

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Centro de Desenvolvimento Tecnológico

Curso de Engenharia de Materiais



Trabalho de Conclusão de Curso

**Estudo e Caracterização de Chapas de Aço Carbono SAE 1020 Modificadas  
pela Técnica de Aspersão Térmica para uso na Indústria de Beneficiamento de  
Arroz**

**Gabriela de Bastos**

Pelotas, 2014.

**GABRIELA DE BASTOS**

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO SAE 1020  
MODIFICADAS PELA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA PARA USO NA  
INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal de Pelotas, como  
requisito parcial à obtenção de título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Neftali Lenin Villareal Carreño

Pelotas, 2014.

**Banca examinadora:**

---

Prof. Dr. Neftali Lenin Villareal Carreño (Orientador)

Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos.

---

Prof. Dr. Antônio Shigueaki Takimi

Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pelas oportunidades, por me guiar sempre e pela proteção.

Gostaria de agradecer a minha família, pela base que me proporcionou chegar onde cheguei. Aos meus pais Nelson e Ana Maria, pelo amor incondicional, que sempre lutaram e sonharam comigo: essa conquista é nossa. Ao meu irmão Nelson Jr. pelo apoio e compreensão nesse e nos demais momentos por qual já passamos. Amo muito vocês.

Ao meu namorado Silvano, que sempre me transmitiu amor, carinho, companheirismo e confiança. Mais que um namorado, meu melhor amigo.

A minha amiga Elaine pela amizade sincera, pelo acolhimento, carinho, compreensão, cuidado, companheirismo e pelas palavras de incentivo. Serei eternamente grata a ti.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, pelo conhecimento transmitido ao longo desses cinco anos, além do coleguismo e amizade. Somos frutos de um belo trabalho e dedicação.

Aos amigos, pela compreensão, palavras de incentivo e pelo que significam pra mim.

## Resumo

BASTOS, Gabriela. **Estudo e Caracterização de Chapas de Aço Carbono SAE 1020 Modificadas pela Técnica de Aspersão Térmica para uso na Indústria de Beneficiamento de Arroz.** 2014. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

O presente estudo teve como objetivo caracterizar chapas de aço carbono SAE 1020 de 1,9 mm de espessura, modificadas pela técnica de aspersão térmica HVOF (*High Velocity Oxi-Fuel*), a fim de se obter um revestimento de WC-Co-Cr resistente ao desgaste erosivo. Três corpos de prova foram aspergidos até a metade, deixando a metade restante em aço carbono original, para fins de comparação. Dois corpos de prova foram instalados em cabeças de elevadores de caçambas de arroz com casca em uma grande e respeitada indústria de beneficiamento de arroz, localizada no município de Pelotas, com o objetivo de obter um desgaste erosivo provocado pela abrasividade da casca do arroz no período de vinte dias de operação, sob um fluxo de 120 toneladas/hora do referido arroz com casca. O corpo de prova restante foi jateado durante 3 minutos com granulha de aço SAE G40 a fim de simular um desgaste erosivo mais agressivo. As amostras dos corpos de prova foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-x. Os resultados mostraram que o revestimento pode ser uma boa alternativa como proteção ao desgaste erosivo.

**Palavras-chave:** aspersão térmica, HVOF, desgaste abrasivo, WC-Co-Cr

## Abstract

BASTOS, Gabriela. **Estudo e Caracterização de Chapas de Aço Carbono SAE 020 Modificadas pela Técnica de Aspersão Térmica para uso na Indústria de Beneficiamento de Arroz.** 2014. 58f. Conclusion of Course Work – Materials Engineering, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

The present study aimed to characterize plates SAE 1020 carbon steel 1.9 mm thick, modified by HVOF thermal spray technique (High Velocity Oxy -Fuel ) aiming to obtain of a resistant erosive wear coating of WC- Co - Cr. Three test objects were sprayed halfway, leaving the remaining half in the original carbon steel, for comparison purposes . Two test objects were installed in heads buckets elevators of paddy rice in a large and respected rice processing industry, located in the city of Pelotas, with purpose providing an erosive wear caused by abrasion of paddy rice in the period twenty days of operation under a flow of 120 ton / hour of paddy rice. The remaining test object was blasting for 3 minutes with SAE G40 steel grit in order to simulate a more aggressive erosive wear. Samples of the test objects were characterized by scanning electron microscopy and x - ray diffraction. The results showed that the coating can be a good alternative for protection against erosive wear.

Key-words: thermal spray, HVOF, abrasive wear, WC-Co-Cr

## **Lista de Figuras**

Figura 1	Características da camada depositada por aspersão térmica (AGUILA et al., 2009).....	13
Figura 2	Classificação da aspersão térmica segundo PAWLOWSKI (2008).....	28
Figura 3	Representação esquemática do processo de aspersão térmica a chama de alta velocidade HVOF (cedido por Praxair Surfaces Technologies).....	29
Figura 4	Equipamentos utilizados no processo de aspersão térmica HVOF (HOWARD, 1997).....	29
Figura 5	Pistola modelo JP5000 TAFA utilizada no processo de aspersão térmica HVOF (PAWLOWSKI, 2008).....	31
Figura 6	Conjunto de forças atuantes sobre uma partícula de erodente (HUTCHINGS, 1992).....	33
Figura 7	Fotografia de alta velocidade do choque a 30° de um cubo de aço ferramenta sobre um aço de baixo teor de carbono (HUTCHINGS, 1977).....	34
Figura 8	Equipamentos utilizados para aspersão térmica HVOF: (1) console e alimentador do pó Tafa/Praxair; (2) pistola HVOF Tafa/Praxair.....	40
Figura 9	Imagen ilustrativa do elevador de caçambas de arroz com casca (a) vista inteira do elevador; (b) vista da cabeça do elevador; (c) vista do interior da cabeça do elevador; (d)	

vista ilustrativa da posição de instalação do corpo de prova na cabeça do elevador.....	41
Figura 10 Imagem do microscópio eletrônico de varredura Shimadzu modelo SSX-550.....	43
Figura 11 Imagem ilustrativa do difratômetro Shimadzu XRD-6000 (ANT TEKNIK, 2012).....	44
Figura 12 Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras testadas na indústria de beneficiamento de arroz: (a) interface da amostra com revestimento e sem revestimento ampliada em 20x; (b) região da amostra sem revestimento ampliada 1000x; (c) superfície da região aspergida ampliada 100x; (d) região do revestimento ampliada 1000x.....	46
Figura 13 Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras testadas por jateamento abrasivo agressivo: (a) interface da amostra com revestimento e sem revestimento ampliada 45x; (b) região sem revestimento ampliada 100x; (c) superfície da região aspergida ampliada 100x; (d) região aspergida ampliada 1000x.....	47
Figura 14 Gráfico da difração de raios-x da amostra com revestimento testada na indústria de beneficiamento de arroz.....	48
Figura 15 Gráfico da difração de raios-x da amostra com revestimento testada por jateamento abrasivo.....	49

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1	Características e propriedades dos processos de aspersão térmica.....	28
Tabela 2	Principais propriedades mecânicas do aço carbono SAE 1020.....	36
Tabela 3	Composição química da liga WC-Co-Cr.....	37
Tabela 4	Características da liga WC-Co-Cr.....	37
Tabela 5	Características gerais do óxido de alumínio fundido marrom.	38
Tabela 6	Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica HVOF.....	39
Tabela 7	Parâmetros do processo de jateamento.....	42

## Sumário

<b>1 Introdução.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Revisão bibliográfica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Aspersão térmica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 Preparação da superfície.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1.1 Limpeza da superfície.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2 Características do jato.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Características da fonte de energia.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.4 Parâmetros de aspersão.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.5 Tratamento térmico após a deposição.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.6 Características e propriedades dos revestimentos.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.6.1 Espessura.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.6.2 Tensões residuais.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.6.3 Porosidade.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.6.4 Dureza.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.6.5 Microestrutura.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.6.6 Aderência.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Processos de aspersão térmica.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 Aspersão térmica a chama de alta velocidade (HVOF).....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.1 Principais características do processo e de seus revestimentos....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Revestimentos de WC-Co.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5 Desgaste erosivo.....</b>	<b>32</b>
<b>3 Materiais e métodos.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Material do substrato.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Material do revestimento.....</b>	<b>36</b>

<b>4 Procedimento experimental.....</b>	
<b>4.1 Aspersão térmica HVOF.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.1 Preparação do substrato.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.2 Parâmetros do processo.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Teste de desgaste erosivo através da aplicação industrial.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 Teste de desgaste erosivo através de jateamento abrasivo agressivo.....</b>	<b>41</b>
<b>5 Caracterização dos revestimentos.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Caracterização morfológica da superfície.....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 Análise cristalográfica.....</b>	<b>43</b>
<b>6 Resultados e Discussões.....</b>	<b>45</b>
<b>6.1 Morfologia da superfície desgastada.....</b>	<b>45</b>
<b>6.2 Caracterização das fases cristalinas.....</b>	<b>47</b>
	<b>50</b>
<b>7 Conclusões.....</b>	
<b>8 Referências.....</b>	<b>51</b>

## 1 Introdução

Segundo Batchelor et al. (2002) a degradação de materiais é o principal problema de engenharia, causando a redução do desempenho e/ou falhas prematuras de componentes, dispositivos, equipamentos e sistemas de engenharia. Um dos principais tipos de degradação de materiais é o desgaste erosivo. Esse tipo de degradação causa um enorme impacto econômico nas indústrias, em especial na indústria de beneficiamento de arroz.

Conforme dados da Federarroz (2013), o estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, sendo responsável por 65% da safra de arroz nacional em uma área aproximada de 1 milhão e 60 mil hectares, atingindo a maior área cultivada do cereal no Continente Americano, distribuída em 20 mil lavouras que movimentam a economia de 142 municípios, 230 indústrias e que direta ou indiretamente envolvem o trabalho de 220 mil pessoas. Dentre as 132 localidades beneficiadoras do grão no estado, o município de Pelotas é considerado o polo, seguido por Camaquã, Itaqui e São Borja. A cidade industrializa cerca de 700 mil t/ano, segundo o Sindicato da Indústria do Arroz de Pelotas, representando de 13 a 20% do total beneficiado no estado e 6% do total beneficiado no país (POUEY, 2006).

O processo de beneficiamento do arroz tradicional é composto basicamente pelas etapas de limpeza, descascamento, separação pela câmara de palha, separação de marinheiro, brunição, homogeneização e classificação (EMBRAPA, 2004). Até o momento em que o grão não é completamente descascado, o mesmo é transportado para os equipamentos constituintes do referido processo por meio de roscas transportadoras, fitas transportadoras e elevadores de caçambas. Todas essas peças, equipamentos e maquinários são basicamente fabricados em aço carbono, cujos sofrem muita degradação, em especial, o desgaste erosivo, devido as características da casca do arroz tais como a alta dureza, fibrosidade, baixa densidade e natureza abrasiva. Na tentativa de aumentar a vida útil dos materiais, aumentando o tempo entre as paradas para manutenção e redução de custos operacionais, as indústrias vêm buscando cada vez mais alternativas tecnológicas. Visto isso, estudos e técnicas são constantemente propostas para recuperar

componentes, alcançar propriedades especiais e/ou prepará-los para melhor suportarem as solicitações nos quais são expostos.

Por outro lado, a técnica de deposição aspersão térmica, tem se destacado pelas vantagens oferecidas em relação a outras técnicas, como a possibilidade de aplicar o revestimento sobre peças de qualquer dimensão e geometria, altas taxas de deposição de material e ainda, não gera impactos ambientais. A aspersão térmica consiste em um grupo de processos utilizados para aplicar revestimentos metálicos ou não metálicos. Através de fontes de energia usadas para aquecer o material de revestimento (em forma de pó, de arame ou haste) para um estado de fusão ou semi fusão, as partículas aquecidas são movidas em direção a uma superfície previamente preparada através de gases ou jatos de atomização, formando uma ligação mecânica com a superfície no momento do impacto. As partículas subsequentes formam o revestimento constituído por uma estrutura lamelar (DAVIS, 2004).

Partindo deste conceito, devido a sua versatilidade quanto à aplicação e os tipos de camadas produzidas e suas espessuras, essa técnica é uma das formas de se obter camadas de elevadas dureza para a proteção ou reparo do componente base, permitindo também, a aplicação de revestimentos em vários tipos de substratos que incluem de aços até plásticos.

