

OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO CORTE PLASMA PARA AÇOS INOXIDÁVEIS*

Andre Luis de Zorzi Marin¹
Wagner Fernando Turr²

Resumo

O corte a plasma de aço inoxidável tem história relativamente nova em comparação com outros meios de corte de metais. Frequentemente os usuários de corte plasma se deparam com questões específicas ao corte do aço inoxidável, como qualidade de corte, velocidade de corte, custo operacional e alterações nas propriedades metalúrgicas. Nos últimos vinte anos as tecnologias aplicadas no corte plasma do aço inoxidável tem evoluído com resultados atrativos nos últimos cinco anos. Estas tecnologias versam com alterações na mistura dos gases de plasma e de proteção, ou ainda, na mudança dos bicos de corte plasma buscando melhor constrição do arco plasma, e a devida seleção de gases em função da espessura de corte. Este trabalho foi desenvolvido através de revisão bibliográfica das principais tecnologias apresentadas pela indústria nas últimas duas décadas para o corte de aço inoxidável com plasma, e testes laboratoriais de corte com as últimas tecnologias de corte. Entre os resultados estão a redução até a eliminação da escória pós-corte, uma borda de corte menos arredondada, melhora na coloração da superfície e diminuição da zona afetada pelo calor na peça de trabalho. A importância do trabalho se dá pelo aumento da participação do uso do aço inoxidável dada a sua importância para a economia, em especial nos setores de energia, processamento de alimentos, papel e celulose e transportes que necessitam de melhorias no corte deste metal e suas ligas.

Palavras-chave: Corte a plasma; Aço inoxidável; Processos de corte.

THE TECHNOLOGICAL ADVANCES OF PLASMA CUTTING FOR STAINLESS STEEL

Abstract

The stainless steel plasma arc cutting technology history is relatively new compared to other metal cutting process. Often, plasma arc cutting users have questions regarding to the stainless steel cutting, such as cutting quality, cutting speed, operating costs and changes in metallurgical properties. For the last twenty years, the technology in the stainless steel plasma cutting has evolved a lot, with significant results in the last five years. These technologies are very much related with changes in the mixing of plasma gases and shield gases, yet with the change of plasma cutting nozzles for better constriction of the plasma arc, and the proper selection of gases depending on thickness. This work was developed through a review of the key technologies for stainless steel plasma arc cutting introduced by the industry in the last two decades, and tests performed in laboratory using the latest cutting technologies. The outcomes are the reduction and even the elimination of post-cutting dross, a less rounded cutting edge, an improved surface color and reduction in the heat affected zone in the work piece. The importance of this work is related to an increased participation of the use of stainless steel, especially in the energy, food processing, pulp and paper and transportation, which need improvements in cutting of stainless steel its alloys.

Keywords: Plasma arc cutting; Stainless steel; Cutting process.

¹ Engenheiro de Materiais-Metalurgia, Gerente Regional de Vendas de Consumíveis na América do Sul, Hypertherm do Brasil Ltda., São Paulo, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, Gerente Regional de Vendas para OEMs na América do Sul, Hypertherm do Brasil Ltda., São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O corte a plasma de aço inoxidável tem história relativamente nova em comparação com outros meios de corte de metais, com aplicações crescentes em várias áreas da indústria conforme Baddoo [1]. Os usuários de corte plasma se deparam com questões específicas ao corte do aço inoxidável, como qualidade de corte, velocidade de corte, custo operacional e alterações nas propriedades metalúrgicas. Nos últimos vinte anos as tecnologias aplicadas no corte plasma do aço inoxidável tem evoluído com resultados atrativos nos últimos cinco anos. Estas tecnologias versam com alterações na mistura dos gases de plasma e de proteção, ou ainda, na mudança dos bicos de corte plasma buscando melhor constrição do arco plasma, e a devida seleção de gases em função da espessura de corte.

Este trabalho foi desenvolvido através de revisão bibliográfica das principais tecnologias apresentadas pela indústria nas últimas duas décadas para o corte de aço inoxidável com plasma, e testes laboratoriais de corte com as últimas tecnologias de corte. Entre os resultados estão a redução até a eliminação da escória pós-corte, uma borda de corte menos arredondada, melhora na coloração da superfície e diminuição da zona afetada pelo calor na peça de trabalho.

