



**Gabriel Villetti Vintacourt
Leandro Vianna Fernandes**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOCHA DE PLASMA PARA
APLICAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA**

Horizontina

2013

**Gabriel Villetti Vintacourt
Leandro Vianna Fernandes**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOCHA DE PLASMA PARA
APLICAÇÃO NO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Desenvolvimento de uma tocha de plasma para aplicação no processo de
aspersão térmica”**

Elaborada por:

**Gabriel Villetti Vintacourt
Leandro Vianna Fernandes**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 28/11/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Eng. Francine Centenaro
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2013**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas, às quais prestamos nossa sincera homenagem: À nossa família que nos apoiou durante esta caminhada. Aos professores que nos ajudaram durante a graduação, em especial ao professor Richard T. Lermen, pela orientação, oportunidade e dedicação durante a realização do trabalho. À Faculdade Horizontina - FAHOR por permitir a fabricação, montagem e realização dos testes práticos. Aos colegas, amigos e familiares que nos acompanharam e auxiliaram na realização deste trabalho.

“Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes”.
(Isaac Newton)

RESUMO

A busca constante por métodos que aumentem a vida útil de sistemas e materiais, através de processos cada vez mais eficientes e com custo reduzido tem gerado um constante investimento em novas tecnologias. O principal objetivo deste trabalho foi apresentar a caracterização e construção de uma tocha geradora de plasma para aplicação em processos diversos com maior ênfase no tratamento de superfície através do processo de aspersão térmica. A tocha de plasma, desenvolvida e fabricada nos laboratórios da Faculdade Horizontina – FAHOR foi primeiramente submetida a testes que serviram para verificação de erros de projeto e definição de parâmetros onde alguns problemas referentes ao arrefecimento da tocha, vazamentos, regulagem da corrente elétrica e vazão do gás foram encontrados e corrigidos, garantindo assim um bom funcionamento do equipamento. Após foram realizados novos testes, com foco no processo de aspersão térmica, onde foram utilizados dois corpos de prova, um de aço SAE 1020, e um de alumínio. Como materiais de adição foram utilizados fios de alumínio para o corpo de prova de aço SAE 1020 e estanho para o corpo de prova de alumínio. Observou-se que a realização da aspersão térmica foi possível, apresentando no corpo de aço uma superfície rugosa e irregular enquanto no corpo de alumínio uma superfície com formato semi-rugoso, porém regular. Outra aplicação da tocha de plasma foi a realização de furos com o jato de plasma. Conclui-se, portanto que a tocha é capaz de realizar tratamento superficial através da aspersão térmica em materiais e também furos, no entanto, estes apresentam formato irregular. Salienta-se que ambos os processos, tanto aspergir quanto furar com a tocha de plasma precisam de um estudo mais aprofundado e melhorias.

Palavras-chave: Tocha de plasma. Aspersão térmica. Tratamento de superfície.

ABSTRACT

The constant search for methods that increase the useful life of systems and materials through processes more efficient and cost-effective has generated a constant investment in new technologies . The main objective of this work was to present a characterization and construction of a plasma torch generator for use in various processes with greater emphasis on surface treatment through the thermal spray process . The plasma torch , designed and manufactured in the laboratories of the Faculty Horizontia - FAHOR was first subjected to tests that were used for verification of design errors and parameter setting where some problems related to the cooling of the torch , leaks , regulating the flow of amperage and gas were found and corrected , thus ensuring a smooth functioning of the equipment . After further tests were conducted , focusing on thermal spray process , where we used two specimens , one of SAE 1020 steel , and aluminum . As filler materials used were aluminum wires to the specimen of SAE 1020 steel and tin for the aluminum specimen . It was observed that carrying out the thermal spraying was possible , with the steel body of a rough surface , irregular aluminum body while in a surface shaped semi- rough but smooth . Another application of the plasma torch was conducting holes with the plasma jet . It follows therefore that the torch is capable of performing surface treatment by thermal spraying materials as well as holes, however, these are irregularly shaped . It is noted that both processes , both as sprinkling stick with the plasma torch need further study and improvements .

Keywords: Plasma torch. Thermal spraying. Surface Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arco de plasma transferido e não transferido.....	17
Figura 2: Métodos e estabilização do arco elétrico.	18
Figura 3: Equipamento para soldagem PAW.	20
Figura 4: Desenho esquemático do processo de aspersão.....	22
Figura 5: Classificação dos processos de aspersão térmica.....	22
Figura 6: Tocha e pulverização térmica por plasma.....	24
Figura 7: Desenho esquemático da tocha de plasma	27
Figura 8: Vista explodida da tocha de plasma.....	27
Figura 9: Peças constituintes da tocha de plasma	28
Figura 10: Pontos importantes na montagem da tocha	29
Figura 11: Tocha de Plasma montada	30
Figura 12: Esquema de funcionamento da tocha de plasma: (a) desenho esquemático dos componentes utilizados para o funcionamento da tocha e (b) fotografia do aparato experimental.	31
Figura 13: Fonte de energia para acionamento da tocha de plasma.....	32
Figura 14: Cilindro de gás argônio com válvula reguladora de vazão.	32
Figura 15: Sistema de arrefecimento da tocha de plasma.	33
Figura 16: Bancada suporte para tocha.	34
Figura 17: Garrafa pet utilizada com recipiente para água de refrigeração.	35
Figura 18: Conexão com Vazamento e Conexões com cola Siliconada.....	36
Figura 19: Comprimento do Jato de Plasma.	36
Figura 20: Aspersão térmica realizada com a tocha de plasma.	37
Figura 21: Tocha de plasma desmontada após série de testes.	38
Figura 22: Acabamento superficial de corpo de prova de aço após aspersão térmica alumínio com uso da tocha de plasma.	39
Figura 23: Corpo de prova de alumínio após aspersão térmica com estanho.	40
Figura 24: Corpo de prova furado com tocha de plasma.....	41
Figura 25: Câmara de refrigeração e fixador do catodo.	45
Figura 26: Câmara de refrigeração e fixador do anodo.	46
Figura 27: Luvas do sistema de arrefecimento.	46
Figura 28: Anodo	46
Figura 29: Bucha isolante.	47
Figura 30: Arruela.	47
Figura 31: Bocal de vedação.	48
Figura 32: Conector do sistema de arrefecimento.....	48
Figura 33: Catodo.	48
Figura 34: Corpo fixador.	49
Figura 35: Pinça.....	49
Figura 36: Capa Longa e Entrada do gás.	49
Figura 37: Montagem completa da Tocha de Plasma.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Seleção do gás de plasma.	14
Quadro 2 – Seleção do gás de proteção.....	15
Quadro 3 – Recomendações de gases por espessura e material.	15
Quadro 4 – Variáveis com os respectivos valores utilizados nos testes com a tocha de plasma.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1	PLASMA	11
2.1.1	Composição Química e o Gás de Plasma	12
2.1.2	Seleção dos Gases de Plasma e Gases de Proteção.	13
2.1.3	O Arco Elétrico	16
2.1.4	Estabilização do arco elétrico na tocha de plasma	17
2.2	PROCESSOS INDUSTRIAIS QUE UTILIZAM O PLASMA	18
2.2.1	Corte a Plasma	18
2.2.2	Soldagem a Plasma	19
2.3	ASPERSÃO TÉRMICA	21
2.3.1	Aspersão Térmica a Plasma	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	25
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	25
3.2.1	Funcionamento da Tocha de Plasma	25
3.2.2	Estrutura da Tocha de Plasma	26
3.2.3	Caracterização da Tocha de Plasma	30
3.2.4	Equipamentos Utilizados	31
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS resultados	34
4.1	TESTES INICIAIS COM A TOCHA DE PLASMA	34
4.2	APLICAÇÕES DA TOCHA DE PLASMA EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	38
4.2.1	Uso da Tocha na Aspersão Térmica	38
4.2.2	Utilização da Tocha de Plasma para Realização de Furos	40
5	CONCLUSÕES	41
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
	ANEXO A	45

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua descoberta até os dias atuais o plasma tem sido objeto dos mais variados tipos de estudo que visam sempre sua aplicação cada vez maior nos mais diversos campos, e áreas onde a sua utilização seja possível. Atualmente já se sabe que em âmbito industrial o plasma pode ser utilizado em equipamentos aero espaciais, na fabricação de semicondutores, na sinterização de materiais, na soldagem, no corte térmico, na fabricação de filmes finos, nas indústrias automotiva, de petróleo, elétrica, eletrônica, geração de energia, dentre outras aplicações.

Além de aplicações nas mais diversas áreas a descoberta do plasma possibilitou também o desenvolvimento de diversos equipamentos. Dentre os equipamentos desenvolvidos que se destacam estão as tochas geradoras de plasma que servem para a realização do processo de aspensão térmica a plasma (plasma spray).

Basicamente o processo de aspensão térmica consiste na aplicação de um revestimento metálico ou não metálico utilizando-se de uma pistola de aspensão (tocha de plasma). O material sob a forma de pó, ou fio, é aquecido até seu ponto de fusão e suas partículas são projetadas contra a superfície de determinado substrato através do jato de plasma. Estas aderem a esta superfície por impacto e após resfriarem acabam formando uma camada que serve de revestimento para a superfície do substrato.

Cabe salientar que desde a invenção da primeira tocha de plasma, o emprego de plasma térmico gerado especificamente por meio destes equipamentos tem se caracterizado como um dos processos eletrotérmicos industriais mais promissores, pois apresenta certa gama de aplicações e pode ser considerado um dos processos que causa menos poluição. (ZHUKOV, ZASYPRKIN, apud LERMEN, 2011).

Apoiado nesse contexto o presente trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de maneira prática de um equipamento tocha de plasma que seja capaz de realizar o processo de revestimento superficial por aspensão em diferentes materiais. Em caráter mais específico e já com o equipamento tocha de plasma construído, o presente trabalho visa analisar o funcionamento do equipamento na realização do tratamento superficial em diferentes corpos de prova, além de analisar se o equipamento pode ser utilizado em outros processos que utilizam plasma.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O referencial teórico apresentado a seguir consiste no apontamento dos conceitos que são fundamentais para a realização deste trabalho. Sendo assim inicialmente é realizada uma descrição do que é o plasma, qual a sua composição química e algumas de suas características gerais. Também são apresentados conceitos sobre o arco elétrico utilizado na obtenção do plasma. Em seguida são descritos os processos industriais que utilizam o plasma com uma ênfase maior no processo de aspersão ou pulverização térmica. Então é realizada uma descrição dos componentes que fazem parte da tocha de plasma, discorrendo-se sobre a importância de cada um para o equipamento.

2.1 PLASMA

A palavra plasma é de origem grega e significa alguma coisa que pode ser formada ou moldada. Os estudos nesta área iniciaram-se em princípios do século XIX, com pesquisas em descargas elétricas de corrente contínua, por Humphry Davy, em 1808, Michael Faraday e outros, em 1830. Os plasmas foram identificados como o quarto estado da matéria em 1879 por William Crookes. Considerando as mudanças de estado que ocorrem através do aquecimento da matéria tem-se a passagem do estado sólido para o líquido pela fusão e deste para o gasoso pela vaporização. Adicionando-se mais energia, as partículas carregadas dos átomos tendem a se separar em elétrons e íons, formando assim, o quarto estado da matéria – o plasma. Assim tem-se uma analogia ao antigo conceito grego dos quatro elementos – terra, água, ar e fogo (NICHOLSON, 1983 apud LERMEN, 2011).