Dentre os diversos tipos de aspersão térmica, o processo de chama a alta velocidade, mais conhecido como HVOF (*High Velocity Oxi-Flame*), utiliza um combustível gasoso ou líquido, no qual é misturado com oxigênio. A queima acontece à alta pressão em uma câmara de combustão gerando um jato de exaustão de alta velocidade. Após a combustão gases são liberados e se expandem através do bocal para fora da pistola a velocidades supersônicas. Com velocidades maiores, as partículas tendem a chegar ao substrato com alta energia térmica (fonte de calor) e cinética (alta velocidade) LIMA et al. (2001).

Essa técnica é particularmente adequada para a aplicação de revestimentos de carbonetos devido à sua baixa temperatura de chama e baixo tempo de permanência do material na chama, em comparação com processos à arco elétrico e à plasma WANG et al. (1994). Os revestimentos apresentam excelente qualidade com respeito à aderência, densidade, rugosidade, elevadas durezas e baixas

quantidade de poros, óxidos e tensões residuais PARKER et al. (1991), LIAO et al. (2000).

O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho do revestimento da liga WC-Co-Cr contra o desgaste erosivo obtido através da técnica de aspersão térmica HVOF em chapas de aço carbono SAE 1020. Essas referidas chapas foram testadas em elevadores de caçambas de arroz em uma grande e respeitada empresa do ramo beneficiador do grão em Pelotas, e também jateadas com granalha de aço a fim de simular um desgaste erosivo com maior agressividade. A escolha deste equipamento onde foi realizado o teste é justificada pelo alto desgaste ocorrido na cabeça do elevador, especialmente na região onde as caçambas completam a volta e arremessam os grãos do cereal com casca em direção à chapa de fechamento dianteiro da cabeça, fazendo com que seja necessária uma manutenção regular desta peça, originando um considerável impacto econômico.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Aspersão Térmica

A aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos. Os materiais depositados, em forma de fio, arame ou pó, são levados a um estado fundido ou semi fundido através de uma fonte de calor que pode ser por combustão de gases, arco elétrico ou gases, gerada no bico de uma pistola apropriada. Logo após a fusão, o material na fase de solidificação (na forma de partículas) é acelerado por gases sob pressão contra o substrato que será revestido. Na colisão as partículas deformam-se e aderem ao material base e na sequência sobre as partículas já depositadas formando camadas. Estas camadas são constituídas por pequenas partículas deformadas na forma de panquecas, contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade (AWS, 1985).

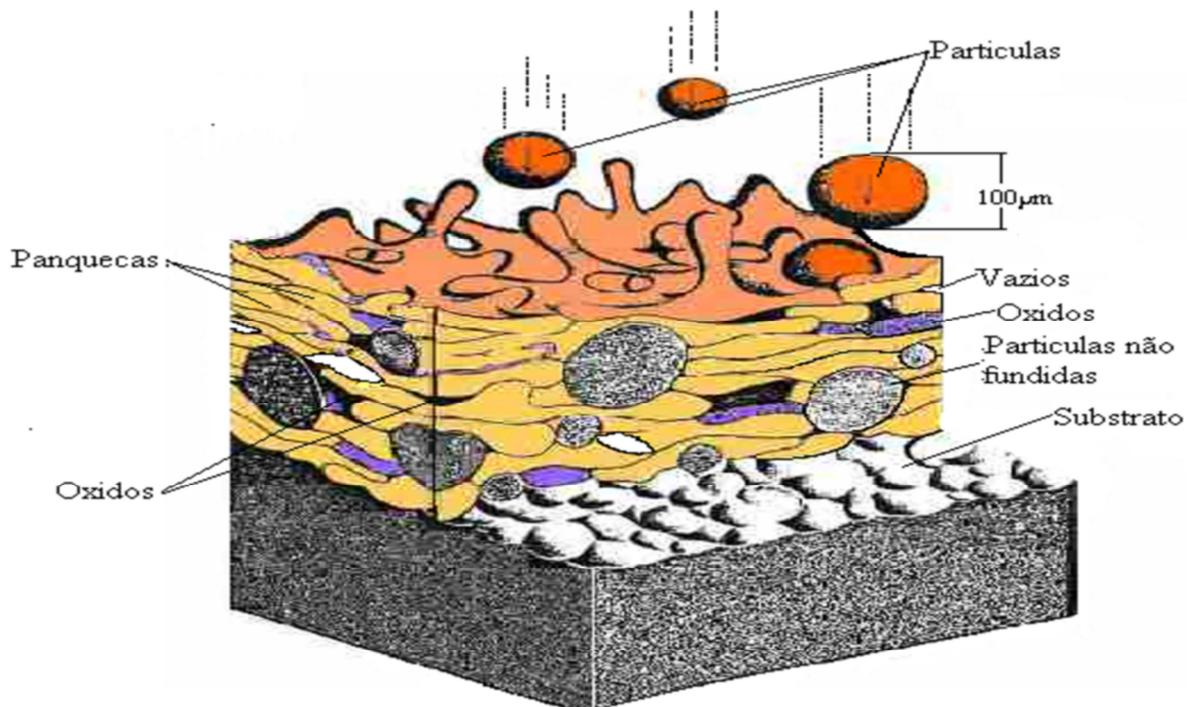


Figura 1 – Características da camada depositada por aspersão térmica (AGUILA, 2005).

Normalmente nos processos de aspersão térmica, as distâncias de projeção das partículas variam de 100 até 300 mm (PUKASIEWICZ, 2008).

Esta técnica é geralmente utilizada para aumentar a resistência a corrosão e diminuir as taxas de desgaste e erosão de peças e componentes estruturais. Além disto, a aspersão técnica também tem sido utilizada para revestir peças que necessitam de isolamento elétrico e térmico ou compatibilidade biológica (CORTES, 2001). A maior vantagem da referida técnica é a diversidade de aplicações, pois a seleção de matérias é quase ilimitada (MARANHO, 1996). Qualquer material que não sofra decomposição quando fundido pode ser depositado.

## **2.1.1 Preparação da superfície**

Os procedimento inclusos na preparação da superfície tem a finalidade de deixá-la ativa permitindo que as partículas propelidas tenham, no momento do impacto, a máxima potencialização de aderência. A preparação da superfície compreende a sua limpeza, texturização e preaquecimento do substrato. O trabalho de limpeza consiste em retirar do substrato impurezas sólidas, líquidas, e pastosas como carepa de laminação e óxidos resultantes de tratamentos térmicos. Por outro lado, é fundamental prover a superfície de determinada rugosidade, obtida por jateamento abrasivo e/ou usinagem, pois a aderência dos revestimentos ocorre principalmente por ancoragem mecânica.

### **2.1.1.1 Limpeza da superfície**

O primeiro passo na preparação do substrato é a remoção de contaminantes como óleo, ferrugem, graxa, tintas, películas de óxidos e umidade. Contaminantes remanescentes entre o substrato e a camada de revestimento irão minimizar o contato na interface e reduzir a aderência (BERNDT et al., 2008). A limpeza da superfície é realizada através de processos químicos, como desengraxe e decapagem ácida, de processos térmicos como queima em forno ou por chama direta e atmosfera redutora, ou através de processos mecânicos como usinagem, escovação, lixamento ou jateamento abrasivo (MARANHO, 2006).

O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para obtenção de limpeza e rugosidade da superfície, consistindo na propulsão de partículas abrasivas na direção do substrato a velocidades relativamente altas (BERNDT et al., 2008). Na aspersão de peças de grande porte, utiliza-se o jateamento para obter ao mesmo tempo limpeza e rugosidade (MENEZES, 2007)

Compostos orgânicos como óleos e graxas quando estão presentes na superfície, podem não ser removidos com o jato de abrasivos, mas também podem fazer com que o abrasivo se acumule na superfície, aumentando a contaminação. Por este motivo, é prudente que antes do jato abrasivo a superfície passe por um processo de limpeza química (PAREDES, 2009).

A limpeza química é dividida em três categorias: a detergência, o desengraxe e a decapagem ácida. A detergência ou limpeza alcalina é um dos meios mais eficientes para a remoção de graxas, óleos, pó e partículas de metais. A limpeza de desengraxe remove impurezas através de vapor quente e é um bom agente quanto a óleos e graxas com grau de contaminação leve. Por sua vez, a decapagem é um modo eficaz de remoção de camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos. Outra forma de limpeza também pode ser empregada como a limpeza ultrassônica destinada a expelir contaminantes impregnados em locais confinados (PAREDES, 2009).

A superfície dos materiais metálicos quando expostas ao ar atmosférico mesmo em um intervalo de tempo muito pequeno adquire um filme de óxido e sobre esta película agrega-se água, óleos, poeiras. Então após a limpeza não se pode demorar para aplicação do revestimento ou tem que se prever um modo de proteção da superfície impedindo a exposição a contaminantes (PAREDES, 2009).

Segundo Paredes (2009), o jato abrasivo é um processo no qual partículas de um material duro são lançadas contra a superfície, através de ar comprimido. É muitas vezes utilizado para obter a limpeza e ao mesmo tempo a rugosidade necessária e de acordo com a norma ISO 8501-1 o grau de limpeza Sa é classificado como:

- Sa1 – tratamento por jateamento abrasivo ligeiro – norma NACE 4 - a superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis, carepa de laminação, ferrugem, tinta e matérias estranhas de fraca aderência.
- Grau Sa 2 - tratamento por jateamento abrasivo comercial – norma NACE 3 - quase toda a carepa de laminação, ferrugem e material estranho devem ser removidos. A superfície deve apresentar, então, coloração acinzentada.
- Grau Sa 2.1/2 - tratamento por jateamento abrasivo ao metal quase branco – norma NACE 2 – as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser removidos de maneira tão perfeita que seus vestígios apareçam somente como manchas tênuas ou estriadas.
- Grau Sa 3 - tratamento por jateamento abrasivo ao metal branco – norma NACE 1 - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser totalmente removidos. A superfície deve apresentar, então, coloração metálica uniforme.

Conforme a norma NACE Nº1 / SSPC-SP 5, para selecionar de maneira correta o abrasivo mais adequado para determinado jateamento, deve-se considerar o tipo de substrato, a condição da superfície antes da limpeza, a técnica de jateamento abrasivo utilizada, os graus de limpeza e de rugosidade desejados com o jateamento, a reutilização ou não do abrasivo, o tamanho de partícula do abrasivo, condições de serviço, taxa de produção necessária, pressão de ar, tamanho de bocal do jateamento e ciclo de vida

Os abrasivos também influenciam na velocidade do jateamento. Em geral, partículas abrasivas de tamanho grandes tornam a operação mais lenta. O material utilizado no jateamento pode ser reutilizado desde que pelo menos 80% possua granulometria original (PAREDES, 1998). Os grãos finos ou contaminados devem ser retirados a fim de não comprometer o desempenho do revestimento (PAREDES, 2009).

A forma das partículas também tem influência primordial na aderência, isto é, o impacto de partículas com formas angulares acarreta o arrancamento do material da superfície, originando mais irregularidades e pontos de ancoramento favoráveis à aderência do material depositado (PAREDES, 1998).

Segundo Menezes (2007) o ângulo do jato abrasivo deve estar compreendido entre os ângulos de 75° a 90°. A distância do bocal a superfície pode variar de 10 a 30 cm de acordo com o tamanho e o tipo de abrasivo usado, a abertura do bocal e a capacidade do equipamento. Com relação ao tempo, deve-se ficar atento, pois jateamento excessivo pode resultar em textura de superfície inadequada, sendo o controle realizado por inspeção visual. Conforme a norma Petrobras N-2568 um tempo de 3 a 4 segundos é normalmente suficiente para conferir a rugosidade necessária.

Outra forma de limpeza da superfície é o preaquecimento do substrato, o mesmo tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade retidos juntos a superfície do material a ser revestido (AWS, 1985). Entretanto, deve-se tomar cuidado, pois expor o substrato a altas temperaturas por tempos prolongados pode resultar na produção de espessas camadas de óxidos. Este procedimento pode ser realizado pela chama da própria pistola da aspersão térmica, por um equipamento independente, ou ainda por indução (PAREDES, 2009).

A determinação da temperatura depende, ainda das tensões térmicas residuais no revestimento, da natureza dos materiais do revestimento, do substrato e de suas propriedades físicas. Através do preaquecimento é favorecida a redução das tensões internas, que por sua vez influenciam na aderência do revestimento (MARANHO, 1996). Quando as partículas aquecidas chocam-se com o substrato o seu resfriamento é muito rápido, acompanhado da contração do material depositado. O substrato por sua vez, dilata-se ao absorver a energia térmica cedida pelas partículas, além daquela transferida pela chama ou plasma da pistola de aspersão. Em função disso ocorrem tensões contrárias na interface substrato-revestimento, que podem ser reduzidas e melhor distribuídas quando o substrato é preaquecido.