A importância do trabalho se dá pelo aumento da participação do uso do aço inoxidável dada a sua importância para a economia, em especial nos setores de energia, processamento de alimentos, papel e celulose e transportes que necessitam de melhorias no corte deste metal e suas ligas.

1.1 Histórico das Tecnologias para o Corte de Aço Inoxidável

Conforme Mesquita e Rugani [2] várias tecnologias são utilizadas para o corte de aço inoxidável, sendo as mais comuns o corte por cisalhamento (guilhotinas, tesouras e discos rotativos), o corte por abrasão (discos de corte, serras e jato d'água) e o corte por fusão (plasma e corte a laser). Boa parte da indústria seleciona estas tecnologias em função de características como espessura do material a ser cortado, volume de material a ser cortado, e tipo de material. Em linhas gerais, os processos de corte por abrasão são comumente utilizados para espessuras mais espessas, acima de 25mm. Por sua vez, os processos de cisalhamento e o corte a laser para materiais mais finos, com espessura até 3mm. O corte plasma tem aplicações na espessura de 3mm a 25mm, sendo possível aplicá-lo em espessuras de até 80mm com velocidades de corte e custo operacional mais atrativos do que as outras tecnologias.

Os primeiros sistemas a plasma projetados para corte de aço inoxidável em espessuras acima de 50mm usavam corrente de corte muito alta e ofereciam velocidades de corte lentas (abaixo de 500mm/min) em comparação com outros processos e a tecnologia de corte plasma atual. Desta forma, a sua utilização era negligenciada pela indústria devido aos custos operacionais (em especial o custo dos gases), inabilidade em alcançar as espessuras que o oxicorte alcançava, falta de conhecimento do público quanto ao plasma e falta de pessoas com habilidades como abordado por Walsh [3].

Na década de 1970 os sistemas de corte a plasma para corte de aço inoxidável utilizavam nitrogênio como gás de plasma e injeção de água como proteção para corte de espessura de 75mm com velocidade de 380mm/min com corrente de corte de 750 A. Porém, para cortar 125mm de espessura de aço inoxidável, já se utilizava como gás de plasma a mistura H35 (35% de hidrogênio, 65% de argônio) com

injeção de água em um fluxo coaxial ao arco e corrente de 1.000 A, entregando velocidade de corte de apenas 150mm/min. O corte de forma complexas não era possível nestes equipamentos pois não operavam com corte em baixa corrente, de modo que equipamentos adicionais eram necessários. Ou seja, o corte a plasma em aço inoxidável era extremamente custoso e quase inviável para espessuras acima de 50mm.

Em estudo para melhoria da qualidade de corte em aço inoxidável e alumínio Couch et al. [4] desenvolveram teorias quanto aos componentes reativos e redutores nos gases de plasma e de proteção. O arco plasma utiliza uma mistura de fluxos de gases reativo e redutivo. O fluxo de gás redutivo varia como uma porção do fluxo do gás total para manter uma atmosfera redutora através da espessura da peça cortada, porém deixando uma atmosfera predominantemente oxidativa (reativa) na intersecção do corte e a borda inferior da peça. No estudo atestam que os gases reativos preferencialmente são: ar comprimido, oxigênio, nitrogênio ou a mistura deles enquanto que os gases redutivos são hidrogênio, mistura H35, metano ou mistura deles. A Figura 1 ilustra através da curva a concentração dos gases redutores que são maiores na borda superior da peça diminuindo a sua concentração até a borda inferior da peça, e a concentração dos gases reativos com comportamento inverso.

