNDRICO, CONVERGENTE-DIVERGENTE E CONVERGENTE-DIVERGENTE-CILÍNDRICO. a) RAIOS DA SEÇÃO; b) VELOCIDADE DE GÁS E DE PARTÍCULA; c) PRESSÃO DO GÁS; d) TEMPERATURA DE GÁS E DE PARTÍCULA
 FONTE: Adaptado de Maev e Leshchynsky (2016).

5 APLICAÇÕES

A tecnologia *Cold Spray*, apesar de recente, já tem ganhado um espaço considerável na indústria. Como mencionado na introdução deste texto, o processo *Cold Spray* não foi criado para substituir os processos térmicos convencionais, mas sim para complementá-los, mirando aplicações onde estes seriam restritos.

O presente texto tem dado ênfase na deposição de revestimento de superfícies (anti-corrosão, desgaste, isolamento térmico, condutor térmico e elétrico, etc.), já que esta foi a primeira aplicação da tecnologia e também para adotar uma padronização didática. Todavia o uso do *Cold Spray* vai além disto. A tecnologia pode integrar tanto processos de produção quanto processos de restauração. Tem grande utilidade na recuperação ou modificação de componentes fundidos (SINGH *et al.*, 2012). Uma vez que o material do processo não é fundido como em outros processos, este processo permite deposição de camadas múltiplas que se empilham de tal forma que consegue-se preencher defeitos de grandes dimensões por completo. Na imagem da Figura 51 é um exemplo de processo de recuperação. Ela mostra um processo de recuperação de um cabeçote de motor de alumínio com a de deposição de pó de alumínio por *Cold Spray*.

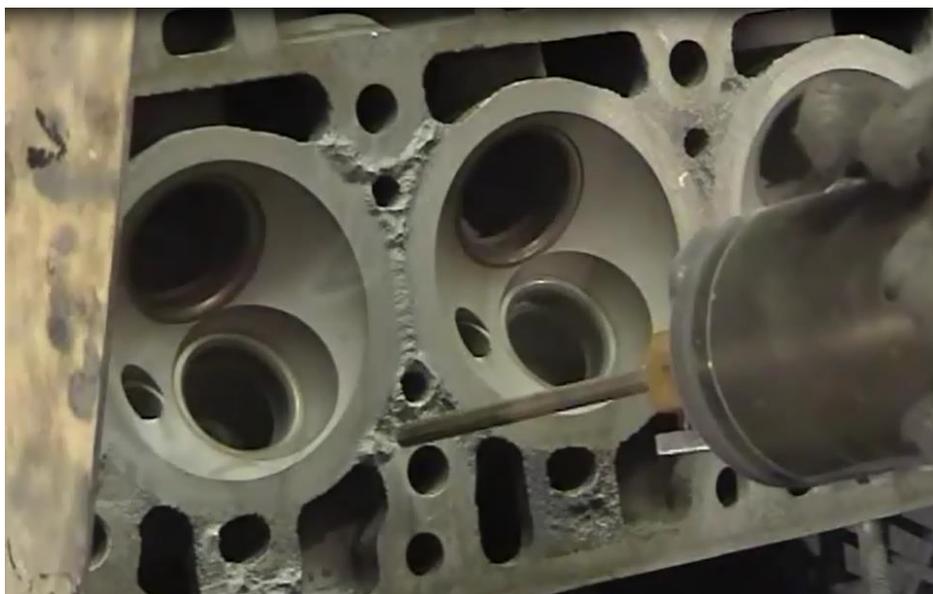


FIGURA 51 – RESTAURAÇÃO DE UM CABEÇOTE DE MOTOR DE AUTOMÓVEL COM PROCESSO *COLD SPRAY*
FONTE: DYMET (2016).

As Figuras 52 e 53 mostram o antes e depois de alguns componentes restaurados pelo processo *Cold Spray*. Em processos de restauração, é comum o processo de aspersão de material ser precedida de uma etapa de preparação das regiões com defeito para que haja uma deposição mais adequada de material. Em alguns casos também faz-se necessário uma preparação prévia do substrato com jato de abrasivos, como no caso da recuperação da árvore de cames, na Figura 53. Posteriormente à aspersão do material, faz-se procedimentos de acabamento, como esmerilhamento e torneamento.

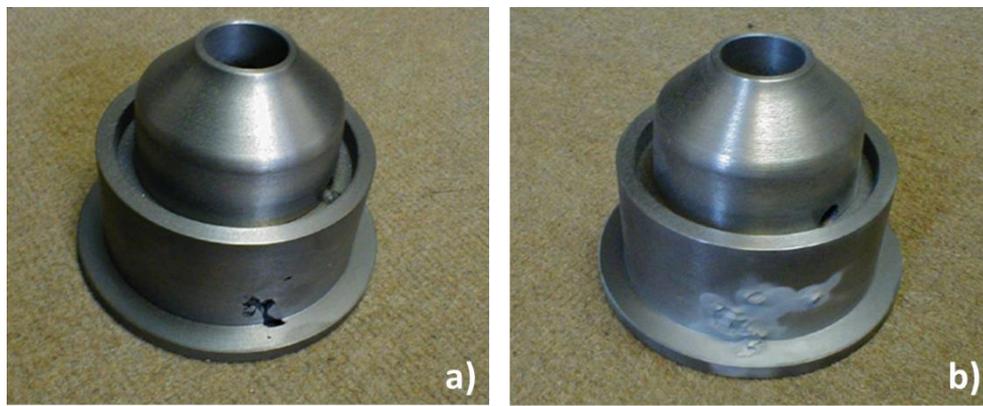


FIGURA 52 – a) ANTES e b) DEPOIS DE UMA RESTAURAÇÃO DE PEÇA FUNDIDA EM AÇO COM DEPOSIÇÃO DE ALUMÍNIO POR PROCESSO *COLD SPRAY*. DEFEITO SURTIU DURANTE PROCESSO DE ACABAMENTO POR USINAGEM
 FONTE: Adaptado de DYMET (2016).

Ainda tratando-se de restauração, o *Cold Spray* pode ser útil em processos de vedação de componentes hidráulicos e pneumáticos, radiadores e vasos de pressão (SHKODKIN *et al.*, 2010). Também pode ser utilizado no reparo de superfícies de rolos industriais, como os utilizados na indústria de papel e polietileno. Outra vantajosa aplicação é na modificação de moldes fundidos (SHKODKIN *et al.*, 2010). Evitando o descarte de moldes antigos e produção de novos, o processo *Cold Spray* permite reaproveitar moldes existentes, tendo eles algum defeito ou sendo eles obsoletos, de forma a modificar o formato do molde de acordo com a necessidade e revestindo possíveis falhas provenientes do uso contínuo.