O termo plasma foi introduzido por Langmuir em 1928 para descrever o estado da matéria em uma coluna positiva de um tubo de descarga. O plasma é basicamente um gás ionizado, isto é, um gás de íons positivos e elétrons, ambos tendo um caminho livre no sentido de que as suas energias médias são muito maiores que a energia potencial de Coulomb. Langmuir observou que o plasma é eletricamente neutro, isto é a densidade média dos íons e a densidade média dos elétrons garante que somente uma corrente elétrica líquida muito pequena flua no volume macroscópico do plasma. (UERJ, 2011).

O INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (2005) ao definir o termo plasma aponta que o mesmo foi usado pela primeira vez por Irving Langmuir em (1926) para descrever a região interna de uma descarga elétrica. Tempos depois, a definição foi estendida para definir o estado da matéria onde átomos e/ou moléculas estão parcialmente ou totalmente ionizados, sendo que as cargas apresentam um comportamento coletivo devido às interações que sofrem interações essas que são descritas pela lei de Coulomb. O grau de ionização do plasma pode variar muito, dependendo da forma de obtenção bem como de sua aplicabilidade.

Ao discorrer sobre o plasma Angeles (2003) descreve a relação entre a formação do plasma e o gás que o constitui. De acordo com ele um gás é constituído de moléculas ou átomos neutros, porém em determinadas condições ocorre um processo conhecido como ionização. Como resultado desse processo o “gás” estará composto de uma mistura de elétrons negativamente carregados, e átomos positivamente carregados, chamados íons, podendo ter também átomos e moléculas com carga neutra, não ionizada. Agora, os elétrons e os íons estão livres para mover-se sob a ação de campos eletromagnéticos aplicados e o “gás”, ou plasma, pode conduzir eletricidade, donde se extrai a definição mais comum de plasma: gás eletricamente condutor.

Com relação aos tipos existentes de plasma o INPE (2005) destaca que existem diversos tipos de plasma sendo que estes podem diferir em muitos aspectos, como por exemplo: temperatura de elétrons e íons, densidade de elétrons e íons, comprimento de Debye, etc. Com base nessas diferenças é que os plasmas são classificados e o tipo de cada um é definido. Outro fato importante na descrição de um plasma é a presença de campos elétricos e/ou magnéticos que ele contém.

2.1.1 Composição Química e o Gás de Plasma

De acordo Silva (2012) a determinação dos gases e da composição química de um plasma é uma tarefa bastante difícil, haja vista a grande quantidade de componentes e radicais presentes. Numa descarga reativa (plasma), a energia é distribuída entre os diversos constituintes, quais sejam: neutros estáveis, elétrons, fragmentos moleculares (radicais), íons negativos e positivos e neutros excitados. Destes componentes, deve ser ressaltado o papel dos elétrons que, devido a sua maior mobilidade, são os principais responsáveis pela condutividade elétrica do

plasma e pelos processos de formação de radicais, neutros excitados e íons, importantes para a reatividade do plasma.

Cabe salientar que na maioria dos casos, a determinação completa da composição química do plasma é tarefa impraticável. Normalmente, se busca a determinação quantitativa ou qualitativa das espécies que se consideram as mais importantes e que podem fornecer informações sobre sua reatividade. Para isso, várias técnicas são normalmente utilizadas, sendo que uma das principais é a espectrometria de massa (SILVA, 2012).

Com relação ao gás de plasma Galiza (2010) destaca que o plasma é um gás aquecido por uma diferença de potencial elétrico tornando portando a qualidade do gás de fundamental importância para a eficiência e a qualidade do processo de formação do plasma. Ainda de acordo com o mesmo autor o gás no processo plasma tem duas funções distintas: a) insumo para geração do plasma e b) refrigeração dos consumíveis.

Basicamente existem dois tipos de sistema para a utilização do plasma; os sistemas manuais e os sistemas mecânicos. Na grande maioria dos sistemas manuais, utiliza-se uma única fonte de suprimento de gás para realizar as duas funções de formação de plasma e refrigeração dos itens consumíveis. Neste caso a vazão do gás torna-se um fator de extrema importância para o desempenho do processo. Se a vazão é excessiva implicará numa boa ação de refrigeração, porém com consequências danosas ao plasma. Se insuficiente, além da perda de qualidade do plasma, a vida útil do consumível é reduzida drasticamente. (GALIZA, 2010).

2.1.2 Seleção dos Gases de Plasma e Gases de Proteção.

O gás no processo plasma possui duas funções principais: serve inicialmente como insumo para criação do gás plasma e também serve como refrigeração dos consumíveis na maioria dos casos e uma terciária função em sistemas com partida por contato: separar o eletrodo do bico. A diferença de potencial elétrico ioniza o gás fazendo reagir uma corrente elétrica que aquece o gás plasma, logo a qualidade e a eficiência do processo estão associadas com a qualidade do gás (LIMA, 2006 apud ANGELI, 2011).

Para visualizar as vantagens de cada gás de corte plasma LIMA, 2006, apud ANGELI, 2011, sintetiza em três quadros: o Quadro 1 mostra as características dos gases quando escolhidos para a aplicação de plasma, o Quadro 2 mostra as características dos fluidos que podem ser utilizados para a aplicação de gás de proteção. Já no Quadro 3 está discriminada a recomendação dos gases pela espessura a cortar.

Quadro 1 - Seleção do gás de plasma.

SELEÇÃO DO GÁS DE PLASMA			
Gás	Recomendado para	Vantagens	Desvantagens
AR	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Carbono • Alumínio • Aço Inox 	<ul style="list-style-type: none"> • Corte limpo e rápido em aço carbono • Conveniente • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa vida do eletrodo • Nitretação da superfície de corte • Oxidação em Inox e Alumínio
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Inoxidável • Alumínio • Aço Carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Bom acabamento em Inox e Alumínio • Excelente vida útil dos consumíveis • Custo relativamente baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação da superfície de corte • Custo relativamente alto para sistemas manuais que requer alta vazão.
Misturas de Argônio e Hidrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Inoxidável • Alumínio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade e velocidade de corte em espessuras acima de 12 mm • Menos fumaça e fumos 	<ul style="list-style-type: none"> • Caro • Não recomendado para Aço Carbono
Oxigênio	<ul style="list-style-type: none"> • Aço Carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior velocidade de corte • Superfície livre de nitretação • Menor angularidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa vida útil dos consumíveis • Não aplicável em Inox ou Alumínio

Fonte: Adaptado de Angeli, 2011.

Quadro 2 - Seleção do gás de proteção.

SELEÇÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO			
Gás	Usado com:	Vantagens	Desvantagens
AR	<ul style="list-style-type: none"> • AR • Nitrogênio • Oxigênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Conveniente • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação na superfície de corte
Dióxido de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa proteção para vários tipos de metais • Boa vida útil dos consumíveis • Maior flexibilidade de parâmetros 	<ul style="list-style-type: none"> • Inconveniente (Pode requerer console de gás específico) • Superfície de corte rugosa
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio • Argônio/Hidrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade de corte em Inox e Alumínio • Boa vida útil dos consumíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitretação da superfície de corte • Menor flexibilidade de parâmetros • Menor vida útil dos consumíveis (comparado ao C O₂)
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrogênio • Argônio/Hidrogênio • Oxigênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente qualidade de corte em Inox e Alumínio • Menos fumos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sujeira • Requer água de alta qualidade

Fonte: Adaptado de Angeli, 2011.

Quadro 3 - Recomendações de gases por espessura e material.

Material	Espessura	Gás Plasma	Gás de Proteção
Aço Carbono	< 6 mm	O ₂	O ₂
Aço Carbono	> 6 mm	O ₂	AR
Aço Inox	<10 mm	95% N ₂ – 5% H ₂	N ₂
Aço Inox	>10 mm	65% Ar – 35% H ₂	N ₂
Alumínio	<8 mm	AR	AR
Alumínio	>8mm	65% Ar – 35% H ₂	N ₂

Fonte: Angeli, 2011.

2.1.3 O Arco Elétrico

Desde o século passado, a descarga elétrica em gases (arco elétrico) vem sendo aplicada industrialmente como condutor elétrico, fonte de luz, e no processamento de materiais, tornando-se assim um dos fenômenos mais importantes da física de plasma. O arco elétrico é um dos tipos de descarga elétrica que apresenta altas densidades de corrente elétrica, temperatura e condutividade elétrica, e é o tipo de descarga elétrica, geralmente, utilizado em tochas de plasmas (LERMEN, 2011).

Pode-se definir o arco elétrico como sendo “uma descarga elétrica mantida através de um gás ionizado” iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

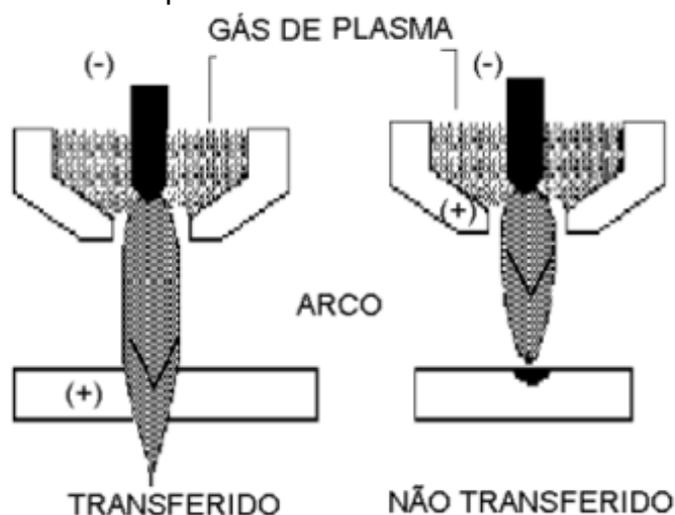
Um arco elétrico possui as seguintes características: pequena queda de potencial no catodo; pequena diferença de potencial nos eletrodos; altas intensidades de corrente elétrica, podendo atingir até milhares de Ampères; grande densidade de corrente nos pontos quentes, “*spot*”, do catodo; e grande intensidade luminosa em todas as partes da descarga (catodo e anodo, coluna positiva). Estas características dependem da ordem de grandeza da corrente elétrica que passa pelo arco, da geometria dos eletrodos e forma de estabilização. A queda de tensão entre os eletrodos depende do material dos mesmos (LERMEN, 2009)

No que diz respeito ao uso de arco elétrico para obtenção de plasma destaca-se que existem vários processos de obtenção de um plasma dependendo das características exigidas em cada aplicação, sendo que os plasmas produzidos com o uso de arco elétrico são obtidos por utilização de descargas elétricas agindo sobre certa quantidade de gás. Dentro dos tipos de descargas o mais usual é a descarga luminescente ou descarga incandescente “*glow*”. Esta é obtida pela aplicação ao gás de tensões de corrente contínuas CC, ou correntes alternadas, CA, ou ainda de radiofrequência RF, ou micro-ondas (INPE, 2005).

Nos processos que se utilizam de plasma o arco elétrico é também chamado de arco plasma. Salienta-se que o arco plasma pode ser transferido, quando a corrente elétrica flui entre a tocha plasma (cátodo) e a peça de trabalho (ânodo); ou

de modo não transferido quando a corrente elétrica flui entre o eletrodo e o bocal da tocha. Embora o calor do arco plasma emergja do bocal nos dois modos de operação, o modo transferido é usado para corte uma vez que o “calor impulsivo” utilizável na peça de trabalho é mais eficientemente aplicado quando o arco está em contato elétrico com a peça de trabalho. No arco não transferido o calor necessário para fusão é transmitido às peças somente pelo gás, podendo ser usado na união de materiais não metálicos (SILVA, 2012). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático dos tipos de arco elétrico para tochas de plasma.