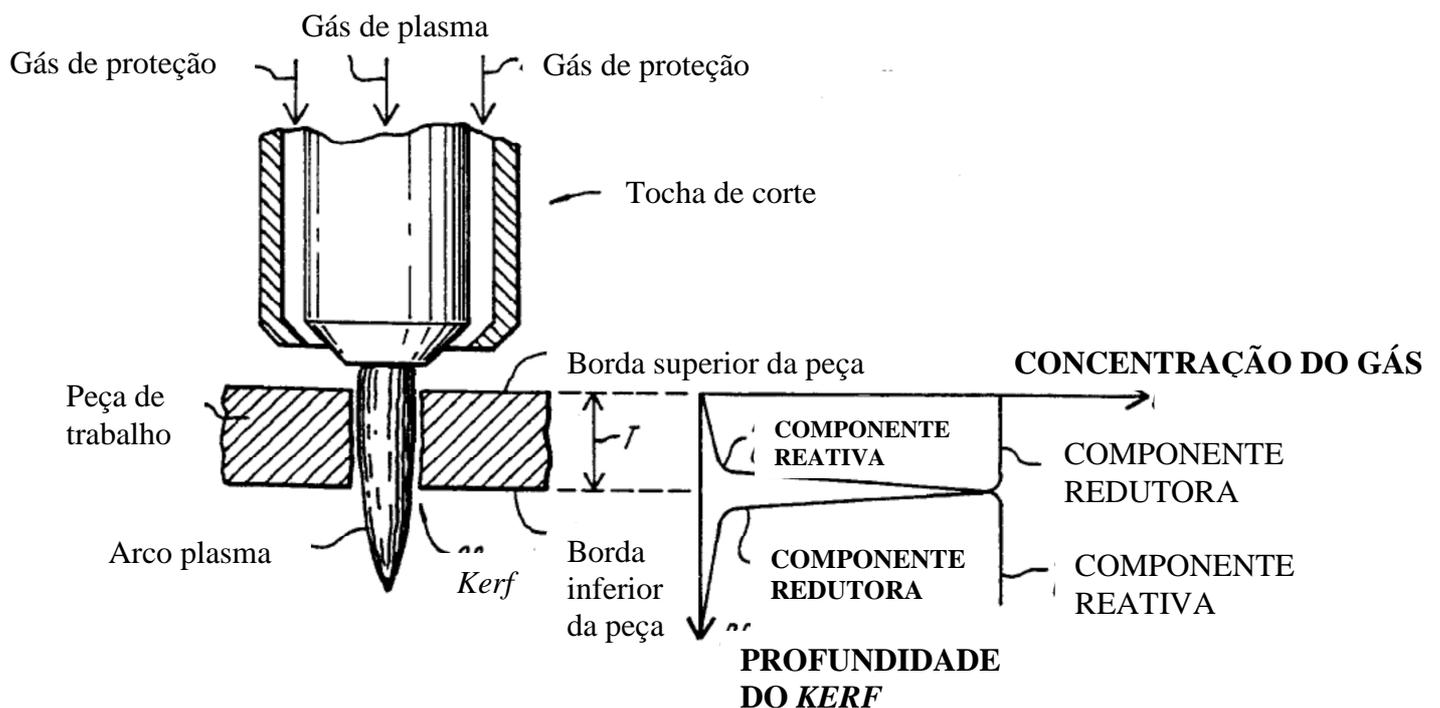


Figura 1 – Visão simplificada da concentração de gases redutores e reativos conforme estudo de Coachet al [4].

A principal característica defendida pelos autores é que os fluxos de gases da tocha para a sangria (*kerf*) incluem como gás constituinte pelo menos um gás reativo, que reage com o metal da peça de trabalho, e outro gás constituinte, diferente, que produz uma reação de redução com o gás reativo como o oxigênio, nitrogênio ou mistura deles. No plasma estes gases podem ser misturados para formar o gás de plasma, como no plasma a ar comprimido, ou ainda separados, sendo um o gás de plasma e outro de proteção como nos plasmas convencionais e de alta definição. O

grande detalhe da tecnologia está na quantidade do gás de redução que é cuidadosamente controlado como uma fração do fluxo de gás total dentro da sangria. O grau de controle é expresso pela razão da taxa de fluxo do(s) gás(es) redutor(es) em relação ao total de do fluxo de gases. Há parâmetros que influenciam nesta razão tais quais o tipo de material a ser cortado, sua espessura, tipo de gases utilizados. A figura 2 ilustra uma relação entre a espessura de corte em aço inoxidável e a concentração de hidrogênio para uma mistura de argônio, nitrogênio e hidrogênio em corte de 100 A de corrente.

