



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM**

FRANCISCO BRENO DE HOLANDA

**RECUPERAÇÃO DIMENSIONAL EM CAMISA DE ASSENTAMENTO DE
OBTURADOR FH POR ASPERSÃO TÉRMICA, MÉTODO DE ARCO SPRAY, EM
CONJUNTO COM SOLDA**

**SALVADOR
2015**

FRANCISCO BRENO DE HOLANDA

**RECUPERAÇÃO DIMENSIONAL EM CAMISA DE ASSENTAMENTO DE
OBTURADOR FH POR ASPERSÃO TÉRMICA, MÉTODO DE ARCO SPRAY, EM
CONJUNTO COM SOLDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito final para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: D.Sc. Charles Chemale Yurgel – SENAI CIMATEC

**SALVADOR
2015**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

H722r Holanda, Francisco Breno de

Recuperação dimensional em camisa de assentamento de obturador fh por aspersão térmica, método de arco spray, em conjunto com solda / Francisco Breno de Holanda – Salvador, 2015.

49 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Charles Chemale Yurgel

Especialização (Especialização em Engenharia de Soldagem) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2015.

Inclui referências.

1. Soldagem. 2. Metalização Arc Spray. 3. Recuperação dimensional. 4. Revestimento duro com Inox 420. 5. Obturados packer FH. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Yurgel, Charles Chemale. III. Título.

CDD: 671.52

FRANCISCO BRENO DE HOLANDA

**RECUPERAÇÃO DIMENSIONAL EM CAMISA DE ASSENTAMENTO DE
OBTURADOR FH POR ASPERSÃO TÉRMICA, MÉTODO DE ARCO SPRAY, EM
CONJUNTO COM SOLDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Apovado em 24 de Março de 2015.

BANCA EXAMINADORA:

Charles Chemale Yurgel – Orientador _____
Doutor em 2014 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Manoel Carreira Neto – Banca _____
Doutor em 2001 pela Universidade de São Paulo.

Ivo Andrei Lima – Banca _____
Doutor em 2013 pelo Senai Cimatec.

Salvador, 24 de Março de 2015

A minha esposa Thaisa, aos meus filhos João, Pedro e Bruna.
Ao meu pai Engenheiro Dr. José Simplício, a minha mãe
Dalvinha, aos meus irmãos Alan Cauê, Enio e Daniele.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS que me fortalece todos os dias para trabalhar e tentar ser uma pessoa melhor. Aos meus Pais José Simplício e Dalva, pela educação e orientação. A minha esposa Thaisa e aos meus filhos João Felipe, Pedro e Bruna. Aos meus irmãos Alan Cauê, Danielle e Ênio Mizael.

Agradeço ao Senai Cimatec pela oferta do curso de Engenharia de Soldagem e por proporcionar-me o conhecimento nesta área, além da oportunidade de contato com excelentes profissionais, como o Professor Dr. Sergio Souto, da Universidade Federal Fluminense; a Professora coordenadora Msc. Adriana H. Vieira e a todo o corpo docente do curso.

Agradeço à Metalfort (coligada Elfe Óleo e Gás) pela oportunidade de trabalhar com diversas técnicas de soldagem (MIG/MAG, ER, TIG e AT), além de técnicas especiais de soldagem como metalização chama pó, Arc Spray e PTA; e ao Supervisor Jeilson R. do Nascimento, por sua boa vontade de repassar toda a sua experiência e conhecimento na área de metalização.

Que sempre nos lembremos da mensagem de Paulo, apóstolo, quando diz:

- “... Eviteis a convivência de todo irmão que leve vida ociosa...”;
- “... Não temos vivido entre vós desregradamente, nem temos comido de graça o pão de ninguém. Mas, com trabalho e fadiga, labutamos noite e dia, para não sermos pesados a nenhum de vós...”;
- “... Quem não quiser trabalhar, não tem o direito de comer...”.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para o serviço de recuperação dimensional e melhoramento de propriedades superficiais internas em camisa de assentamento, componente do obturador hidráulico *Packer* FH. Usualmente, a recuperação da camisa de assentamento era executada com metalização *arc spray* em quase 100% da totalidade de sua área interna, com exceção da região que serve para proteger as bordas da metalização, chamada ombreira. Apresenta também a solução para a falha de vedação, que resulta na passagem de fluidos do interior do poço para a câmara de assentamento do *Packer* FH, impedindo o seu funcionamento. Para sanar a falha de vedação, foram realizados testes na camisa de assentamento, baseados em sua recuperação dimensional interna e no aumento na extensão da ombreira. A ombreira, anteriormente, possuía extensão de 3mm a partir da fase externa do componente, em ambos os lados. A solução proposta foi aumentar a extensão dessa ombreira na região de interface de vedação, na camisa de assentamento e no anel selante com a aplicação de overlay. A ombreira recuperada com solda passou a ter uma extensão de 35mm de cada lado, a partir da face externa da camisa de assentamento, em ambos os lados, melhorando, assim, as características mecânicas na região dessa interface, por se tratar de ser um depósito com características de metal fundido, ao contrário dos depósitos aplicados por metalização, que são camadas de gotículas líquidas que se solidificam, resultando em uma macroestrutura lamelar com microporos, microcavidades, etc.

Palavras-chave: Aspersão Térmica; Recuperação dimensional; *Packer* FH; Revestimento duro Inox 420.

ABSTRACT

This paper presents a new methodology for the dimensional recovery service and improvement of internal surface properties in entry jacket, a component of the FH hydraulic Packer. Usually the recovery of the entry jacket was carried out with thermal spray electric arc in almost 100% of its entire internal area, with the exception of the region which serves to protect the edges of the metallization, called anchorage. It also presents a solution to the seal failure, which results in the passage of internal well fluids into the internal of the entry jacket of FH hydraulic Packer, preventing its operation. To remedy the seal failure, tests were performed in nesting shirt, based on its internal dimensional recovery and increasing the extent of the anchorage. The anchorage previously had a dimension of 3mm from the external phase of the component, on both sides. The proposed solution was to increase the extent of anchorage in the region of the seal's interface, the settlement shirt and sealing ring by applying overlay. The anchorage recovered with welding started having the length of 35mm each side from the outer face of the settlement shirt, on both sides, thus improving the mechanical characteristics in the region of this interface, as this is to be a deposit with molten metal characteristics, unlike the deposits applied by plating layers of which are liquid droplets which solidify, resulting in a laminated microporous macrostructure, micro cavities, etc.

Keywords: Thermal Spraying; Dimensional recovery; Packer FH; Stainless 420 hard coating.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 O processo de Aspersão Térmica	13
2.1.1 Vantagens	15
2.1.2 Desvantagens	16
2.2 Preparação da superfície	16
2.3 Técnicas de Aspersão Térmica	17
2.3.1 Chama Oxiacetilênica/Convencional (Flame Spray).....	17
2.3.2 Arames e Varetas	17
2.3.3 Aspersão por chama-pó	19
2.3.4 Aspersão por Arco Elétrico (Arc Spray)	21
2.3.5 Aspersão por chama de alta velocidade (HVOF)	25
2.3.6 Aspersão por plasma.....	26
2.3.6.1 Plasma de arco não transferido (APS)	26
2.3.6.2 Aspersão por plasma de arco transferido (PTA).....	27
2.3.7 Detonação (D-GUN).....	27
2.4 Materiais Aplicados por Aspersão Térmica	28
2.4.1 75B® BONDARC®	29
2.4.2 60T – ARAME 13% CROMO	32
2.5 Aplicação da aspersão térmica na manutenção de equipamentos da industria.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 O componente “Obturador/Packer”	36
3.2 Materiais e metodologia da recuperação dimensional interna em camisa de assentamento por metalização em conjunto com processo de soldagem	37
3.2.1 Recuperação dimensional da camisa de assentamento	39
3.2.2 Recuperação dimensional da ombreira	41
3.2.3 Teste de estanqueidade	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5. CONCLUSÕES.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de deposição por aspersão térmica.	14
Figura 2: Fluxograma das principais técnicas de aspersão térmica a partir de suas fontes de geração de energia.	14
Figura 3: Característica de formação de revestimento termicamente aspergido.	15
Figura 4: Equipamento típico para aspersão térmica por combustão (esquemático).	18
Figura 5: Seção transversal de uma tocha para aspersão por chama (esquemática).....	18
Figura 6: Corte transversal de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama (esquemático).....	20
Figura 7: Esquema de parte do dispositivo de aspersão a arco elétrico (esquemático).....	22
Figura 8: Equipamento para aspersão térmica à chama de alta velocidade (esquemático)..	25
Figura 9: Sistema para aspersão térmica a plasma (esquemático).....	27
Figura 10 – Tipos de revestimentos aplicados por aspersão térmica.....	29
Figura 11: Esfera de válvulas, gavetas e sedes de válvulas, assentos, etc.....	35
Figura 12: Eixos de bombas.	35
Figura 13: Obturadores, componentes de Packer e mandril.....	35
Figura 14: Haste de cilindro hidráulico.	36
Figura 15: Obturador ou <i>Packer</i> FH.....	37
Figura 16: Área da interface de vedação, camisa de assentamento com o anel selante.	37
Figura 17: Corte real do contato de vedação entre a camisa vs. anel selante (região de recuperação da ombreira).	39
Figura 18: Torno mecânico executando preparação interna de superfície em camisa de assentamento.....	39
Figura 19: Máquina de metalização “Arc Spray” e pistola com extensão para aplicações internas.....	40
Figura 20: Retífica para serviços internos em camisas (Mello, UNS-2).	41
Figura 21: Camisas de assentamento recuperadas, overlay e metalização; ombreira com 35mm.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de características de processos de aspersão térmica.(*)	28
Tabela 2: Aplicação de revestimento para diversas funções na indústria.	34

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de engenharia de superfícies, tem ganhado espaço na área de melhoramento de propriedades mecânicas, de recuperação dimensional de superfícies e de proteção anti-corrosiva. A técnica de aspersão térmica ou metalização, “Arc Spray”, possibilita a aplicação nos mais diversos tipos de revestimentos metálicos e cerâmicos, como o alumínio, o metal patente, o aço carbono, o aço inox, o carbeto de tungstênio, o zinco e o bronze, e nos mais diversos tipos de equipamentos do segmento industrial. Dentre os processos de metalização, o “Arc Spray” é a técnica que possui a menor relação custo-benefício dentre os processos.