Figura 1 - Arco de plasma transferido e não transferido.

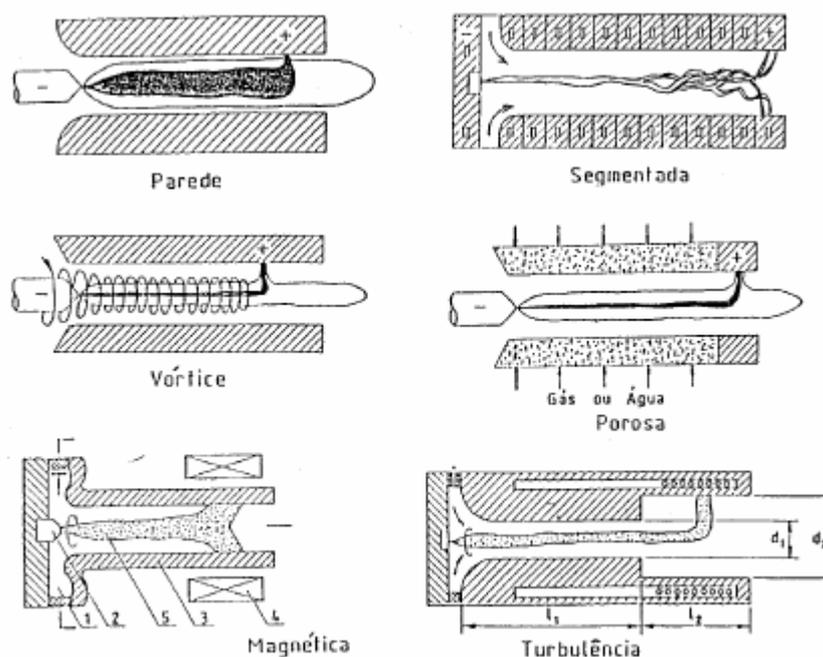


Fonte : Adaptado de Silva, (2012) .

2.1.4 Estabilização do arco elétrico na tocha de plasma

Segundo Angeles (2003) a estabilização consiste em submeter o arco elétrico a uma força, radial ou longitudinal, de modo a que o arco permaneça no centro do canal e de forçá-lo a retornar a essa posição quando de qualquer desvio, evitando, assim, que ocorra uma prematura ruptura do arco para as paredes metálicas do canal e, conseqüentemente, uma diminuição do comprimento do arco. A estabilização garante o funcionamento estável da tocha de plasma e pode contribuir para a diminuição da erosão dos eletrodos. Existem diversos tipos de estabilização: por parede, por fluxo axial de gás, por fluxo em vórtice de gás, por parede segmentada, por transpiração através da parede porosa, ou por injeção radial de gás, por turbulência, por campo magnético. A Figura 2 mostra os diversos tipos de estabilização.

Figura 2: Métodos e estabilização do arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Angeles, 2003.

2.2 PROCESSOS INDUSTRIAIS QUE UTILIZAM O PLASMA

2.2.1 Corte a Plasma

O corte a plasma foi introduzido em 1955 em substituição a outros processos de corte de metais não ferrosos e aços inoxidáveis. O jato de plasma funde e expulsa o metal de base com grande eficiência, resultando em uma superfície com excelente acabamento, precisão dimensional, pouca ou nenhuma distorção e pequena zona afetada pelo calor (SILVA, 2012).

Para Silva (2012) as características do arco plasma podem ser bastante alteradas pela mudança do tipo e vazão do gás, corrente elétrica de corte, tensão do arco e diâmetro do bico de corte. Por exemplo, se é usado uma baixa vazão de gás, o jato plasma torna elevada a concentração de calor na superfície da peça, sendo ideal para soldagem. Em contrapartida se a vazão de gás é suficientemente aumentada, a velocidade do jato plasma é tão grande que ejeta o metal fundido através da peça de trabalho. Introduzida em 1957 pela UNION CARBIDE, esta técnica podia ser usada para cortar qualquer metal a velocidades de corte relativamente altas. A faixa de espessuras abrangida variava de chapas finas (0,5 mm) até chapas grossas (250 mm). A espessura de corte está diretamente

relacionada com a capacidade de condução de corrente da tocha e propriedades do metal. Uma tocha mecanizada com capacidade para 1000 ampères pode cortar 250 mm de aço inoxidável ou Alumínio. Contudo, na maioria das aplicações industriais, a espessura de corte não ultrapassa 40 mm. Nesta faixa de espessuras, o corte plasma convencional é usualmente alargado e tem a ponta circular. Cortes largos são o resultado de um desbalanceamento energético na face de corte.

De acordo com Galiza (2010) o corte a plasma é um processo que utiliza um bico com orifício otimizado para restringir um gás ionizado em altíssima temperatura, tal que possa ser usado para fundir seções de metais condutores. Um gás eletricamente condutivo (plasma) é usado para transferir energia negativa fornecida pela fonte plasma da tocha para o material a ser cortado. A tocha serve de suporte para os consumíveis e fornece um fluido refrigerante para estas peças (gás ou água).

Basicamente o corte plasma utiliza os mesmos princípios da soldagem PAW (*“Plasma Arc Welding – PAW”*). O arco sofre constrição, forma o plasma (gás altamente ionizado) e funde a peça, sendo que o próprio remove o material fundido por arraste ou com um gás auxiliar. Entretanto, o corte realizado com este dispositivo se dá por fusão, sendo possível obter pequenas extensões; baixa deformação e alta qualidade (MACHADO, 1996).

2.2.2 Soldagem a Plasma

O processo de soldagem a plasma é similar ao processo TIG (*“Tungsten Inert GÁS”*) e aos propulsores eletrotérmicos. O sistema desse processo é constituído por um eletrodo refratário não consumível e é, geralmente, conectado ao polo negativo de uma fonte de característica corrente constante. Circundando o eletrodo são encontrados dois bocais concêntricos, onde flui um gás geralmente inerte (argônio). O arco elétrico é iniciado por uma fonte de alta frequência entre o eletrodo e a peça (plasma transferido) ou entre o eletrodo e o bocal (plasma não transferido). O gás é eletricamente aquecido e ionizado ao passar pela descarga elétrica no orifício e emerge como um jato de plasma, efeito característico dos propulsores eletrotérmicos (LERMEN, 2009).

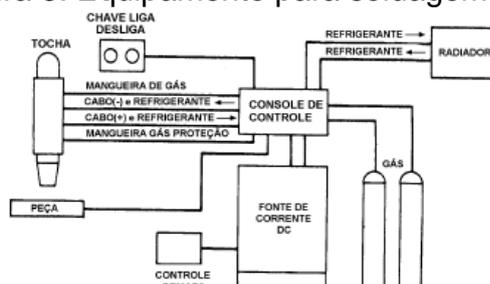
Para Wainer; Brandi e Mello (2004) o processo de soldagem a plasma é uma extensão do processo de soldagem TIG, onde a coluna do arco elétrico sofre uma constrição que é obtida a partir da passagem do arco através de um orifício de diâmetro reduzido e de parede fina (de cobre refrigerado a água).

Bracarense (2000) destaca que a soldagem a plasma é um processo de soldagem que produz coalescência dos metais pelo aquecimento com um arco constrito entre o eletrodo e a peça de trabalho ou entre o eletrodo e o bocal constrito da tocha. A proteção se obtém através de um gás quente e ionizado proveniente da tocha, esse gás é usualmente suprido por uma fonte auxiliar de gás de proteção. O gás de proteção deve ser um gás inerte ou uma mistura de gases inertes e o metal de adição pode ou não ser usado.

Uma interessante característica do plasma é a possibilidade do mesmo soldar de dois modos bastante distintos. No primeiro, convencional e muito semelhante ao modo TIG o arco funde o metal base com relativamente pequena penetração sendo o metal de adição às vezes utilizado às vezes não. No segundo método, conhecido como método de furo controlado, a vazão do gás de orifício é aumentada forçando o plasma a passar através da poça de fusão que se forma. Conforme a tocha se desloca as forças devidas a tensão superficial obrigam o metal liquido a preencher o furo existente atrás do arco realizando assim uma solda com penetração completa. (MACHADO, 1996).

De acordo com Bracarense (2000), um sistema manual de soldagem a arco com plasma consiste numa tocha, um dispositivo de controle, fonte de potência, alimentação de gás de orifício, de gás de proteção, fonte de refrigeração da tocha e outros acessórios tais como uma chave “on-off”, medidores de fluxo de gás, e um controle de corrente a distância, conforme Figura 3.

Figura 3: Equipamento para soldagem PAW.



Fonte: Adaptado de Bracarense, 2000.

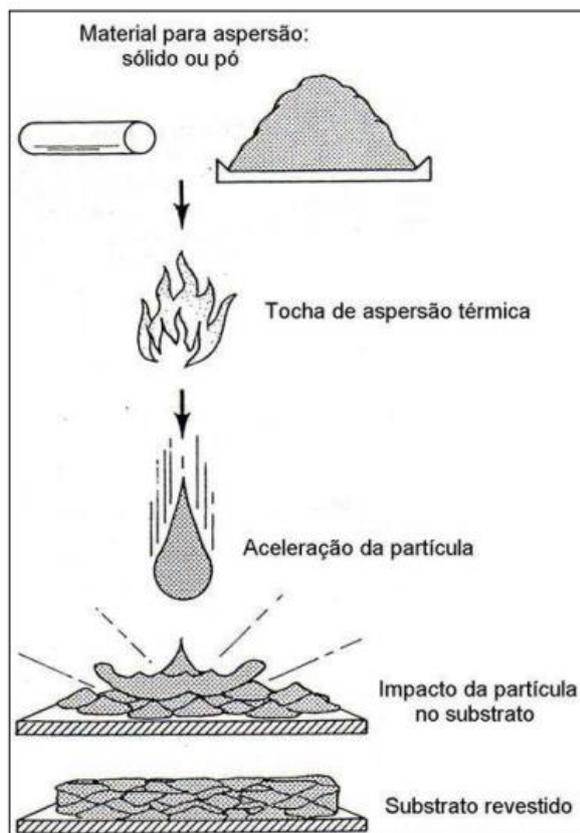
2.3 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica é uma tecnologia de aplicação de revestimentos utilizada em diversas áreas da engenharia. Seus diferentes métodos de aplicação e a grande variedade de materiais utilizados fazem desta tecnologia uma das mais conceituadas para soluções relacionadas a desgaste, corrosão e degradação térmica, entre outras aplicações tornando sua utilização ampla, tanto na fabricação quanto na manutenção de peças e componentes (LIMA; SOUZA; CAMARGO, 2012).

O desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, em face o elevado custo de componentes de reposição aliado as vantagens de se recuperar peças as quais se elimina a substituição. E com isto deseja se elevar o desempenho dos sistemas mecânicos em uso, os quais são cada vez mais solicitados e dentre seus parâmetros de trabalho mais importantes pode-se citar a pressão e a temperatura. E para resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas é exigido da ciência dos materiais o desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço (PAREDES, 2009).

De forma simplificada 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. Nos processos de aspersão térmica, os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semifundido através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola apropriada. E 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 contra a superfície as partículas deformam-se e aderem ao material base formando camadas. E estas camadas são constituídas por pequenas partículas deformadas na forma de “panquecas” em direção paralela ao substrato formando lamelas. (AWS, 1985 apud PAREDES, 2009). A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do processo de aspersão térmica.

