

## **ESTUDO DO PROCESSO PLASMA COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME**

<sup>(1)</sup> **Moisés Alves de Oliveira**  
<sup>(2)</sup> **Jair Carlos Dutra**

### **RESUMO**

Neste trabalho é apresentada uma avaliação do processo PLASMA com alimentação automática de arame, visando sua utilização na recuperação de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação. Para tanto, foi quantificada a influência da distância bocal/peça sobre a queda de tensão no arco e na largura da zona fundida, bem como determinada a correlação entre corrente e taxa de alimentação de arame. Verificou-se que tanto a tensão, como a geometria da zona fundida, são influenciadas pela distância bocal/peça, mostrando que o processo PLASMA é tão sensível a variações no comprimento do arco quanto o TIG. Os estudos mostram, ainda, que o posicionamento do arame, em relação à coluna do arco PLASMA, exerce influência significativa sobre a taxa de alimentação de arame, a largura e a molhabilidade dos depósitos.

**Palavras-chave:** Soldagem PLASMA; PLASMA com Adição Automática de Arame; Recuperação de Turbinas Hidráulicas.

### **ABSTRACT**

In this paper an evaluation of Cold Wire PLASMA Arc Welding is shown. This study was carried out in order to use this welding process in to repair procedures of hydraulic turbines blades damaged by cavitation erosion. The experiments were designed to quantify the influence of stand-off distance on arc voltage drop and on melted zone width, as the same as define the relationship between welding current and wire feed rate. It was verified that arc voltage and melted zone width are influenced by stand-off distance, showing that PLASMA Arc welding process is so sensitive as GTAW to a change on arc length. Beside this, the results showed that wire feed rate, weld bead width and wet angle are strongly influenced by the position of wire feeding along the arc column extent.

**Key-Words:** PLASMA Arc Welding; Cold Wire PLASMA Arc Welding; Hydraulic Turbines Repair.

<sup>(1)</sup> Eng. Mecânico, Mestrando em Eng. Mecânica - LABSOLDA/UFSC  
Campus Universitário CP 476, Trindade, Fpolis, SC, CEP : 88040-900. [moises@labsolda.ufsc.br](mailto:moises@labsolda.ufsc.br)

<sup>(2)</sup> Dr. Eng., LABSOLDA/UFSC  
[jdutra@labsolda.ufsc.br](mailto:jdutra@labsolda.ufsc.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Recentemente, o LABSOLDA/UFSC desenvolveu a técnica de soldagem MIG/MAG com pulsação térmica para a recuperação de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação<sup>(1)</sup>. Apesar do salto na qualidade e produtividade obtidos<sup>(2)</sup>, novas técnicas, como a soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame<sup>(3)</sup> e o MIG/MAG com Duplo Arame<sup>(4)</sup>, estão sendo estudados na busca por avanços ainda maiores.

Inserido neste contexto, surge a possibilidade de utilização do processo PLASMA com Alimentação de Arame. Seu desenvolvimento é voltado à otimização entre taxa de deposição e o aspecto geométrico dos depósitos objetivando, com isto, um aumento na produtividade.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Na operação de recuperação de turbinas por soldagem a arco, após o término da operação de enchimento da área atingida, uma operação de acabamento deve ser realizada para recuperar o perfil original da região. A existência de defeitos, superficiais ou internos, a relação entre a altura e a largura do cordão, além do tempo gasto em operações de retrabalho e acabamento, se tornam importantes parcelas na avaliação da produtividade. A situação se torna ainda mais crítica pelo fato dos depósitos serem feitos fora da posição plana, o que exige o controle da poça de fusão para evitar o escorrimento do metal líquido. A ocorrência deste escorrimento reduz a produtividade, tanto pelo desperdício de material e pela dificuldade que cria para a deposição de novas camadas, quanto pelo incremento no tempo despendido na operação de acabamento. Neste contexto, a avaliação de desempenho do processo de soldagem empregado não pode ser feita unicamente com base na taxa de deposição [kg/h], sendo necessário considerar todos os aspectos envolvidos na operação de reparo. Tomando-se por base este conceito mais amplo de produtividade, cria-se a justificativa para o estudo do processo plasma com alimentação de arame, já que este oferece características importantes<sup>(5,6)</sup>:

- 1 - Maior concentração de energia, permitindo uma soldagem com maiores velocidades de deslocamento da tocha;
- 2 - Maior estabilidade do arco, o que favorece a formação de cordões com geometria mais regular;
- 3 - Operações de retrabalho são menores em algumas aplicações;
- 4 - Maior facilidade para a soldagem com adição de arame, devido a maior distância tocha-peça;
- 5 - Pelo fato do eletrodo estar encapsulado no bocal, este não entra em contato com o arame de adição ou com a poça fundida, o que reduz o desgaste e permite um menor número de paradas para reafiação do eletrodo;

Além destas características, a literatura cita como vantagens do processo sua baixa sensibilidade a variações na distância bocal/ peça – DBP (fig. 1). Conforme apresentado, variações na DBP provocam pequenos efeitos na queda de tensão e na concentração de calor, assim como na largura da zona fundida. Considerando o interesse de mecanizar/ automatizar a operação de reparo de pás de turbinas, a qual envolve uma soldagem sobre uma superfície irregular, estas características se apresentam como favoráveis à utilização da soldagem PLASMA. Entretanto, para a verificar sua veracidade, as quais já haviam sido questionadas anteriormente em trabalhos conduzidos no LABSOLDA<sup>(7)</sup>, decidiu-se por mensurar os efeitos causados

pela distância tocha/peça na queda de tensão do arco e na formação geométrica da zona fundida. Além da quantificação dos efeitos da DBP, foram conduzidos ensaios com deposição de arame para determinar a relação entre corrente de soldagem e taxa de deposição, assim como o aspecto geométrico dos cordões produzidos na soldagem PLASMA com adição de arame.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Influência da Distância Tocha/Peça na Tensão de Arco**

Os primeiros ensaios foram conduzidos para avaliar a influência do comprimento do arco sobre a queda de tensão e as características geométricas da zona fundida. Para estes ensaios, a corrente foi mantida constante em 100 A, a vazão do gás de plasma (VGP) em 0,8 l/min e o gás de proteção em 8 l/min, sendo ambos argônio puro comercial. Foi utilizado eletrodo de Tungstênio com 2% de Tório, diâmetro de 4,7 mm e ângulo de ponta de 20°. As soldas foram feitas em corpos de prova de aço carbono ABNT 1020, 9,5 x 50 x 200 mm, com superfície usinada. Todos os ensaios foram conduzidos na posição plana, com bico de plasma com orifício de 3,2 mm. A distância bico/peça (DTP) foi convencionada como sendo a distância entre a extremidade do bocal constritor da tocha e a superfície do corpo de prova (figura 1). As distâncias utilizadas foram 3, 5, 10, 15 e 20 mm. Para verificar a influência do recuo do eletrodo em relação ao bocal, foram conduzidos ensaios com ajustes na variável de 0; 0,9; 2,3 e 3,6 mm. Visando permitir uma comparação de resultados, foi analisada a influência do comprimento do arco sobre a queda de tensão no processo TIG. Durante este experimento a corrente foi mantida no valor de 100 A, a vazão de gás de proteção: 8 l/min. Foi utilizado eletrodo de tungstênio com 2% de tório de 3,2 mm de diâmetro e 30° de ângulo de ponta. O comprimento do arco foi convencionado como sendo a distância entre a ponta do eletrodo e a superfície do corpo de prova. Foram utilizados os mesmos valores de distância (comprimento do arco) do ensaio para o processo plasma.

#### **3.2 Influência da Distância Tocha/Peça Sobre a Largura da Zona Fundida**

Para se estimar a influência da DBP sobre a largura e penetração do cordão foram realizados ensaios com as mesmas variáveis e condições listadas no item anterior, com exceção de VGP que variou segundo os valores 0,8; 1,4 e 2,0 l/min. A velocidade de soldagem que foi mantida a 20 cm/min.