As necessidades tecnológicas e econômicas atuais têm contribuído para que a aspersão térmica se apresente numa fase de desenvolvimento acelerado em diversos países. Se no início a aspersão térmica era utilizada unicamente para a proteção contra a corrosão, usando, na maioria dos casos, o zinco como material aspergido, a evolução das técnicas de aplicação fez com que o seu uso fosse difundido para outros campos de aplicação. Atualmente, devido à grande variedade de materiais de deposição, existe também uma ampla diversidade de aplicações, como, por exemplo, o revestimento para resistência ao desgaste (abrasão, cavitação, erosão, escoriação, etc.) e restauração dimensional.

Para a restauração dimensional da camisa de assentamento, foram aplicados revestimentos de inox 420 em conjunto com a soldagem (*weld overlay*). Esse revestimento aspergido também é muito utilizado para a recuperação de eixos – top-drive, virabrequim, conversor de torque e etc. –, cilindros, tampas de motores elétricos, haste, êmbolo, camisa de bomba de lama, componentes de obturadores (paker), camisas de power swivel, pistas – rolamentos, gaxetas, etc. – e equipamentos industriais em geral.

- Isolamento térmico:

Os revestimentos usados como barreiras térmicas são, em geral, feitas de zircônio e/ou óxidos de alumínio de baixa condutividade térmica, os quais são depositados para reduzir a condução de calor no metal de base.

- Resistência à corrosão:

Os materiais comumente utilizados no controle da corrosão incluem: zinco, alumínio, ligas de níquel e níquel-cobalto.

- Isolamento elétrico:

Os materiais mais usados para desempenhar este tipo de função são: alumina pura, alumina-titânio e silicato de alumínio. Estes revestimentos podem ser encontrados em dispositivos de comunicação e instrumentos cirúrgicos.

- Condutores elétricos:

A aspersão térmica é usada com frequência para criar condutores para contatos, conexões elétricas, resistência de aquecimento, e outros. Entre os materiais utilizados estão a prata, o cobre, o alumínio e as ligas de estanho e de bronze.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de aspersão térmica

A aspersão térmica é uma tecnologia que abrange um grupo de processos utilizados na aplicação de revestimento metálico ou não-metálico. As variações básicas dos processos de aspersão térmica ocorrem nos materiais de aspersão utilizados no tipo de energia usada para aquecer ou fundir estes materiais e no método de carregamento das partículas aspergidas para o substrato. Em geral, materiais apropriados para o uso na aspersão térmica são estáveis em temperaturas elevadas (materiais que se dissociam ou se decompõem são inadequados). Assim, a grande maioria dos metais, intermetálicos, ligas, todas as formas de materiais cerâmicos, metal cerâmico e alguns polímeros podem ser utilizados como matéria-prima em pelo menos um dos processos de aspersão térmica segundo Lima & Trevisan (2001).

Os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos no bico de uma pistola através da combustão de gases, arco elétrico ou plasma. Logo após a fusão ou aquecimento, o material finamente atomizado é acelerado por gases sob pressão contra a superfície a ser revestida (substrato), atingindo-a no estado fundido ou semifundido. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem-se ao material base ou sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica lamelar. Estas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura lamelar, contendo inclusões de óxidos, vazios, porosidade e contaminações do meio segundo Lima & Trevisan (2001). A figura 1 mostra, de forma simplificada, a formação de um revestimento depositado por um processo de aspersão térmica.

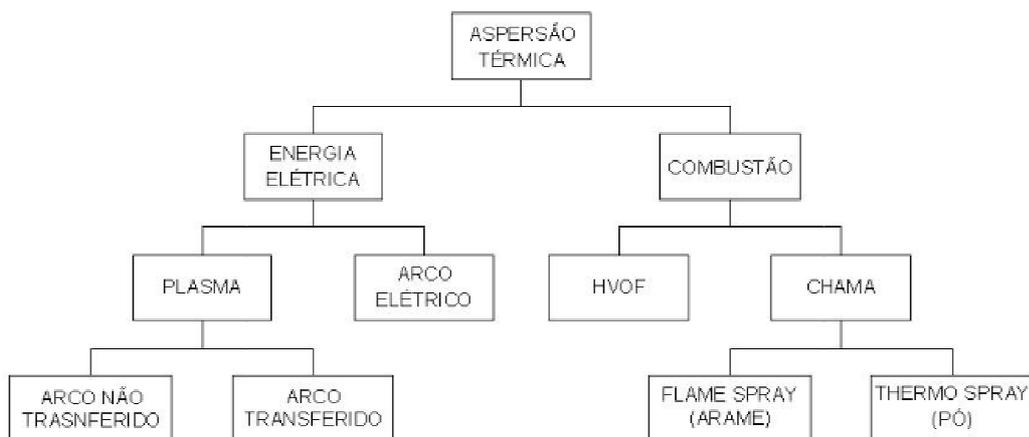
Figura 1: Esquema de deposição por aspersão térmica.



Metais aspergidos termicamente são, em geral, mais duros que os metais que os originam, devido principalmente a inclusões de óxidos formados durante o processo de aspersão. Eles também são menos dúcteis por causa da porosidade, da contaminação e da dureza associada ao processo segundo Lima & Trevisan (2001).

De acordo com os métodos de geração de energia, principalmente a combustão à gás e a energia elétrica, é possível classificar a aspersão térmica nos seguintes processos relacionados abaixo (figura 2):

Figura 2: Fluxograma das principais técnicas de aspersão térmica a partir de suas fontes de geração de energia.

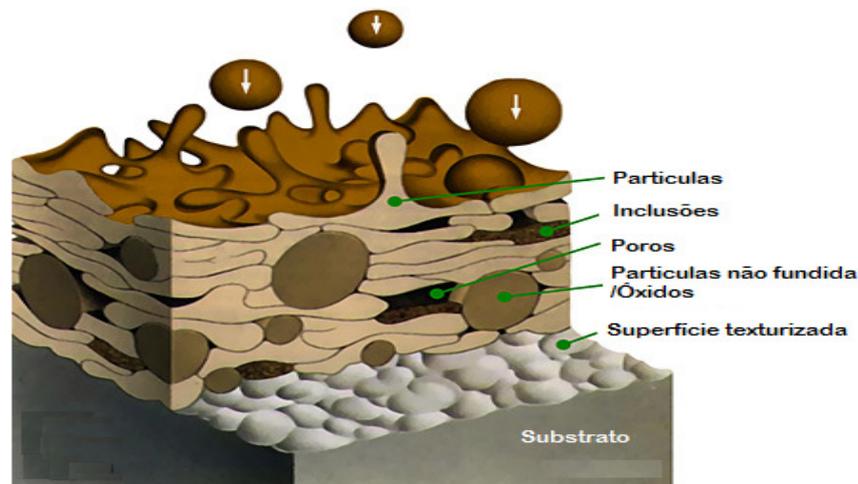


HVOF – High Velocity Oxy-Fuel (Aspersão por chama de alta velocidade).

Fonte: PAREDES, 2009.

Os revestimentos produzidos por aspersão térmica possuem uma microestrutura única, pois são formados por partículas fundidas ou semifundidas de diferentes tamanhos, que são aceleradas para um substrato com elevada velocidade. A posterior sobreposição destas partículas resulta no revestimento final. Assim, esta morfologia diferente (lamelar) confere a elas várias vantagens e desvantagens, citadas a seguir.

Figura 3: Característica de formação de revestimento termicamente aspergido.



2.1.1 Vantagens da aspersão térmica

As vantagens da aspersão térmica são:

- Não é necessário qualquer tempo de cura do revestimento, podendo o mesmo conferir proteção anticorrosiva imediata;
- Possui alta adesão para aplicação de selantes ou sistemas de pinturas subsequentes, constituindo um processo de fácil e rápida manutenção;
- Possui teor zero de compostos orgânicos voláteis emitidos para a atmosfera;
- Tem maior facilidade no controle da matéria-prima quando comparado às tintas;
- Possibilita sua aplicação mesmo em temperaturas próximas de 0°C;
- Tem resistência bastante elevada em trabalhos com soldagem próximos a áreas já metalizadas;
- Não apresenta degradação pela ação de radiação ultravioleta;
- Os equipamentos para processos de combustão de baixa velocidade ou arco elétrico são pequenos, portáteis e permitem sua utilização fora da fábrica;

- Com o controle adequado, o risco de degradação do substrato durante a aspersão é pequeno.

2.1.2 Desvantagens da aspersão térmica

- Necessita de mão de obra qualificada e de um preparo de superfície de melhor qualidade do que os sistemas de pintura (maior perfil de ancoragem), o que resulta em um custo de aplicação inicial mais alto;
- A aplicação manual deste tipo de revestimento por longos períodos é relativamente cansativa quando comparado aos sistemas convencionais de pintura, o que também aumenta o custo inicial;
- O alumínio aplicado por arco elétrico gera uma quantidade razoável de alumínio e óxidos de alumínio na atmosfera. Estes resíduos podem se tornar explosivos caso não sejam tomadas as devidas precauções;
- O zinco aplicado por arco elétrico emite gases tóxicos podendo causar ao operador a chamada “febre de zinco”, caso ele não esteja devidamente protegido.

2.2 Preparação de superfícies cilíndricas

Componentes mecânicos de máquinas e equipamentos que receberão algum revestimento por aspersão térmica, tanto para melhoria de suas propriedades superficiais quanto para restauração dimensional, devem passar por um trabalho de preparação superficial prévia para antes de receberem esse revestimento. Um dos processos de preparação superficial para o recebimento da metalização é a usinagem na superfície cilíndrica. Esta usinagem se destina ou a um rebaixamento da área a ser revestida para deixar o espaço necessário para a espessura de camada especificada que será depositada, ou a uma uniformização da área que apresenta desgastes irregulares, provocados pelo uso da peça (abrasão, desgaste, etc.) ou ainda para remover contaminações químicas, oxidações e revestimentos antecessores danificados.

Para aplicações de revestimentos em superfícies cilíndricas, costuma-se preparar a superfície, usinando-se uma rosca de passo com 32 fios por polegada no comprimento total da área onde será aplicada a metalização, e profundidade do filete com 0,13 à 0,15 mm no raio e no ângulo de rosca de 45° à 55° , aproximadamente. Esta rosca tem a finalidade de aumentar a superfície de contato entre camada e substrato, criando um efeito de ancoragem

mecânica que auxilia a aderência da camada. A ferramenta para abrir a rosca deve ser afiada de maneira a cortar o material sem deixar canto vivo no fundo do filete; desta forma, evita-se o entalhe, que poderia causar fissura com possível nucleação de trincas e dano ao material de base.