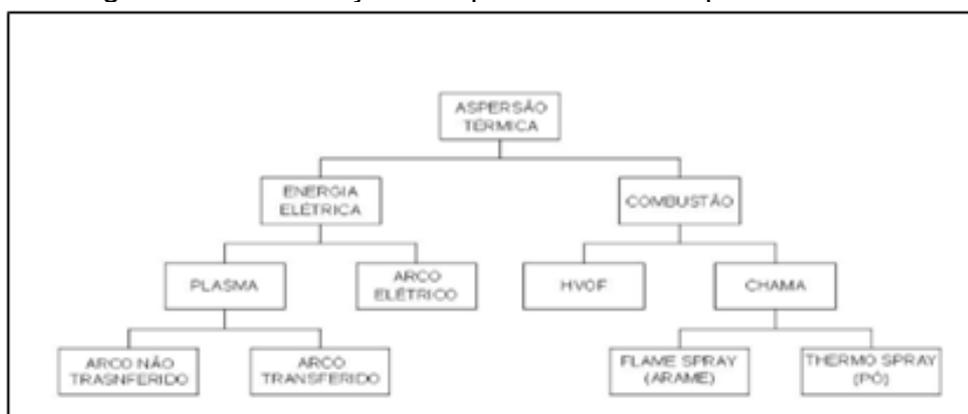
Figura 4: Desenho esquemático do processo de aspersão



Fonte: Adaptado de Daryl 2004 apud Zimmer 2009.

Os processos de aspersão térmica são classificados em dois grupos sendo que um distingue-se do outro porque um utiliza a chama e outro utiliza a energia elétrica como gerador de plasma. A Figura 5 apresenta a classificação dos processos de aspersão térmica.

Figura 5: Classificação dos processos de aspersão térmica



Fonte: Adaptado de Paredes, 2009.

Na classificação apresentada podem ser incluídos os processos “*Combustion-Arc*” e “*Coald Spray*” que são processos que basicamente consistem na utilização de uma pequena câmara de combustão interna a pistola e interior ao arco que gera gases de combustão com temperatura e pressões elevadas (PAREDES, 2009).

Para Zimmer (2009) a maior vantagem é a habilidade da maioria dos processos de aspersão térmica aplicar revestimentos a substratos sem significativo aporte de calor ao substrato. Então, materiais com elevado ponto de fusão, como tungstênio, podem ser aplicados sem alterar suas características pelo calor.

2.3.1 Aspersão Térmica a Plasma

A aspersão (pulverização) térmica a plasma foi desenvolvida a partir de exigências apresentadas pela indústria aeroespacial quando revestimentos de alta qualidade que faziam uso de carbonetos e óxidos se tornaram necessários sobre motores e turbinas de foguetes em geral (MACHADO, 1996).

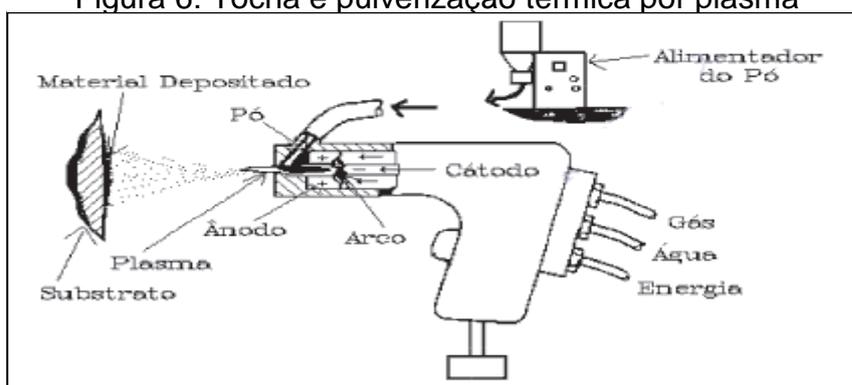
Na aspersão térmica a plasma existem dois modos de formação de plasma arco transferido e o não-transferido: No modo de arco transferido, o arco atinge a peça de trabalho que fecha o circuito elétrico. No modo de arco não transferido, o arco é estabelecido e mantido entre o eletrodo e o orifício constrito, desta forma o plasma é forçado através do orifício pelo gás e a peça não faz parte do circuito elétrico. O calor útil é obtido somente do jato de plasma, sendo conhecido como processo de aspersão térmica de plasma spray (PAREDES, 2009).

Os processos de arco transferido e arco não transferido são descritos de maneira mais detalhada por Paredes (2009):

- No processo PTA (“*Plasma Transferred Arc*” – Plasma de Arco Transferido), adiciona-se ao processo de aspersão a plasma a capacidade de aquecimento e fusão superficial do substrato. Desta forma pode-se dizer que é uma combinação de processos de soldagem e aspersão térmica.
- No processo de Aspersão Térmica por plasma de arco não-transferido APS (“*Air Plasma Spraying*”) o material para revestimento da peça é aplicado em forma de pó e utiliza o calor de um arco plasma para provocar a fusão.

Conforme Machado (1996) na aspensão por plasma a maioria das vezes é utilizado para a produção do plasma o modo de arco não-transferido, ou seja, o arco é formado entre o eletrodo geralmente de tungstênio e o bocal de cobre refrigerado por água. Além disso, a tocha usada para o direcionamento e formação do plasma deve sofrer algumas modificações para a aplicação do consumível (material do revestimento) em pó. A Figura 6 mostra um desenho esquemático do processo de pulverização térmica.

Figura 6: Tocha e pulverização térmica por plasma



Fonte: Adaptado de Machado, 1996.

São necessários dois gases na tocha de plasma, sendo o primário aquele que forma o plasma e o secundário um gás de proteção. Geralmente os gases utilizados para a formação de plasma (primários) são; nitrogênio, argônio, hélio e hidrogênio. Já para gases secundários são utilizados o ar comprimido, o oxigênio, entre outros. (MACHADO, 1996).

3 METODOLOGIA

A metodologia é apresentada em duas etapas, a primeira descreve o método com que o projeto foi desenvolvido e a segunda etapa descreve o funcionamento da tocha de plasma, seus componentes, sua aplicação no processo de aspersão térmica, os parâmetros utilizados para a realização dos testes e os materiais e equipamentos utilizados na fabricação e realização dos testes da mesma.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Para realizar a modelagem dos principais componentes da tocha de plasma, foi utilizado o software “*Solid Works 2013*”, uma ferramenta de auxílio para desenho e montagem de projetos muito utilizada pela engenharia atualmente. Com base em projetos e especificações referentes ao processo de aspersão térmica por tocha de plasma já existentes, foi-se dimensionada a tocha de plasma.

Após ter o projeto definido, deu-se início a fabricação dos componentes, sendo que os mesmos foram fabricados na Faculdade Horizontina - FAHOR, a qual disponibilizou máquinas e ferramentas necessárias para realização do trabalho, além de contar com o auxílio de um técnico em mecânica, professor orientador e componentes do grupo para fabricação dos componentes, montagem final e realização de testes com a tocha de plasma.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 Funcionamento da Tocha de Plasma

A tocha de plasma desenvolvida caracteriza-se pela formação de um jato de plasma com elevada densidade de energia. A tocha possui geometria coaxial sendo constituída por um catodo que é o eletrodo negativo (eletrodo de tungstênio), fixado através de um corpo fixador fabricado de cobre em formato cilíndrico, e um anodo que é o eletrodo positivo (eletrodo cobre plasma).

O corpo fixador do catodo e o eletrodo cobre plasma são ligados, e isolados eletricamente entre si através de um bocal isolador. Esta ligação permite que ocorra a formação do arco elétrico no interior da tocha entre o eletrodo positivo e o negativo, apresentando o formato coaxial da tocha projetada.

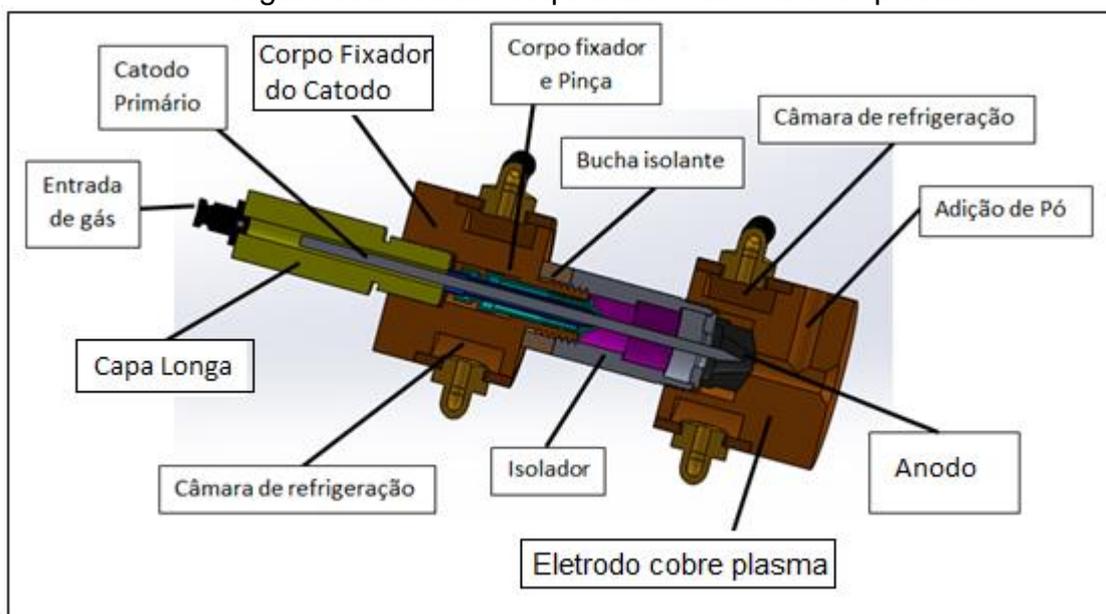
Para o funcionamento da tocha, inicialmente é injetado gás argônio no interior da mesma através da entrada de gás. O gás atravessa a capa longa e também o corpo fixador do catodo, que além de fixar o catodo possui as entradas de refrigeração por onde é injetada água. No interior da tocha o gás é aquecido e ionizado através da passagem pela descarga elétrica gerada por uma fonte de solda TIG que tem intensidade de corrente elétrica que varia de zero até duzentos e vinte amperes. Este gás ionizado ao entrar em contato com o catodo (eletrodo de tungstênio) forma o plasma que é expelido em formato de jato.

A adição de substrato para realização da aspensão térmica a plasma é realizada através de um orifício que se localiza na extremidade do corpo fixador do anodo, sendo que o substrato adicionado para aspensão pode ser em pó ou em formato de arame.

3.2.2 Estrutura da Tocha de Plasma

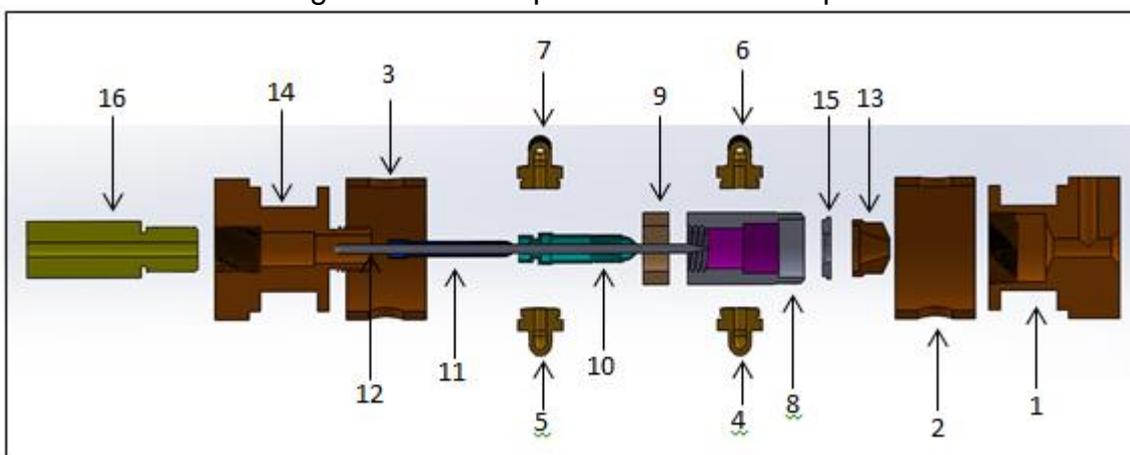
A Figura 7 mostra o desenho esquemático da tocha de plasma. Os principais componentes do dispositivo são um anodo confeccionado de cobre com câmara de refrigeração e um catodo, sendo um eletrodo de tungstênio de diâmetro 3,2 mm e comprimento 150 mm com extremidade cônica de 60°. O catodo é fixado pelo corpo fixador e uma pinça, e é refrigerado através das câmaras de refrigeração a água e isolado eletricamente. Foram utilizadas luvas de cobre para formar as câmaras de refrigeração. O gás de trabalho é adicionado à tocha através da entrada de gás, localizada na capa longa da tocha.