#### **3.3 Ensaios com Adição Automática de Arame na Posição Plana**

Nos ensaios para determinar a relação entre a corrente e a velocidade de alimentação do arame, a vazão de gás de plasma foi fixada em 1,4 l/min e utilizado bocal constritor de 3,2 mm. Foi utilizado o arame AWS-E70S-6 (aramé maciço de aço carbono, diâmetro de 1,2 mm). A distância tocha/peça foi fixada em 6 mm, para melhor acomodar o arame entre o bocal e a peça, e o recuo do eletrodo foi mantido em 2,3 mm. A velocidade de soldagem foi mantida constante em 20 cm/min. Os ensaios foram conduzidos com a corrente de soldagem variando entre 100 e 150 A. A limitação da corrente inicial em 100 A se deu pelo fato de que, para correntes inferiores, não houve a fusão do material de base. Já o patamar superior de corrente foi limitado pelo valor nominal máximo estipulado pelo fabricante da tocha, quando se utiliza um bocal constritor com orifício de 3,2 mm.

### 3.4 Equipamentos

Para a condução dos trabalhos foram utilizados os equipamentos:

- Fonte de Soldagem microprocessada, operando com um módulo para a ignição e manutenção do arco piloto;
- Tocha de soldagem plasma com capacidade para 220A;
- Sistema de deslocamento de tocha microprocessado;
- Válvula para o controle de vazão do gás de plasma e medidores de vazão de gás;

Além dos equipamentos acima listados, dois adicionais foram desenvolvidos para a execução deste trabalho. O primeiro refere-se ao equipamento para a alimentação do arame, cuja principal característica consiste na possibilidade de sincronismo entre velocidade de alimentação e a corrente, com total liberdade no ajuste dos valores da velocidade de base e de pulso. O segundo equipamento desenvolvido corresponde ao suporte, adaptado à tocha PLASMA, para viabilizar a alimentação do arame (fig. 2).

Como requisitos para este desenvolvimento, definiu-se que o sistema deveria ser de fácil adaptação e manuseio, leve e durável. Como requisito adicional, o sistema deve oferecer boa rigidez, pois o desalinhamento do arame em relação ao arco plasma provoca falhas de fusão. Em todos os ensaios foram feitas aquisições do sinal de tensão, sendo utilizado, para tanto, um programa computacional instalado em um sistema portátil de aquisição de dados. Com exceção da tocha de soldagem, todos os demais equipamentos utilizados foram desenvolvidos no LABSOLDA.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 3 é apresentado um gráfico que permite identificar o efeito da variação da DBP sobre a queda de tensão no arco PLASMA. Os resultados indicam uma taxa de variação de 0,54 V/mm, sendo esta não influenciada pelo recuo (R) do eletrodo. Este valor se encontra muito próximo àquele obtido com o arco TIG, onde a taxa de variação foi de 0,55 V/mm (fig. 4). Confrontados os resultados, verifica-se que não se pode afirmar que o processo PLASMA seja menos sensível do que o processo TIG à variações no comprimento do arco, pois ambos apresentam a mesma taxa de variação (V/mm). Tal qual a variação na queda de tensão, a geometria da zona fundida mostrou-se dependente de DBP (fig. 5). Nesta situação, as maiores larguras foram obtidas com os menores valores de DBP, apesar da tendência de redução na queda de tensão. Este comportamento sugere a existência de uma variação na eficiência de fusão do processo, sendo maior a dissipação de energia para o meio quanto maior o comprimento do arco, com uma diminuição na parcela de energia transferida para o metal de base. Apesar da variação da largura da zona fundida ser de pequena magnitude para mudanças em DBP da ordem de 1 ou 2 mm, o mesmo não acontece caso estas variações sejam maiores. Em se tratando do reparo das pás de turbinas hidráulicas, onde as superfícies apresentam irregularidades e raios de curvatura, variações da ordem de 5 mm não podem ser consideradas como impossíveis. Neste caso, ao contrário do que sugere a literatura, poderão ser encontradas mudanças na largura da zona fundida da ordem de 1,5 mm. Variações desta natureza já são suficientes para produzir defeitos na soldagem mecanizada/ automatizada, caso a) não exista um mapeamento adequado da superfície, o que permite a correção antecipada da trajetória de movimento da pistola; b) não sejam introduzidos mecanismos que permitam reconhecer a mudança no perfil, como os "seam tracker"; ou c) não venham a ser utilizados recursos que permitam compensar a variação na DBP durante a soldagem, a exemplo dos sistemas AVC. Apesar da

literatura que aborda a soldagem PLASMA apresentar como uma vantagem deste processo sua insensibilidade a mudanças na DBP, esta informação deve ser avaliada com muito cuidado. A rigor, a sensibilidade do processo PLASMA às variações no comprimento do arco pode ser considerada como equivalente àquela observada na soldagem TIG.