Em metalização externa e interna, é importante evitar metalizar até as extremidades. Costuma-se sempre deixar junto a elas uma pequena faixa sem rebaixar do metal de base (ombreira), formando assim uma câmara onde o revestimento fica protegido de eventuais choques mecânicos. Um eixo ou camisa revestidos por metalização até as suas extremidades poderão ter a camada lascada facilmente a qualquer batida no topo.

O próximo passo é eliminar toda e qualquer contaminação de óleos, graxas e eventuais gorduras deixadas na peça após o trabalho de usinagem.

2.3 Técnicas de Aspersão Térmica

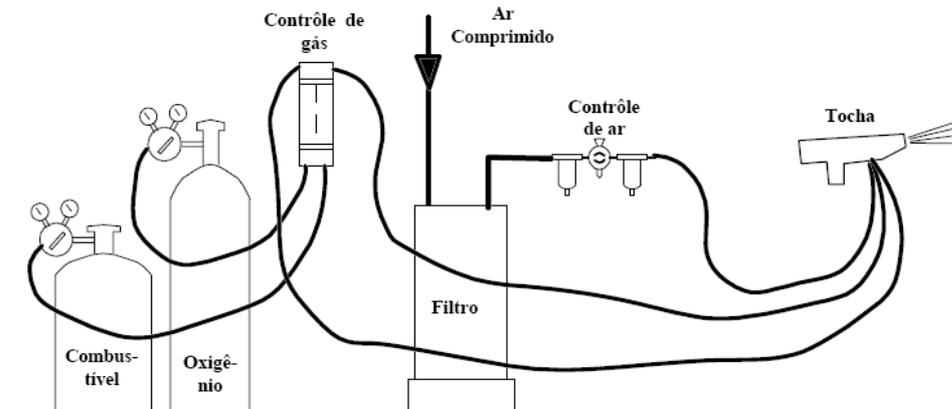
2.3.1 Chama Oxiacetilênica/Convencional (Flame Spray)

Este grupo de processos utiliza o calor gerado pela queima de gás combustível. Qualquer substância possível de ser fundida e que não sublima a temperaturas inferiores a cerca de 2760°C pode ser aspergida por estes processos. Os materiais aplicados podem ser os metais e suas ligas na forma de arame, cordão ou pó e os materiais cerâmicos, na forma de varetas, cordão ou pó.

2.3.2 Arames e Varetas

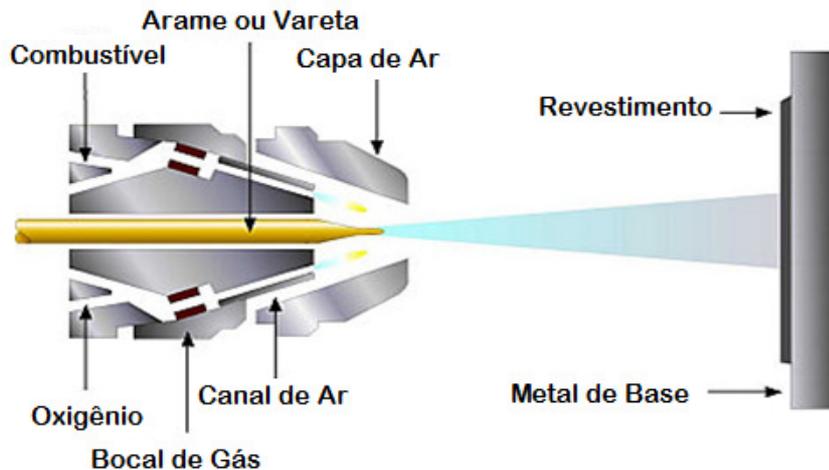
O equipamento usado para a aplicação de arames e varetas está apresentado na figura 4. A seção transversal típica de uma tocha utilizada para aspersão com estes processos é mostrada na figura 5.

Figura 4: Equipamento típico para aspersão térmica por combustão (esquemático).



Fonte: MARQUES, 2009.

Figura 5: Seção transversal de uma tocha para aspersão por chama (esquemática).



Fonte: DORFMAN, 2002.

O material a ser aspergido é inserido por roletas alimentadores na parte posterior da tocha. Estes podem ser tracionados por um motor elétrico ou pneumático, ou também por turbina a ar. O material é alimentado através de um bocal, onde é fundido por uma chama de gás combustível. Os gases combustíveis são usados juntamente com o oxigênio. O acetileno é o mais largamente usado por sua maior temperatura de chama (3.100°C). Entretanto, em certos casos, temperaturas mais baixas são usadas com vantagens econômicas (Propano – 2.640°C). A chama é usada apenas para fundir o material. Para se obter aspersão, um jato de gás, em geral ar comprimido, é usado para pulverizar o material

e acelerar as partículas em direção ao substrato. Em aplicações especiais, um gás inerte pode ser usado.

Os roletes de alimentação devem ser escolhidos de acordo com a forma de material a ser alimentado, isto é, arame ou vareta.

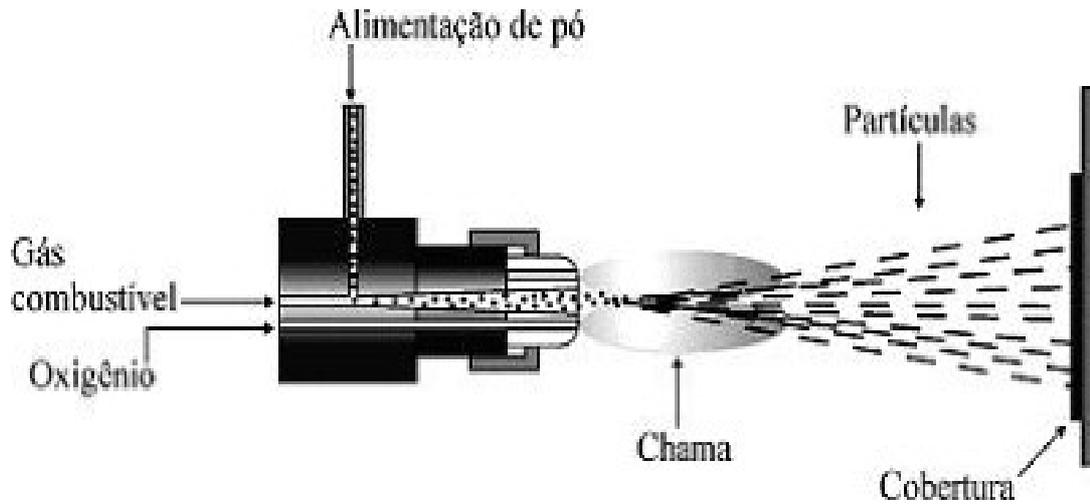
2.3.3 Aspersão por chama-pó

Tochas para aspersão a chama com pó são mais leves e mais compactas que tochas para outros processos. Devido às menores temperaturas e velocidades alcançadas pelas partículas, os revestimentos obtidos têm, em geral, menor resistência adesiva ao substrato, menor resistência coesiva entre as lamelas e maior porosidade, quando comparados com os depositados por outros processos de aspersão térmica.

O material a ser aspergido pode ser um metal puro, uma liga metálica, um composto, um carboneto, um cerâmico, um "cermet" (metal duro com partículas duras à base de titânio) ou combinações destes. O processo é geralmente usado para aplicação de ligas metálicas autofluxadas, que devem ser fundidas após a aspersão. Estes materiais contêm boro e silício que servem como agentes fluxantes e minimizam a oxidação. Sua fusão e/ou ligação metalúrgica a um substrato metálico é obtida aquecendo-se o revestimento até sua temperatura de fusão, que em geral, é inferior a 1040°C e pode ser feita com o uso de qualquer fonte de calor, como uma chama, uma bobina de indução ou um forno. Um arco elétrico também pode ser usado, mas com certo cuidado, para evitar ou minimizar a fusão do substrato.

O pó para aspersão é armazenado num recipiente que pode ser parte integrante da tocha ou ser acoplado a ela. Uma pequena quantidade de gás é desviada para arrastar o pó até o jato da mistura oxigênio/combustível em chama, quando ele é fundido e acelerado em direção ao substrato. Um corte transversal de uma tocha típica para aspersão de pó por chama é mostrado na figura 6.

Figura 6: Corte transversal de uma tocha para aspersão térmica de pó a chama (esquemático).



Fonte: DORFMAN, 2002.

Variações do processo de aspersão térmica de pó a chama incluem: gás comprimido para alimentação do pó na chama, jatos adicionais de ar comprimido para acelerar as partículas fundidas, alimentador de pó remoto com arraste do pó para a tocha por um tubo pressurizado com gás inerte e dispositivo para aceleração a alta velocidade à pressão atmosférica. Esses refinamentos tendem a aumentar a taxa de alimentação de pó e, às vezes, a velocidade das partículas fundidas que aumentam a resistência adesiva e a densidade do revestimento aspergido.

Revestimentos fundidos por aspersão são densos e relativamente isentos de porosidade. A composição da liga pode levar o revestimento a ter níveis de dureza Rockwell C superiores a 50. A espessura destes revestimentos é limitada àquelas faixas que podem ser aquecidas até a temperatura de fusão sem descamação. O uso de ligas autofluxantes é limitado a aplicações em que os efeitos da fusão e de distorção podem ser tolerados. Revestimentos mais espessos de metais dissimilares podem ser aplicados em passes múltiplos. A superfície que vai receber o segundo revestimento deve ser limpa de todos os resíduos de óxido após cada etapa de fusão.

Em todos os processos de aspersão térmica, a taxa de alimentação de pó afeta a estrutura e a eficiência de deposição do revestimento. Se o material não é aquecido adequadamente, a eficiência de deposição cai rapidamente e o revestimento conterà partículas não fundidas retidas. Se a taxa de alimentação de pó for muito baixa, certa quantidade de pó pode se volatilizar, resultando em deterioração do revestimento e elevação de custos. Os alimentadores de pó são compostos por um recipiente e um sistema

de medição que regula a taxa de alimentação de material no dispositivo transportador por gás.