Figura 7: Desenho esquemático da tocha de plasma



Os componentes constituintes da tocha de plasma são apresentados através da Figura 8, que apresenta uma vista explodida da tocha.

Figura 8: Vista explodida da tocha de plasma



Os componentes da tocha de plasma são compreendidos em:

Capa Longa (16) fabricada de alumínio, com sua extremidade roscada tem a função de comprimir a pinça (11), que possui um rasgo em sua extremidade cilíndrica, contra o corpo fixador (10), cujo interno apresenta formato cilíndrico, garantindo assim a fixação do cátodo.

Cátodo (12) caracterizado por ser um eletrodo coaxial de tungstênio AWS Eth- 2, com 150 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro, com chanfro cônico em

sua extremidade de 60°. O mesmo está conectado a câmara de refrigeração através do corpo fixador e pinça.

Anodo (13) caracteriza-se por ser um bico de contato de plasma, cilíndrico em forma de câmara com chanfro cônico de 60°. O bico é fabricado de cobre.

Câmara de refrigeração e fixador do catodo (14) caracterizado por ser um corpo cilíndrico com um rebaixo que forma a câmara juntamente com a luva (3), ambos fabricados de cobre. Este componente possui uma rosca interna onde é montado o fixador (16) e uma rosca externa onde é montado o isolador (8).

Câmara de refrigeração e fixador do anodo (1), caracterizada por ser um corpo cilíndrico com um rebaixo que forma a câmara juntamente com a luva (2), ambos fabricados de cobre. Este componente possui um interno cônico onde é montado o anodo (13), e em sua extremidade há um furo onde é feita a injeção do material em pó ou arame.

Bucha isolante entre os ânodos (9), fabricado em polímero, e isolador (8) fabricado a partir de um bocal MIG/MAG com isolamento.

Arruela (15) faz a adaptação entre o isolador (8) e o anodo (13), fabricada de cobre.

Conectores do sistema de refrigeração (4), (5), (6) e (7), são conectados nas luvas (2) e (3) e também conectados a mangueiras que são responsáveis pela entrada e saída da água.

A Figura 9 apresenta a tocha de plasma desmontada, com as peças constituintes do projeto sendo que o detalhamento das mesmas é encontrado no ANEXO A.

Figura 9: Peças constituintes da tocha de plasma

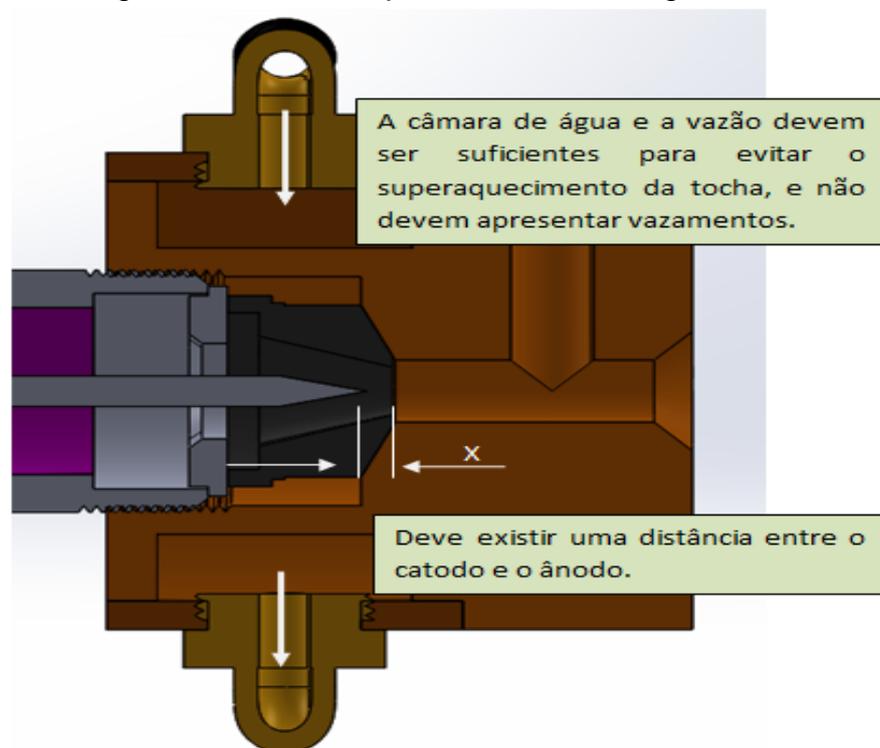


Após a fabricação de todas as partes constituintes da tocha de plasma, foi dado início ao processo de montagem da mesma. Os componentes da tocha de

plasma foram fabricados com ligações roscadas, para facilitar sua montagem e desmontagem além de futuras manutenções e trocas de componentes que sofrem desgaste ao longo de sua utilização.

Alguns pontos importantes foram levados em consideração durante a montagem para garantir um melhor funcionamento e maior vida útil do equipamento, como garantir o isolamento entre o catodo e o anodo, apresentar um sistema de refrigeração eficiente, sem vazamentos, o catodo deve apresentar uma ponta cônica e não pode ultrapassar o anodo, conforme Figura 10.

Figura 10: Pontos importantes na montagem da tocha



A montagem da tocha de plasma foi realizada no Laboratório de Soldagem da FAHOR. Para realizar a montagem foram utilizadas ferramentas manuais, como chaves de fenda, alicates, fita veda rosca e colas vedantes, o que facilitará na desmontagem da tocha para futuras manutenções e trocas de componentes. A Figura 11 apresenta a tocha de plasma montada.

Figura 11: Tocha de Plasma montada



3.2.3 Caracterização da Tocha de Plasma.

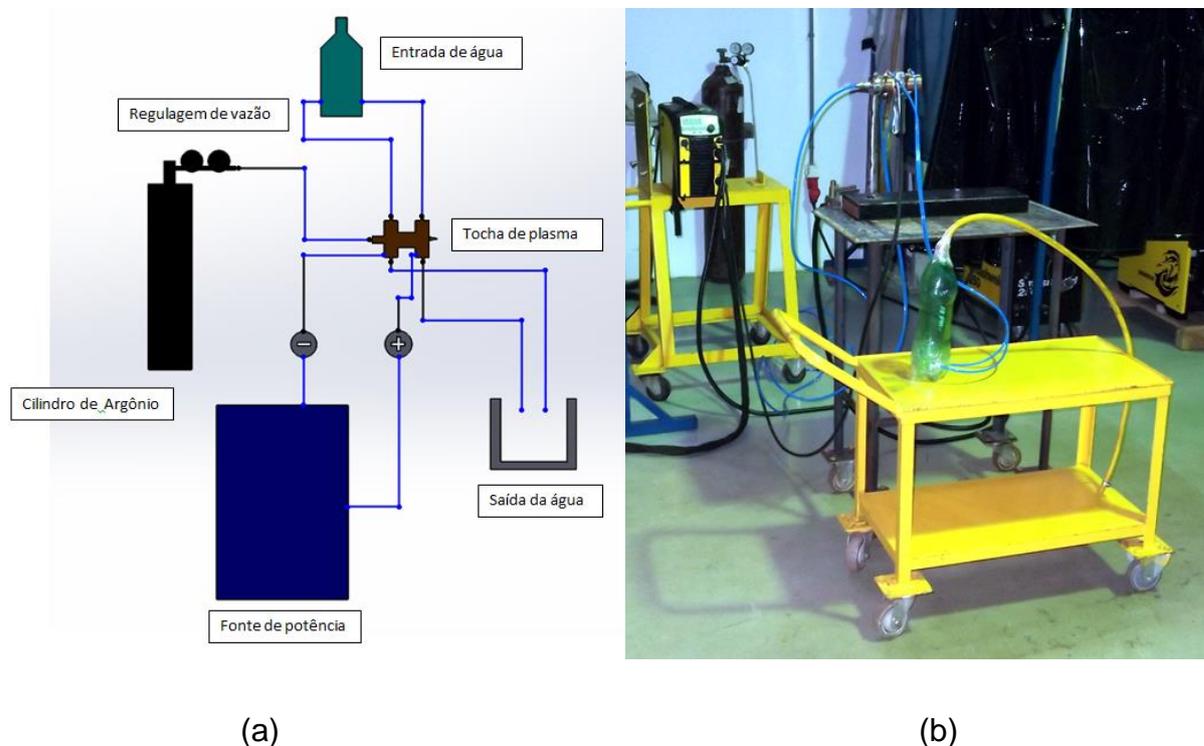
Os parâmetros determinados para a realização dos testes utilizando a tocha de plasma foram a vazão do gás e a intensidade da corrente, conforme Quadro 4. A partir destas variáveis foram analisados o comprimento e aparência do jato de plasma expulso para fora da tocha.

Quadro 4- Variáveis com os respectivos valores utilizados nos testes com a tocha de plasma.

N°	Variável	Unidade	Nível	Valor
1	Intensidade da corrente elétrica	A	1	100
			2	150
			3	220
2	Vazão do Gas (Argônio)	l/min	1	10
			2	14
			3	25

A Figura 12 apresenta o desenho esquemático dos componentes utilizados para realização dos testes da tocha de plasma. O sistema é composto pelos seguintes componentes: Uma fonte de potência de característica corrente constante (tombante), um cilindro de argônio com regulagem de vazão, e um sistema de refrigeração.

Figura 12: Esquema de funcionamento da tocha de plasma: (a) desenho esquemático dos componentes utilizados para o funcionamento da tocha e (b) fotografia do aparato experimental.



3.2.4 Equipamentos Utilizados

A tocha de plasma foi fabricada, montada e testada nos laboratórios da FAHOR, este tópico apresenta as principais máquinas e equipamentos utilizados para o desenvolvimento do projeto.

Foi utilizada uma fonte de potência de característica corrente constante para o acionamento da tocha de plasma. Essa fonte é proveniente de um aparelho de solda TIG e possui um intervalo de corrente elétrica de 0 – 220 Ampères. A Figura 13 mostra a fonte de potência utilizada nos testes.

Figura 13: Fonte de energia para acionamento da tocha de plasma.