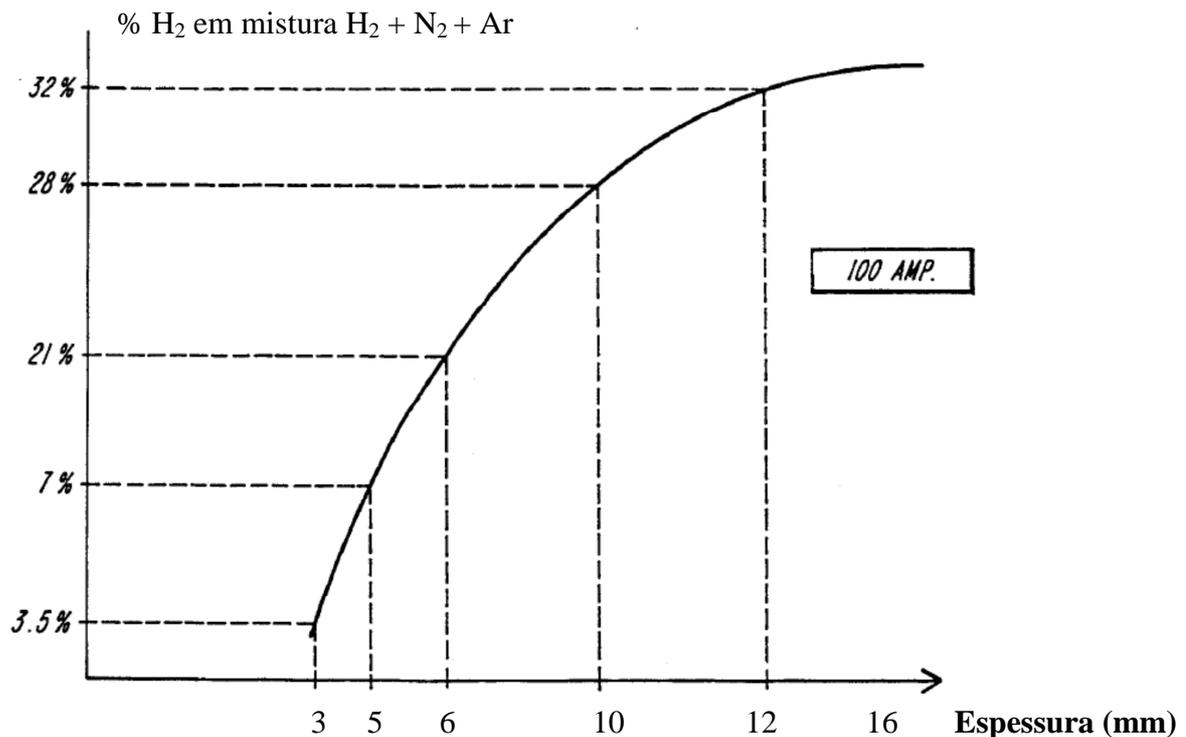


Figura 2 – Variação da concentração de hidrogênio em mistura de gás de hidrogênio, nitrogênio e argônio em função da espessura de corte para aço inoxidável em 100 A de corrente por Couchet al. (1995).

Adolpho e Lualdi [5] e Putnanet al. [6] atestam que os fabricantes de equipamentos de corte plasma sugerem a utilização do nitrogênio como gás de corte para aço inoxidável. Isso se deve ao fato de que o aço inoxidável não ter altas concentrações de ferro, diminuindo suas propriedades de reação exotérmica com o oxigênio, muito utilizado no corte de aço carbono. Desta forma, em reações onde os gases de plasma são outros diferentes do oxigênio, o corte plasma depende fortemente da transferência de calor do arco para a peça de trabalho. Assim, no fim da década de 1990 outros gases como a mistura de argônio e hidrogênio passa a ser utilizados, dado a sua maior condutividade térmica, o que significa que mais calor pode ser transferido do arco plasma para a peça. Os autores ainda atestam que a mistura H35 adiciona uma quantidade de calor muito alta em corte de espessuras mais finas, sendo assim recomendado uma redução na concentração de hidrogênio à teores próximos de 5%, como na mistura F5 (5% de hidrogênio, 95% de nitrogênio). Para Shintani [7] o corte em aço inoxidável deve considerar o uso de gases inertes ou redutores como nitrogênio, argônio e hidrogênio ou a mistura deles, gerando uma superfície de corte mais lisa e com pouca quantidade de escória, quando a