2.3.4 Aspersão por Arco Elétrico (Arc Spray)

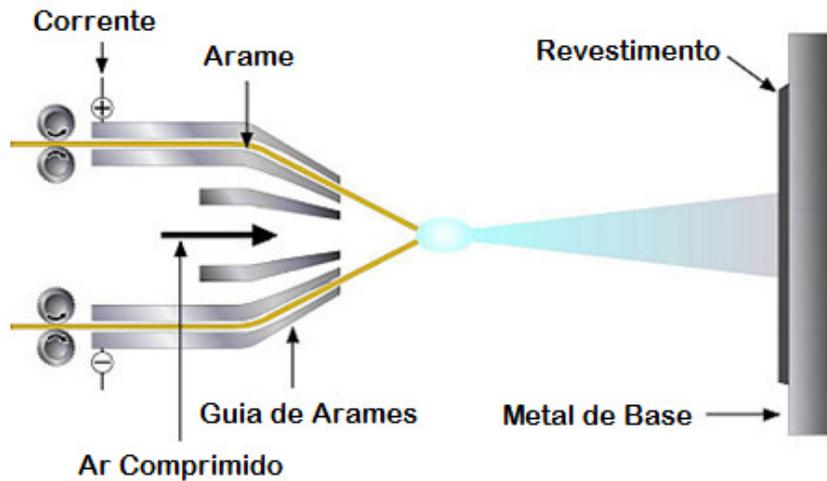
No processo de aspersão térmica a arco elétrico, também conhecido como processo Arco Arame, os dois eletrodos consumíveis de arame que se encontram inicialmente isolados um do outro, avançam automaticamente para se encontrar num ponto em uma névoa de gás atomizante. Uma diferença de potencial entre 18 e 40 Volts é aplicada através dos arames, iniciando um arco elétrico que funde as pontas dos arames eletrodos. Um gás, usualmente ar comprimido, é dirigido através da zona de arco, atomizando o metal fundido e projetando as partículas sobre um substrato preparado. Irregularidades na atomização dependem da uniformidade de alimentação do arame, da voltagem do arco e estabilidade da corrente, das variações na abertura do arco, entre outras coisas. Para aplicações especiais, gases inertes como argônio e hélio podem ser usados no lugar do ar comprimido, com a finalidade de reduzir a oxidação dos revestimentos.

O sistema de aspersão a arco elétrico consiste em:

- Fonte de voltagem constante, retificador de corrente CC / suprimento de energia;
- Suprimento de ar comprimido;
- Alimentador de arame que consiste de motor elétrico ou acionado a ar, roda motriz e dispositivo tensionado da roda motriz;
- Pistola de arco elétrico que consiste de corpo da pistola, bocal de ar e capa de ar;
- Mangueiras e cabos.

A figura 7 apresenta um esquema simplificado da técnica a arco elétrico (Arc Spray).

Figura 7: Esquema de parte do dispositivo de aspersão a arco elétrico (esquemático).



Esta técnica difere de outras técnicas de aspersão térmica nas quais não há fonte externa de calor, tais como: chama de gás ou plasma induzido eletricamente. Aquecimento e fusão ocorrem quando os arames, material a ser aspergido, carregados eletricamente com cargas opostas (um arame é positivo - ânodo, o outro negativo - cátodo) são alimentados conjuntamente e um arco controlado é gerado quando ocorre sua interseção. O fator limitante para esta técnica é que os materiais aplicados devem ser eletricamente condutores.

As temperaturas do arco excedem consideravelmente os pontos de fusão dos materiais aspergidos. Durante o ciclo de fusão, o metal aspergido é superaquecido até um ponto onde pode ocorrer alguma volatilização, especialmente com alumínio e zinco. As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, “interações metalúrgicas”, zonas de difusão ou ambos. Estas reações localizadas formam pequenas zonas "soldadas", levando a um revestimento com boa resistência adesiva e coesiva. Um efeito negativo do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência a mudar a composição das ligas aplicadas devido à oxidação seletiva ou vaporização, ou mesmo à ocorrência simultânea destes dois fenômenos. A natureza destes efeitos é bastante complexa, mas pode ser minimizada pela criteriosa seleção da composição do arame.

Os aspectos atraentes na técnica a arco elétrico são basicamente as altas eficiências e as taxas de deposição, pois, neste caso, são utilizados dois arames, enquanto a técnica de chama convencional utiliza somente um, o que a torna bastante econômica em relação à aplicação de revestimento em grandes superfícies. Valores de taxa de deposição da ordem de 13,5 kg/h para o processo de arco elétrico podem ser comparados com 1,89 kg/h para a

combustão com pó e 5,4 kg/h para a combustão com arame. Os únicos fatores que controlam a taxa de deposição são a corrente elétrica e a taxa de alimentação do arame necessária para esta corrente. A ausência de gases de combustão leva a uma redução do aquecimento do substrato, que é desejável para alguns componentes. A aspersão térmica a arco normalmente fornece maiores valores de aderência e coesão e menor porosidade em relação à técnica à chama com arame ou pó, por possuírem velocidades de partículas mais altas (100-330m/s). Desenvolvimentos recentes utilizam atmosfera inerte (argônio ou nitrogênio) para a aplicação de metais extremamente reativos, como o zircônio e o titânio para a proteção contra a corrosão na indústria química. São listadas outras características abaixo:

- Potência elétrica: 5 a 10 kW;
- Temperatura do arco: 5800°C (280 A de corrente);
- Voltagem: 20-40 Volts;
- Distância de aspersão: 50-170 mm (depende do revestimento);
- Pressão do gás de atomização: 0,2-0,7 MPa;
- Vazão de gás atomizado: 1-80 m³/h;
- Aderência da camada: 10-30 MPa (Zn e Al), 70 MPa (ligas NiAl);
- Porosidade: 2-10%;
- Espessuras típicas depositadas: 0,8-2,5 mm;
- Ângulo de aspersão: melhores resultados a 90°;
- Taxa de deposição: 3-18 kg/h;
- Diâmetros típicos dos arames: 2-5 mm.

(Fonte: Catálogo do fabricante TAFA).

Apesar dos fundamentos das técnicas ainda continuarem os mesmos, sua evolução tem ocorrido com avanços no que concerne à alimentação contínua de arame, através da utilização de motor elétrico e não somente de ar comprimido, na melhoria da estabilidade do arco, no aumento da taxa de propagação da chama, na introdução de bocal tipo fechado e capa de ar secundária, nos gases de combustão, entre outros. Especificamente no caso do uso de gases de combustão, técnica também conhecida como *combustion-arc*, a introdução de uma pequena câmara de combustão interna à pistola e anterior ao arco elétrico gera gases de combustão, misturas de ar comprimido e propano, por exemplo, com temperatura

e pressão elevadas o suficiente para gerar partículas de menor diâmetro e, eventualmente, de maior velocidade. Como resultado, níveis de porosidade (<1%) e rugosidade superficial inferiores ao arco elétrico convencional são obtidos.

O arco elétrico oferece melhores propriedades e vantagens econômicas em relação à técnica à chama convencional. A seguir são indicadas as principais vantagens do processo de aspersão a arco elétrico:

- Taxa de deposição bastante superior, podendo chegar, no caso de revestimentos de Al em condições ótimas de aplicação, a valores da ordem de 80-120 m²/hora (espessura aplicada de 250 µm);
- Depósitos mais densos (menor porosidade);
- Preparo de superfície menos crítica (admite grau de limpeza Sa 2½). Na deposição de alumínio, o grau Sa 2½ leva a um consumo maior deste metal, além de maior ocorrência de salpicos durante a aspersão. Assim, para o alumínio é recomendável o grau de limpeza Sa 3I;
- Partículas com maior velocidade, calor e fluidez determinando maior aderência do revestimento pela possibilidade de formação de microssoldas e processos de difusão no estado sólido. Os valores de adesão transversal da camada dos revestimentos de Al com selante orgânico alcançam, facilmente, valores superiores a 10 MPa quando aplicados pelo arco elétrico;
- Microestrutura de depósitos mais consistentes pela maior simplicidade na regulação do processo.

Os depósitos produzidos pela técnica de arco elétrico são caracterizados por “lamelas” mais espessas e de tamanhos variados do que as produzidas por chama convencional ou plasma e com maior quantidade de óxidos. Outra característica desta técnica caracteriza-se por partículas solidificadas antes do impacto fazerem parte da microestrutura do material. Estrutura esta que pode ser melhorada pelo uso de arames de menores diâmetros e taxas de alimentação menores, pelo uso de gases de atomização inertes para reduzir a oxidação, pela redução da distância de aspersão para minimizar a oxidação e pela redução da voltagem do arco para minimizar o superaquecimento das gotas aspergidas.

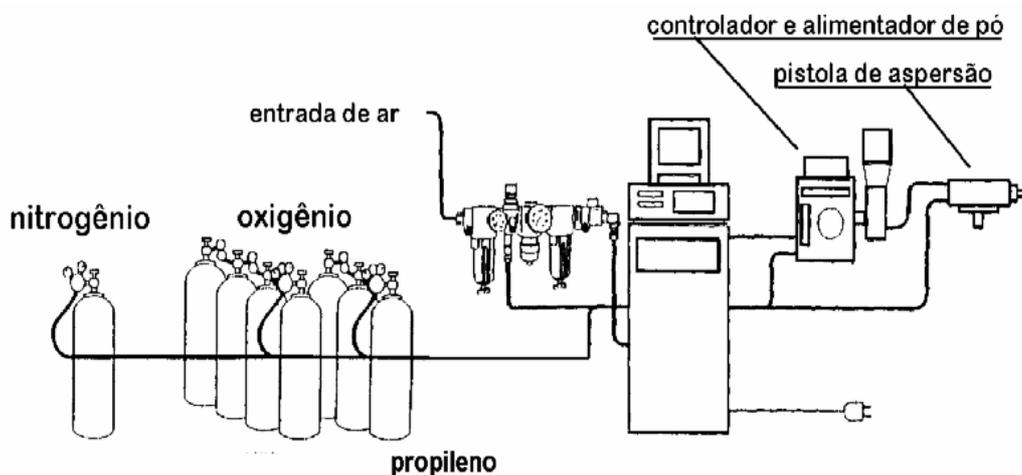
2.3.5 Aspersão por chama de alta velocidade (HVOF)

Neste processo, o calor gerado na combustão utiliza uma mistura de oxigênio com gases combustíveis (propileno, propano ou querosene), onde a chama atinge temperaturas na faixa entre 2700°C e 3100°C. No caso da utilização de pó como material de deposição, a sua alimentação é feita de forma concêntrica ao bico da pistola, utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico, onde pó é atomizado no passo por uma câmara quente tipo Venturi, sendo, portanto, aquecido e aumentada sua velocidade. Logo, ele atravessa com elevada velocidade a chama. O pó não funde, devido ao curto tempo de exposição a fonte de calor, apenas suas partículas são aquecidas, permitindo, com isto, um aumento significativo da energia cinética das partículas; portanto, no momento do impacto contra o substrato, estas transferem energia (cinética + impacto = calor elevado) elevada.