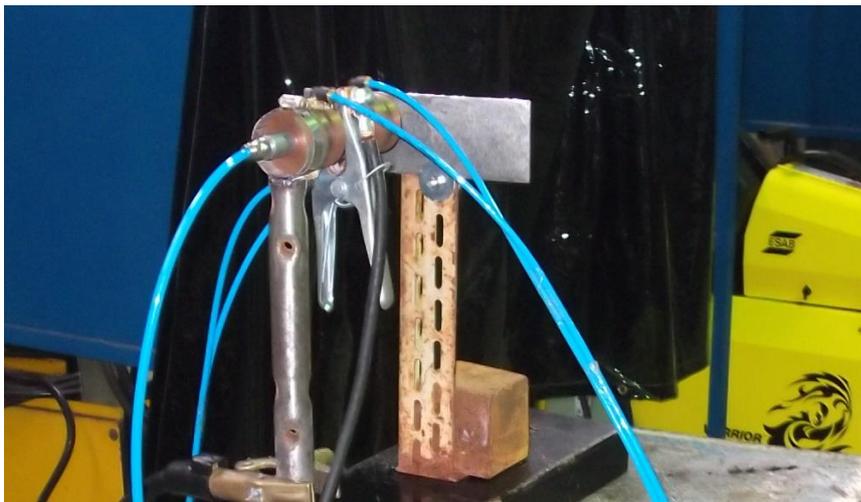
O sistema de injeção de gás na tocha de plasma é composto por um cilindro de argônio com uma válvula reguladora de vazão que controla o fluxo da entrada de gás na tocha de plasma conforme Figura 14, este sistema permite vazões de até 25 l/min.

Figura 14: Cilindro de gás argônio com válvula reguladora de vazão.



O sistema de arrefecimento é realizado através de duas câmaras de refrigeração, que são alimentadas por uma fonte externa, formando um sistema aberto de refrigeração. A Figura 15 apresenta o sistema de arrefecimento da tocha de plasma, onde as duas mangueiras azuis superiores fazem a entrada da água e as inferiores a saída.

Figura 15: Sistema de arrefecimento da tocha de plasma.



4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são apresentados em duas etapas. A primeira etapa consiste em apresentar os resultados obtidos com os experimentos iniciais de funcionamento da tocha de plasma construída, onde no decorrer dos procedimentos alguns problemas foram encontrados e solucionados. A segunda etapa consiste em apresentar os resultados obtidos no tratamento das superfícies de corpos de prova por meio de aspersão térmica com o uso da tocha de plasma, além da utilização da mesma em outros processos.

4.1 TESTES INICIAIS COM A TOCHA DE PLASMA

Os testes iniciais constituíram-se em analisar a funcionalidade da tocha de plasma. Foi analisada a formação do arco elétrico, o jato de plasma formado, possíveis vazamentos de gás, isolamentos elétricos e todo o sistema de refrigeração.

Desde a montagem da tocha foram constatados alguns problemas que precisariam de soluções imediatas ou acabariam ocasionando o mau funcionamento da tocha. Primeiramente foi verificada que haveria necessidade da construção de um suporte estilo bancada para tocha, sendo que este suporte também poderia ser utilizado isolado da mesma. Este problema foi resolvido com a confecção de um suporte o qual é mostrado na Figura 16. Os materiais para a construção do referido suporte foram encontrados no almoxarifado três pertencente ao laboratório da FAHOR- Faculdade Horizontina, e a solda dos componentes foi terceirizada.

Figura 16: Bancada suporte para tocha.

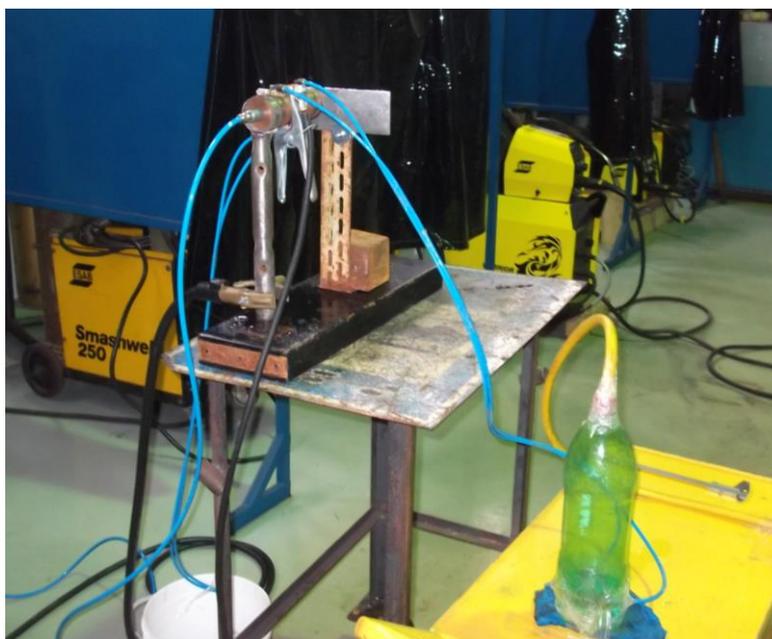


Após a montagem da tocha (corpo) e a sua fixação no suporte, outro problema encontrado foi no sistema de refrigeração. Havia necessidade de um sistema de refrigeração com uma vazão que evitasse o superaquecimento dos

componentes. No entanto, ao conectar as mangueiras na entrada de refrigeração verificou-se que não era possível controlar a vazão da água. A solução para este problema foi o uso de um recipiente alternativo, uma garrafa pet, onde a partir da mesma era possível ver e regular a vazão da mangueira de entrada, conforme Figura 17.

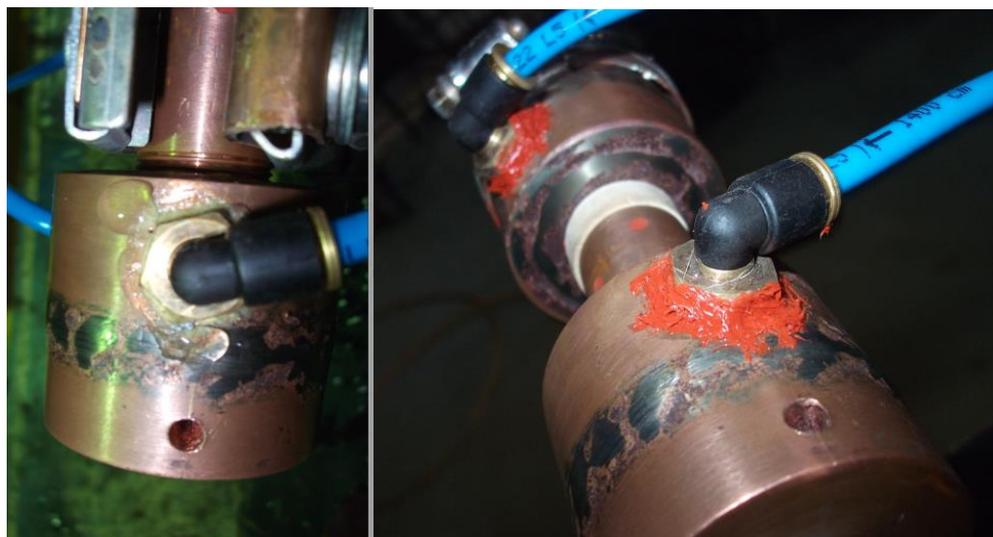
Foram feitos dois furos de, aproximadamente, quatro milímetros de diâmetro nas laterais da garrafa pet. Nestes furos foram fixadas as mangueiras das duas entradas de refrigeração da tocha, na parte superior do recipiente foi feito um furo de diâmetro de dez milímetros e neste foi fixada a mangueira central de entrada da água, assim podendo controlar a vazão de entrada da água na garrafa pet, e de saída nas mangueiras, tornando o arrefecimento da tocha constante e eficiente.

Figura 17: Garrafa pet utilizada com recipiente para água de refrigeração.



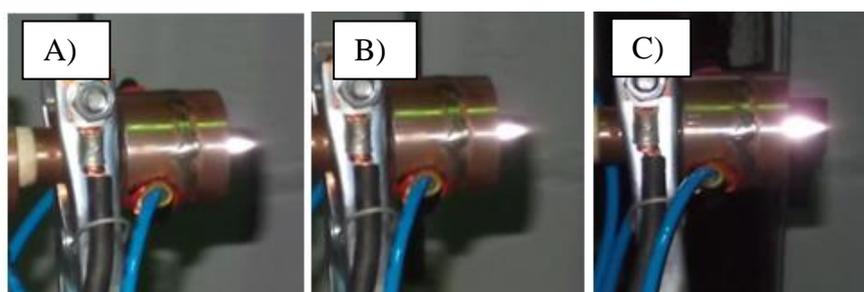
Já com a tocha em funcionamento outro problema encontrado foi à existência de vazamentos nas conexões entre a tocha e as mangueiras de refrigeração, conforme Figura 18. Este problema foi resolvido com a adição de cola siliconada resistente a altas temperaturas nas conexões de entrada da água, onde se encontravam os vazamentos.

Figura 18: Conexão com Vazamento e Conexões com cola Siliconada.



Com relação ao arco elétrico o mesmo apresentou um jato de plasma aparentemente estável. Convém lembrar que para abertura do arco foi usado um sistema de alta frequência gerado pela fonte de potência. Ressalta-se ainda que a intensidade do jato de plasma é proporcional a regulagem da corrente elétrica da fonte de potência e a vazão do gás. Quanto maior a corrente elétrica e maior a vazão do gás maior foi o jato de plasma formado. A Figura 19 apresenta, de maneira visual, os comprimentos do jato de plasma que foram alcançados alterando a vazão do argônio e a corrente elétrica da fonte. A Figura 19 A apresenta o jato de plasma formado com uma corrente elétrica de 100 ampères e uma vazão de gás de 10 litros por minuto. A figura 19 B apresenta o jato de plasma formado com uma corrente de 150 ampères e uma vazão de gás de 14 litros por minuto. Já a Figura 19 C apresenta o jato de plasma formado por uma corrente elétrica de 220 ampères e uma vazão de gás de 25 litros por minuto.

Figura 19: Comprimento do Jato de Plasma.



Outro problema encontrado foi à injeção do metal em pó. Houve a necessidade da confecção de um furo com diâmetro de cinco milímetros na

extremidade do corpo fixador do anodo, com profundidade até o centro do canal de plasma. Após a furação foram feitos novos testes, onde outro problema surgiu, parte do material do pó de adição fundia nas bordas do furo, entupindo o mesmo, impedindo assim que o processo de aspersão térmica ocorresse.

Este problema foi resolvido com a alteração das vazões de gás e da corrente elétrica da fonte, a fim de encontrar um ponto em que o jato de plasma realizasse a aspersão evitando a fusão do material as suas bordas. A Figura 20 apresenta a tocha de plasma no processo de aspersão térmica.

Figura 20: Aspersão térmica realizada com a tocha de plasma.



Após a resolução de todos os problemas, a tocha foi avaliada e novos testes foram realizados. A tocha de plasma foi desmontada para verificação do desgaste de seus componentes internos, onde foi verificado que os principais componentes afetados foram a arruela de adaptação e o anodo, conforme Figura 21.

Pode - se observar que esses dois componentes apresentaram desgaste em sua superfície muito provavelmente provocado pelo alto calor a que foram submetidos quando houve a abertura do arco plasma.

Figura 21: Tocha de plasma desmontada após série de testes.



4.2 APLICAÇÕES DA TOCHA DE PLASMA EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Os resultados obtidos com a aplicação do dispositivo em processos de fabricação foram satisfatórios, isto é, além da aplicação do mesmo no processo de aspersão térmica, que é o foco principal do presente estudo ainda foi possível a realização de furos através do jato de plasma produzido pela tocha, porém estudos para otimização destes processos com o uso da tocha construída devem ser realizados.