A figura 5 também permite avaliar a influência da vazão de gás de plasma sobre a geometria da zona fundida. Mantida uma DBP constante, ao longo de uma faixa de valores, aumentos na vazão do gás de plasma (VGP) induziram a um aumento na largura da zona fundida, sem promover o aparecimento de defeitos. Entretanto, este efeito mostrou-se limitado, pois incrementos adicionais levaram ao aparecimento de “humping”<sup>(8)</sup>. Este defeito se caracteriza pela formação de regiões com protuberâncias ou vazios, intercalada por regiões onde a zona fundida apresenta aspecto normal. Na soldagem TIG, a ocorrência deste defeito foi associada a um aumento da pressão do arco sobre a poça fundida, devido ao aumento da corrente. Ao ser transposto para a soldagem PLASMA, pode-se relacionar a ocorrência de “humping” ao aumento da pressão do arco voltaico, devido ao acréscimo da vazão de gás (DBP constante) ou pela aproximação da tocha em relação à peça de trabalho (VGP constante).

Definidas as combinações que permitiram produzir uma zona fundida de maior largura, selecionou-se um conjunto destas para a condução dos ensaios com deposição de arame. Os primeiros ensaios foram realizados com o arame direcionado para a raiz coluna do arco (adição junto a superfície da poça de fusão), sendo a alimentação feita à frente do arco (fig. 6). Durante a execução destes ensaios, verificou-se a formação de cordões uniformes e uma excelente estabilidade do processo, com isenção total de respingos. Entretanto, os cordões não apresentaram boa molhabilidade. As tentativas de aumentar a corrente de soldagem, mantendo constantes as velocidades de arame e de soldagem, provocaram o aparecimento de “humping”. Na expectativa de melhorar o aspecto geométrico dos cordões, foram feitas mudanças na posição de incidência do arame no arco. Mantendo a alimentação de arame a frente, em um primeiro conjunto de ensaios foi modificada a posição de adição do material, sendo o arame posicionado de modo a interceptar o arco à meia altura entre o bocal constritor e a superfície da poça de fusão. Com esta mudança, além da formação de cordões com maior molhabilidade, foi possível um aumento na taxa de alimentação de arame (fig. 7). A origem deste fenômeno foi associada à inserção do arame em uma região mais quente do arco, o que permitiu aumentar a velocidade de alimentação do arame, sem a necessidade de elevar a corrente de soldagem. Isto indica que o rendimento de fusão do arame é dependente da posição em que o arame é posicionado no arco.

Como característica adicional, a formação e o destacamento das gotas se mostrou dependente da corrente de soldagem. Para os ensaios conduzidos com valores de corrente de 100 e 120 A, o destacamento se caracterizou por gotas de diâmetro pequeno, que, por serem espirradas para fora do arco, provocaram a formação de depósitos com uma geometria irregular. A elevação da corrente de soldagem e da velocidade de alimentação de arame modificou este comportamento, conduzindo a um aumento nas dimensões das gotas fundidas e a uma transferência que manteve o alinhamento do eixo do arco.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados, concluiu-se que:

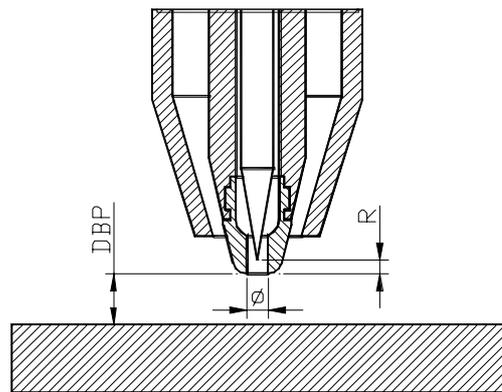
- Com relação ao efeito da variação da distância bocal/peça (DBP) sobre a queda de tensão no arco PLASMA, os resultados indicam uma taxa de variação de 0,54 V/mm, sendo esta não influenciada pelo recuo (R) do eletrodo. Este valor se encontra muito próximo àquele obtido com o arco TIG, onde a taxa de variação foi de 0,55 V/mm;
- Tal qual a variação na queda de tensão, a geometria da zona fundida mostrou-se dependente da distância bocal/peça, sendo a maior largura quanto menor a DBP, apesar da tendência de redução na queda de tensão;
- Apesar da literatura que aborda a soldagem PLASMA apresentar como uma vantagem deste processo sua insensibilidade a mudanças na DBP, a sensibilidade do processo PLASMA à variações no comprimento do arco pode ser considerada como equivalente àquela observada na soldagem TIG;
- Mantida uma DBP constante, ao longo de uma faixa de valores, aumentos na vazão do gás de plasma (VGP) induziram a um aumento na largura da zona fundida, sem promover o aparecimento de defeitos. Entretanto, este efeito mostrou-se limitado, pois incrementos adicionais levam ao aparecimento de “humping”;
- Mantendo a alimentação à frente do arco, a mudança no direcionamento do arame da raiz coluna do arco (adição junto a superfície da poça de fusão) para uma posição a meia altura entre o bocal constritor e a superfície da poça de fusão, permitiu a formação de cordões com maior molhabilidade e um aumento na taxa de alimentação de arame;
- As variações que surgem na largura da zona fundida, devido a mudanças na DBP, podem ser corrigidas, mediante a incorporação de sistemas auxiliares ou utilizando as variáveis do próprio processo PLASMA;
- Os testes demonstraram que os equipamentos desenvolvidos apresentaram um bom desempenho, porém alguns aprimoramentos são necessários para facilitar o alinhamento entre o arame e o arco voltaico.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem especialmente ao Dr. Eng. Carlos E. I. Baixo, pela atuante participação no desenvolvimento do trabalho, à toda a equipe do LABSODA/UFSC, em particular aos engenheiros Larry Fiori Ollé e Raul Gohr Jr. que viabilizaram o desenvolvimento dos equipamentos da bancada de soldagem PLASMA. À empresa IMC pelo desenvolvimento e fabricação dos equipamentos e aos órgãos financiadores do projeto: PADCT III, através do projeto “Roboturb” e CNPq através de bolsas de mestrado e de iniciação científica.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>1</sup> DUTRA et al, O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica, Anais do XXI ENTS. Assoc. Bras. Soldagem, Caxias do Sul, p. 889 a 902, junho de 1995.
- <sup>2</sup> SEBRAE, Sistema e Processo de Soldagem, Vencendo a Erosão das Turbinas, Tecnologia e Inovação para a Indústria, Brasília, p.214 a 217, 1999.
- <sup>3</sup> DELGADO et al, Estudo do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame, Anais do XXV ENTS. Associação Brasileira de Soldagem, Belo Horizonte, 1999.
- <sup>4</sup> MOTTA et al, MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único: Características e Desempenho do Processo, Submetido ao XXVI ENTS. Associação Brasileira de Soldagem, Curitiba, setembro de 2000.
- <sup>5</sup> American Welding Society, Welding Handbook, Eighth Edition, Volume 2, AWS, p.239 a 350, 1991.
- <sup>6</sup> MACHADO, Invan Guerra, Soldagem e Técnicas Conexas: Processos, 1ª Edição, Editado pelo Autor, Porto Alegre 1996, p. 219.
- <sup>7</sup> DIAZ, Victor M., Influência de Parâmetros e Variáveis da Soldagem Plasma Sobre as Características da Solda com Ênfase na Análise da Abertura e no Fechamento do Keyhole, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1999.
- <sup>8</sup> SAVAGE et al, Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding, Welding Journal, p. 212 a 224, July 1979.