As camadas de alumínio em pó depositadas por este processo, por exemplo, se caracterizam por manter a forma original das partículas, que estão levemente deformadas, quando depositadas no substrato. Até o momento, é o processo que permite obter a maior aderência e a menor porosidade, sendo que os poros ficam concentrados entre as partículas maiores e entre as que se rompem pelo impacto no substrato.

Na figura 8, observa-se o equipamento utilizado, onde a velocidade de projeção das partículas pelo jato de transferência (fluxo de nitrogênio + propagação da chama) pode atingir até 1200m/s, conhecido como processo supersônico. Na atualidade, pistolas mais modernas, que transferem as partículas, permitem gerar velocidades dos gases de 3200m/s até 5000m/s.

Figura 8: Equipamento para aspersão térmica à chama de alta velocidade (esquemático).



Fonte: HOWARD, Larry ; Modern Welding Technology, 4th edition

2.3.6 Aspersão por plasma

2.3.6.1 Plasma de arco não transferido (APS)

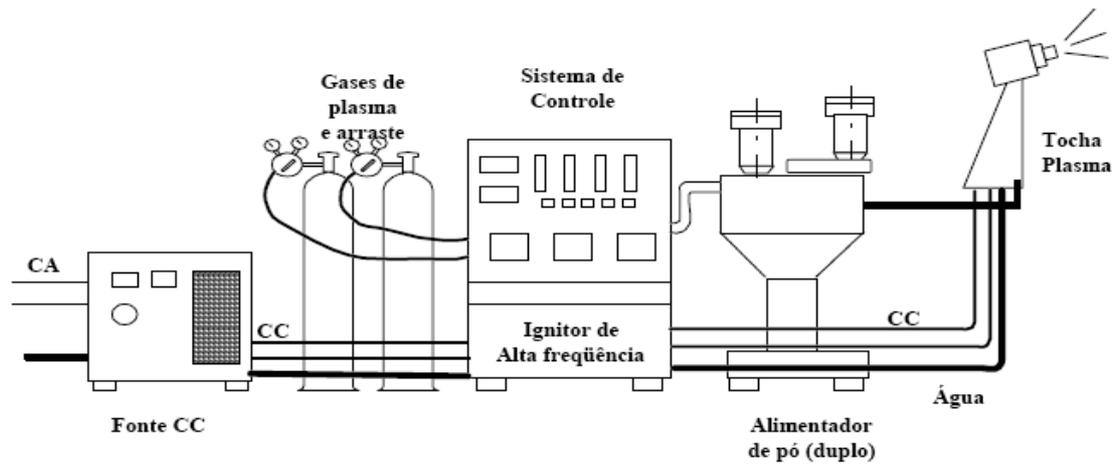
O desenvolvimento de turbinas e motores de foguetes tem exigido bom desempenho de materiais de engenharia em condições cada vez mais severas. Para satisfazer estas exigências, óxidos e carbonetos são considerados, devendo ser aplicados por processos de aspersão térmica de alta temperatura. O processo plasma atende esta necessidade o que leva ao desenvolvimento de uma nova família de materiais e técnicas de aplicação para uma ampla faixa de aplicações industriais.

Na aspersão à plasma, o material é aplicado a partir de um pó. A aplicação a partir de arames foi desenvolvida mais recentemente. Neste processo, um gás ou mistura de gases passa através de um arco elétrico estabelecido entre um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre, dotado de um orifício, alinhados coaxialmente. Em sua passagem, o gás é aquecido gerando o plasma.

O pó é alimentado no plasma, fundido e acelerado em direção ao substrato por um jato de alta velocidade. A energia, a temperatura e a velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, pela intensidade da corrente elétrica e pela composição e vazão do gás de plasma. Em geral, nitrogênio ou argônio são usados como gases de plasma, podendo conter adições de hidrogênio ou hélio para aumentar sua potência e velocidade.

O equipamento básico para a aspersão à plasma, mostrado na figura 9, consiste em uma fonte de corrente contínua constante, um alimentador de pó, uma fonte de gás e um sistema de controle que permitem ajustar os parâmetros de operação (corrente, vazões de gás, fluxo de água para refrigeração) e fazer a sincronia de todo o sistema.

Figura 9: Sistema para aspersão térmica a plasma (esquemático).



2.3.6.2 Aspersão por plasma de arco transferido (PTA)

Este processo é uma combinação de aspersão térmica e soldagem. O substrato deve ser condutor e faz parte do circuito do arco elétrico que gera o plasma. O material aspergido se mistura com o material da poça de fusão formada no substrato, isto é, ocorre diluição. O equipamento usado é similar ao necessário para o plasma não transferido, com exceção da tocha.

A ligação do revestimento ao substrato é essencialmente metalúrgica e as espessuras utilizadas são, em geral, maiores do que em outros processos de aspersão térmica. O depósito é denso, uniforme e com bom acabamento. A operação é geralmente mecanizada e com boa reprodutibilidade. Entretanto, a combinação de substratos e materiais aplicáveis é mais limitada. A tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais características dos diversos processos de aspersão térmica, segundo THORPE (1993).

2.3.7 Detonação (D-GUN)

A tocha de detonação é diferente de outros equipamentos de aspersão por combustível. Ela utiliza a energia de explosões de uma mistura oxigênio-acetileno, ao invés de uma chama estacionária para impulsionar o pó até a superfície do substrato. O depósito resultante é extremamente duro, denso e fortemente ligado ao substrato.

Uma tocha de detonação consiste, basicamente, de um tubo comprido, onde é introduzida uma mistura de gás combustível, oxigênio e pó. Quando é feita a ignição da mistura, uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja

velocidade de saída é de 760m/s aproximadamente. Após cada injeção de mistura, uma certa quantidade de nitrogênio é introduzida no tubo para purga deste. Ocorrem várias detonações por segundo, gerando um ruído da ordem de 150dB, sendo, muitas vezes, utilizadas instalações especiais com isolamento acústico para estas operações.

Dentro do tubo, temperaturas superiores a 3300°C são atingidas, enquanto a temperatura do substrato deve ser mantida abaixo dos 150°C, usando-se dispositivos de resfriamento, se for o caso.

A espessura dos revestimentos, geralmente, situa-se entre 0,05 e 0,5mm. A operação é normalmente mecanizada e, às vezes, remotamente controlada. Um excelente acabamento pode ser obtido, devido à baixa porosidade do revestimento.

Tabela 1: Comparação de características de processos de aspersão térmica.(*)

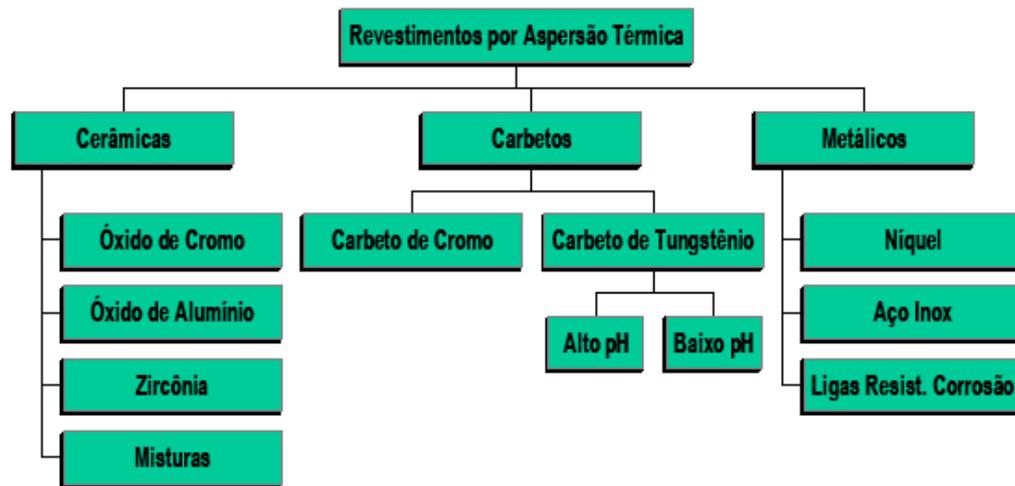
Característica Processo	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa	6	3	7	25-75	11-22
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média	4	3	9	50-100	11-22
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-3	1	16	4-6	0,2-0,4
Plasma	4,2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-1	5	5	30-80	13-22
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta	0,1	10	1	100-270	220
HVOF	28- 57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610-1060	8	Muito Alta	0,2	5	14	100-270	22-200
Plasma de alta energia	17-28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240-1220	8	Muito Alta	0,1	4	23	100-250	9-13
Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar, He	240-610	9	Muito Alta	ppm	10	10	50-100	11-22

(*) Thorpe, M. L. Thermal Spray - Industry in transdition. Advanced materials & processes, v.143, n.5, p.50-61. 1993.

2.4 Materiais aplicados por Aspersão Térmica

Basicamente qualquer material pode ser depositado por processo de aspersão térmica; entretanto, destacam-se três famílias de materiais: cerâmicos, carbetos e metais, que são verificados na Figura 10.

Figura 10 – Tipos de revestimentos aplicados por aspersão térmica.



Para o trabalho de recuperação dimensional interno da camisa de assentamento, utilizamos os revestimentos 75B® BondArc® em conjunto com o 60T.

2.4.1 75B® BONDARC®

É uma liga exclusiva de níquel-alumínio para uso em aspersão térmica. Está disponível através da Tafa sob licença exclusiva patenteada sob U.S. Nº 4.027.367 e patentes externas correspondentes. Comercialmente conhecido como BONDARC, este arame pré-ligado fornece revestimento com alta taxa de adesão. Ele é denso e resistente à oxidação em altas temperaturas, choque térmico e abrasão. Também é indicado como camada final, como, por exemplo, acabamento de 10 micro polegadas aa. O arame BONDARC é fabricado exclusivamente para aspersão a arco. A característica incomparável de adesão desta liga é atribuída às altas temperaturas atingidas na liga níquel-alumínio associadas com impacto no material base, provocando difusão e, conseqüentemente, uma ligação metalúrgica. Medições efetuadas da taxa de adesão têm demonstrado ser 55% maiores que as formadas através de reações exotérmicas de misturas de níquel-alumínio, materiais que existiam previamente e demonstravam altas taxas de adesão. Um dos maiores problemas em alcançar alta qualidade e alta taxa de adesão em qualquer processo de aspersão térmica é o custoso e demorado processo de preparação do substrato. O arame BONDARC elimina este problema. Após extensa bateria de testes, ficou comprovada a qualidade superior deste revestimento ao compará-lo com materiais exotérmicos, em adesão a cantos vivos e cargas de impactos.