As temperaturas de preaquecimento recomendadas para a maioria dos revestimentos estão na faixa de 90°C até 150°C (LIMA e TREVISAN, 2001).

### 2.1.2 Características do jato

Dentro do processo de aspersão térmica, é no jato que ocorre a atomização dos materiais. Por sua vez, a atomização acontece quando o material em forma de arame é fundido e pulverizado em pequenas partículas pela ação de um gás a pressão e de um bico adequado. No caso de material em forma de pó, a atomização ocorre quando o material é fundido parcial ou totalmente pela chama ou plasma e pulverizado pelo jato de ar comprimido ou dos gases de combustão. Neste caso, a pulverização produzida fora do processo, permite misturar os pós em proporções variadas e assim obter camada com diferentes propriedades (AGUILA, 2005).

O gás de transporte das partículas é responsável pela enérgica cinética que adquire a partícula. Ele pode ser parte da fonte de energia ou externo a ela. O comprimento do jato é característico de cada processo (AGUILA, 2005).

### 2.1.3 Características da fonte de energia

A fonte de energia deve entregar o calor necessário para a fusão ou aquecimento das partículas. As reações geradas para produzir esse calor devem ser controladas a fim de influir apenas de forma positiva no resultado final do material aspergido. Algumas fontes de energia utilizadas são descritas a seguir conforme (AGUILA, 2005).

**Combustão ou detonação de gases ou líquidos:** mistura de combustíveis (propano, butano, querosene, acetileno, etileno, hidrogênio) com oxigênio e calor, atingindo temperaturas perto de 3100°C.

**Eletricidade:** através da eletricidade é gerado um arco elétrico ou um plasma no bico da pistola ao passar o gás (argônio, hélio ou hidrogênio), atingindo temperaturas de 4000 a 6000°C e acima de 20.000°C respectivamente (CORTES, 2001)

## 2.1.4 Parâmetros de aspersão

**Preparação da superfície:** os substratos requerem limpeza e um processo de jateamento, que proporcionará a rugosidade necessária para a boa aderência do revestimento (MAGNANI, 2008).

**Distância da aspersão:** distância entre a boca da pistola até a superfície do substrato. Este percurso determina a velocidade e temperatura no qual chegam as partículas ao substrato, portanto, determinará a microestrutura do revestimento. A distância deve ser definida de acordo com as características do pó que está sendo aspergido e com a relação estrutura-propriedade que se deseja (MAGNANI, 2008).

**Velocidade de deslocamento da pistola em relação ao substrato:** a velocidade transversal de deslocamento da pistola em relação ao substrato influencia na quantidade de material que irá se depositar. Uma velocidade de deslocamento lenta implica em uma maior quantidade de material depositado, resultando em um resfriamento lento que repercutirá na estrutura da camada obtida, e portanto, em suas propriedades. Uma velocidade maior provocará o processo contrário (MAGNANI, 2008).

**Vazão dos gases:** os gases que participam do processo de aspersão térmica são basicamente três, gás combustível, o oxigênio como gás comburente e o gás de arraste. Deve-se calcular a relação estequiométrica da reação de combustão com os respectivos gases para definir a vazão dos mesmos (MAGNANI, 2008).

**Pó de aspersão:** o tamanho e morfologia do pó influenciam nas condições de alimentação da pistola, assim como na troca de calor dentro da câmara de combustão (MAGNANI, 2008).

**Taxa de deposição:** é limitada em função do método usado e o ponto de fusão do material de revestimento (ASM, 1995). Parâmetros devem ser levados em consideração antes de se iniciar o processo de aspersão para se aumentar a eficiência da deposição, tais como a pressão e temperatura do jato, a taxa de vazão do gás, a taxa de alimentação do pó, a distância do jato, o consumo e o tamanho da partícula do pó (DAVIS, 2004).

**Limitações da espessura da cobertura:** está relacionada às tensões internas que ocorrem durante o processo de endurecimento do revestimento. Essas tensões se acumulam de acordo com o crescimento da espessura do revestimento e resultam em tensões de cisalhamento na interface com o substrato. Quando a tensão interna é superior à força de adesão, o revestimento pode ser delaminado do substrato ou quebrar (ASM, 1995).

**Adesão do material de revestimento:** as forças de ligações entre o revestimento e o substrato são afetadas por tensões residuais no revestimento, fusão e superfície de contato entre as partículas e entre o substrato e partículas adjacentes, difusão do revestimento na região aspergida, forças de atração atômica e interação mecânica (DAVIS, 2004).

**Método de acabamento do revestimento:** pode ser feito por usinagem ou retífica. Em geral, os revestimentos depositados por aspersão podem ser usinados para acabamento com rugosidade na ordem de 1 a  $2\mu\text{m}$   $R_a$  e que podem ainda ser melhoradas para 0,25 a  $0,5\mu\text{m}$   $R_a$  por meio de retificação (ASM, 1995).

### **2.1.5 Tratamento térmico após a deposição**

O tratamento térmico dos revestimentos após a deposição é realizado com o propósito de eliminar os poros remanescentes, além de homogeneizar a microestrutura bruta obtida no processo de aplicação (LEE e MIN, 2000). As formas de aquecer os revestimento englobam a refusão com chama, laser, arco elétrico, indução e em forno com atmosfera controlada (AWS, 1985). Deve-se definir o tipo de tratamento térmico mais apropriado para cada revestimento em função de suas características e propriedades.

### **2.1.6 Características e propriedades dos revestimentos**

#### **2.1.6.1 Espessura**

A definição exata da espessura do revestimento, para determinada aplicação depende da otimização de outros parâmetros, como desempenho e custo. Em

função do custo e ciclo de vida, a espessura mínima deve ser tal que possibilite o desempenho adequado, e a espessura máxima não deve ser tão alta a ponto de inviabilizar sua aplicação, devido ao alto custo (MARANHO, 2006).

A espessura mínima do revestimento é controlada pela granulometria do pó ou espessura do arame. Já a espessura total é obtida pelo número de passes. Considerando a variação da velocidade relativa pistola – peça e o fluxo de material, os revestimentos apresentam diferentes valores de porosidade e dureza (MARANHO, 2006).

Com relação ao efeito da espessura do revestimento na aderência é de se esperar que os mais espessos possuam maiores tensões internas, o que por sua vez diminuiria a aderência. Ao contrário, valores muitos altos de aderência para revestimentos de pequenas espessuras podem ser originados de defeitos inerentes aos mesmos (APPS, 1969).

#### **2.1.6.2 Tensões residuais**

As tensões residuais nos revestimentos depositados por aspersão térmica, são originadas através de dois mecanismos. O primeiro mecanismo de geração de tensões internas ocorre devido ao resfriamento das partículas aspergidas a partir da temperatura atingida no processo, que pode ser a temperatura de fusão ou outra temperatura menor, até a temperatura que se encontra o substrato. Este tipo de tensão residual é denominado de tensão intrínseca, tensão de deposição ou tensão de têmpera (CLYNE e GILL, 1996) (GODOY et al., 2002)

As tensões intrínsecas geradas no resfriamento primário surgem devido à restrição do movimento quando da contração das lamelas na solidificação. A restrição ao movimento é devido as outras lamelas anteriormente depositadas ou ao substrato. O somatório dessas micro tensões pode mudar a distribuição de tensões no conjugado revestimento/substrato (CLYNE e GILL, 1996) (GODOY et al., 2002) (STOKES e LOONEY, 2004).

Os valores teóricos máximos da tensão intrínseca são da ordem de 1GPa, porém na prática os valores são de aproximadamente 100MPa, devido a vários

mecanismos de relaxação de tensão que atuam durante o processo de solidificação (MARANHO, 2006).

O segundo mecanismo ocorre devido aos diferentes níveis de contração entre o material do revestimento e do substrato quando o conjugado se resfria da temperatura atingida no final da deposição até a temperatura ambiente. Além disso, esse resfriamento secundário pode ocorrer de formar desigual em diferentes pontos do conjugado. Este mecanismo é denominado contração térmica diferencial e é dependente do coeficiente de expansão térmica do substrato e revestimento, e das temperaturas de fusão das partículas e do substrato (CLYNE e GILL, 1996). Essa contração gera diferentes níveis de tensão no revestimento e no substrato (GODOY et al., 2002).

As tensões térmicas geradas no resfriamento primário e secundário são responsáveis pela ocorrência de trincas e destacamento dos revestimentos (CLYNE e GILL, 1996). As tensões geradas no resfriamento primário são sempre tensões de tração e as tensões geradas no resfriamento secundário dependem da relação entre os coeficientes de dilatação térmica do revestimento e do substrato. Se o coeficiente de dilatação térmica do revestimento é maior que o do substrato, as tensões geradas no resfriamento secundário são trativas, caso contrário, compressivas. Quando os dois coeficientes são iguais não há forças resultantes (MARANHO, 2006).

#### **2.1.6.3 Porosidade**

Consiste em cavidades isoladas ou interconectadas capazes de permitir que líquidos ou até gases penetrem até o substrato, podendo acarretar a penetração de espécies agressivas que irão acelerar o processo de degradação do revestimento. Afeta diretamente propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato (MENEZES, 2007) (SCHIEFLER, 2004).

Existem dois tipos de poros em revestimentos depositados por aspersão térmica. Poros grandes, formados entre lamela/substrato e lamela/lamela, e poros

pequenos formados dentro das lamelas (SOBOLEV e GUILEMANY, 1994) (FUKANUMA, 1992) (FUKANUMA, 1994).

A macroporosidade ocorre devido à incompleta cobertura da superfície pelas partículas subsequentes que são aspergidas. Isto acontece pela incapacidade do material comprimir os gases existentes nos interstícios entre lamela/lamela ou lamela/substrato. A formação desses poros está relacionada com a temperatura, a densidade, a tensão superficial, a viscosidade das partículas fundidas, a velocidade do impacto e a distribuição granulométrica. Baixas temperaturas e/ou velocidade de impacto, assim como partículas grandes tendem a aumentar a porosidade (SOBOLEV e GUILEMANY, 1994) (SEDLÁCEK, 1992).

A microporosidade ocorre dentro das partículas aspergidas. Os poros são formados na superfície das lamelas, pois durante a maior parte do tempo de solidificação a camada do metal de revestimento está no estado pastoso, então, durante todo esse período existe metal líquido na superfície, e no final da solidificação o líquido restante é succionado para o interior da lamela, formando pequenas bolhas que originarão os poros (SOBOLEV e GUILEMANY, 1994) (SOBOLEV, 1996).

Uma maneira de minimizar os efeitos da porosidade é a aplicação de selantes sobre a superfície revestida ao término da aspersão térmica para a impregnação ou vedação dos poros. A vedação dos poros reduz a área exposta minimizando a corrosão (MENEZES, 2007).

Segundo Berndt et al. (2004) as mais comuns fontes de porosidade são:

**Ângulo de aspersão:** a porosidade do revestimento diminui quando o ângulo de aspersão se aproxima de 90°, sendo 45° o ângulo de impacto mínimo aceitável, pois a partir deste valor propriedades como força de ligação e coesão do revestimento ficará comprometida.

**Partículas sólidas ou não fundidas:** dependendo da temperatura das partículas, as gotículas que irão de encontro ao substrato/revestimento podem se encontrar desde o estado fundido até o estado sólido. As partículas no estado líquido escoam facilmente e fecham a maior parte dos vazios. Por outro lado, as partículas sólidas

irão aderir superficialmente na rugosidade do depósito dificultando o contato entre as partículas posteriores, gerando vazios/porosidades no revestimento.

Existem casos em que a porosidade é desejável, por exemplo em revestimentos usados como barreira térmica, onde a porosidade aumenta ainda mais a sua capacidade isolante. A porosidade também aumenta a resistência a choques térmicos e ciclos de temperatura, além de ser muito útil em próteses de implantes médicos, onde 4% de poros são incluídos com o objetivo de permitir que a matéria do osso cresça entre o revestimento e com isso o processo de cicatrização seja acelerado (MENEZES, 2007).