Os reparos e produção de componentes utilizando *Cold Spray* não são exclusividades do ramo automobilístico, mas também contribuem na indústria aeroespacial e aeronáutica. Para exemplificar este fato, cita-se como exemplos os relatos sobre estudos realizados para utilização de Al e ligas de Al no reparo de componentes de foguetes e chapas estruturais utilizadas em aeronaves (SINGH *et al.*,

2012). Além das áreas da tecnologia anteriormente mencionadas, outros exemplos são: recuperação de turbinas a gás, componentes eletrônicos, utensílios e outros objetos domésticos feitos de metal (torneiras, maçanetas, estruturas de cama), e até mesmo obras de artes feitas em metal, como algumas esculturas, podem ser recuperadas pelo processo de *Cold Spray* (SINGH *et al.*, 2012).



FIGURA 53 – RECUPERAÇÃO DE UMA ÁRVORE DE CAMES a) DEFEITO; b) ASPECTO APÓS JATO DE ABRASIVO; c) PÓ A BASE DE COBRE E ZINCO DEPOSITADO SOBRE O DEFEITO VIA *COLD SPRAY*; d) PEÇA RECUPERADA APÓS *COLD SPRAY* SEGUIDO DE TORNEAMENTO E ESMERILHAMENTO
 FONTE: DYMET (2016).

O *Cold Spray* também está presente na fabricação de equipamentos e componentes do ramo elétrico, como contatos elétricos, fornecendo superfícies condutoras de eletricidade, por exemplo (SHKODKIN *et al.*, 2010). Também pode ser utilizado na fabricação de trocadores de calor automotivos à base de Al-Si-Zn (YOON *et al.*, 2007), de painéis solares (SINGH *et al.*, 2012), e até mesmo implantes dentários e ortopédicos, depositando materiais biocerâmicos (como o TiO_2 , hidroxiapatita) ou metais com boa osseointegração (como o próprio Ti) sobre diferentes tipos de materiais (GARDON *et al.*, 2013) (SINGH *et al.*, 2012). Após a soldagem de estruturas metálicas galvanizadas, é possível que danifique-se as zonas recobertas adjacentes ao cordão de solda. Assim, a deposição de revestimento de zinco sobre a linha de

solda utilizando *Cold Spray* é uma boa solução para restaurar e proteger a região soldada contra corrosão (SHKODKIN *et al.*, 2010).

Também é importante citar as decorrentes pesquisas por novos materiais que possam ser aplicados na indústria espacial, como por exemplo a busca da NASA por materiais que tenham boas resistências à oxidação, à fluência e à fadiga, para serem usados na produção de componentes de motores para foguetes por deposição via *Cold Spray* (KARTHIKEYAN, 2007).

6 ANÁLISE FUNDAMENTAL DE CUSTOS DO *COLD SPRAY*

Uma análise econômica para o processo *Cold Spray* foi elaborada por Stier (2012), pela Siemens. Segundo a análise de Stier (2012), existem alguns tipos de custo inerentes à implantação e operação de uma planta *Cold Spray*:

- Custo de consumíveis;
 - Pó
 - Gás propulsor
 - Energia elétrica para aquecimento do gás
- Custo de depreciação do equipamento/planta;
- Custo de locação;
- Custo da jornada de trabalho do operador;
- Manutenção / reparo.

Stier (2012) considerou em sua análise os custos envolvidos na deposição via *Cold Spray* de 1 kg de material. Na análise original, a moeda utilizada foi o Euro, porém nesta revisão pode considerar-se uma moeda qualquer. O custo total do processo configura-se num somatório dos diferentes tipos de custos mencionados, de acordo com a equação 9:

$$C_{tot} = C_{pó} + C_{gás} + C_{ee} + C_{eqp} \quad (9)$$

Onde:

C_{tot} = Custo total do processo (\$)

$C_{pó}$ = Custo total do pó/material (\$)

$C_{gás}$ = Custo total do gás (\$)

C_{ee} = Custo total da energia elétrica (\$)

C_{eqp} = Custo total do uso do equipamento (\$)

O custo total de pó/material utilizado no processo é definido como (STIER, 2012):

$$C_{pó} = U_{pó}m_{pó} \quad (10)$$

Onde:

$U_{pó}$ = custo do pó por unidade de massa (\$/kg)

$m_{pó}$ = massa de pó utilizada no processo (kg)

De forma similar ao custo de material, o custo total do gás utilizado no processo é definido como (STIER, 2012):

$$C_{gás} = U_{gás}m_{gás} \quad (11)$$

Onde:

$U_{gás}$ = custo do gás por unidade de massa (\$/kg)

$m_{gás}$ = massa de gás utilizada no processo (kg)

O custo total de energia elétrica utilizada no processo é definido como (STIER, 2012):

$$C_{ee} = U_{ee}(Q_{gás} + Q_{los}) \quad (12)$$

Sendo que:

$$Q_{gás} = m_{gás}c_p(T - T_{amb})/3600 \quad (13)$$

$$Q_{los} = HL Q_{gás} \quad (14)$$

Onde:

U_{ee} = custo unitário da energia elétrica (\$/kWh)

$Q_{gás}$ = energia aplicada para aquecimento do gás (kWh)

Q_{los} = perda de energia térmica (kWh)

c_p = calor específico do gás à pressão constante (kJ/kgK)

T = temperatura do gás aquecido (K)

T_{amb} = temperatura ambiente (temperatura inicial do gás) (K)

$HL = \text{taxa de perda de calor}$

O custo total do uso do equipamento durante o processo é definido como (STIER, 2012):

$$C_{eqp} = U_{eqp} t_{prod} \quad (15)$$

Onde:

$U_{eqp} = \text{custo horário do equipamento } (\$/h)$

$t_{prod} = \text{tempo produtivo do equipamento}(kWh)$

A definição da taxa horária de uso do equipamento dada por Stier (2012) é:

$$U_{eqp} = \frac{\text{depreciação} + \text{locação} + \text{manutenção} + \text{reparo}}{\text{tempo produtivo}} \quad (16)$$

No custo da depreciação estão incorporados o investimento total do equipamento (consiste no preço do equipamento de *Cold Spray* em si e dos componentes periféricos, se houver: robotização, cabines, coletores, filtros, sistema de recuperação de gás He, etc.) mais os custos do capital. Em locação, pode entrar custos referentes ao espaço de trabalho, por exemplo. Em manutenção e reparo, entram custos de reposição ou conserto de peças e componentes.