O arame BONDARC é auto aderente a uma extensa variedade de superfícies metálicas, incluindo ligas de aço e aço carbono recozidos e temperados, aço inox, alumínio, níquel, ferro fundido, titânio e tântalo; excetuando-se, neste caso, a liga base cobre tungstênio. O arame BONDARC não exibe as mesmas características de auto aderência quando aplicado através de sistema arame chama, ou pós projetados através do sistema plasma. O arame BONDARC 75B pode ser projetado com qualquer sistema TAFE de aspersão a arco.

Possui revestimento com espessura de 0,01 a 0,15mm e pode ser aplicado com passe somente. Maiores espessuras até 6,3mm devem ser aplicadas através de spray contínuo. Desta forma, em alguns casos, o arame BONDARC pode ser usado como camada única.

Revestimento de BONDARC pode ser usinado para um acabamento grosseiro com ferramentas de carboneto de tungstênio ou acabamento fino, retificado com pedra de óxido de alumínio ou carboneto de silício. O arame BONDARC pode ser depositado diretamente sobre superfícies quimicamente limpas, sem o preparo convencional, rosqueamento, jateamento, torneamento; desta forma, eliminando os custos de equipamentos de preparação e a mão de obra associada a esta operação.

Entretanto, sempre que possível, a superfície deve ser preparada através de rosqueamento, retífica grossa ou jateamento (granalha ou óxido de alumínio 24 mesh a 80psi) ou ainda, utilizada uma lixa grossa e limpa; isto irá incrementar a taxa de adesão em 600 psi. Em todos os casos, certifique-se de que a superfície a ser metalizada esteja limpa. Uma vez que o revestimento com BONDARC visualmente se pareça com aço inox, é preferível que o mesmo seja utilizado como camada final, onde for aceitável.

As propriedades típicas do revestimento TAFE de níquel-alumínio, quando projetado sobre superfície limpa sem preparo, incluem: taxa de adesão 9.100 psi e dureza 55-80 HR_C.

As composições típicas de níquel e alumínio são:

Elemento	Ni	Al
Composição (%)	95,00	5,00

Para que seu acabamento seja excepcionalmente bom, este deve ser obtido através de torneamento.

Suas velocidades e profundidade de corte encontram-se descritas abaixo:

Velocidade Superficial – 1,27 m/s (250 fpm);

Velocidade Transversal – 38 cortes/cm (96 cortes/pol) (0,0105 pol);

- Profundidade de corte – 250 microns (0,010 pol) para os primeiros cortes;
- 125 microns (0,005 pol) para acabamento.

Ferramentas de carboneto de tungstênio podem ser usadas para se obter um acabamento rugoso, e retífica, para um acabamento fino. Refrigera constantemente quando da operação de acabamento e não permite que o revestimento sobreaqueça.

Ligas de alto níquel exibem dificuldades de acabamento. Se for utilizada uma retífica, pode acontecer um empastamento da pedra, mancha de revestimento ou aumento do risco de destacamento. Se for utilizada uma ferramenta de corte, mesmo cerâmica ou diamante, o destacamento pode ser um problema em revestimento de alta dureza. Entretanto é bastante comum obter um acabamento de 20 micro polegadas aa utilizando-se a técnica correta de retífica e rebolo. Um acabamento de 15 micro polegadas aa pode ser obtido com cuidados especiais. Para acabamentos com valores menores que 10 micro polegadas aa, métodos secundários devem ser utilizados. A retífica deve ser executada em estágios, trabalhando-se em sucessivas remoções de material, com avanço decrescente.

A especificação típica do rebolo obtida de vários fabricantes é: carboneto de silício, 37 C; dureza I; porosidade 8 e vitrificada aberta.

Para ajuste típico da retífica: rebolo (rpm), média/alta; eixo (rpm): baixa; SFPM: alta rotação da peça oposta a do rebolo e material removido por passe: 0,012mm.

Utilize rebolo limpo e exercendo baixa pressão.

Acabamento secundário, polimento, tanto com diamante e carboneto de silício utilizando base mineral (livre de enxofre) com óleo hidráulico 5 a 10. Pode produzir um acabamento menor que 10 micro polegadas aa com esforço e arte. Tipicamente o processo consiste em iniciar com lixa 240, prosseguir com 320, 400, 600, 1200 e até mesmo 4000. Se a base diamantada for a escolhida, deverão ser utilizadas partículas de 9 a 15 microns (fornecida pela 3M e outros).

O objetivo é utilizar lixa 240 para remover completamente as marcas de retífica. Após, utilizar a lixa 340 para remover as marcas da lixa 240 e assim sucessivamente. Caso esta sequência não seja seguida, passar de 240 para ua 600. O alto polimento só deverá ocorrer nos pontos mais altos do revestimento.

2.4.2 – 60T ARAME 13% CROMO

O arame 13% cromo foi feito exclusivamente para aspersão a arco. Seu revestimento resiste muito bem ao desgaste e razoavelmente à corrosão. É um excelente revestimento multiuso nas aplicações de elementos de máquina.

Revisão de Aplicação

Este é o arame mais utilizado para a recuperação de peças na área de aspersão térmica, devido a sua resistência ao desgaste e baixo índice de trincas. Recomendado quando um revestimento duro e com alguma resistência à corrosão é desejado. O seu alto percentual de cromo fornece uma resistência razoável à corrosão em alta temperatura.

Além disso, o aço cromo serve como um revestimento com resistência elétrica. A sua aplicação na recuperação de ponta de eixo, cilindros, pistões, virabrequins, hastes hidráulicas e numerosos tipos de elementos de máquina tem sido efetuada com bastante êxito. Algumas centrais elétricas só usam este material para as suas recuperações. A sua composição assim se divide:

Elemento	C	P	S	Mg	Ni	Cr	Si	Fe
Composição (%)	0,3%	Traços	Traços	1,0%	1,0%	12-4%	0,08%	Balanço

Uso do arame 75BTM como camada base para o 60T:

Na maioria das aplicações, o arame TAFE 75B elimina a necessidade de superfície rosqueada. As informações abaixo indicam os passos a serem seguidos quando do uso deste material. Nota-se que o arame 75B não adere em vários materiais não ferrosos e, nestes casos, a preparação de superfície convencional deverá ser utilizada.

Antes de tudo, deve-se limpar a superfície de metal branco através de jateamento, esmerilhamento, polimento ou lixamento. Deverá ser uma superfície ao metal branco livre de óleo, graxa ou contato com as mãos. A seguir:

1. usar posicionador curto com capa de posicionador azul;
2. ajustar a pressão de atomização para 50-60 psi (obs.: fazer isto com o ar de atomização ligado);

3. trabalhar com 150 amp e 30 volts;
4. haver distância de projeção de 7,00 a 10,00 cm;
5. movimentar a pistola uniformemente para assegurar um completo revestimento da superfície.

Continue o acabamento final com o material selecionado usando 50psi de ar de atomização (esta pressão é para uma rugosidade média; para revestimentos grosseiros diminua em 5 psi; já para revestimentos mais finos, aumente 5 a 10 psi, dependendo do acabamento desejado).

Quanto ao acabamento, os revestimentos são usualmente retificados. O operador pode usinar com ferramenta de carboneto, que fornecerá um acabamento macio. O método preferencial para diâmetros internos é torneamento com carboneto deixando 0,5 mm para o polimento até a dimensão final. Se o depósito for inicialmente retificado, deixe 0,12 mm de sobre metal para o polimento final. Retificar com pedra de silício ou alumina com tamanho de partícula 30 – 50. (Buletins Wire, Praxair)

2.5 Aplicações da aspersão térmica na manutenção de equipamentos da indústria

Os mais diversos tipos de peças e componentes mecânicos de máquinas e equipamentos podem ser recuperados através da aspersão térmica. A escolha do processo e do revestimento a serem aplicados, depende dos resultados e do tipo de reparo que se deseja obter.

A tabela 2 apresenta uma descrição da aplicação da aspersão térmica de acordo com o serviço nas mais diversas áreas industriais, incluindo as áreas de petróleo e gás, automotiva e demais segmentos industriais.

Tabela 2: Aplicação de revestimento para diversas funções na indústria.

Aplicação de Metalização de acordo com a indústria												
INDÚSTRIA	DESGASTE						Restauração	CONTROLE DE FOLGAS		Corrosão/Oxidação	FUNÇÃO ELETRICA	
	Abrasivo	Adesão	Fricção	Erosão	Cavitação	Impacto		Desgaste	Abrasivo		Resistência	Condução
Turbinas a gás	X	X	X	X			X	X	X	X		
Hidro turbinas	X	X	X	X	X		X			X		
Motores	X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Motor Diesel	X	X		X		X	X			X		
Transporte	X	X					X			X	X	
Ferrovias	X	X				X	X			X		X
Fab. Ferro e Aço	X			X		X	X			X		
Laminados de Aço	X	X				X	X			X		
Fundição	X			X		X	X			X		
Forjamento	X	X				X	X			X		
Marinha	X			X			X			X		
Óleo e Gás	X	X		X		X	X			X		
Mineração	X			X	X	X	X			X		
Petroquímica	X			X			X			X		
Polímeros	X			X		X	X			X		
Utilidades elétricas	X	X		X	X	X	X			X		
Papel e Celulose	X			X	X	X	X			X		
Defesa (A. esp.)	X	X	X	X	X	X	X			X		
Vidro	X	X					X			X		

Abaixo temos uma breve relação dos tipos mais comuns de peças da indústria e serviço com recuperação dimensional de superfície e proteção anticorrosão.

Figura 11: Esfera de válvulas, gavetas e sedes de válvulas, assentos, etc.



Figura 12: Eixos de bombas.



Figura 13: Obturadores, componentes de Packer e mandril.