4.2.1 Uso da Tocha na Aspersão Térmica

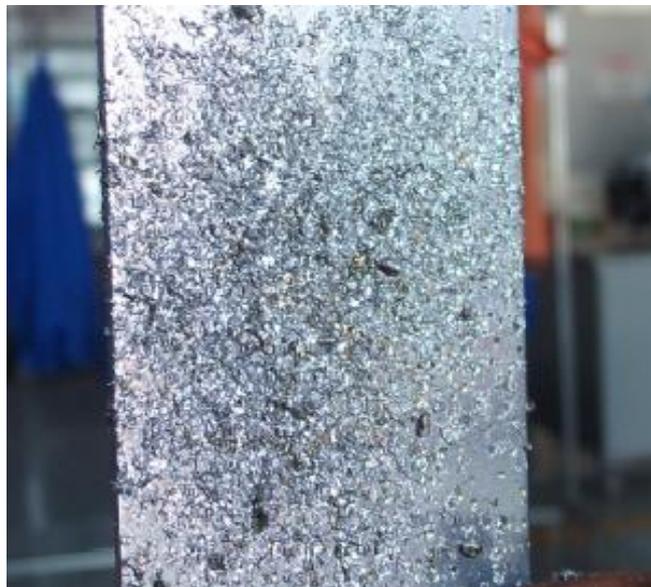
O resultado da aplicação do dispositivo no processo de aspersão térmica foi satisfatório, pois foi possível a realização de aspersão térmica com a tocha de plasma que foi desenvolvida. O primeiro experimento realizado foi em um corpo de prova de material aço SAE 1020 com formato retangular. Para este experimento os seguintes parâmetros foram utilizados; intensidade da corrente elétrica de 150 A; vazão do gás de 20 l/min; distância do corpo de prova até o bocal de 100 mm e material de adição alumínio em formato de fio. Após a realização do experimento verificou-se que houve deposição de material sobre o corpo de prova através da aspersão, criando uma camada de material com acabamento superficial semi-rugoso e irregular. A Figura 22 apresenta o corpo submetido a aspersão térmica.

Figura 22: Acabamento superficial no corpo de prova de aço 1020, após aspersione térmica com alumínio.



Em outro experimento realizado, o corpo de prova utilizado foi de material alumínio sendo o material de adição estanho em formato de fio. Os parâmetros utilizados neste experimento foram os mesmos do experimento com o corpo de prova de aço SAE 1020. Ao final do experimento verificou-se que houve deposição de material sobre o corpo de prova utilizado, tornando a superfície do mesmo rugosa porém mantendo um formato regular, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23: Acabamento superficial no corpo de prova de alumínio, após aspensão térmica com estanho.



4.2.2 Utilização da Tocha de Plasma para Realização de Furos

Os furos realizados com a tocha de plasma apresentaram irregularidades devido ao jato de plasma formado não ter força suficiente para expulsar o material fundido. No experimento realizado foram feitos dois furos em um corpo de prova de latão de aproximadamente 1 mm de espessura, com os seguintes parâmetros; intensidade da corrente elétrica de 200 A; vazão do gás de 20 l/min e distancia do bocal de 5mm. Os furos apresentaram formato irregular e rebarbas como mostrado na Figura 24, e o tempo de corte foi de aproximadamente 40 segundos, supõe-se que chapas com espessuras maiores a 1,5 mm não será possível realizar furos com a tocha de plasma a essas configurações.

Figura 24: Corpo de prova furado com tocha de plasma.



5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos, os estudos bibliográficos, e as análises realizadas, conclui-se que:

1. Foi realizado o projeto, a construção a caracterização e a aplicação de uma tocha de plasma.
2. A tocha de plasma construída apresentou a formação de um jato de plasma estável sendo que quanto maior a vazão de gás e a intensidade da corrente aplicadas mais potente foi o jato.
3. A tocha de plasma mostrou-se capaz de realizar aspensão térmica em corpos de prova de diferentes materiais. Foram realizados testes com corpos de prova de aço SAE 1020 onde foi aspergido o material alumínio em formato de arame e verificou que a aspensão térmica foi realizada. Também foi realizado teste com corpo de prova de alumínio onde foi aspergido material estanho em formato de arame e a aspensão térmica também pode ser verificada.
4. Os furos realizados com a tocha de plasma que foi projetada e construída apresentaram irregularidades devido ao jato de plasma formado não possuir força para expulsar o material fundido de forma instantânea. Supõe-se que chapas e/ou corpos de prova de espessura maior a 1,5 mm não sejam possíveis de furar com a tocha em condições atuais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos, os seguintes estudos podem ser realizados:

- Estudos nos corpos de prova utilizando equipamentos adequados, verificando quais propriedades do material sofreram alteração.
- Realizar testes com fontes de maior potência, gerando assim diferentes intensidades de correntes elétricas.
- Com a utilização de equipamentos adequados, medir a variação do comprimento do jato da tocha de plasma com diferentes intensidades de corrente e vazão de gás.
- Implantar um método de alimentação do material em pó mais eficiente e controlado, a fim de garantir uma maior qualidade e uniformidade no processo.
- Desenvolver dispositivo para movimentar a tocha de plasma, podendo assim manuseá-la para realizar cortes ou furos específicos.
- Caracterizar a tocha quanto as curvas características de tensão e corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELI, Luís L. P., **Comparação de características do processo de corte a plasma com o oxicorte.** Piracicaba, 2011. Disponível em <<http://brasil.fumep.edu.br/~phlibiblio/10023478.pdf>> Acesso em: 05 out. 2013.
- ANGELES, Pablo Jenner Paredez. **Estudo de Tochas de Plasma através da Teoria da Similaridade.** 2003.100 f. Dissertação (Mestrado em Física) – UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.
- BRACARENSE, Aleixandre Queiroz. **Soldagem a Plasma – PAW.** Universidade Federal de Minas Gerais: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica; Disciplina de Processos de Soldagem. Belo Horizonte, 2000.
- GALIZA, José Aldo. **Processo de Corte a Arco Plasma.** Piracicaba, 2010. (Apostila).
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE).** São José dos Campos, 2005.
- LIMA, Carlos Roberto Camello; SOUZA, Natália Ferraresso Cardoso; CAMARGO, Flávio. **Estudo das Características de Revestimentos Poliméricos Aplicados por Aspersão Térmica para Proteção contra Desgaste e Corrosão de Substratos Metálicos.** São Paulo, 2012.
- LERMEN, Richard Thomas. **Desenvolvimento de uma Tocha de Plasma Híbrida para o Processamento de Materiais.** 2011. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- LERMEN, Richard Thomas. **Soldagem e Corte com Dispositivo Magnetoplasmadinâmico e Sistemas Híbridos.** UFRGS- Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica, e de Materiais: Exame de Qualificação para a Obtenção do Título de Doutor em Engenharia. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2009.
- MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre: Editado pelo Autor, 1996. Cap. 18. P. 362-369.
- PAREDES, Ramón S. Cortéz. **Aspersão Térmica.** Curitiba, 2009. (Apostila).
- SILVA, Gilson Garcia Da. **Apostila de Processamento de Materiais por Plasma.** Rio Grande do Norte, 2012. (Apostila).
- UERJ – UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Tecnologia de Plasma.** Rio de Janeiro, 2011. (Relatório)
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H de. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2004.

ZIMMER, André, **Influência da Aspersão Térmica por Plasma e suas Altas Taxas de Resfriamento na Cristalinidade de Fases do Sistema Al₂O₃-TiO₂-Al₂TiO₅**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2009. Disponível em < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18584/000730280.pdf?sequence=1>> Acesso em: 25 ago 2013

Figura 27: Luvas do sistema de arrefecimento.

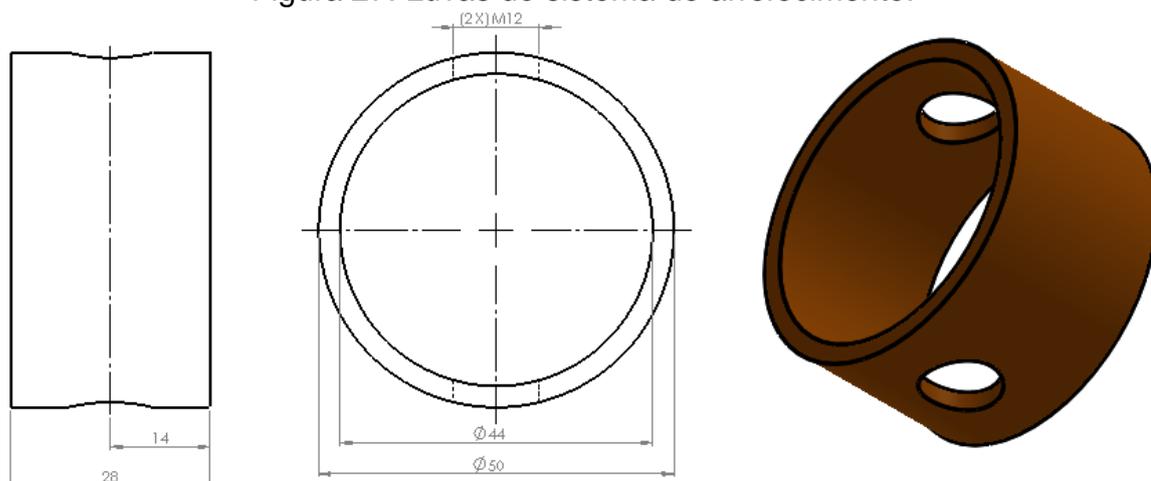


Figura 28: Anodo

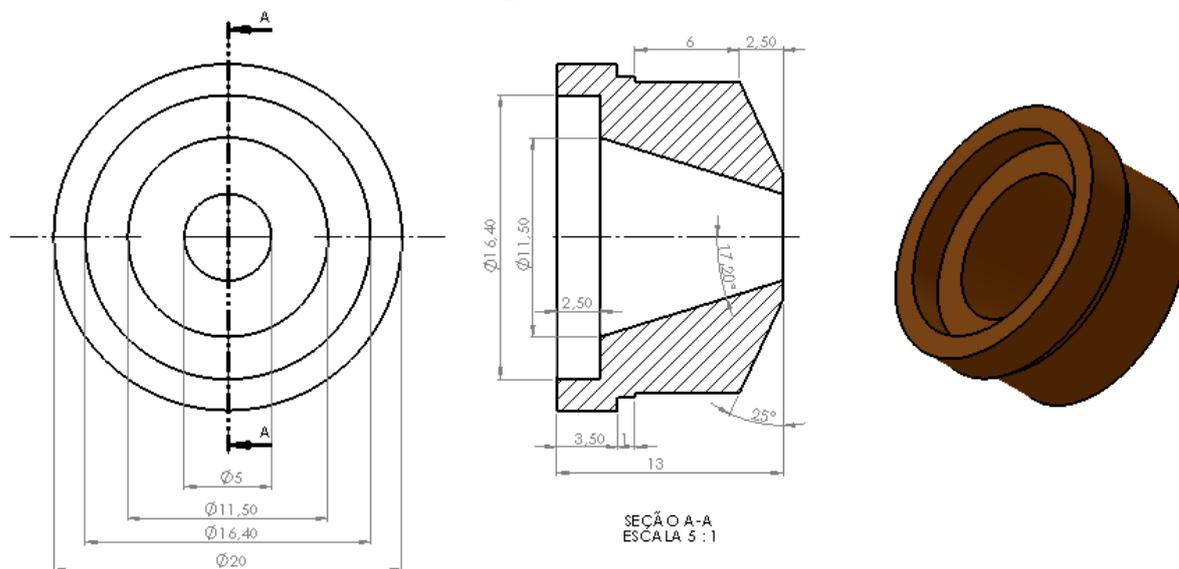


Figura 29: Bucha isolante.