Entende-se por tempo produtivo do equipamento o somatório de tempo em que o equipamento está ligado e, portanto, o fluxo de gás está ativado, independente se há ou não liberação de pó de material por parte do alimentador.

$$t_{prod} = t_{pó,on} + t_{pó,off} \quad (17)$$

$$t_{tot} = t_{prod} + t_{improd} \quad (18)$$

Onde:

$t_{prod} = \text{período de tempo produtivo (equipamento / gás ligado)} (h)$

$t_{pó,on} = \text{período de tempo em que a alimentação de pó está ativada} (h)$

$t_{pó,off} = \text{período de tempo em que a alimentação de pó está desativada} (h)$

t_{improd} = período de tempo improdutivo (pó e gás desligados) (h)

Outra forma de interpretar o tempo produtivo do equipamento é diminuir o tempo de equipamento desligado (tempo improdutivo) do tempo total do período de depreciação. A Figura 54 ilustra um exemplo de segmento do período de depreciação de um equipamento de *Cold Spray*. Nota-se que os eventos representados em verde (alimentação de pó ativada) e vermelho (alimentação de pó desligada) ocorrem com o equipamento em funcionamento. Assim, há fluxo de gás e o período é contabilizado como produtivo. Já nos eventos em cinza o equipamento está desligado, logo o período é contabilizado como improdutivo.

Stier (2012) optou por não considerar em sua análise os custos referentes a jornada de trabalho, visto que este varia de acordo com o país, legislação, companhia e grau de especialização do operador.

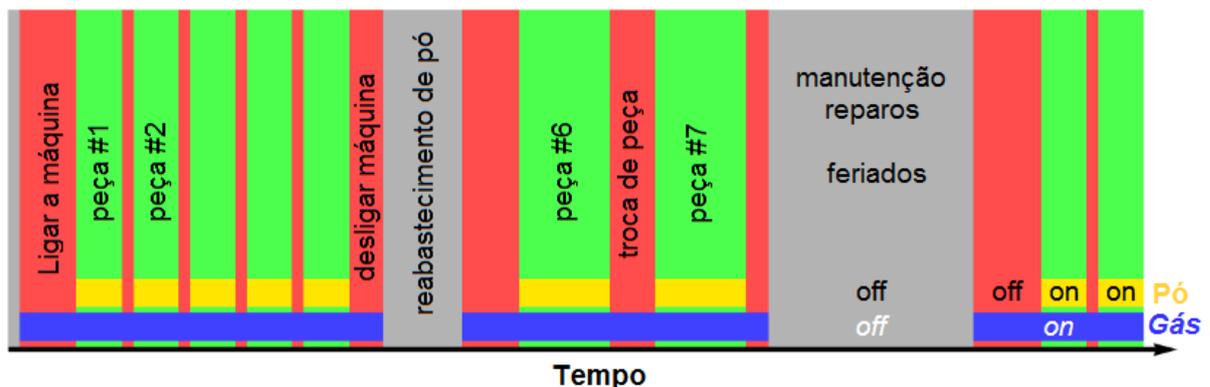


FIGURA 54 – SEGMENTO DO PERÍODO DE DEPRECIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE COLD SPRAY E SEUS EVENTOS PRODUTIVOS E IMPRODUTIVOS

FONTE: Adaptado de Stier (2012).

Alguns conceitos sobre o uso dos consumíveis são importantes de entender, pois afetam no custo total de consumíveis. A Figura 55 ilustra o conceito que Stier chamou de *perda geométrica*. A perda geométrica é um conceito relacionado ao percurso realizado pela pistola do processo sobre a peça. Ao analisar a imagem da figura, nota-se que alguns segmentos do percurso da pistola do equipamento ultrapassam os limites geométricos da peça, mais especificamente nas mudanças de direção da pistola entre passadas adjacentes. Interpretando este fenômeno, conclui-se que há uma perda de material por conta desta aspersão fora da peça (STIER, 2012).

Outro fenômeno que promove perda de material está relacionado à eficiência de deposição, cuja definição já foi devidamente abordada por este texto. Sendo assim, a perda de material (em massa) pode ser prevista e a quantidade de material (em massa) necessária na alimentação de pó para que haja a deposição efetiva de 1 kg de material sobre o substrato via *Cold Spray*, conforme proposto no início da análise, pode ser equacionada unindo o efeito de ambos os fenômenos (perda geométrica e eficiência de deposição) (STIER, 2012).

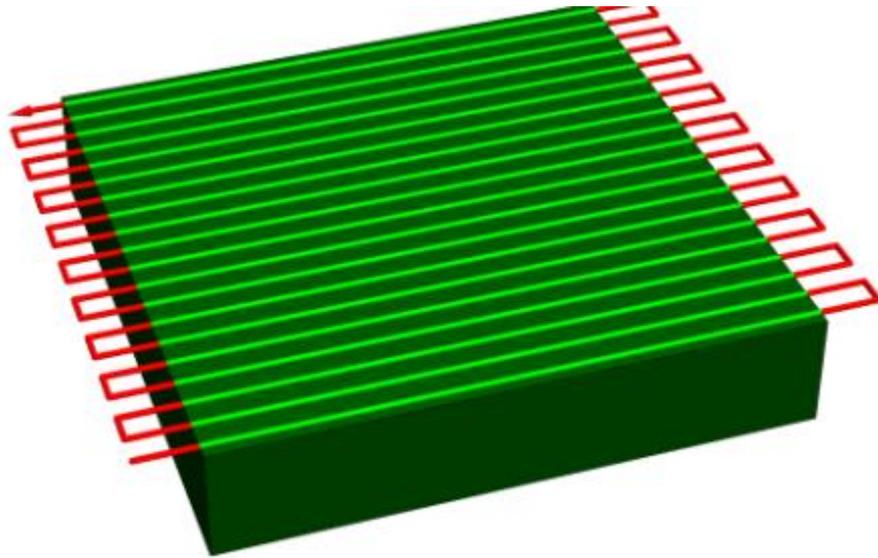


FIGURA 55 – PERCURSO DA PISTOLA DE *COLD SPRAY* SOBRE UMA PEÇA. OS SEGMENTOS DO PERCURSO EM VERDE INDICAM AS PARTES ONDE A ASPERSÃO DE MATERIAL OCORREU SOBRE A PEÇA. OS SEGMENTOS EM VERMELHO INDICAM OS TRECHOS ONDE A PISTOLA ULTRAPASSA OS LIMITES DA PEÇA E A ASPERSÃO DE MATERIAL OCORRE FORA DELA.