#### **2.1.6.4 Dureza**

A dureza nos revestimentos obtidos por aspersão térmica, é basicamente dividida em macro dureza aparente e micro dureza das partículas. A macro dureza é uma medida da resistência do depósito quanto à penetração, sendo mais indicado para sua verificação o teste de dureza Rockwell. Nas medições de macrodureza, a maior representatividade dos resultados está relacionada com a utilização de cargas mais leves e distribuídas sobre a maior área possível. Além disso, considerações a respeito da espessura do revestimento devem ser feitas, pois a utilização de elevadas cargas em revestimentos finos induz a medição de dureza do substrato (AWS, 1985) (DAVIS, 2004). As medições de macrodureza são realizadas utilizando cargas variadas em função da espessura do revestimento. Normalmente se utiliza a dureza Rockwell e adotando procedimentos da norma ASTM E-18.

A microdureza Vickers é normalmente utilizada para avaliação da dureza de todos os tipos de revestimentos. Devido às características anisotrópicas dos revestimentos, os valores de microdureza variam consideravelmente em um mesmo revestimento, portanto alguns cuidados devem ser tomados para que o valor encontrado seja representativo do revestimento como um todo, e não de uma lamela ou de uma única partícula. Os ensaios de microdureza são efetuados com procedimentos adotados pela norma ASTM E-384 (DAVIS, 2004) (LIMA e TREVISAN, 2001).

A dureza de um revestimento tem muitas vezes grande importância prática, pois pode ser correlacionada com a resistência ao desgaste e fadiga. Além disso, a dureza pode servir como parâmetro indireto para fixação de variáveis do processo de aspersão (AWS, 1985).

#### **2.1.6.5 Microestrutura**

O estudo da microestrutura envolve necessariamente a compreensão da solidificação das lamelas individuais. Através desse estudo é possível compreender a influência dos vários parâmetros de aspersão no desempenho do revestimento (MARANHO, 2006).

A solidificação de cada lamela resulta das condições que a partícula líquida encontra a superfície contra a qual foi projetada. As condições para que a velocidade de solidificação seja extremamente alta está no contato térmico ideal entre a lamela e o substrato. Além disso, pelo fato de haver achatamento das partículas quando do choque, ocorre um aumento considerável da taxa de extração de calor devido ao aumento da área de transferência térmica, sendo obtidas taxas de resfriamento entre  $10^6$  a  $10^7^{\circ}\text{C/s}$  (DAVIS, 2004) (VARDELLE et al., 1994). Essa solidificação extremamente rápida tem como consequência a formação de lamelas com estrutura de grãos muito finos. Em geral, altas taxas de resfriamento geram altas taxas de nucleação, e as lamelas são policristalinas com grãos muito menores do que os obtidos por processos convencionais de solidificação (DAVIS, 2004) (VARDELLE et al., 1994).

A morfologia apresentada ao final do processo de aspersão é dependente, entre outros fatores, da temperatura em que o substrato se encontra, ou a partícula anteriormente depositada, que se reflete na temperatura interpasso. Maiores temperaturas favorecem a formação de lamelas, ou panquecas no caso de apenas uma partícula deformada, mais contínua e homogêneas (LIMA e TREVISAN, 2001) (VARDELLE et al., 1994).

A formação da microestrutura está relacionada, além da velocidade de solidificação, com a natureza das interfaces, que pode ser tanto com o substrato como com as lamelas previamente depositadas. Na aplicação da primeira camada, a

interface é entre o material que está sendo depositado e o substrato, com a aplicação de sucessivas camadas, a interface passar a ser entre o material sendo aspergido e as lamelas previamente depositadas. Esta nova interface possui propriedade diferentes em relação às inicialmente estabelecidas entre o material aplicado e o substrato. Essa variação no fluxo de calor, em função das sucessivas camadas sendo depositadas, interfere diretamente na solidificação do material aspergido, sendo a microestrutura diferente ao longo da seção transversal do revestimento (DAVIS, 2004) (SOBOLEV et al., 1999).

### 2.1.6.6 Aderência

A capacidade do revestimento de resistir ao arrancamento quando solicitado em tração é denominado de aderência, e compreende a adesão entre as partículas e o substrato e a coesão entre as partículas das várias camadas sobrepostas. Os valores obtidos de aderência são indicativos da otimização dos mecanismos que atuam entre as partículas e/ou substrato (MARANHO, 2006).

O mecanismo de ancoragem mecânica, ocorre devido à solidificação das partículas fundidas ao redor das asperezas da superfície do substrato. Ao serem projetadas as partículas se alojam ao redor das asperezas e ao se solidificarem se contraem, fornecendo a força necessária para a ancoragem mecânica (KNOTEK, 2001). Os mecanismos físicos ocorrem pela interação dos átomos das lamelas com os átomos do substrato resultando em forças de Van der Waals. Para que esse fenômeno ocorra é necessária que a aproximação entre os átomos seja menor que as distâncias atômicas, que é de aproximadamente de 0,5nm (MARANHO, 2006).

Para a melhoria da aderência, por meio da ancoragem mecânica, é essencial de um nível de rugosidade adequado. Por sua vez, a aderência metalúrgica é bastante dependente tanto do processo de aspersão, que determina a temperatura, energia cinética e grau de oxidação das partículas, como da natureza do material aspergido, se metálico ou cerâmico. Em alguns materiais, em especial naqueles denominados autoligantes (Mo, Nb, Ta, ligas de Ni-Al) é forte a aderência metalúrgica, tanto é que os mesmos são empregados como camada intermediária

(camada de ligação) para aumentar a aderência global do revestimento (DAVIS, 2004) (LIMA e TREVISAN, 2001) (AWS, 1985).

Materiais de revestimento formam adesões metalúrgicas com o substrato e as forças de ligações entre o revestimento e o substrato são afetadas por: tensões residuais no revestimento, fusão e superfície de contato entre as partículas e entre o substrato e as partículas adjacentes, difusão do revestimento na região aspergida, forças de atração atômica (Van der Waals) e interação mecânica (DAVIS, 2004).

A aderência é requisito essencial para o bom desempenho do revestimento, pois de nada adianta ter uma camada com uma espessura ideal e livre de poros se a mesma não tem aderência suficiente. Ela é medida, em geral, como a força necessária para separar o revestimento do substrato, sendo o preparo adequado da superfície do substrato o fator determinante para a obtenção de bons resultados (PAREDES, 1998).

## **2.2 Processos de aspersão térmica**

A aplicação correta do método de aspersão térmica é determinada por meio das seguintes características: material de revestimento requerido, desempenho desejado para o revestimento, tamanho da superfície a ser revestida e economia (ALENCAR, 2009).

Os processos de aspersão térmica podem ser classificado de acordo com os métodos de aquecimento e a natureza do material a ser aspergido, como é mostrado no esquema da Fig. 2. As propriedades e características dos referidos processos estão reunidas na Tab. 1 (PAWLOWSKI, 2008).

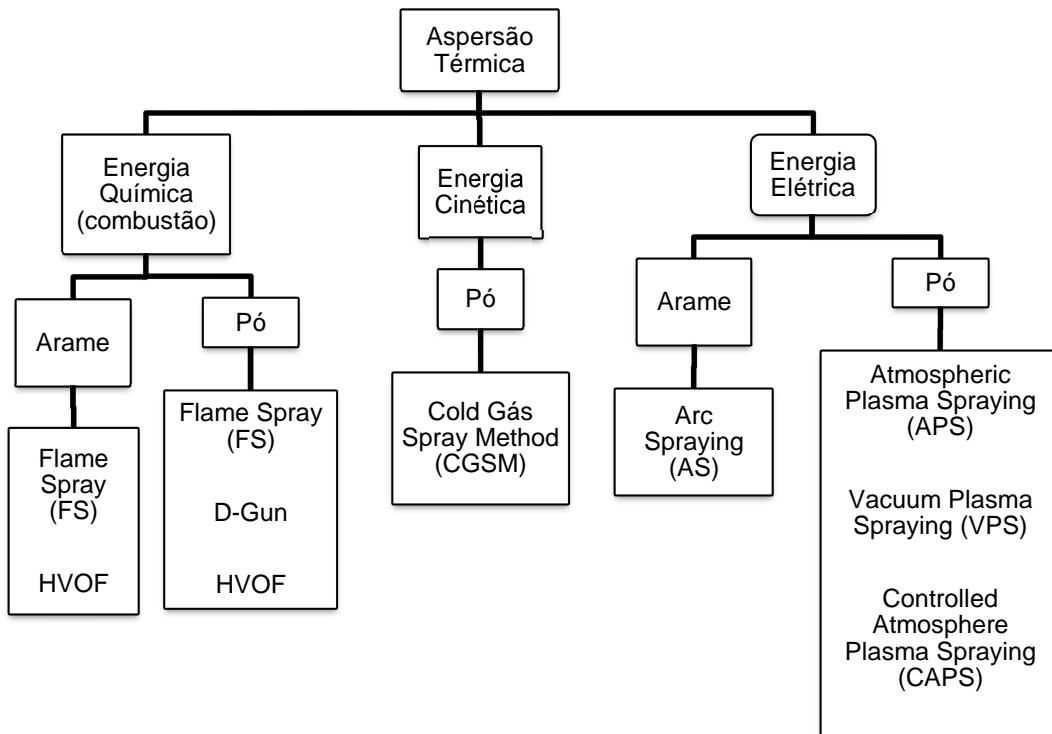


Figura 2 – Classificação da aspersão térmica segundo PAWLOWSKI (2008).

Tabela 1 – Características e propriedades dos processos de aspersão térmica.

Propriedades	Processos					
	FS(pó)	HVOF(pó)	D-Gun(pó)	AS(arame)	APS	CGSM(pó)
Temperatura da chama [°C]	2200-3200	2700-3100	3900	4000-6000	16000	-
Velocidade das partículas [m/s]	30-150	400-1200 até 5000	910	100-250	300-500	1000
Aderência [MPa]	4-20	>40	>40	10-36	10-36	30-40
Porosidade [%]	5-15	<3	<3	3-15	1-7	0,7
Óxidos [%]	0,4-10	1-5	0,1	2,5-15	2-3	-

Fonte: Adaptação MARANHO (2006).

### 2.3 Aspersão térmica a chama de alta velocidade (HVOF)

Este processo é conhecido popularmente HVOF, (High Velocity Oxi-Fuel). Seu princípio de funcionamento consiste na utilização de um combustível gasoso ou líquido, podendo ser propileno, hidrogênio, propano ou querosene, no qual é misturado com oxigênio, e é a razão de vazão de oxigênio/gás combustível que determina a temperatura que a chama atingirá. A combustão ocorre à alta pressão em uma câmara, gerando um jato de exaustão de alta velocidade, e após este fenômeno, gases são liberados e se expandem através do bocal para fora da pistola a velocidades supersônicas (PAREDES, 2009).

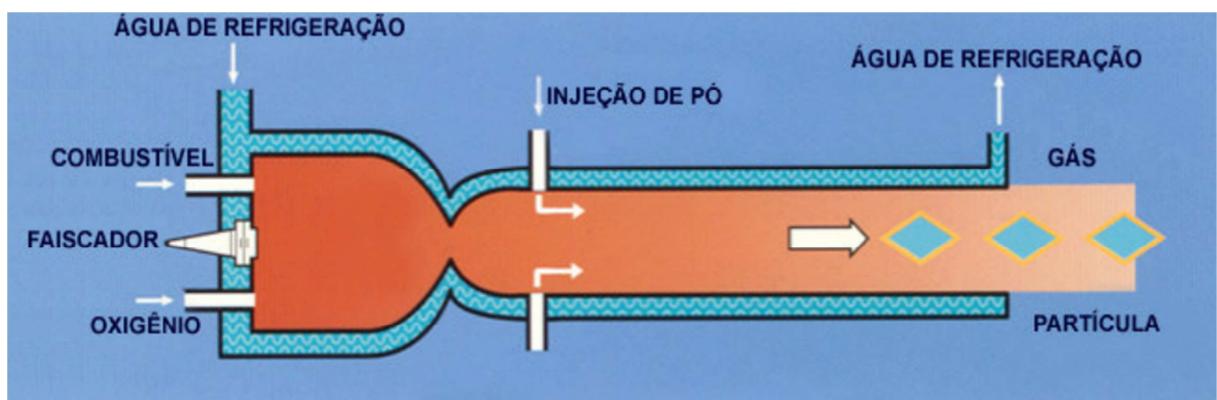


Figura 3 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica a chama de alta velocidade HVOF (cedido por Praxair Surfaces Technologies).