**Fig. 1 – Distância Bico/Peça (DBP)**

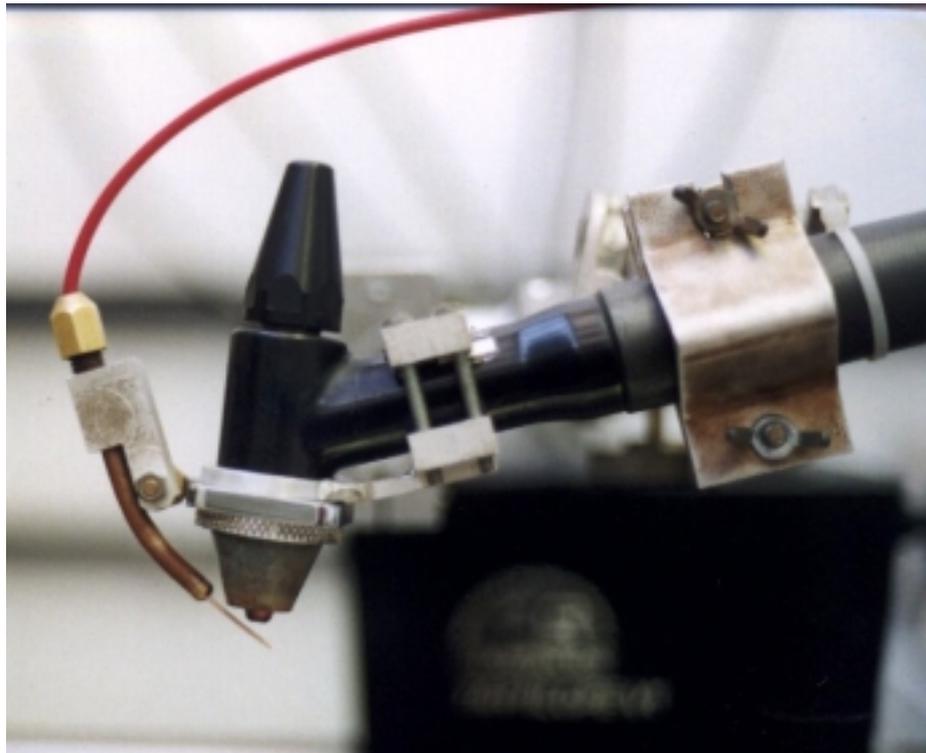


Fig. 2 – Foto da Tocha Plasma Adaptada com o Suporte Direcionador de Arame

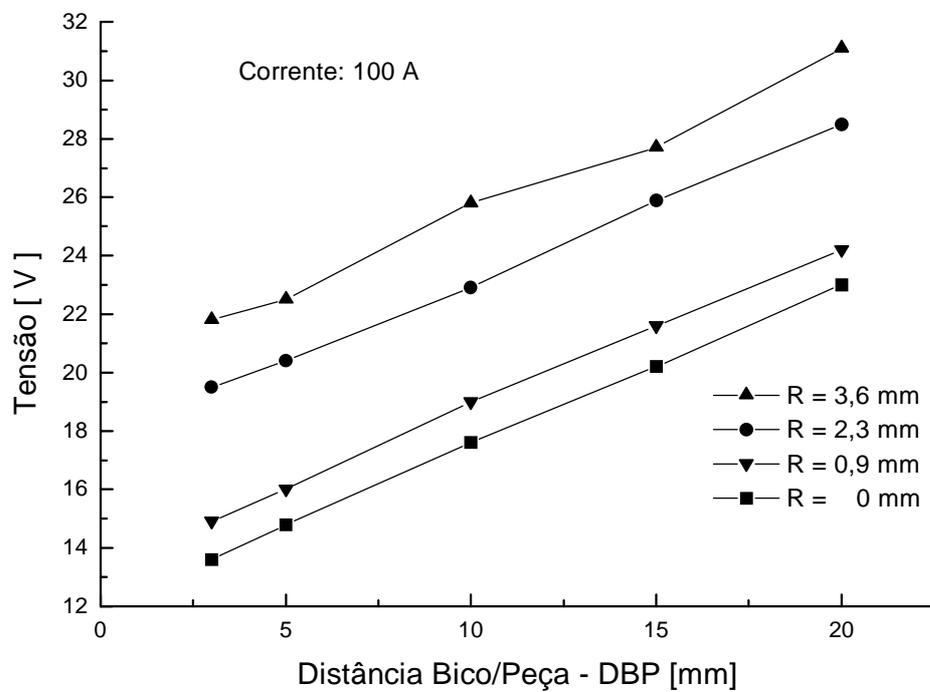


Fig. 3 – Influência da Distância Tocha/Peça e Recuo do Eletrodo Sobre a Tensão do Arco Plasma