FONTE: Stier (2012).

$$GL = \frac{\sum_{fora} l_{percurso}}{\sum_{dentro} l_{percurso}} \quad (19)$$

$$m_{pó} = \frac{1 + GL}{k_d} \quad (20)$$

Onde:

GL = perda geométrica

$l_{percurso}$ = comprimento do percurso feito pela pistola (mm)

$m_{pó}$ = massa de pó utilizada no processo (kg)

k_d = eficiência de deposição

Neste sistema, a taxa de alimentação de pó será (STIER, 2012):

$$\dot{m}_{pó} = \frac{m_{pó}}{t_{pó,on}} \quad (21)$$

Onde:

$\dot{m}_{pó}$ = taxa de consumo de pó (kg/h)

$t_{pó,on}$ = período de tempo em que a alimentação de pó está ativada (h)

$m_{pó}$ = massa de pó utilizada no processo (kg)

Conhecendo as taxas de consumo de pó e de gás, é possível estabelecer uma relação entre elas através da razão entre as taxas de consumo (STIER, 2012):

$$w = \frac{\dot{m}_{pó}}{\dot{m}_{gás}} \quad (22)$$

Feitas todas as considerações, reorganizando as equações 10 a 22 e substituindo os termos da equação 9, a equação do custo total do processo *Cold Spray* de um determinado tempo de vida útil é reduzida a (STIER, 2012):

$$C_{tot} = \frac{1 + GL}{k_d} \left[U_{pó} + \frac{1}{w} \frac{t_{prod}}{t_{pó,on}} \left(U_{gás} + \frac{U_{eqp}}{\dot{m}_{gás}} + \frac{1 + HL}{3600} c_p (T - T_{amb}) U_{ee} \right) \right] \quad (23)$$

7 ANÁLISE COMPARATIVA DO *COLD SPRAY* E OUTROS PROCESSOS DE ASPERSÃO

Ainda que o processo *Cold Spray* não substitua os processos mais antigos de aspersão, mas os complementa, visando também cobrir os casos aos quais os demais processos não são aplicáveis, cabe a comparação entre os processos quanto a algumas características.

O primeiro aspecto a ser comparado é o de velocidade das partículas e temperatura do gás de processo. O diagrama da Figura 56 (idem Figura 4 p. 21) mostra a comparação destes parâmetros no processo *Cold Spray* (processo que utiliza indução elétrica) com os processos por combustão (por chama convencional, *HVOF*) e por energia elétrica (arco elétrico, plasma). A baixa temperatura do gás no *Cold Spray* evita a degradação térmica do material a ser revestido, e também reduz o nível de oxidação nos processos ao ar, mesmo para materiais os mais suscetíveis, como o Ti. A alta velocidade compensa a falta de energia térmica, transformando-o em um processo cinético. Apesar da baixa temperatura de aquecimento do gás, altas temperaturas são geradas pelo impacto enérgico das partículas, promovendo deformações na interface, conforme mencionado.

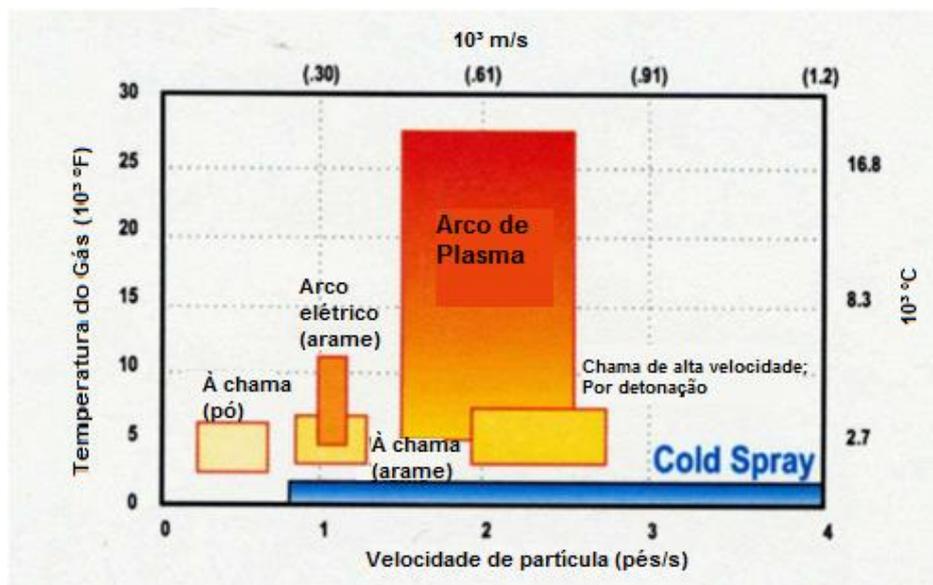


FIGURA 56 – VELOCIDADE DE PARTÍCULA E TEMPERATURA DO GÁS EM DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO

FONTE: Adaptado de U.S. ARL (2016).

A alta velocidade das partículas contribui para um maior efeito de empilhamento das camadas, de forma a produzir um revestimento mais denso que outros processos. A Figura 57 mostra a diferença entre revestimentos de Cu depositados pelos processos *Cold Spray* e por *Plasma Spray*. O revestimento produzido por *Cold Spray* é mais denso e com menor teor de óxido (0,3 %p contra 1,7%p do produzido por *Plasma Spray*) (TINHASHE, 2010). A Tabela 5 mostra uma comparação do nível de porosidade de revestimentos produzidos pelos diferentes processos de aspersão (PAWLOWSKI, 2008); (CORTÉS PAREDES, 2000). Esta comparação evidencia a competitividade da qualidade do revestimento produzido por *Cold Spray* quando trata-se de densidade. Nota-se que o processo neste quesito supera processos como à chama convencional e por arco elétrico.

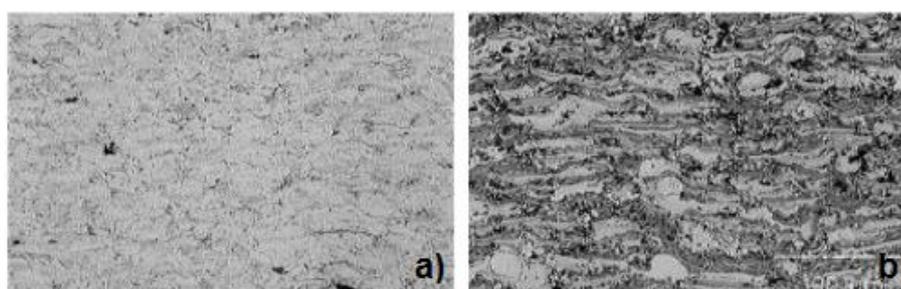


FIGURA 57 – REVESTIMENTO DE COBRE DEPOSITADO POR a) *COLD SPRAY*; b) *PLASMA SPRAY*
 FONTE: TINASHE (2010).