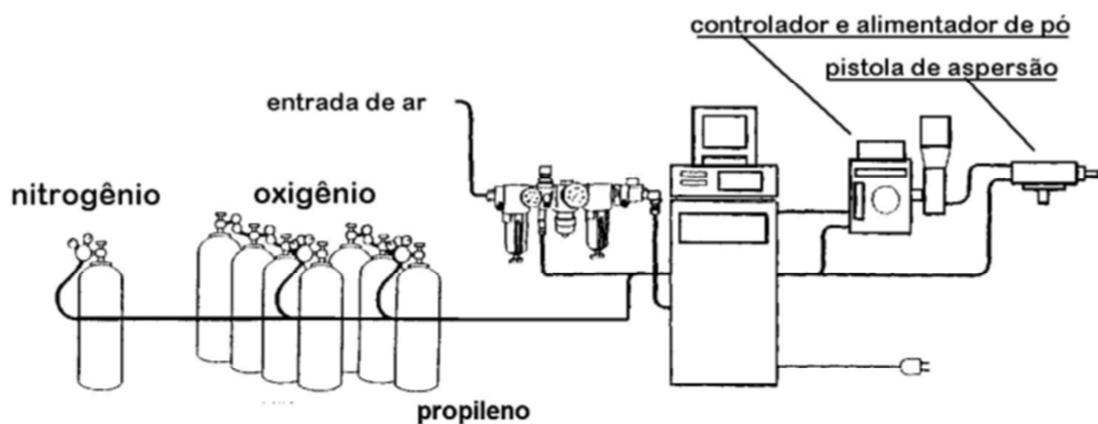


Figura 4 – Equipamentos utilizados no processo de aspersão térmica HVOF (HOWARD, 1997).

Este tipo de processo é particularmente adequado pra aplicação de revestimentos de carbonetos devido à sua baixa temperatura de chama e baixo tempo de permanência do material na chama, em comparação com processos a arco elétrico e a plasma (WANG et al., 1994). Os revestimentos apresentam maiores durezas, adesão e baixas quantidade de poros e óxidos, combinadas com baixas tensões residuais nos revestimentos e excelente resistência ao desgaste (PARKER et al., 1991) (LIAO et al., 2000).

### **2.3.1 Principais características do processo e de seus revestimentos**

Segundo Pawlowski (2008) e Lima, Trevisan (2002) o processo HVOF tem como principais características:

- Distância de aplicação entre 150 a 300 mm.
- Tamanho das partículas na faixa de 5 a 45  $\mu\text{m}$ .
- Alimentação de pó em torno de 20 a 120 g/min.
- Os alimentadores do pó normalmente são do tipo placa rotativa.
- As taxas do fluxo de gás combustível estão entre 40 e 60 L/min.
- O fluxo de oxigênio pode ser de até 430 L/min.
- O nível de ruído deste processo excede a 140 decibéis.
- Velocidade das partículas entre 2000 e 2200 m/s.

As principais propriedades dos revestimentos depositados por HVOF são a aderência da camada superior a 90 MPa, porosidade inferior a 1% e a espessura do material depositado na faixa de 100 a 300  $\mu\text{m}$ .

A pistola JP5000, utilizada neste tipo de aspersão, usa a injeção radial de pó no canhão e segundo Paredes (2009) este sistema traz os seguintes benefícios:

- Menor pressão de injeção do pó é necessária, uma vez que o pó é injetado em uma área de baixa pressão criada pelo sistema convergente/divergente da saída da câmara de combustão.
- A velocidade e a temperatura do pó estão melhores distribuídas através do spray.

Uma vez injetado, o pó se mistura com o gás e é acelerado até próximo da máxima velocidade, no ponto em que deixa o canhão, se desloca com velocidade constante até seu impacto com o substrato. A saída convergente/divergente no interior da câmara de combustão é projetada para conduzir uma configuração de fluxo que auxilia na distribuição do pó e produz um perfil quase único de velocidade de partícula quando de sua saída do canhão. Isso resulta em um revestimento mais consistente.

Um depósito consistente de revestimento significa que menos pó será necessário para se alcançar a espessura desejada, e menos trabalho de usinagem será requerido para se obter o acabamento necessário (PAREDES, 2009).



Figura 5 – Pistola modelo JP5000 TAFA utilizada no processo de aspersão térmica HVOF (PAWLOWSKI, 2008).

## 2.4 Revestimentos de WC-Co

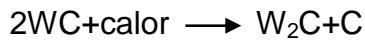
A utilização dos carbetos nos mais diversos campos da engenharia ocorre, principalmente, devido à sua excelente resistência ao desgaste. Esta propriedade provém da combinação de uma matriz metálica tenaz com partículas duras de carbetos (HUMAN e EXNER, 1996). Revestimentos de carbeto de tungstênio são um dos materiais mais utilizados para proteção ao desgaste em indústria,

principalmente, em sistemas aeroespaciais, automotivos, de transporte e de degradação de energia (KARIMI et al., 1993).

Os revestimentos de carbeto estão sendo considerados como viáveis substitutos para o cromo duro quando se deseja proteção à erosão e abrasão, tornando-os muito interessante no cenário atual, onde as regulamentações ambientais estão cada vez mais restritivas ao uso de revestimento a base de cromo (MURTHY et al., 2001).

Durante o processo de aspersão térmica pode ocorrer um fenômeno conhecido como a descarburização das partículas de carbeto de tungstênio. A elevada taxa de perda de carbono acontece quando os grãos do pó atravessam a chama, provocando a decomposição do monocarboneto de tungstênio (WC) a carbeto de di-tungstênio ( $W_2C$ ) (MURTHY et al., 2001).

De acordo com Wolke et al. (1992) a perda de carbono ocorre pelo seguinte processo.



O carbono liberado nesta reação pode ser inteiramente eliminado através de reações de oxidação progressivas, então:



Este processo de oxidação está relacionado à temperatura da chama e ao tempo de permanência das partículas na chama. Algumas modificações podem ocorrer neste processo como consequência de variação de oxigênio da chama (LIAO et al., 2000).

## 2.5 Desgaste erosivo

O desgaste erosivo é produzido pelo impacto de partículas duras sobre uma superfície, caracterizando a perda de material em função da interação mecânica de uma superfície e um fluido. O transporte das partículas pode ser feito em fluxo de

gás ou de líquido (DALLAIRE, 2000). Segundo a norma ASTM G 40-92, erosão é a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluído, ou um fluído multicomponente ou partículas líquidas ou sólidas impactantes. O fluido pode conter sólidos, ou de origem externa, ou originados pela perda de material da própria superfície.

Diversas forças de diferentes origens podem agir em uma partícula em contato com uma superfície sólida, conforme na Fig. 6. Partículas vizinhas podem exercer forças de contato, assim como um fluido em fluxo, se presente, pode causar força de arraste. A força gravitacional também pode ser importante, porém a força dominante sobre uma partícula erosiva, é a força de contato exercida pela superfície atingida, força essa responsável pela desaceleração da partícula de sua velocidade inicial de impacto (HUTCHINGS, 1992).

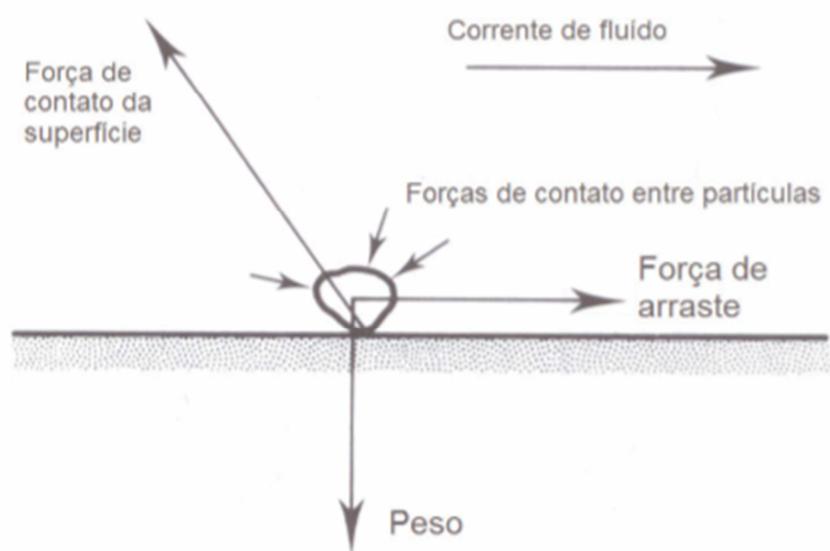


Figura 6 – Conjunto de forças atuantes sobre uma partícula de erodente (HUTCHINGS, 1992).

No desgaste erosivo, a extensão do desgaste depende da massa e do número de partículas individuais atingindo a superfície, e de sua velocidade de impacto (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Hutchings (1992), os mecanismos de erosão devem envolver tanto deformação plástica como fratura frágil. No desgaste erosivo de uma superfície

dúctil, pode ocorrer uma deformação elástica recuperável, ou uma deformação plástica, permanente. O tipo de deformação irá depender se o limite de escoamento do material é excedido em qualquer ponto durante o impacto. Já nos materiais frágeis, diferentes modos de criação de trincas contribuem para a perda de material pela erosão (TAKIMI, 2003).

O ângulo de incidência da partícula erosiva sobre a superfície atingida influencia diretamente no tipo de mecanismo de desgaste. Segundo Wheeler e Wood (2005), a erosão de um material depende do ângulo que cada partícula atinge a superfície alvo, e acrescenta que em materiais dúcteis, a taxa de erosão é maior em baixos ângulos de colisão, em contraste aos materiais frágeis, em que apresentam suas maiores taxas de desgaste erosivo em ângulos próximos a 90°.

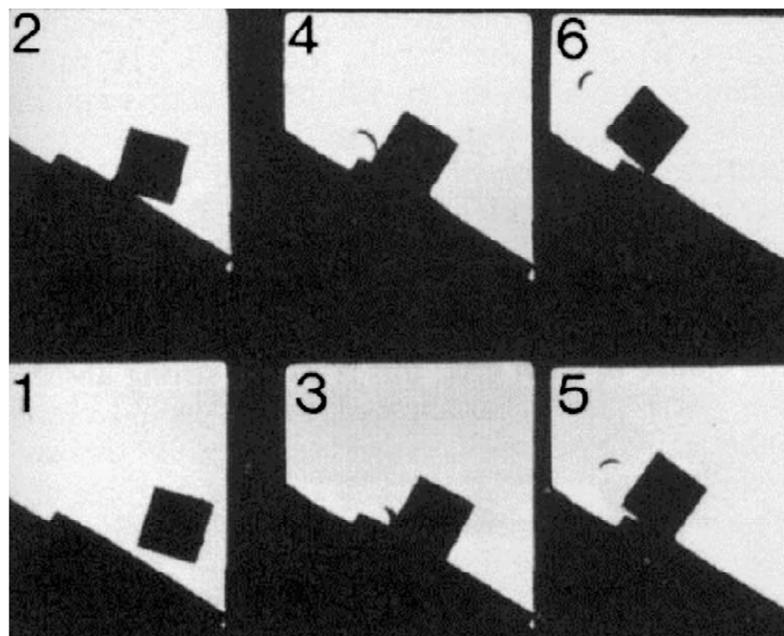


Figura 7 – Fotografia de alta velocidade do choque a 30º de um cubo de aço ferramenta sobre um aço de baixo teor de carbono (HUTCHINGS, 1977).

Partículas de qualquer forma ou dureza, sob ângulos normais de ataque, irão provocar fadiga superficial sobre o material atingido, causando perdas (LUDEMA, 1996). O início dessas perdas é atrasado, conforme o material começa a fadigar. Os materiais frágeis, como os cerâmicos, têm grande susceptibilidade a trincas e microfissuras, portanto, são removidos preferencialmente pela interligação de trincas que divergem do ponto de choque da partícula com a superfície (HOPPERT, 1990).

Para Ball (1986), as principais variáveis que afetam a severidade da erosão incluem tamanho, natureza, massa da partícula, tipo e velocidade do fluxo e ângulo de impacto. Hoppert (1989) salienta ainda que a resistência à erosão do material alvo depende também de sua estabilidade no meio, bem como de suas propriedades físicas e mecânicas.

Segundo Finnie (1995) os principais fatores responsáveis pelo processo de erosão podem ser assim distribuídos.

**Operacionais:** a velocidade e ângulo de impacto da partícula, o número de partículas por unidade de área e por unidade de tempo, e corrosividade do meio influenciam a taxa de desgaste de determinado material.

**Propriedades das partículas:** o tipo de material, o tamanho, a forma; a densidade e a dureza são as propriedades das partículas que influenciam no desgaste.