Figura 14: Haste de cilindro hidráulico.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O Componente “Obturador/Packer”

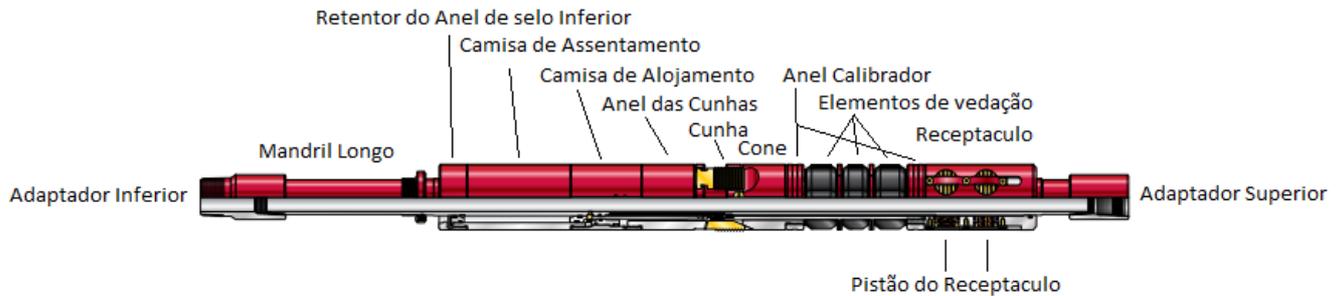
O obturador ou *Packer* tem a função básica de promover a vedação do espaço anular entre o revestimento e a coluna de produção em uma determinada profundidade dentro do poço. Obturadores têm múltiplas funções, sendo elas:

1. Servirem para compor a primeira barreira mecânica de segurança no espaço anular do poço;
2. Proteger o revestimento (acima dele) contra pressões de formação e fluidos corrosivos;
3. Possibilitar a injeção controlada de gás, pelo anular, nos casos de elevação artificial por gás-lift;
4. Permitir a produção seletiva de várias zonas por uma única coluna de produção (com mais de uma *packer* na composição da coluna de produção).

O obturador FH é um *packer* recuperável, simples, com assentamento hidráulico. Sua finalidade é equipar poços produtores, sobretudo os poços desviados. Ele é constituído por diversos componentes como mandril longo, adaptador inferior, adaptador superior, elementos de vedação, retentor do anel de selo inferior, camisa de assentamento, camisa de alojamento, anel das cunhas, cunhas, cones, anel calibrador, elementos de vedação,

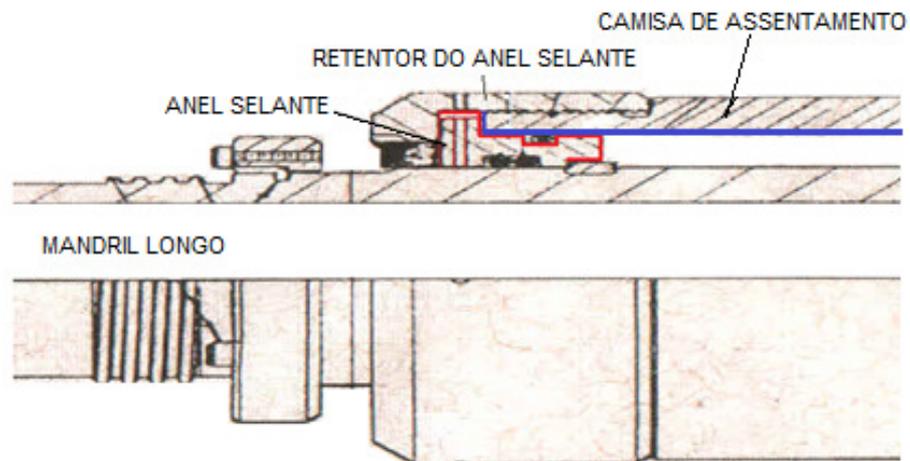
espaçador, receptáculo, pistões do receptáculo, além de componentes internos como anel selante, mandril conector e mandril de elemento de vedação.

Figura 15: Obturador ou *Packer* FH.



Fonte: Catálogo de Packers – Weatherford

Figura 16: Área da interface de vedação, camisa de assentamento com o anel selante.



3.2 Materiais e metodologia da recuperação dimensional interna em camisa de assentamento por metalização em conjunto com processo de soldagem para aplicação de overlay

Neste trabalho foram realizados 4 testes comparativos para a recuperação de ombreira das camisas de assentamento em conjunto com o processo de metalização Arco Spray na camisa de assentamento.

O serviço de recuperação dimensional, melhoramento de propriedades mecânicas e resistência à corrosão de superfície dos componentes do obturador FH aplicados por metalização Arco Spray é realizado nos seguintes componentes: camisa de assentamento

com metalização de sua área interna, camisa alojadora com metalização interna, mandril longo com metalização externa, mandril conector com recuperação de superfícies interna e externa e mandril de elemento de vedação com metalização externa.

Quando os obturadores hidráulicos *Packer* FH, montados com camisa de assentamento recuperada com metalização “Arc Spray”, são utilizados nas intervenções de poços em Sergipe e no Rio Grande do Norte, o comportamento do mesmo é satisfatório e sua principal função de vedação junto com o anel selante é atendida. Já quando as intervenções são efetuadas nos poços de petróleo do estado de Alagoas com as camisas de assentamento recuperadas com metalização, por atuar em ambiente mais agressivo com temperatura e pressões mais elevadas, a área de vedação que compreende o contato entre a camisa de assentamento com o anel selante apresenta passagem de fluido do anular para a câmara de acionamento, impedindo o assentamento do obturador no revestimento do poço. A falha de operação do obturador em um poço de petróleo pode ocasionar perda de produção no poço, contaminação de fluidos, contaminação de zonas e tempo para novas intervenções.

A solução proposta para melhorar a efetividade dessa vedação é aumentar a extensão da ombreira que, inicialmente, corresponde à, aproximadamente, 3mm da área interna da camisa de assentamento e serve como ancoragem e proteção das bordas da metalização. A ombreira é a área interna da camisa que não foi removida do metal de base para servir de ancoragem para a metalização aplicada internamente. O anel selante é mais um componente do obturador mecânico que trabalha em contato direto com a área recuperada da camisa de assentamento e possui uma região onde estão alojados os *O-ring's* que, dentro dessa área de contato, podem variar entre 20 e 35 mm da borda da camisa a depender do fabricante; é nesta área de contato que ocorre a passagem de fluido, ocasionada por elevadas pressões, temperatura elevada e ambiente agressivo. Como a metalização é um revestimento aplicado e não possui as mesmas características mecânicas do metal de base ou do overlay, as mesmas densidade e uniformidade microestrutural, a interfase ombreira metalização e a área metalizada podem deixar microporos ou microvazios onde podem iniciar a passagem de fluido devido às altas pressões e temperatura, ocasionando a falha na vedação dos componentes do obturador mecânico *packer* FH instalado no interior do poço.

3.2.1 Recuperação dimensional da camisa de assentamento

A aplicação de revestimento interno por metalização na área a ser recuperada dimensionalmente na camisa de assentamento foi realizada. Inicialmente se faz uma preparação da superfície com limpeza química, utilizando solvente, para que a superfície fique livre de impurezas, graxas e óleos.

Após a limpeza a área danificada a ser recuperada deve ser usinada até que as irregularidades sejam removidas. Inicia-se a usinagem de preparação, com abertura de rosca na região cilíndrica interna, com passo de 0,7mm e profundidade de 0,35mm no raio com ângulo de 45°. O filete de rosca conforme especificado acima é realizado em torno mecânico (MDA, NARDINI, ROMI, etc.). Ver figura 17.

Figura 17: Corte real do contato de vedação entre a camisa vs. anel selante (região de recuperação da ombreira).



Figura 18: Torno mecânico executando preparação interna de superfície em camisa de assentamento.



Após a superfície ser previamente preparada para receber o revestimento aplicado por metalização tipo “Arc Spray”, reveste-se inicialmente com uma fina camada de 0,01mm à 0,15mm de uma liga a base de Ni-Al (75B® BondArc® - Praxair – TAFA) que proporciona uma alta taxa de adesão do revestimento aplicado (ver item 2.4.1).

Posteriormente a essa etapa da aplicação da base, aplica-se o revestimento duro, propriamente dito, de Aço Inox 420 (60T Praxair – TAFA) com uma camada aspergida que pode variar de 0,25 mm à 2,00 mm, a depender da necessidade (ver item 2.4.2).

Figura 19: Máquina de metalização “Arc Spray” e pistola com extensão para aplicações internas.



Após o revestimento aplicado, vem a fase final de todo o processo que são a retificação e o acabamento. Os revestimentos são usualmente retificados. O operador pode usinar com ferramenta de carboneto, que fornecerá um acabamento macio. O método preferencial para diâmetros internos é o torneamento com carboneto, deixando 0,5mm para o polimento até a dimensão final. Se o depósito for inicialmente retificado, deixe 0,12mm de sobre metal para o polimento final. Retificar com abrasivos de silício ou alumina.

Figura 20: Retífica para serviços internos em camisas (Mello, UNS-2).



3.2.2 Recuperação dimensional da ombreira

Para realizar a recuperação dimensional da “ombreira”, é necessária a aplicação de overlay na área de contato interna entre a camisa de assentamento e o anel selante conforme figura 16.

A usinagem de desbaste é efetuada em um comprimento de 35mm a partir da borda da camisa, rebaixando em média entre 1 e 3mm no diâmetro interno do componente. Executa-se uma limpeza superficial prévia, com solvente, para que a superfície que receberá o overlay fique livre de impurezas e demais contaminações. Após a preparação, foram realizados os testes para a aplicação do revestimento e recuperação da ombreira (proteção e ancoragem da metalização) com processos de soldagem diferentes para comparar a efetividade da vedação, menores danos e menores deformações da região da rosca do componente.

Figura 21: Camisas de assentamento recuperadas, overlay e metalização; ombreira com 35mm.



O primeiro teste para a recuperação da ombreira, utilizando processos de soldagem diferentes na aplicação do overlay (soldagem de revestimento), foi dividido em duas etapas:

- 1) O primeiro teste foi realizado com o processo de soldagem SMAW (eletrodo revestido) utilizando como consumível o eletrodo OK 67.73 bitola 2,5mm;
- 2) O segundo teste, com o processo GTAW (TIG) utilizando arame TIG ER 316L bitola 3,25mm.

Ambos os testes foram realizados pelo mesmo profissional, um soldador qualificado em eletrodo revestido e TIG para tubulação API.