TABELA 5 – POROSIDADE DO REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO

Processo	Porosidade (%)
Chama convencional	< 10
HVOF	< 1
D-Gun	0,5 - 2
<i>Plasma Spray</i> (arco não transferido)	1 - 7
<i>Plasma Spray</i> no vácuo	1 - 2
Arco elétrico	< 5
<i>COLD SPRAY</i>	< 1

FONTE: O Autor (2016).

Outra vantagem do *Cold Spray* sobre outros processos de aspersão é a forma como alia alta eficiência de deposição com boa precisão (ou fidelidade) dimensional e de forma, ou seja, permite criar com eficiência formas mais complexas do que se é possível com outros processos. Isto faz também com que o processo *Cold Spray* seja

uma alternativa economicamente viável e competitiva de fabricação de protótipos na indústria. O *Cold Spray* portanto se estende à manufatura, diferentemente de outros processos de aspersão que limitam-se apenas à indústria de revestimento de superfícies (TINHASHE, 2010).

Nos processos convencionais de aspersão, é comum haver segregação de elementos de liga durante a solidificação. No *Cold Spray*, este problema geralmente não ocorre. Assim, a composição da microestrutura do revestimento acaba sendo mais homogênea e as propriedades do revestimento mais atrativas (TINHASHE, 2010).

Com relação à aderência do revestimento com o substrato, o processo *Cold Spray* também é bem sucedido. Comparativamente, montou-se a Tabela 6, com a faixa de resistência adesiva reportada para cada processo (PAWLOWSKI, 2008) (CORTÉS PAREDES, 2000). A comparação deve ser feita em termos de ordem de grandeza, uma vez que é difícil comparar com precisão os casos, já que os materiais e parâmetros dos processos são variados. Mas em termos gerais, percebe-se que o *Cold Spray* consegue revestimentos com força adesiva muito próximo ou superior a alguns processos térmicos, como por chama convencional, arco elétrico e *plasma spray*. Por outro lado, na média não supera o resultado conseguido com *HVOF*, *D-Gun* ou plasma a vácuo.

É importante em muitas aplicações que o substrato não sofra alterações microestruturais, mecânicas e químicas. Graças ao baixo aporte de calor para o substrato, o *Cold Spray* sai em vantagem frente a outros processos (TINHASHE, 2010).

TABELA 6 – RESISTÊNCIA ADESIVA DO REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO

Processo	Resistência adesiva do revestimento
Chama convencional	~ 30 MPa, 60 ou 70 MPa para algumas ligas
HVOF	> 90 MPa
D-Gun	> 70 MPa
Plasma Spray (arco não transferido)	15 - 25 MPa, 70 MPa para algumas ligas
Plasma Spray no vácuo	> 80 MPa
Plasma Spray em atmosfera controlada	20 - 45 MPa
Arco elétrico	10 - 30 MPa, 70 MPa para algumas ligas
COLD SPRAY	26 - 44 MPa (Cu), 33 - 35 MPa (Al), 26 - 62 MPa (Ta)

FONTE: O Autor (2016).

Outra boa característica do *Cold Spray* é o fato de conseguir boas espessuras, suficientes para serem competitivas. Observe na Tabela 7 que as espessuras de revestimento do *Cold Spray* são próximas ou superiores às de processos como *HVOF*, *D-Gun* e plasma com arco não transferido (PAWLOWSKI, 2008) (PAREDES, 2012).

TABELA 7 – ESPESSURA DE REVESTIMENTO, PARA DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO

Processo	Espessura de revestimento (μm)
Chama convencional	100 - 2500
HVOF	100 - 300
D-Gun	até 300
Plasma Spray (arco transferido)	500 - 6000
Plasma Spray (arco não transferido)	300 - 1500
Plasma Spray no vácuo	150 - 500
Plasma Spray em atmosfera controlada	1000 - 2000
Arco elétrico	100 - 2000
COLD SPRAY	250 - 650

FONTE: O Autor (2016).

Além de todas estas características, o processo *Cold Spray* ainda possui vantagens em termos operacionais. O processo conta com jatos de baixa temperatura (comparado aos outros processos) e baixa emissão de radiação, o que reduz os riscos ao operador. Além disso, o seu equipamento é silencioso (70 – 80 dB) comparado ao de processos como *HVOF* e *D-Gun*, por exemplo, que passam dos 150 dB. Assim, mais conforto é fornecido ao operador em seu ambiente de trabalho e mais tempo ele poderá operar o equipamento.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho empenhou-se em passar de forma completa porém compacta uma visão geral do processo *Cold Spray*. Muitos aspectos aqui abordados são capazes de direcionar a visão do leitor à conclusão de que o *Cold Spray* é um processo promissor.

Na introdução deste texto, citou-se diferentes países no mundo em que o *Cold Spray* tem sido aplicado com sucesso. A razão disto foi esclarecida aos poucos, durante o desenvolvimento do texto. Primeiramente passou-se pelos principais princípios do processo. Destes destacam-se dois: alta velocidade de partícula e baixa temperatura de gás. Estes dois conceitos diferenciam o *Cold Spray* da maioria dos processos inventados anteriormente para deposição de material de revestimento e carregam consigo uma série de vantagens apontadas nos últimos capítulos: variedade na aplicação e características de revestimento competitivas.

A flexibilidade do *Cold Spray* é uma vantagem importantíssima que este possui sobre os demais processos. É possível trabalhar com diversos tipos de material em diversas aplicações, com um grau de qualidade igual ou superior às tecnologias convencionais, não só de aspersão, mas de produção e manufatura.

O equipamento do *Cold Spray* e seu princípio de funcionamento, descritos nos capítulos 2 e 4 desta obra, mostram a simplicidade do mecanismo envolvido e conotam a facilidade de operação, não exigindo um nível muito alto de especialização. Pela descrição do equipamento e dos consumíveis envolvidos no processo, observa-se que de uma forma geral o processo em sua forma mais simples não envolve equipamentos de grande complexidade tampouco recursos muito caros.

É possível ter um equipamento mais barato (LPCS), para aplicações mais simples, utilizando consumíveis economicamente acessíveis (pós metálicos simples e gases de aporte mais baratos, como o N₂ ou ar comprimido). Por outro lado, para aplicações de maior responsabilidade e que exijam maior qualidade de revestimento e maior controle de processo, é necessário um equipamento mais robusto (HPCS) trabalhando com consumíveis de melhor desempenho (ligas ou compósitos mais complexos, gás hélio) e acréscimo de periféricos (robotização, câmaras de vácuo, coletores, recuperadores de gás).