**Propriedades da superfície:** o tipo de material, a morfologia, o nível de tensões, a dureza, a rugosidade, o tamanho de grão e a porosidade influenciam diretamente no desgaste provocado.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Material do substrato

O material utilizado como substrato do revestimento obtido por aspersão térmica foi o aço carbono SAE 1020, numeração comercial 14 (1,9 mm de espessura). As peças aspergidas foram obtidas de uma mesma chapa comercial. Foram separados três corpos de prova quadrados medindo 200x200 mm cada uma.

O aço SAE 1020 é obtido pelo processo de laminação a quente, apresentando boa soldabilidade e forjabilidade, porém possui baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade. Diante de suas características, esse tipo de aço é muito utilizado na indústria agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, etc. A Tab. 2 especifica as principais propriedades mecânicas do aço carbono SAE 1020.

Tabela 2 – Principais propriedades mecânicas do aço carbono SAE 1020.

Especificação da chapa	Propriedades Mecânicas					
	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Impacto (J)
SAE 1020	450	330	36,0	59	143	87

Fonte: ASM, Metals Handbook, vol. 4, 1991.

#### 3.2 Material do revestimento

O material utilizado como revestimento foi a liga WC-10Co-4Cr. O carbeto de tungstênio atua como componente da fase dura, resistente ao desgaste. Por outro lado, a matriz de cobalto e cromo, melhora a resistência à corrosão e erosão em comparação à outras ligas compostas por somente a matriz de cobalto (KAEFER, 2004).

O pó utilizado foi fabricado pela Sulzer Metco (código do fornecedor: Woka 3653, lote 1714701) e apresenta as seguinte propriedades:

Tabela 3 - Composição química da liga WC-Co-Cr.

Composição química (peso%)				
W	Co	C	Cr	Fe
Equilíbrio	9 – 10,5	5,1 – 5,8	3,5 – 4,5	0,3 máx.

Fonte: Adaptadção de Sulzer Metco, 2006.

Tabela 4 - Características da liga WC-Co-Cr.

Características da liga WC-Co-Cr Woka 3653	
Distribuição química	86%WC-10%Co-4%Cr
Manufatura	Aglomerado, sinterizado ou esferoidal
Morfologia	Esferoidal
Densidade aparente	5 g/cm <sup>3</sup>
Distribuição do tamanho de partícula	-45 +11µm
Ponto de fusão	Aproximadamente 1480°C
Temperatura de serviço	Até 450°C

Fonte: Adapatação de Sulzer Metco, 2006.

## 4 Procedimento experimental

O procedimento experimental se baseou na aplicação do revestimento no material de substrato, para posterior obtenção de desgaste erosivo por meio de aplicação industrial e jateamento abrasivo agressivo.

### 4.1 Aspersão térmica HVOF

A aplicação do revestimento nos corpos de prova ocorreu apenas em uma das metades dos mesmos, deixando a outra metade em aço carbono original para fins comparativos. A espessura da camada revestida obtida foi de 0,143 mm.

#### 4.1.1 Preparação do substrato

A limpeza do substrato e obtenção do grau de rugosidade necessário para a aspersão, foi realizada através de jateamento abrasivo.

O jateamento foi feito com óxido de alumínio fundido marrom da marca Elfusa (grão 24). A Tab .5 apresenta as características do material.

Tabela 5 – Características gerais do óxido de alumínio fundido marrom.

Características Gerais			
Densidade específica real	Dureza (Knoop-100)	Tenacidade (ANSI-B74.8R2007)	
3,96 g/cm <sup>3</sup>	1.850 kgf/cm <sup>2</sup>	48%	

Fonte: Elfusa, 2011.

O grau de limpeza Sa obtido de acordo com a norma ISO 8501-1 foi o grau 3, onde as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho foram totalmente removidos. A rugosidade final dos corpos de prova foram de 3,520 µmRa.

#### 4.1.2 Parâmetros do processo

A Tab. 6 apresenta os parâmetros utilizados no processo de aspersão a chama de alto velocidade (HVOF).

Tabela 6 – Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica HVOF.

Parâmetro	Valor
Pressão oxigênio	0,965 Mpa
Fluxo oxigênio	58,19 Nm <sup>3</sup> /h
Pressão querosene	0,917 MPa
Fluxo querosene	0,199 m <sup>3</sup> /h
Pressão nitrogênio	0,344 Mpa
Fluxo nitrogênio	0,2832 Nm3/h
Pressão ar comprimido	0,399 Mpa
Taxa de alimentação	76 g/min
Distância da pistola	300 mm
Canhão	152,4 mm
Distância entre passes	5 mm
Temperatura inicial das peças	17°C
Temperatura final das peças	180°C
Quantidade de passes	3

A deposição do revestimento obtido pela técnica HVOF foi realizado em um equipamento TAFA JP5000. A Fig. 8 mostra os equipamentos utilizados.



Figura 8 – Equipamentos utilizados para aspersão térmica HVOF: (1) console e alimentador do pó Tafa/Praxair; (2) pistola HVOF Tafa/Praxair.

#### 4.2 Teste de desgaste erosivo através da aplicação industrial

Após a aplicação do revestimento nos corpos de prova, dois deles foram instalados na cabeça de um elevador de caçambas com fluxo de 120 toneladas/hora de arroz com casca em uma grande indústria de beneficiamento de arroz, localizada no município de Pelotas (RS). Os corpos de prova permaneceram em operação constante pelo período de vinte dias, sob temperatura ambiente. A imagem ilustra como é composto um elevador de caçambas e como foi realizada a instalação das chapas.

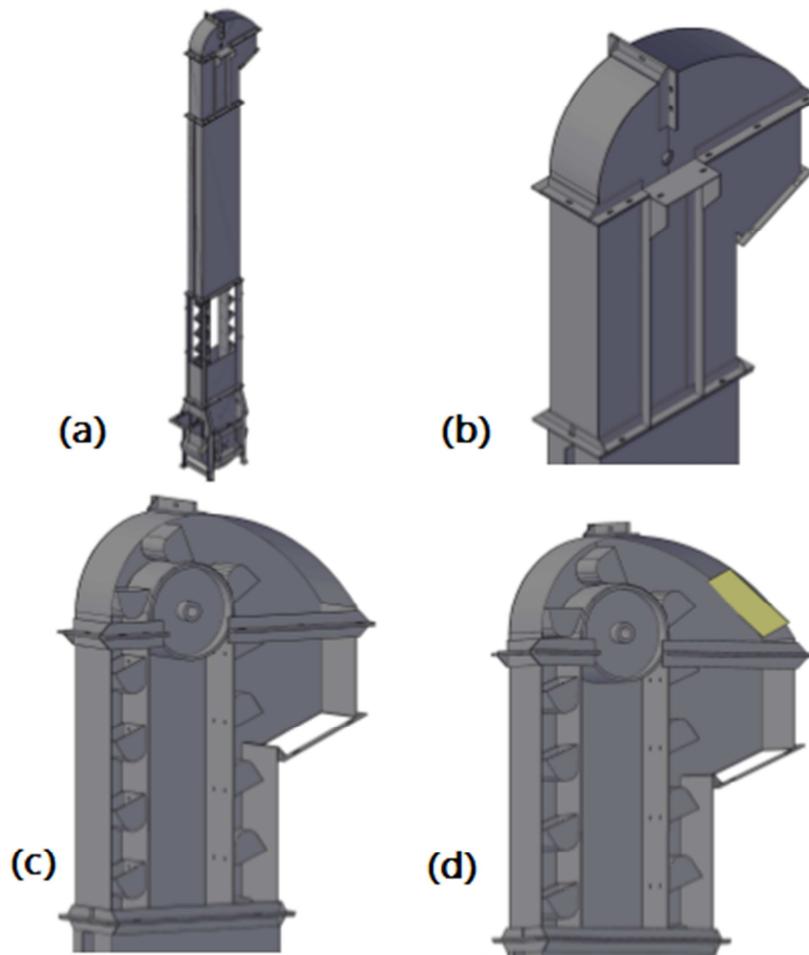


Figura 9 – Imagem ilustrativa do elevador de caçambas de arroz com casca (a) vista inteira do elevador; (b) vista da cabeça do elevador; (c) vista do interior da cabeça do elevador; (d) vista ilustrativa da posição de instalação do corpo de prova na cabeça do elevador.

Ao término dos vinte dias de teste, os corpos de prova foram retirados para a análise dos resultados.

#### 4.3 Teste de desgaste erosivo através de jateamento abrasivo agressivo

A fim de se obter um desgaste erosivo mais agressivo, foi realizado uma simulação. O teste consistiu na aplicação de um jato abrasivo no corpo de prova, produzindo um severo desgaste erosivo no mesmo.

O material abrasivo foi a granalha de aço tipo SAE G-40. Os parâmetros do procedimento são apresentados na Tab. 7.

Tabela 7 - Parâmetros do processo de jateamento.

Parâmetros	Valor
Pressão de jateamento	1,2 MPa
Compressor de ar	1699 L/min – 425 litros de reservatório
Diâmetro da mangueira	19,05 mm
Duração do jateamento	3 min
Distância do jateamento	300 mm
Morfologia do grão abrasivo	Angular
Granulometria	0,84 – 0,42 mm
Grau Sa de limpeza	3

## 5 Caracterização dos revestimentos

### 5.1 Caracterização morfológica da superfície

A análise de micrografias e morfologias das amostras foram realizadas em um microscópio Shimadzu modelo SSX-550, com corrente de feixe de 1pA e potência de feixe de 15kV. O respectivo aparelho é mostrado na Fig. 10.



Figura 10 – Imagem do microscópio eletrônico de varredura Shimadzu modelo SSX-550.

### 5.2 Análise cristalográfica

A análise das fases cristalinas das amostras foi realizada através do difratômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação de Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406\text{\AA}$ ) a 40 kV e 40mA, em um intervalo de ângulo de 5-80° (2 $\theta$ ).



Figura 11 – Imagem ilustrativa do difratômetro Shimadzu XRD-6000 (ANT TEKNIK, 2012).

## 6 Resultados e Discussões

### 6.1 Morfologia da superfície desgastada

Na análise das amostras testadas na indústria de beneficiamento de arroz, nota-se que em função do pouco tempo em operação, os corpos de prova não obtiveram um grande desgaste erosivo, porém ainda assim percebe-se que a metade aspergida manteve-se muito mais protegida dos efeitos provocados pelo desgaste que a metade sem revestimento. A Fig. 12(b) evidencia muito bem os desgastes provocados na parte do corpo de prova no qual não havia revestimento, desgastes esses que estão circulados e são característicos do arrancamento de material devido à abrasividade do fluxo de arroz com casca. Na Fig. 12(c) observa-se a superfície do revestimento praticamente preservada. Já na Fig. 12(d) consegue-se notar a existência de porosidade no revestimento, alguns poros evidenciados por setas.

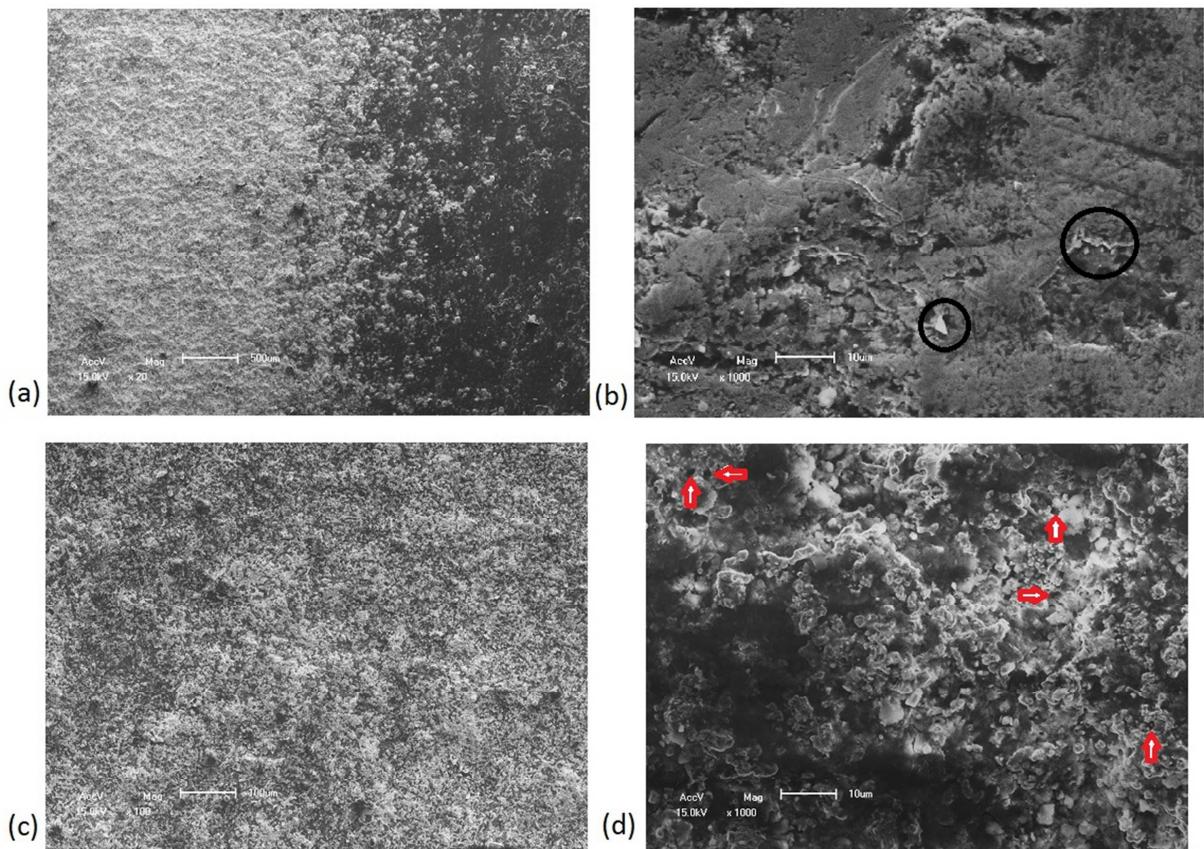


Figura 12 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras testadas na indústria de beneficiamento de arroz: (a) interface da amostra com revestimento e sem revestimento ampliada em 20x; (b) região da amostra sem revestimento ampliada 1000x; (c) superfície da região aspergida ampliada 100x; (d) região do revestimento ampliada 1000x.