espessura de corte não é menor do que 6mm. Para espessuras menores do que 6mm a preocupação recai sobre a quantidade escória gerada na parte inferior da peça e respingo de material fundido para a parte superior da borda. Desta forma, a sua proposta para melhoria no processo de corte de aço inoxidável passa pela adição de um bico adicional à tocha de corte como ilustrada na Figura 3. Este bico permite que entre ele e o bico principal um gás secundário seja adicionado ao processo. Ele tem a função de gerar uma força cinética necessária para soprar a escória que ainda está fundida atrás da zona de corte. Além disso, o gás secundário reduz qualquer tentativa de retorno do gás de plasma ou de proteção para a parte superior da peça, diminuindo a geração de respingos no corte.

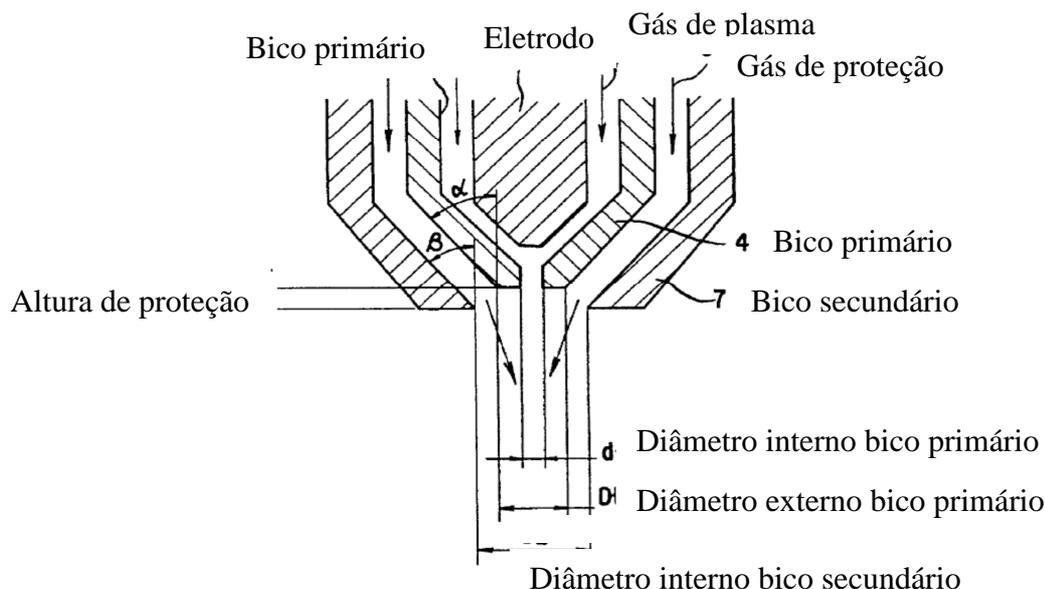


Figura 3 – Ilustração de bico de corte adicional proposto por Shintani (1997) em corte de aço inoxidável em espessuras menores do que 6mm.

1.2 Novas Tecnologias para o Corte de Aço Inoxidável

As soluções atuais propostas pelos fabricantes das tecnologias de corte plasma podem ser divididas em três categorias: a) soluções com base na seleção dos tipos de gases de corte; b) alterações e desenvolvimento na tecnologia de consumíveis de corte; c) melhorias no controle de altura da tocha para perfurações. Abaixo, estão detalhadas cada uma delas.