Em outras palavras, o *Cold Spray* é uma tecnologia economicamente flexível, que se adapta bem ao nível de complexidade da demanda. Ainda com relação ao

equipamento, conclui-se que há ganho na questão de segurança, não apenas pela menor temperatura do gás ou pelo baixo nível de ruído, mas também pela ausência de reações de combustão e de gases em estoque, o que acarreta uma diminuição ainda maior no risco de acidente.

Por fim, vê-se que mesmo com diversos estudos realizados há ainda uma grande oportunidade de novas pesquisas e descobertas. São várias as lacunas ainda existentes no processo que os pesquisadores de aspersão ainda esforçam-se em preencher: descoberta de novos materiais; entendimento do processo de aderência das partículas de materiais não metálicos; variações de equipamento para otimização do processo; refinamento da análise dos custos envolvidos; variação dos parâmetros de processo para otimização de resultados; análise de aplicabilidade da tecnologia para novos campos da indústria. Em suma, é grande o potencial de inovação.

No Brasil, por hora, é limitada a oportunidade de estudo da tecnologia. A pesquisa experimental é escassa por conta da falta de equipamento. Poucos pesquisadores locais têm se dedicado a apresentar a tecnologia. Por isso, quase não encontra-se artigos ou livros nacionais que comentem sobre o mesmo. Há também questões legais, de patente e direitos sobre a tecnologia, que certamente burocratizam ainda mais a implementação do processo no Brasil. Porém, visto a competitividade da tecnologia *Cold Spray*, é de se esperar um crescente interesse da indústria brasileira nesta modalidade de aspersão de material. Assim, cresce a necessidade de conhecimento, e por consequência, a relevância deste trabalho. O presente texto cumpre, portanto, seu papel: de apresentar a tecnologia em forma de revisão bibliográfica, de despertar o interesse por mais informação (disponível em cadernos e revistas técnicas) e de fomentar o avanço das pesquisas sobre o *Cold Spray*.

REFERÊNCIAS

Air Cold Spray Pure Nickel. Autor Desconhecido. Publicado em 01/07/2009 por *startack1*, YouTube. (3 min). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=7jtEXbBGMZU>>. Acesso em: 11/11/2016.

ASSADI, H.; GÄRTNER F.; STOLTENHOFF T.; KREYE H. Bonding mechanism in cold gas spraying. **Acta Materialia**, v. 51, n. 15, p. 4379-4394, 2003.

BROSSARD, S. et al. Study of the splat formation for plasma sprayed NiCr on aluminum substrate as a function of substrate condition. **Surface and Coatings Technology**, v. 204, n. 16-17, p. 2647–2656, 2010.

CAI, Z.; DENG, S.; LIAO, H.; ZENG, C.; MONTANOV, G.; The Effect of Spray Distance and Scanning Step on the Coating Thickness Uniformity in Cold Spray Process. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 23, n. 3, 2014.

CHAMPAGNE, V. K. **The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications.** Cambridge (Reino Unido): Woodhead Publishing, 2007.

CHAMPAGNE, V. K.; ZIEGLER, W. **Cold Spray Technology for Military Applications.** Aberdeen, Maryland (EUA): US Army Research Laboratory, 2007. 16 slides.

CORTÉS PAREDES, Ramón Sigifredo. **Aspersão térmica.** Curitiba: UFPR / Departamento de Engenharia Mecânica, 2000. 37p., il., grafs., tabs. Inclui bibliografia. ISBN BROCH.

CORTÉS PAREDES, Ramón Sigifredo. **Aspersão Térmica.** Curitiba (Brasil): UFPR / Departamento de Engenharia Mecânica, 2014. 106 slides. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM314/Nova%20pasta/Apresenta__o%20Aspers_o%20T_rmica.pdf>. Acesso em: 11/11/2016.

Cold gas dynamic spray – DYMET. Rússia: Autor Desconhecido, Produzido por DYMET Technology & Equipment. Arquivo MP4 pessoal, (9 min).

DYKHUIZEN, R. C.; SMITH, M. F Gas Dynamic Principles of Cold Spray. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 7, n. 2, p. 205-212, 1998.

DYMET Technology & Equipment, Application. **AUTOMOTIVE PARTS RESTORATION: SCRATCH AT CAMSHAFT.** Disponível em: <http://dymet.info/en/app/auto33_.html>. Acesso em 18/11/2016.

DYMET Technology & Equipment, Application. **Casting and machining defects: FILLING THE CASTING DEFECTS (2).** Disponível em <http://dymet.info/en/app/mdefect02_html>. Acesso em 18/11/2016.

GARDON, M.; LATORRE, A.; TORRELL, M.; DOSTA, S.; FERNÁNDEZ, J.; GUILMANY, J. M. Cold gas spray titanium coatings onto a biocompatible polymer. **Materials Letters**, v. 106, p. 97-99, 2013.

GHELICHI, R.; GUAGIANO, M. Coating by the Cold Spray Process: a state of the art. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 8, p. 30-44, 2009.

GILMORE, D. L.; DYKHUIZEN, R.C.; NEISER, R. A.; ROEMER, T.J.; SMITH, M.F. Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process. **Journal Thermal Spray Technology**, v. 8, n. 4, p. 576-582, 1999.

GRUJICIC, M.; SAYLOR, J. R.; BEASLEY, D. E.; DEROSSET, W. S.; HELFRITCH, D. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process. **Applied Surface Science**, v. 219, p. 211-227, 2003.

GRUJICIC, M.; ZHAO, C. L.; DEROSSET, W. S.; HELFRITCH, D. Adiabatic shear instability based mechanism for particles / substrate bonding in cold-gas dynamic-spray process. **Materials and Design**, v. 25, n. 8, p. 681-688, 2004.

KARTHIKEYAN, J. **Cold Spray Technology: International Status and USA Efforts**. Barberton, Ohio (EUA): ASB Industries Inc., 2004.

KARTHIKEYAN, J. **Development of Oxidation Resistant Coatings on GRCop-84 Substrates by Cold Spray Process**. Barbeton (OH): ASB Industries Inc., NASA/CR-2007-214706, 2007.

KLASSEN, T.; KREYE, H. **The Cold Spray Process and its Optimization**. Hamburgo (Alemanha): Institute of Materials Technology, HSU Hamburg, 2006.

KOIVULUOTO, H. **High-pressure and low-pressure cold spraying – Overview of coating properties**. Tampere (Finlândia): Universidade de Tecnologia de Tampere, 2013. 23 slides.

KUMAR, S.; GYUYEOL, B.; CHANGHEE, L. Deposition characteristics of copper particles on roughened substrates through kinetic spraying. **Applied Surface Science**, v. 255, p. 3472-3479, 2009.