Nas amostras testadas com jateamento, percebe-se um grande efeito do desgaste erosivo. A Fig. 13(a) mostra a interface da amostra com revestimento e sem revestimento, onde já se nota que na região sem revestimento alguns pontos circulados com características de perda de material. A Fig. 13(b) evidencia muito bem a região da amostra sem revestimento com considerável perda de material provocado pelo fluxo de granulha de aço. A Fig. 13(c) apresenta a superfície do revestimento com pequenas irregularidades e elevações devido ao forte desgaste obtido pelo jateamento. Já na Fig. 13(d) percebe-se a presença de algumas partículas, entretanto que até o presente momento não foram analisadas quimicamente.

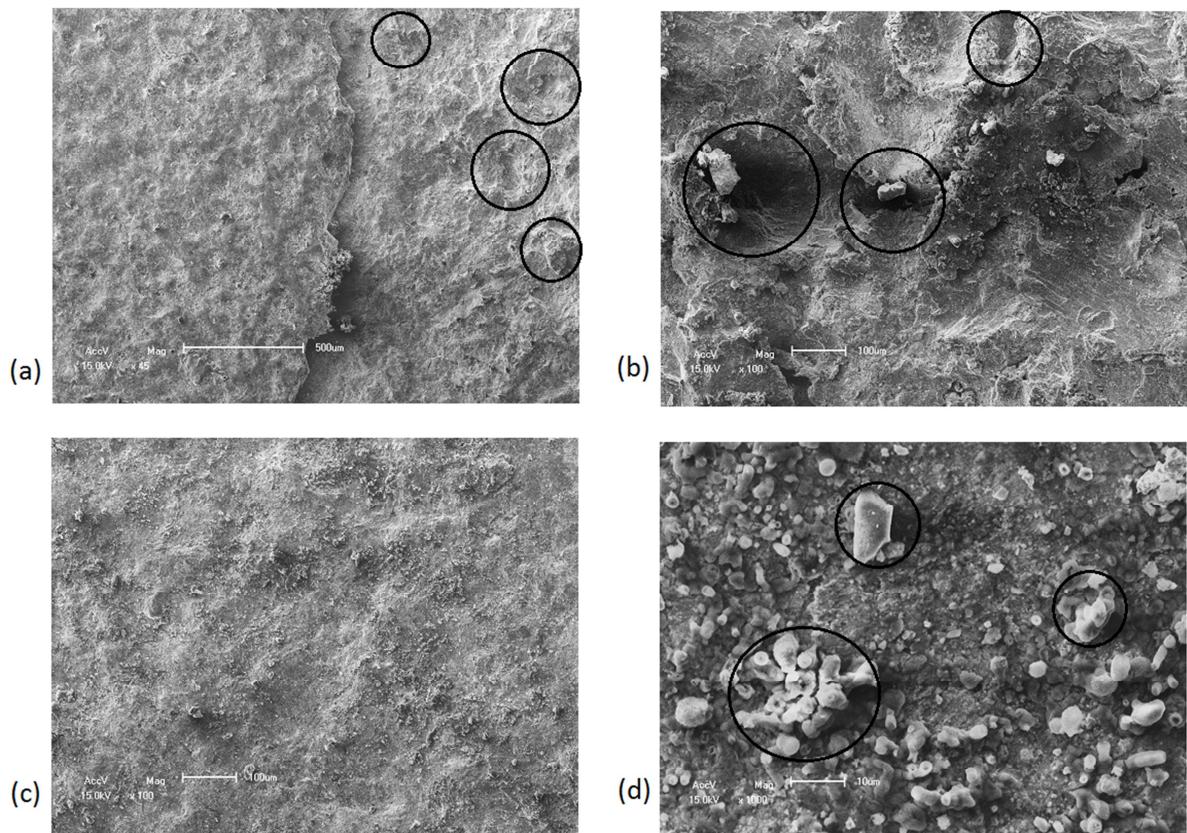


Figura 13 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das amostras testadas por jateamento abrasivo agressivo: (a) interface da amostra com revestimento e sem revestimento ampliada 45x; (b) região sem revestimento ampliada 100x; (c) superfície da região aspergida ampliada 100x; (d) região aspergida ampliada 1000x.

## 6.2 Caracterização das fases cristalinas

Os resultados da difração de raios-x comprovaram o fenômeno de descarburização que ocorre com carbeto de tungstênio durante o processo de aspersão térmica.

Segundo Verdon et al. (1998) a descarburização afeta diretamente a estrutura dos revestimentos, com uma concomitante diminuição da dureza e da resistência ao desgaste. Este fenômeno depende das condições de aspersão, as quais são caracterizadas pela alta temperatura, pela atmosfera oxidante e pelas altas taxas de resfriamento. Para evitar este fenômeno, deve-se controlar o potencial

de carbono da atmosfera de sinterização e o conteúdo de oxigénio no pó (ASM, 1992).

Por este motivos novos processos estão sendo desenvolvidos, como o HVOF, a fim de minimizar a decomposição da fase carbeto. Isto se dá em função da menor temperatura e menos tempo de contato entre o pó e a chama. Além disso a alta velocidade das partículas provê várias vantagens, tais como baixa porosidade, maior força de ligação entre as partículas e maior dureza (VERDON et al., 1998).

As Fig. 14 e 15 mostram os picos de WC e comprovam a existência de  $W_2C$ . Na Fig. 15 da amostra jateada com revestimento, nota-se nos picos de WC e  $W_2C$  que há uma diminuição da intensidade em relação ao gráfico da Fig. 14. Além dessa diferença de intensidade também percebe-se no gráfico da Fig. 15 o surgimento de um pico de ferrita (Fea) com estrutura cristalina CCC (cúbica de corpo centrado) referente ao substrato, devido ao fato da amostra testada por jateamento ter sofrido um maior desgaste, e consequentemente, diminuindo a seção transversão do revestimento expondo a superfície do aço carbono 1020.

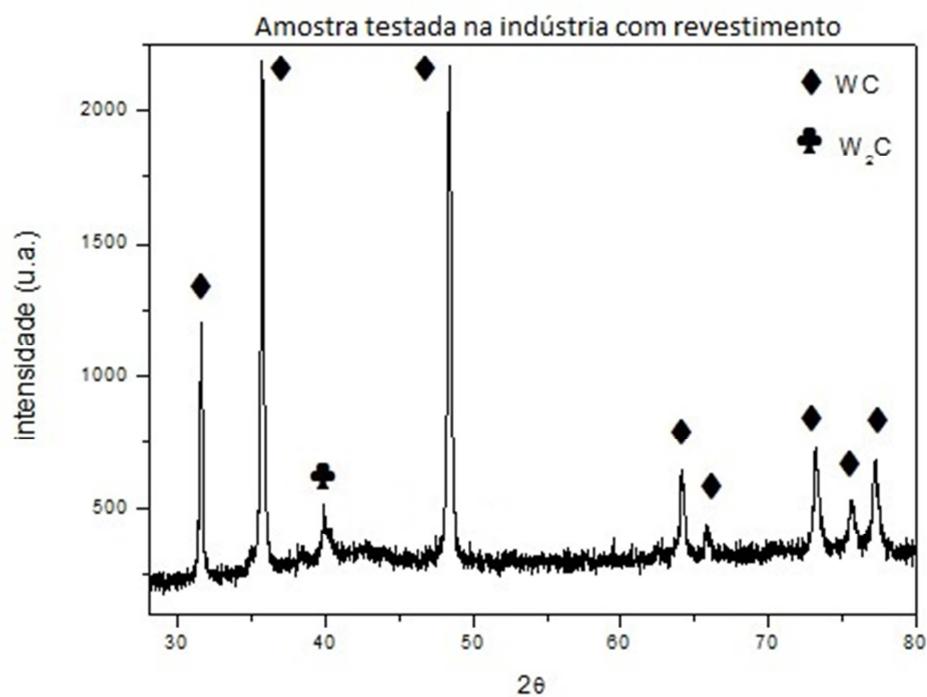


Figura 14 – Gráfico da difração de raios-x da amostra com revestimento testada na indústria de beneficiamento de arroz.

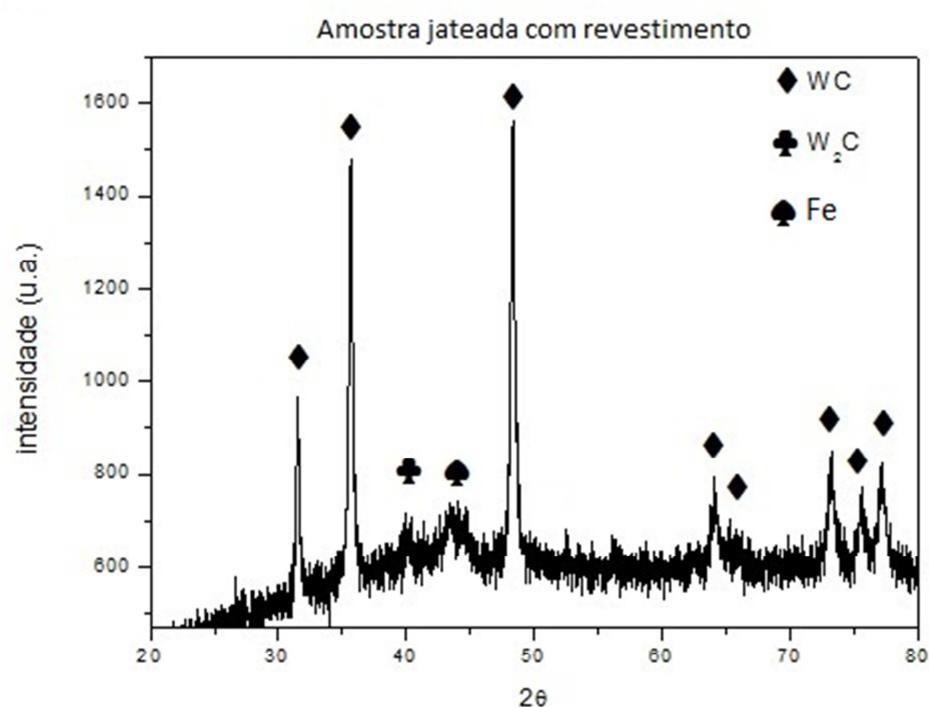


Figura 15 – Gráfico da difração de raios-x da amostra com revestimento testada por jateamento abrasivo.

## 7 Conclusões

Na análise morfológica da superfície desgastada, conclui-se que visualmente o revestimento desempenhou um papel protetor, principalmente em relação ao desgaste obtido por jateamento, o qual foi mais agressivo. Foi possível perceber que na região sem revestimento haviam irregularidades na superfície e pontos de arrancamento e perda de material muito mais presentes que na região em que havia o revestimento.