Em relação à primeira tecnologia, as atuais consideram a seleção adequada do gás como primeiro passo para o sucesso do corte de aço inoxidável a plasma. A seleção ar comprimido como gás de plasma e gás de proteção (ar/ar) é uma opção comum para velocidades de corte rápidas e de baixo custo, mas o acabamento escuro e fortemente oxidado da superfície muitas vezes requer esforços intensos em operações secundárias. Várias opções adicionais podem ser selecionadas de acordo com os requisitos da peça acabada. O nitrogênio como gás de plasma e de proteção (N_2/N_2) proporciona velocidades de corte aumentadas com uma superfície mais lisa e com menor formação de óxidos, porém produz uma superfície de corte enegrecida, semelhante à obtida com a seleção ar comprimido como gás de plasma e proteção. Os arredondamentos na borda superior e angularidades significativas geralmente aparecerem.

Os clientes que exigem uma superfície de corte mais refinada com boa coloração, borda superior da peça de trabalho afiada e com angularidade e escória limitada deverão usar gases especiais para obter melhores resultados. Uma das propostas atuais dada pela indústria de plasma, conforme Putnanet al. [6] é o corte com nitrogênio em gás de plasma e água como proteção. Neste processo o eletrodo é circundado pelo nitrogênio, o qual é aquecido pelo arco elétrico formando o plasma. O arco plasma deixa o bico e uma proteção radial de água incide sobre ele. Uma cortina de vapor se forma na interface água/arco plasma a qual protege o plasma da atmosfera e resfria o perímetro do arco. Isso diminui o diâmetro da pluma do plasma e concentra a energia para o seu núcleo interno, empurrando o metal fundido para fora da sangria (também conhecida como *kerf*). A figura 4 ilustra este processo.

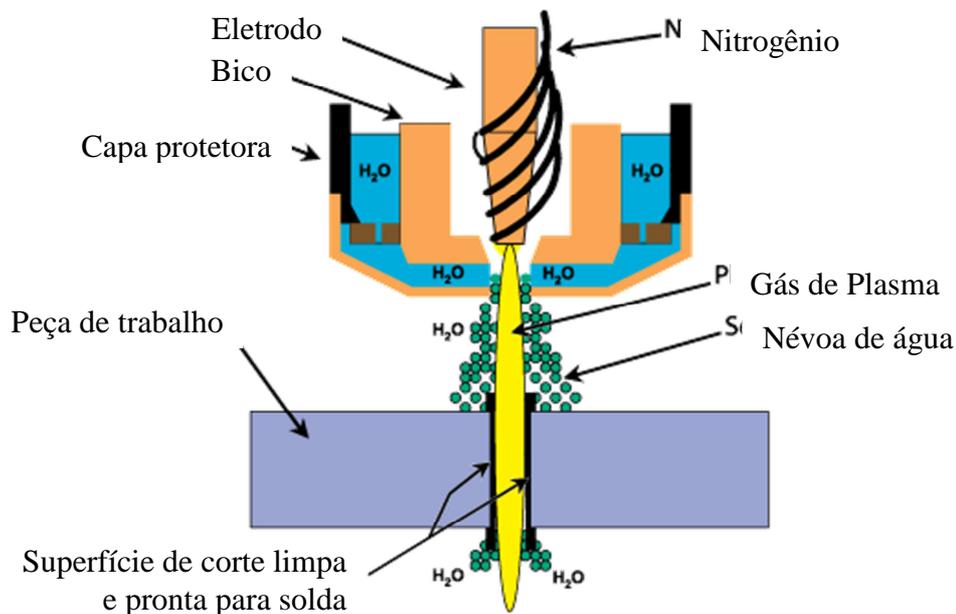


Figura 4 – Corte a plasma em aço inoxidável com nitrogênio como gás de plasma e água como proteção.

Este moderno processo é eficaz para o corte de aço inoxidável em chapas finas e médias, mas o impacto da água sobre mesas secas de corrente de ar descendente deve ser considerado antes de escolher esta opção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nos testes foram aço inoxidável na norma AISI 304L e AISI 316L em chapas com espessuras de 3mm, 4mm e 6mm para obtenção dos resultados. Os gases utilizados como gases de plasma foram: ar comprimido, nitrogênio, F5 (mistura com 5% de Hidrogênio e 95% de Nitrogênio), H35 (mistura com 35% de Hidrogênio e 65% de Argônio).