LI, C. – J.; WANG, H. – T.; ZHANG, Q.; YANG, G. – J.; LI, W. – Y.; LIAO, H. L. Influence of Spray Materials and Their Surface Oxidation on the Critical Velocity in Cold Spraying. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 19, n. 1-2, p. 95-101, 2010.

LI, C. – J.; LI, W. – Y.; LIAO, H. Examination of the Critical Velocity for Deposition of Particles in Cold Spraying. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 15, n. 2, p. 212-222, 2006.

LI, W. – Y.; LI, C. – J. Optimal Design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space. **Journal of Thermal Spray Technology**, v.14, n. 3, p. 391-396, 2005.

LIMA, R. S.; KUCUK, A.; BERNDT C. C.; KARTHIKEYAN, J.; KAY, C. M. LINDEMANN, J. Deposition efficiency, mechanical properties and coating roughness in cold-sprayed titanium. **Journal of Materials Science Letters**, v. 21, p. 1687-1689, 2002.

MAEV, R. G.; LESHCHYNSKY, V. **Cold Gas Dynamic Spray**. Boca Raton (FL): CRC Press, 2016.

MORIDI, A.; HASSANI-GANGARAJ, S. M.; GUAGLIANO, M. On Fatigue Behavior of Cold Spray Coating. **MRS Online Proceedings Library**, v. 1650, 2014.

MORIDI, A.; HASSANI-GANGARAJ, S. M.; GUAGLIANO, M.; DAO, M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. **Surface Engineering**, v. 36, n. 6, p. 369-395, 2014.

PAPIRYN, A.; KOSAREV, V.; KLINKOV, S.; ALKHIMOV, A.; FOMIN, V. M. **Cold Spray Technology**. Amsterdã: Elsevier Ltd, 2007.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2 ed. Chichester, West Sussex (Reino Unido): John Wiley & Sons Ltda, 2008.

Portable High Pressure Cold Spray System--CGT 2000. Autor Desconhecido. Publicado em 12/03/2010 por *Charles Kay*, YouTube. (1 min). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hDmZgzJ2-84>>. Acesso em: 11/11/2016.

SCHMIDT, T.; GAERTNER, F.; KREYE, H.; KLASSEN, T. **Particle Impact Conditions and Corresponding Coating Properties in Cold Spraying**. In: Conferência de Cold Spray, 2007. Akron, Ohio (EUA). *Anais...* Hamburgo (Alemanha): HSU Hamburg, 2007. 46 slides.

SHKODKIN, A.; KASHIRIN, A.; KLYUEV, O.; BUZDYGAR, T. **Peculiarities of Gas Dynamic Spray Applications in Russia**. Obninski (Rússia): OCPS, 2010. 37 slides.

SINGH, H.; SIDHU, T. S.; KALSI, S.B.S. Cold spray technology: future of coating deposition processes. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 22, p. 69-84, 2012.

STIER, O. **Economics of Cold Spray – Fundamental Cost Analysis**, CT RTC MAT Coatings, Siemens AG, 2012. 35 slides. Disponível em: <<http://www.coldsprayteam.com/files/Oliver%20Stier%20-%20Siemens.pdf>>. Acesso em 21/11/2016.

STOLTENHOFF, T.; VOYER, J.; KREYE, H. Cold Spraying—State of the Art and Applicability. In: Conferência Internacional de Aspersão Térmica, Essen (Alemanha), 2002. *Anais...* **DVS Deutscher Verband fur Schweißen**, p. 366-374, 2002.

TINASHE, S. E. **Conceptual Design of a Low Pressure Cold Gas Dynamic Spray (LPCGDS) System**. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Joanesburgo (África do Sul): Universidade de Witwatersrand, 2010.

TOKAREV, A. O. Structure of aluminum powder coatings prepared by cold gas dynamic spraying. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 38, p. 136-139, 1996.

VAN STEENKISTE, T.H.; SMITH, J.R.; TEETS, R.E.; MOLESKI, J.J.; GORKIEWICZ, D.W.; TISON, R.P.; MARANTZ, D.R.; KOWALSKY, K.A.; RIGGS, W.L.; ZAJCHOWSKI, P.H.; PILSNER, B.; MCCUNE, R.C.; BARNETT, K.J. Kinetic Spray Coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 111, n. 1, p. 62-71, 1999.

YIH, C.-S. Instability due to viscosity stratification. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 27, n. 2, p. 337-352, 1967.

YIN, S.; SUN, Y.; WANG, X.; GUO, Z.; LIAO, H. Effect of Spray Angle on Temperature Distribution within the Metallic Substrate in Cold Spraying. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 22, n. 6, p. 983-991, 2013.

YOON, S.; KIM, H.; LEE, C. Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process, **Surface & Coatings Technology**, v. 201, p. 9524-9532, 2007.

ANEXO 1 – Tabela dos materiais utilizados no processo *Cold Spray*, os substratos onde são geralmente depositados e as suas principais aplicações

Revestimento	Substrato	Aplicação
I. Metais		
Cu e suas ligas	Vários	Característica antimicrobiana; boa condutividade elétrica e térmica
Al e sua ligas	Vários	Resistência à corrosão; restauração dimensional e reparo.
Zn e suas ligas	Vários	Proteção catódica para ligas ferrosas e ligas de Al - resistência à corrosão
Aços inoxidáveis	Aço carbono	Restauração dimensional e reparo; aplicações médicas
Ti e suas ligas	Vários	Restauração dimensional e reparo; aplicações médicas
Ni e suas ligas	Vários	Restauração dimensional e reparo
Ta	Al	O uso de materiais refratários está em desenvolvimento para revestimentos com pistolas de bocal cilíndrico
Al-5Fe-V-Si	6061-T6	Resistência a altas temperaturas - Combustão interna de motores
Fe ₄₄ Co ₆ Cr ₁₅ Mo ₁₄ C ₁₅ B ₆	Ligas AlMg ₃ , Cu, Ti, aço inoxidável 316L	Estudos de viabilidade e de investigação do comportamento de deformação de vitro-metálicos
CuNiTiZr	BMG de Cu	Aplicações gerais de vitro-metálicos
Al-Co-Ce	AA 2024-T3	Proteção contra corrosão
Cu ₅₄ Zr ₂₂ Ti ₁₈ Ni ₆	Al 6061	Sem sucesso na melhora da proteção contra corrosão - boa performance na proteção ao desgaste do que o Cu puro
II. Compósitos		
Ti/Al	Al	Estudos de viabilidade para revestimentos ou componentes
TiAl ₃ -Al	Ti-22Al-26Nb ortorrômbico	Resistência à oxidação em altas temperaturas
Al-Al/Ni	Ni, Al	Composição de intermetálico para possíveis aplicações estruturais
Ligas refratárias à base de Co + adição de Ni	Aço	Aplicações onde é necessário material refratário