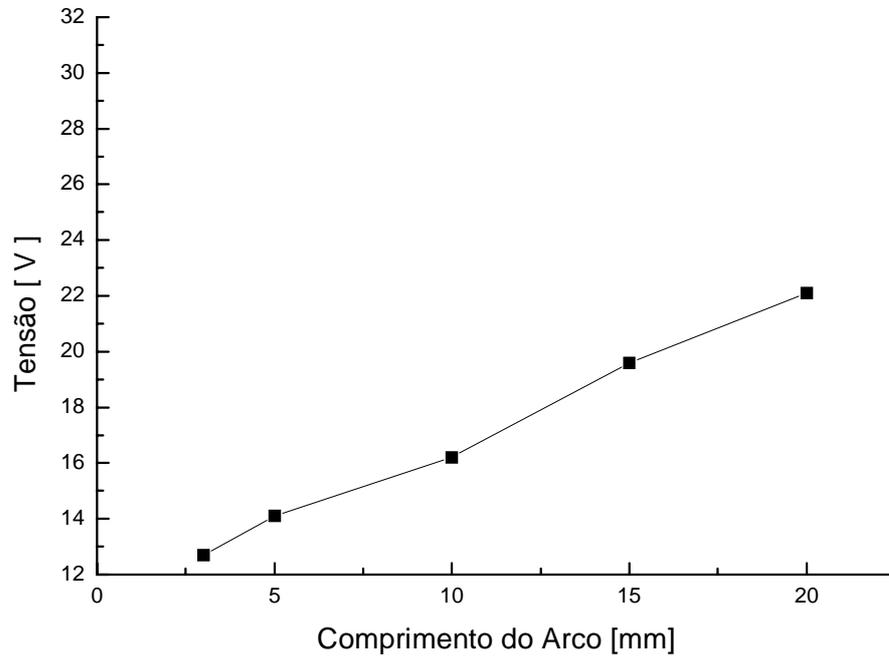


Fig. 4 – Influência do Comprimento do Arco Sobre a Tensão do Arco TIG

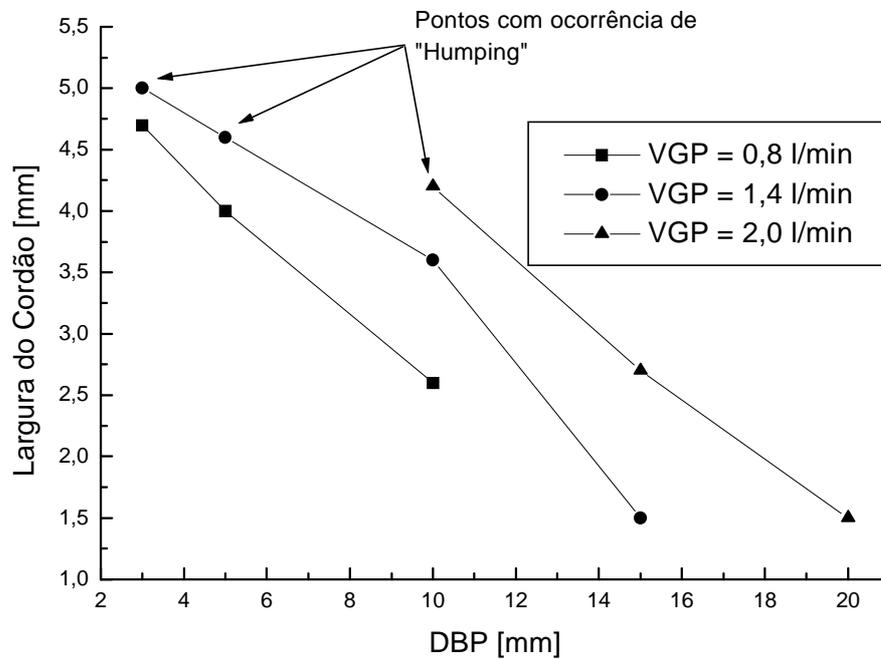


Fig. 5 – Influência da Distância Tocha/Peça Sobre a Geometria do Cordão