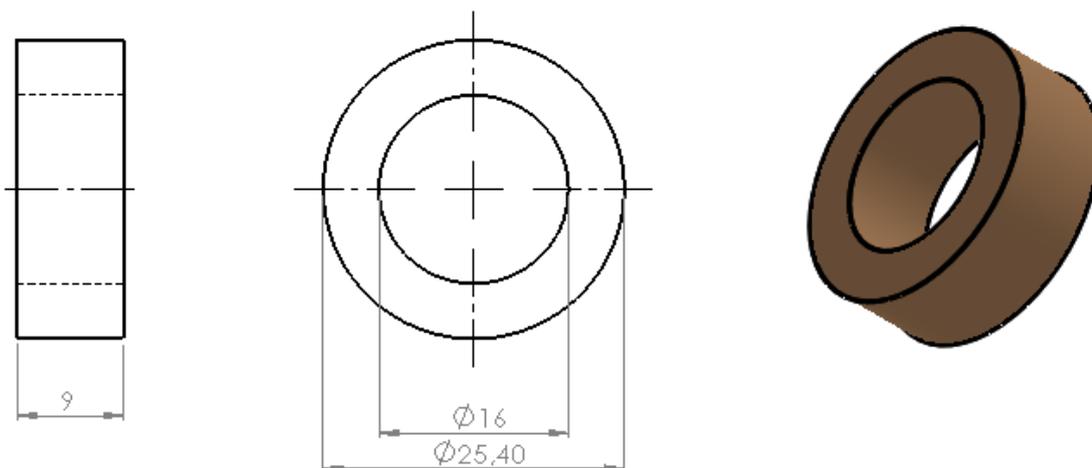


Figura 30: Arruela.

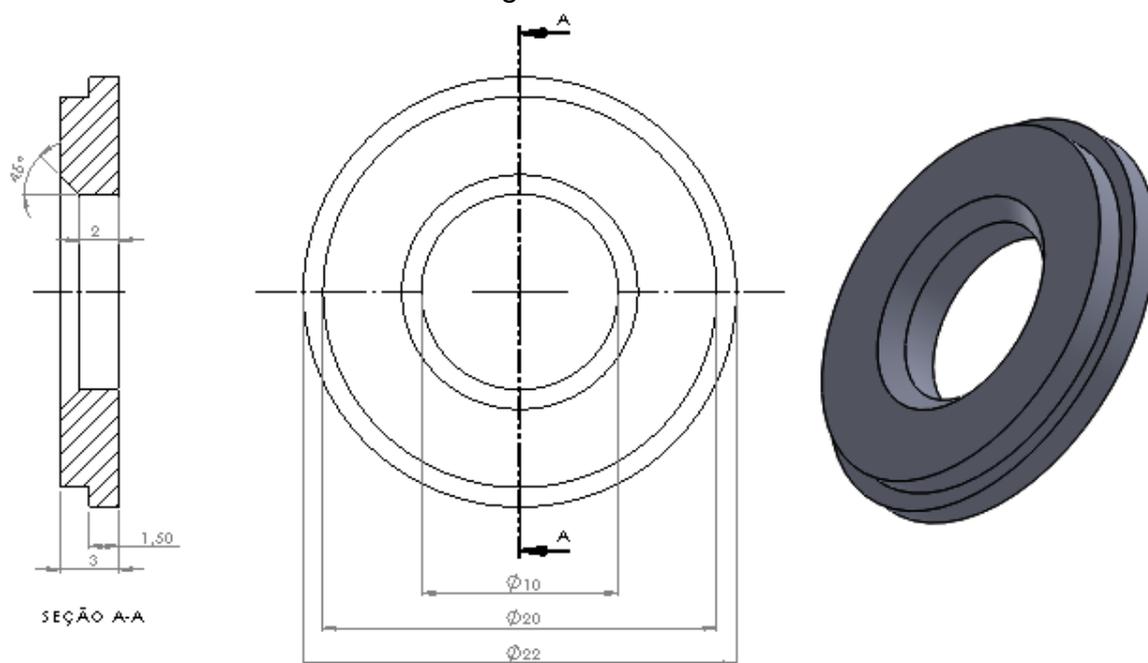


Figura 31: Bocal de vedação.

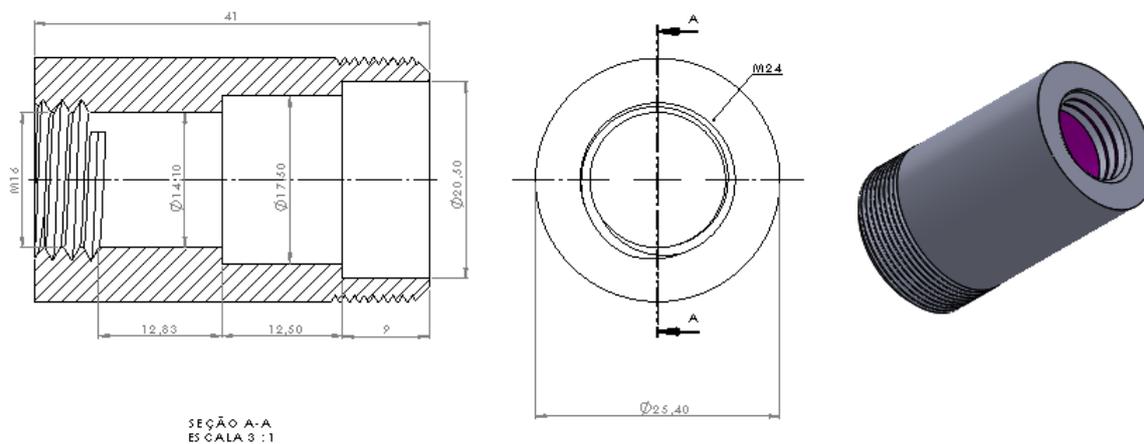


Figura 32: Conector do sistema de arrefecimento.

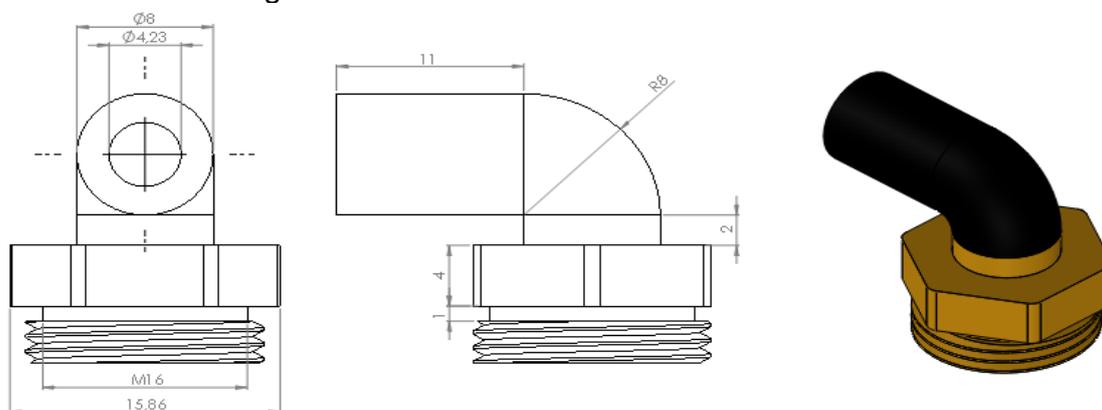


Figura 33: Catodo.



Figura 34: Corpo fixador.

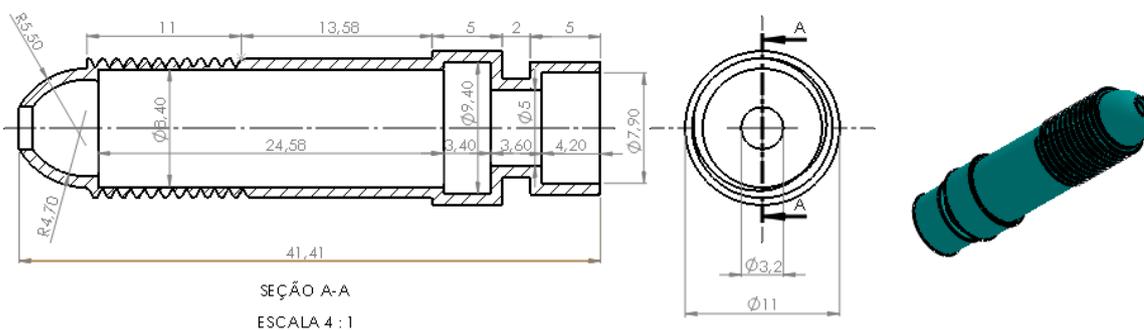


Figura 35: Pinça.

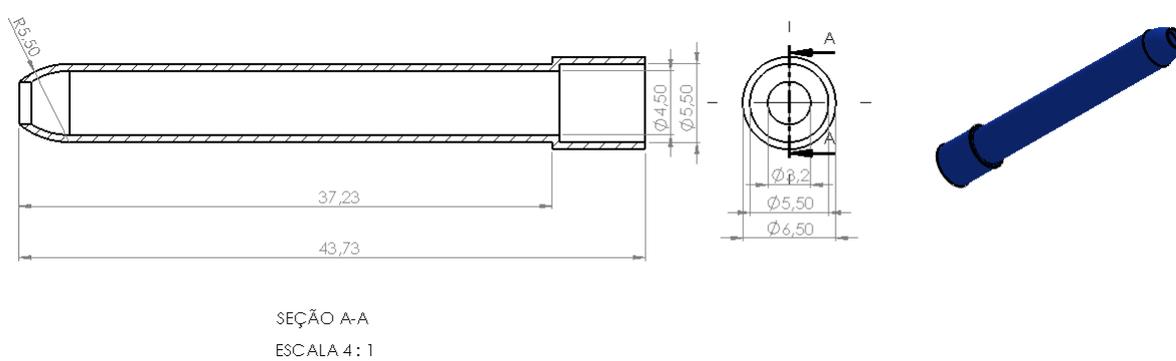


Figura 36: Capa Longa e Entrada do gás.

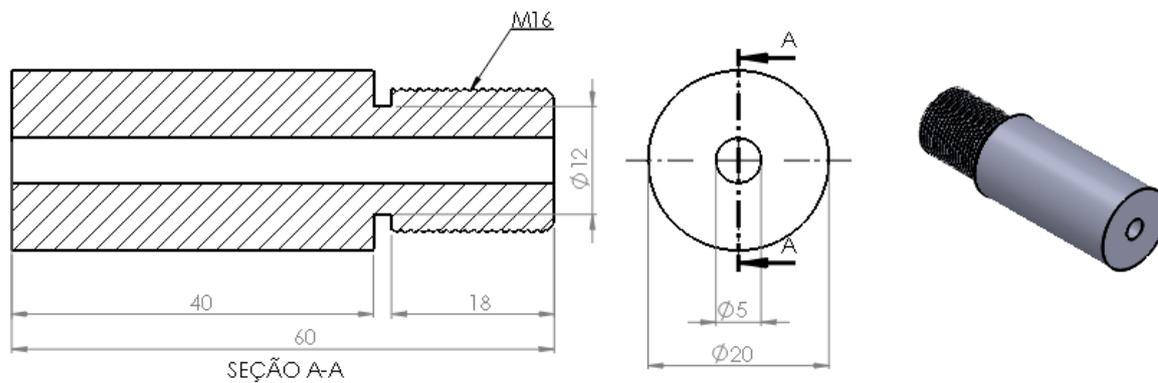


Figura 37: Montagem completa da Tocha de Plasma.