Na etapa onde utilizou-se o equipamento de eletrodo revestido, foi solicitado um preaquecimento na região descrita por se tratar de um aço 4340. Observou-se que as distorções na região da rosca foram mínimas, rebaixando, aproximadamente, 0,5mm no diâmetro do equipamento; como a distorção foi mínima, ela não prejudica a fixação do retentor do anel selante com a camisa de assentamento.

Com o preaquecimento, a mesma condição ocorreu quando a área foi recuperada após a aplicação do overlay pelo processo de soldagem TIG com arame ER 316L. O serviço de recuperação da área por solda eletrodo revestido e TIG foram satisfatórios para a resolução do problema. Efetuou-se um teste de pressão (hidrostático) com gabarito de teste semelhante ao teste de recebimento efetuado pela contratada na bacia de Sergipe Alagoas. O tempo de recuperação da camisa com solda e metalização em conjunto quintuplicou se comparado com a recuperação executada somente com a metalização “Arc Spray” em 96% da extensão interna da camisa.

O segundo teste foi realizado com o intuito de solucionar o problema de tempo de preparação das camisas de assentamento; resolveu-se utilizar o equipamento semiautomático de soldagem, MIG/MAG bitola de arame 1,6 mm, orbital interna de camisas, o ID Weld 2500 da Eutectic.

Apesar de todos os parâmetros de soldagem (tensão e corrente) ajustados conforme indicação de profissionais especializados no equipamento semiautomático, o tempo de preparação da recuperação da área (ombreira) foi reduzido; porém, as distorções locais impostas pelo aporte térmico da aplicação de revestimento soldado em parede de espessura fina com rosca, danificou todo o perímetro da região de rosca da camisa. Este teste tornou-

se inviável pelos danos causados, nas regiões onde existe parede com espessura fina e da rosca da camisa de assentamento.

No terceiro teste para recuperação de área com soldagem de revestimento, utilizou-se o processo de soldagem MIG/MAG manual com soldador qualificado e arame específico TAFA 60T (Inox 420) bitola 1,6mm com atmosfera protetora de gás StarGold Plus. O serviço atendeu os requisitos com relação às distorções localizadas na região da rosca da camisa de assentamento; porém, o revestimento aplicado, por se tratar inicialmente de aço inox 420 (martensítico), apresentou dureza muito elevada e onerou o tempo de usinagem e a retífica para preparação das medidas indicadas em desenho.

O quarto teste assemelha-se ao terceiro por utilizar o processo de soldagem MIG/MAG com as mudanças de consumíveis para aplicação de revestimento. O metal de adição foi alterado para Inox 309L e a bitola de arame 0,8mm manteve a mesma atmosfera protetora. Os resultados do quarto teste foram satisfatórios pois, além de minimizarem as distorções locais na região da rosca da camisa de assentamento, diminuíram o tempo de preparação das peças quando comparados com os outros processos de soldagem utilizados (MIG/MAG - ID Weld 2500, ER e TIG) e nos requisitos usinagem e retífica quando comparados com o inox 420. O eletrodo de aço inox 309L apresenta dureza bem inferior quando comparado com o aço inox 420, facilitando, assim, a sua usinagem para desbaste e aproximação da medida requerida e posterior retífica para medida final e acabamento.

3.2.3 Teste de estanqueidade

Para verificação da efetividade da vedação entre a camisa de assentamento e o anel selante é feito um teste de estanqueidade (teste hidrostático) utilizando bomba hidropneumática DSF150. O fluido utilizado para o teste é uma mistura de água com óleo solúvel na proporção de 8:2, respectivamente. Para a realização do teste, que é dividido em três etapas, inicialmente, aplica-se uma pressão gradativa da pressão no nível do mar até 600 psi (4,137 Mpa), permanecendo nesse patamar por 30 minutos. Logo após verificar-se da não queda na pressão indicada no manômetro, o mesmo é despressurizado. Em seguida à despressurização da primeira etapa, inicia-se uma segunda etapa de pressurização gradativa até 1.200 psi (8,274 Mpa), permanecendo nesse patamar por mais 30 minutos, sempre verificando se há queda de pressão manométrica. Se houver a despressurização, isto é, com o resultado for positivo, passa-se à terceira e última etapa que consiste em uma pressurização gradativa até 2.000 psi (13,789 Mpa). Permanecendo nesse patamar por mais

30 minutos, verifica-se a pressão no manômetro, para depois realizar a despressurização e a validação do teste ao abrir a região pressurizada e visualizar se não houve passagem de fluidos para a câmara de assentamento do obturador *packer* FH.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A recuperação da ombreira na área preparada para metalização consiste em aplicar um overlay nessa região com aço inox, envolvendo todo o perímetro interno a uma extensão de aproximadamente 35mm a partir da face ou borda da camisa de assentamento. Esta área compreende a região da rosca externa do componente e tem espessura média de parede 7,429 mm para obturadores FH de 7”.

A metalização “Arc Spray” com aplicação de aço inox 420, no intuito de recuperação dimensional e melhoramento de propriedades superficiais interna da camisa de assentamento, é uma excelente alternativa para a vedação no contato com o anel selante em montagem de obturadores *packer* FH para intervenções em poços no estado de Sergipe. Já para obturadores utilizados em intervenções nos poços de Alagoas, a mesma interface não trabalha com a mesma efetividade. A solução proposta de aplicação de um overlay na região de interface da camisa de assentamento junto com o anel selante, região da interface de vedação (figuras 16 e 20), resolveu o problema de passagem de fluido do anular para a câmara de acionamento, conforme teste hidrostático executado.

É compreensível que as características macroestruturais, propriedades físicas e forma de ligação (com diluição) de um revestimento soldado, overlay, com o metal de base, são semelhantes às características metalúrgicas de um metal fundido. Estas características físicas e mecânicas são superiores às características macroestruturais e propriedades físicas de um revestimento aplicado por metalização “Arc Spray”, pois o revestimento é macroestruturalmente composto por lamelas do material aplicado, intercaladas de inclusões de óxidos, microtrincas, partículas sólidas, gerando assim uma porosidade elevada, de 2 até 10% quando comparado com o overlay que é de 0%. Essa estrutura lamelar é decorrente do revestimento aspergido que é formado por camadas sucessivas de gotículas líquidas aceleradas que, quando colidem com a superfície opositora à pistola de aplicação, achatam-se e solidificam-se, além do mecanismo de adesão do revestimento aplicado por metalização ser formado por interações físicas que possuem propriedades bastante inferiores quando comparado com a interação metalúrgicas do overlay, que envolve diluição do revestimento com o metal de base.

5. CONCLUSÕES

Apesar das vantagens do revestimento aplicado por metalização no que diz respeito ao tempo de reposição do componente, ao menor custo de reposição com reconstituição dimensional e melhoramento de propriedades superficiais à abrasão, a distorções mínimas no metal de base na região de paredes finas e à geração de menor tensão residual no componente, o mesmo não se torna eficaz quanto a sua função de vedação junto ao anel selante em obturadores montados para intervenções nos poços de Alagoas por se tratar de um ambiente bem mais agressivo, com gradiente geotérmico e pressões elevadas quando comparado com as intervenções nos poços de Sergipe.

A solução proposta de aplicação de overlay nas extremidades internas da camisa de assentamento, 35mm a partir das bordas para a recuperação da ombreira, em conjunto com a metalização na região central da camisa de assentamento, de aproximadamente 229,45mm (obturador *packer* FH de 7”), entre o overlay nas extremidades, solucionou o problema na interface de vedação entre os dois componentes, a camisa de assentamento e o anel selante, necessários para a montagem de um obturador mecânico *packer* FH, recuperado para as intervenções em poços no estado de Alagoas.

O procedimento de recuperação dimensional interno e o melhoramento de propriedades só utilizando metalização “Arc Spray” com aplicação de Inox 420 será mantido para a montagem de obturadores mecânicos que atuarão em intervenções em poços em outras localidades por se tratar de um procedimento com um baixo custo (R\$ 522,37) quando comparado com a recuperação que necessita de metalização e soldagem (aplicação de overlay) em conjunto (R\$ 883,17), além do tempo de preparação e reposição do componente que é menor em aproximadamente 220 minutos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY, *Thermal spraying – practice, theory and applications*, Miami, FL, USA 1985, 184p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE SOLDAGEM - ABS. Metalização. 1994, 36 p.

BULETTINS WIRE, Boletim Técnico de Arames – Tafa Arc Spray –PRAXAIR.

CATÁLOGO GERAL DE ASPERSÃO TÉRMICA METALIZAÇÃO, Edição 2011, Revisão 01 – Eutectic do Brasil Ltda. Disponível em: <<http://www.eutectic.com.br>>

DORFMAN, M. R.; “*Thermal Spray – Materials*”. *Advanced materials & Processes*, vol. 160, n.9, p. 49, 2002.

DORFMAN, M. R.; “*Thermal Spray – Processes*”. *Advanced materials & Processes*, vol. 160, n.8, p. 47, 2002.

HOWARD, Larry; *Modern Welding Technology*, 4th edition.

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

MANUAL DE APLICAÇÕES EM SOLDAGEM, 2^o Edição, Outubro 2009 – Eutectic do Brasil Ltda. Disponível em: <http://www.eutectic.com.br>.

MARQUES, P.V., *Aspersão Térmica*, artigo Infosolda, Departamento de Mecânica, UFMG, (<http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>).

MENEZES, D.D., 2007, *Avaliação da Resistência à Corrosão de Revestimentos de Alumínio aplicados pelas Técnicas de Arco Elétrico e Chama Convencional*, em Meio Cloreto, tese de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NORMA PETROBRAS N-2568, *Revestimento anticorrosivo aplicados por aspersão térmica*, Janeiro 2004.

PAREDES, Ramón S. C.; *Aspersão Térmica*. Universidade Federal do Paraná – 2009.

PAWLOWSKI, L.; *The science and engineering of thermal spray coating*. John Wiles & Sons, New York, NY 1995.

SANTOS, E.J.F., TOLEDO, L.B., CARRILHO, Silva Carrilho, M., *Comparativo Entre os Processos de Aspersão Térmica na Manutenção*, artigo Infosolda e NT Soldagem & Qualidade, (www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/pb.pdf).

TERRES, C. J. F., “*Avaliação de revestimento de aço inoxidáveis depositados por aspersão térmica*”, Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, PR, 2006.

THORPE, M.L. *Thermal Spray*. *Advanced Materials & Processes* 1993.