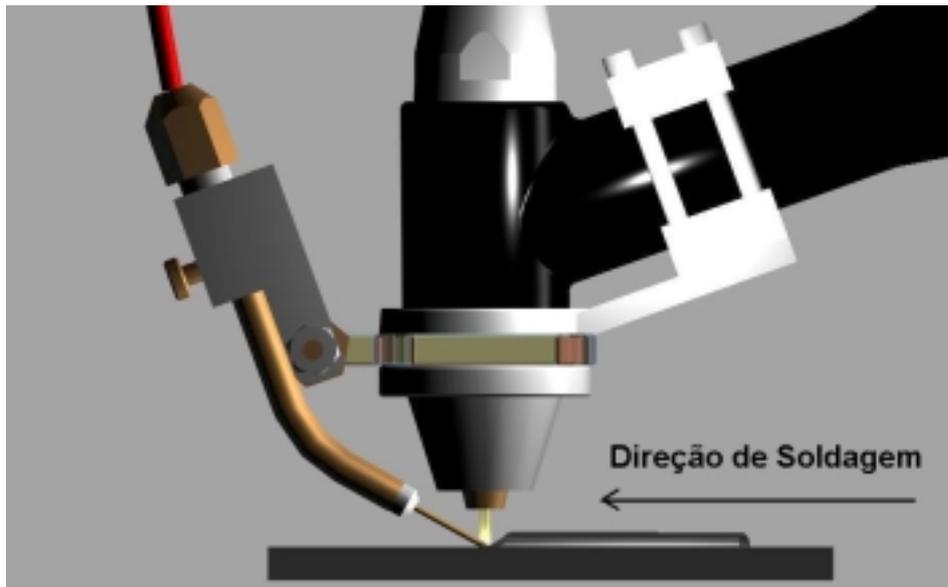


Fig. 6 - Direção de Alimentação de Arame.

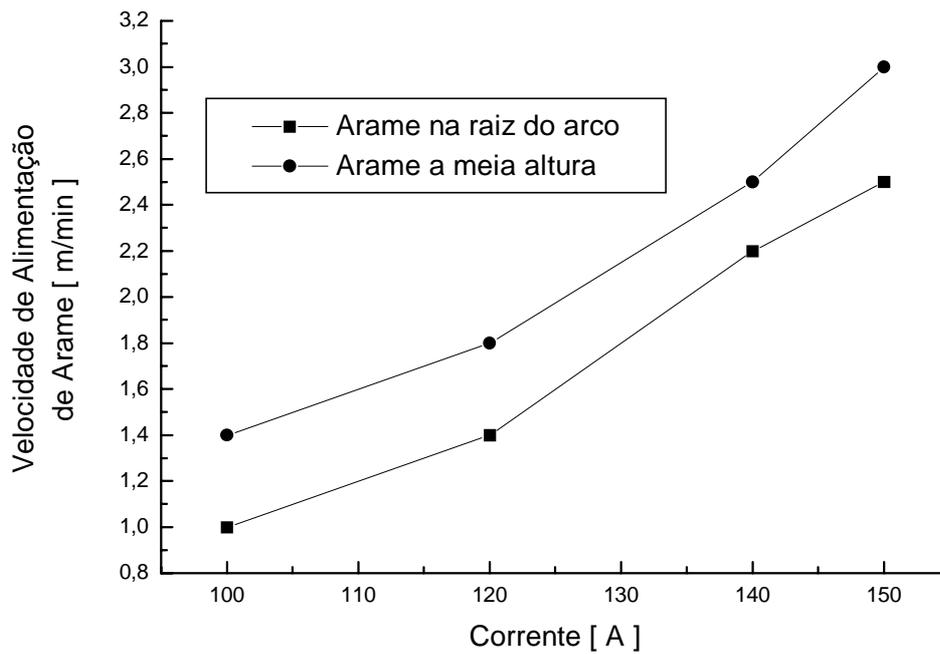


Fig. 7 – Relação entre Corrente e Velocidade de Alimentação de Arame