FONTE: Adaptado de Moridi *et al.*, (2014)

ANEXO 1 (cont.) – Tabela dos materiais utilizados no processo *Cold Spray*, os substratos onde são geralmente depositados e as suas principais aplicações

Revestimento	Substrato	Aplicação
Aço inox. 316 + liga Co-Cr	Aço carbono 316L	Melhoria de resistência mecânica e contra corrosão para aplicações médicas
Nd ₂ Fe ₁₄ B + Al	Al 5083	Componentes magnéticos para aplicações eletrônicas, motores elétricos, sensores, acoplamentos magnéticos e atuadores
Al-Al + Mg ₁₇ Al ₁₂	Liga de Mg Az91D	Proteção contra corrosão
Al ₂ O ₃ + 316 austenítico	Liga de Mg Az91	Melhora na proteção contra corrosão
Al-Al + Al ₂ O ₃	Aço carbono e Al7075	Aplicações que demandam proteção contra o desgaste e contra corrosão
Cu-Al Al ₂ O ₃ -SiC (todas as combinações)	Al	Melhora nas propriedades tribológicas
Al + Al ₂ O ₃	Si e Al 6061	Melhora nas propriedades tribológicas
Al + SiC, Al + Al ₂ O ₃ assim como Al, SiC e Al ₂ O ₃ puros	Si	Estudos de viabilidade de deposição em substratos duros
Al-Al ₂ O ₃ Al6061-Al ₂ O ₃	AZ91E-T6	Melhora na resistência à corrosão e desgaste
Cu-Al ₂ O ₃	Aço Fe52	Melhora nas propriedades tribológicas
Al-Al ₂ O ₃	Liga de Mg Az91D	Melhora na resistência à corrosão e desgaste
Al-Bronze-Al ₂ O ₃	...	Melhora nas propriedades tribológicas
Al-Al ₂ O ₃ -Zn em diferentes teores (%p)	AA2024-T3	Proteção contra corrosão
W/Cu	Aço carbono	Dissipador de calor em aplicações eletrônicas
WC-Co	Aço inoxidável SUS 304	Resistência ao desgaste
WC-15Co WC-10Co-4Cr	Al	Resistência ao desgaste, particularmente no setor de maquinário pesado
WC+25Co	Aço alto carbono, Al7075-T6	Melhora na proteção contra corrosão e desgaste
Cr ₃ C ₂ -NiCr Cr ₃ C ₂ -Ni	AISI 4140	Resistência ao desgaste
SUS304/diamante	Ligas de Al	Estudos do mecanismo de formação de revestimento

FONTE: Adaptado de Moridi *et al.*, (2014)

ANEXO 1 (cont.) – Tabela dos materiais utilizados no processo *Cold Spray*, os substratos onde são geralmente depositados e as suas principais aplicações

Revestimento	Substrato	Aplicação
Bronze/diamante	Al	Usinagem de cerâmicas de alta resistência, graças às excelentes propriedades mecânicas do diamante
Cu/Cu ₂ O	...	Revestimentos anti-incrustamento
Al/CuO	...	Aplicações com propulsores térmicos
B ₄ C/Ni	316L	Proteção contra desgaste e corrosão para sensores geológicos que operam em grandes profundidades sob condições severas
Ti/HA	Ti e Al	Aplicações biomédicas
Cu reforçado com nanotubos de C	Al	Dissipador de calor em aplicações eletrônicas
III. Cerâmicos		
SiC	Inconel 625	Resistência à oxidação em altas temperaturas
WO ₃	Si	Aplicação com foto eletrodos
TiO ₂	SS, Al, Cu, Ti	Promissor em aplicação como foto catalisador; potencial aplicação na purificação de ambientes, células solares, esterilização, tratamento contra o câncer e filmes anti-embaçamento
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Avaliação de NPDS para aspersão de cerâmicos sobre substratos cerâmicos
HA	Az51	Melhora na biodegradação
TiN	α-Al ₂ O ₃	Proteção em ferramentas de usinagem
Ti ₂ AlC	AA6060, aço 1.0037, Cu, SS304	Comportamento semelhante aos cerâmicos; estudos de viabilidade de deposição de revestimentos de alta dureza para futuras aplicações industriais
IV. Polímeros (substrato ou pó ou ambos)		
Pó de Cu, Al ou Pb	PC/ABS, PA 6, PP, PS e compósito d	Estudos de viabilidade de aspersão de metal sobre substratos de polímero ou compósito, para aplicações de engenharia
Al Al/Cu	PEEK540CA30	Aplicações aeroespaciais e militares graças a sua baixa densidade e alta resistência mecânica e rigidez

FONTE: Adaptado de Moridi *et al.*, (2014)

ANEXO 1 (cont.) – Tabela dos materiais utilizados no processo *Cold Spray*, os substratos onde são geralmente depositados e as suas principais aplicações

Revestimento	Substrato	Aplicação
Al	CFRP	Revestimento de fuselagem de aeronaves para proteção contra danos provocados por raios
HA	PEEK	Aplicações biomédicas
Ti	PEEK	Aplicações biomédicas
Poliiolefina	PE Al	Estudos de viabilidade
Polietileno	Al 7075-T6	Estudos de viabilidade
Cu	PE de alta densidade (HDPE) e nylon	Anti-incrustamento
Cu	PU, HDPE, PP, nylon 6, PTFE e polid	Anti-incrustamento
Cu	PU	Anti-incrustamento
V. Revestimentos nanocristalinos		
Al 5083	...	Estudos de deposição de pós nanocristalinos
Al 6061 Al 5083	Al 6061	Usinagem em meso escala
Al 2618 + Sc	Al	Aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e automotivas
Al 2009	Ligas de Al	Aplicações gerais - melhora na dureza
MCrAlY	Al 6061	Melhora na resistência à oxidação, usado como revestimentos em barreiras térmicas de componentes aquecidos de turbinas
Al/Al ₂ O ₃	Aço carbono	Melhora propriedades tribológicas, utilizado na indústria automotiva e aeroespacial
Cu/Al ₂ O ₃	Cu	Eletrodos de solda ponto e costura; contatos elétricos; fios de chumbo e condutores de aplicação em alta temperatura
Fe/Al	Aço inoxidável	Atrativo para aplicações industriais de média a alta temperatura
CuNiFe	Liga de níquel C63000	Anodo inerte para produção de Al
VI. Substratos especiais		
Al	Vidro sodo-cálcico	Estudo e caracterização da interface entre Al e vidro
Al	PZT	Diversas aplicações que necessitam de conversão de energia mecânica em elétrica e vice versa

FONTE: Adaptado de Moridi *et al.*, (2014)