Através da análise das fases cristalinas, foi possível constatar a descarburização do carbeto de tungstênio ocorrido durante o processo de aspersão térmica, e ainda, perceber o surgimento da fase de ferrita na amostra jateada, devido ao forte desgaste sofrido pela mesma, que supostamente acarretou na exposição do material do substrato.

Conclui-se que os parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica são de suma importância para a otimização e obtenção de um revestimento com as propriedades esperadas.

Por fim, observa-se que o teste realizado por jateamento se mostrou mais conclusivo em relação ao teste realizado na indústria, no que se diz respeito à avaliação do desempenho do revestimento, devido ao pouco tempo de permanência dos corpos de prova em campo.

## 8 Referências

24º Abertura da Colheita do Arroz. Disponível em:

<<http://www.youtube.com/watch?v=trH74dYBI1Q#t=31>>. Acesso em: 10 de janeira de 2014.

AGUILA, J.V. Avaliação de revestimentos resistentes à corrosão e desgaste, aplicados por aspersão térmica ao arco: **Um estudo para proteção de ponteiras de “risers”**. 79f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

ALENCAR, G.T.M. **Efeitos da adição de carbonetos na resistência ao desgaste a à corrosão de uma liga auto-fluxante depositada por aspersão térmica.**

Dissertação de Mestrado. 101f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G-40: Standard terminology relating to wear and erosion. West Conshohocken, 2001.

AMERICAN SOCIETY AND TESTING MATERIALS. ASTM E-18: Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. Philadelphia, 2001.

AMERICAN SOCIETY AND TESTING MATERIALS. ASTM E-384: Standard Test Method for Microhardness of Materials. Philadelphia, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Thermal spraying technology**. Miami, 1985, 184 p.

ANT TEKNIK. Lab XRD-6000: X-ray Diffractometer. Disponível em:

<<http://www.antteknik.com/en/representations/shimadzu/products/x-ray-systems/xrd-x-ray-diffractometers/lab-xrd-6000>>. Acesso em: 13 de janeiro de 2014.

APPS, R.L. **Grit blasting v. bond strength in metal spraying**. London: The Welding Institute, 1969. 95p.

ASM Handbook, Vol. 18. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**, Thermal Spray Coatings, p. 829-834. 1995.

ASM International Handbook. **Power Metallurgy – Sintering of Cemented Carbides**. p. 385- 389. 1992.

BALL, A. **The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials**. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. V. 86, n. 1, p. 1-1, Jan. 1986.

BATCHELOR, A.W. et al. **Materials Degradation and its Control by Surface Engineering**. 2ed. Londres: Imperial College Press, 2002. 1-3, 25-28 p.

BERARD, D., FAUCHAIS, P. **Influence of the torch-substrate relative movements and cooling of coating during spraying on the mechanical properties of TBCs**. In: National Thermal Conference, 3, 1990. Long Beach. Anais... Ohio: Thermal Spray Research na Applications, 1991, v.1, p, 551-560.

BERNDT, C. C., BERNECKI, T., et.al, **Handbook of Thermal SprayTechnology**, ASM International, 2004

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 5 ed. Rio de Janeiro – RJ: LTC. 2000. 817p.

CLARE, J.H., CRAWMER, D.E. **Thermal spray coatings**. In: Amercian Society for Metals. Surface cleaning, finishing, and coating. Ohio, 1982. V. 5, p. 361-374.

CLAUDIO Bragantini: Secagem, armazenamento e beneficiamento. Disponível em:<[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoTocantins/secagem\\_armazBeneficiamento.htm#beneficiamento](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoTocantins/secagem_armazBeneficiamento.htm#beneficiamento)> Acesso em: 10 de janeiro de 2014.

CLYNE, T.W., GILL, S.C., **Residual Stresses in thermal spray coatings and their effect on interfacial adhesion: a review of recent work**. *Journal of thermal spray technology*, v. 5(4), p. 401-418, 1996.

DAVIS, J.R. **Handbook of Thermal Spray Technology**, ASM International, 334p.2004.

Elfusa. **Ficha Técnica: Óxido de alumínio fundido marrom – BT**. 2011.

- FINNIE, I. **Erosion of surfaces by solid particles.** Wear 3, p. 87-103. 1960.
- FUKANUMA, H. **A porosity formation and flattening model of a impinging molten particle in thermal spray coating.** Journal of thermal spray technology. V. 3(1), p. 33-44, março/1994.
- FUKANUMA, H. **An analysis of the porosity producing mechanism,** IN: Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition. P. 767-772. Orlando 28/maio-5/junho/1992.
- FUKUMOTO, M. et al. – **Flattening mechanism in the thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface.** Journal of Thermal Spray Technology, September, 1999, v. 8(3), p. 177.
- GODOY, C., SOUZA, E.A., LIMA, M.M., BATISTA, J.C.A. **Correlation between stresses and adhesion of plasma sprayed coatings: effects of a post-annealing treatment.** Thin solids films. V. 420-421, p. 138-445. 2002.
- HOPPERT, S. **Alumina oxide ceramic for wear protection in mineral processing.** Siegburg, Alemanha. P. 3-10. 1990.
- HOWARD, L. **Modern welding technology.** Fourth edition. 1997.
- HUMAN, A.M., EXNER, H.E. **Electrochemical behaviour of tungsten-carbide hardmetals.** Materials Science & Engineering, v. A209, p. 180-191. 1996.
- HUTCHINGS, I.M. **Deformation of metal surfaces by the oblique impact of square plates.** Int. J. Mech. Sci. 19, p.45-52, 1977.
- HUTCHINGS, I.M. **Tribology. Friction and wear of engineering materials.** London: Edward Arnol, 1992. P; 273.
- IRVING, B., KINIGHT, B., SMITH, R.R. **The HVOF process – the hottest topic in the thermal spray industry.** Welding journal. V. 7, p. 25- 30. 1993.
- KAEFER, L.F. **Análise do comportamento eletroquímico de revestimentos de carbeto de tungstênio cimentados obtidos por aspersão térmica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 190p. 2004.

KARIMI, A., VERDON, C., BARBEZAT, G. **Microstructure and hydroabrasive wear behaviour of high velocity oxy-fuel sprayed WC-Co(Cr) coatings.** Surface and coatings technology. V.57, n.1, p.81-89. 1993.

KNOTEK, O. **Thermal Spraying and Detonation Gun Processes.** In: Handbook of hard coatings. RPOINTAN F. BUNSHAH, (Ed).. New York – USA, Ed. Noyes Publications, 2001, cap. 3, pag. 77-107.

LEE, C.H., MIN, K.O., **Effects of heat treatment on the microstructure and properties of HVOF – sprayed NiCrWMoB alloy coatings.** Surface and Coatings Technology. V. 132, p. 49-57. 2000.

LIAO, H. et al. – “**Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings**”, Surface and Coatings Technology, 2000, v. 124, p. 235.

LIMA, C.C., TREVISAN, R., **Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações**, Artliber Editora, São Paulo, Brasil, 2001. (148p.)

LIMA, CARLOS CAMELLO et al. **Aspersão térmica: Fundamentos e Aplicações** 148p. São Paulo. Artliber., 2001.

LIMA, R.S., KARTHIKEYAN, J., KAY, C.M., LINDEMANN, J., BERNDT, C.C., **Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured wc-co coatings.** Thin solids films. V.416. p. 129-135, Julho de 2002.

LUDEMA, K.C. Friction, Wear, Lubrification: **a Textbook in Tribology**. Florida: CRC Press. 1996.

MAGNANI, M. **Estudo da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos metálico-cerâmicos aplicados na liga AA7050 mediante aspersão térmica oxicombustível de alta velocidade (HVOF).** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 240p. 2008.

MARANHO, O. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente.** 188f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo. 2006.

MARANHO, O., **Influência da preparação da superfície na aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, Outubro de 1996, 126p.

MENEZES, D. D. **Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio Aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional, em meio Cloreto**. 168f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

MISRA, A., FINNIE, I. **A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester**, *Wear*, v.60, n1, p.111-121, 1980.

MURTHY, J.K.N, RAO, D.S., VENKATARAMAN, B. **Effect of grinding on the erosion behaviour of a WC-Co-Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes**. *Wear*, v. 249, p.592-600, 2001.

Norma ISO 8501-1:1988, Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products – Visual Assessment of Surface Clealiness.

Norma NACE No1 / SSPC-SP 5, White Metal Blast Cleaning.

Norma PETROBRAS N-2568, Revestimentos Anticorrosivos Aplicados por Aspersão Térmica, Janeiro 2004.

NUNES, R.M., et al. **Metals Handbook**. 10.ed. 4 vol. ASM Intenational, 1991.

PANOSIAN, Z., 2001, **Revestimentos Metálicos para Proteção contra Corrosão**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Florianópolis.

PAREDES, R.C. “**Aspersão Térmica**”, Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Materiais e Tratamento de Superfície, Universidade Federal de Paraná, Curitiba (2009).

PAREDES, R.C. 1998, **Estudos de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha**, tese de Dr. Eng°., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

PARKER, D.W. et al. – “**HVOF – SAPRAU TECHNOLOGY** – Poise for Growth”. Advanced Materials and Processes, 1991. V.4, p. 68.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2.ed. John Wiley & Sons Ltd. 2008. 626 p.

PINTAÚDE, G. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**. 200p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casa de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico, Brasil**. 2006. 345f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre.

PUKASIEWICZ, A G. M. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP**. 173p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

ROUND, M.J. **The training and certification of metal spraying protection inspectors**. Thermal Spraying, V. 6, p. 175-185, Jun1989.

SCHIEFLER, M.F. **Estudos microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

SEDLÁCEK, V. **Metalic surfaces, films, and coatings**. Elsevier Science Publishers. Amsterdã, 1992.

SHWETZKE, R., KREYE, H. **Microstructure and properties of tungstein carbide coating sprayed with various high velocity oxigen fuel spray systems**. Journal of thermal spray technology. V. 8(3), p. 433-439. Setembro/1999.

SILVA, P.F., **Introdução a corrosão e proteção das superfícies metálicas**. Belo Horizonte. Imprensa Universitária –UFMG, 1981.

SOBOLEV, V.V., GUILEMANY, J.M., CALERO, J.A. **Heat transfer during formation of an hvof sprayed wc-co coating on a copper substrate.** Journal of Materials Processing Technology. V. 96, p.1-8, setembro de 1999.

SOBOLEV, V.V. **The formation of coating shrinkage porosity in the process of thermal spraying.** Journal of materials processing technology. V. 58, p. 227-232. 1996.

SOBOLEV, V.V., GUILEMANY, J.M., **Investigation of coating porosity formation during high velocity oxi-fuel (hvof) spraying.** Materials letters, v. 18, p. 304-308, 1994.

STOKES, J., LOONEY, L., **Residual stress in hvof thermally sprayed thick deposits.** Surface and coatings technology. V. 177-178, p. 18-23, 2004.

Sulzer Metco. **Wc 10Co 4Cr Sintered and Crushed Powders.** 2012

SUNDARARAJAN, G., SEN, D., SIVAKUMAR, G. **The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coatings process parameters.** Wear. V.258, p.377-391. 2005.

TERRES, C.J.F. **Avaliação de revestimentos de aços inoxidáveis depositados por aspersão térmica.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 106p. 2006.

TAKIMI, A.S., VILLANOVA, D.L., VICENZI, J., LIMA, M.D., MARQUES, C.M., BERGMANN, C.P. **Revestimentos protetores aplicados por hvof: estudo comparativo da resistência à erosão a quente por cinzas de carvão mineral.** INFOMET, 01 nov. 2003.

VARDELLE, M., VARDELLE, A., LEGER, A.C., FAUCHAIS, P., GOBIN, D., **Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes.** Journal of thermal spray technology. V. 4(1), p. 50-58, Março de 1994.

VERDON, C., et al. **A study of high velocity oxi-fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings.** Part 1: Microstructure. Materials Science & Engineering. V.246, p. 11-24, 1998.

WANG, B-Q et al. – “**The erosion-oxidation behavior of HVOF Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr cermet coating**”, Wear, 1994, v.174, p.177.

WHEELERD.W., WOOD, R.J.K. **Elevated temperature erosion of several thermal-sprayed coating under the simulated erosion condition of in-bed tubes in a fluidized bed combustor**, Wear, p. 580-587, 1997.

WOLKE, J., et al. **Influence of different gases on the mechanical and physical properties on HVOF sprayed tungsten carbide cobalt**. Proceedings of the International Thermal Spray Conference and Exposition. Orlando, Florida, EUA. 1992.

ZUM GAHR, K-H. **Microstructure and wear of materials**. New York. Elsevier, 1987. V. 10. (tribology series).