Além disso, foi utilizada uma fonte plasma de alta definição 260 Ampéres e outra de corte com ar comprimido de 200 Ampéres, as quais estavam integradas por CNC e controladores de altura a uma mesa de corte. As chapas foram colocadas em mesas de corte com tochas plasma comandadas por CNC, controladores de altura e fonte plasma do fabricante Hypertherm. Cada corte foi executado de acordo com as velocidades de corte, tensão de arco, pressão e vazão de gases recomendados pelo fabricante da fonte plasma, os quais estão descritos na tabela da Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de corte utilizados para corte de aço inoxidável nas espessuras de 3 a 6mm.

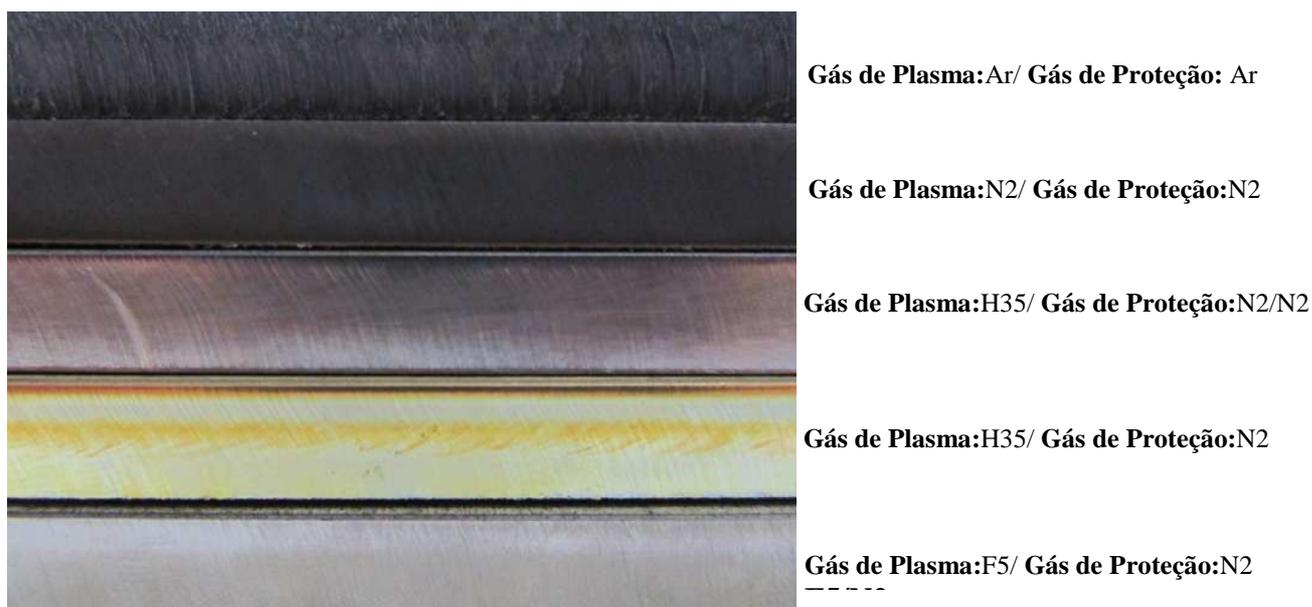
Gás selecionado		Fluxo de corte		Espessura do material	Tensão de arco	Amperagem de corte	Velocidade de corte
Gás de plasma	Gás de proteção	Gás de plasma	Gás de proteção				
Ar comprimido	Ar comprimido	62 l/min	49 l/min	6mm	126 V	50 A	1400mm/min
Nitrogênio	Nitrogênio	62 l/min	39 l/min	6mm	124 V	50 A	1400mm/min
H35	Nitrogênio	75 l/min	49 l/min	6mm	140 V	130 A	1400mm/min
F5	Nitrogênio	84 l/min	51 l/min	6mm	120 V	60 A	1635mm/min

O processo de corte, considerando a Tabela 1, foi utilizado com 50, 60 e 130 Ampéres em função das espessuras de corte e a fonte com voltagem de entrada de 380V. Durante o corte, verificou-se a qualidade de corte considerando-se as seguintes características, as quais serão utilizadas para comparação:

- Forma da borda superior de corte (arredondada ou afiada conforme ISO-9013);
- Angularidade de corte em graus (conforme ISO-9013)
- Coloração da superfície de corte
- Presença de escória na borda inferior de corte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra os resultados obtidos no corte de uma chapa de 6mm em aço inoxidável 304L com alteração nos gases de plasma de proteção. É perceptível a melhoria alcançada na utilização de F5 como gás de plasma e nitrogênio como gás de proteção, com uma superfície lisa, sem oxidação e borda de topo afiada. Os resultados para cada tipo de gás de plasma e gás de proteção encontram-se na tabela da Figura 5.



Gás de Plasma:Ar/ Gás de Proteção: Ar

Gás de Plasma:N2/ Gás de Proteção:N2

Gás de Plasma:H35/ Gás de Proteção:N2/N2

Gás de Plasma:H35/ Gás de Proteção:N2

Gás de Plasma:F5/ Gás de Proteção:N2

Figura 5 – Ilustração com qualidades de superfície de corte em aço inoxidável 304L de espessura de 6mm com diferentes tipos de gases utilizados como gás de plasma/gás de proteção.

Tabela 2 – Resultados obtidos com corte de aço inoxidável em função do set-up de gases de plasma e proteção.

Gás de plasma	Proteção	Resultados			
		Forma da borda superior de corte	Angularidade e de corte (ISO-9013)	Coloração da superfície de corte	Presença de escória na borda inferior
Ar comprimido	Ar comprimido	Quadrada	Grau 4	Enegrecida e áspera com forte oxidação	Pouca escória
N2	N2	Arredondada	Grau 4 a 5	Enegrecida	Pouca escória
F5	N2	Quadrada e afiada	Grau 3	Cor prateada	Isento de escória
H35	N2	Quadrada	Grau 3	Cor dourada com tons azuis e cinzas	Isento de escória

Conforme Couchet al. [4] este resultado era esperado pelo fato da composição do F5, com uma concentração menor de Hidrogênio, necessitar de um potencial de ionização semelhante ao do Nitrogênio, porém eliminando a oxidação gerada por nitretos quando o corte é feito com Nitrogênio, obtendo-se uma superfície brilhante. O autor relata que o F5 como gás de plasma, é recomendado o uso em espessuras de até 9,5mm. Para Shintani [7] as espessuras finas, vão na faixa até 6mm para utilização deste gás. Assim, a lacuna existente para espessuras maiores do que 10mm é solucionada com outra seleção de gases que é a mistura de H35 com nitrogênio como gás de plasma e nitrogênio como gás de proteção. Esta solução permite obter uma superfície lisa, sem oxidação com coloração próxima à do metal base e o borda de topo afiada. Isso se dá em função do aumento da utilização de hidrogênio na mistura do gás de plasma baseada na curva da Figura 2 para espessuras de corte na faixa de 6 a 50mm. Entretanto, do ponto de vista da produtividade, as velocidades de corte são lentas quando se utiliza somente a mistura H35 como gás de plasma. Assim, faz-se a adição de nitrogênio, que tem a vantagem de apresentar velocidade de corte muito superior, o que aumenta a produtividade. O console de gás de alguns equipamentos de corte plasma a alta definição combinam o H35 e o N₂ como gás de plasma para melhorar significativamente as velocidades de corte, ao mesmo tempo em que mantém a cor adequada da borda de corte.

Isso nos leva à próxima consideração para o sucesso no corte de aço inoxidável a plasma, a escolha de materiais. O aço 304L é um aço inoxidável austenítico e o grau mais comumente utilizado em todo o mundo, com 35% da produção mundial. Quando um processo a plasma projetado para cortar aço 304L é aplicado à outra liga austenítica semelhante, por exemplo, o 316L, o resultado pode ser diferente, trazendo escória e uma borda de corte áspera. Isso se deve a presença de Molibdênio no 316L que gera formação de óxidos de molibdênio que alteram a fluidez da escória. Na Figura 9 é ilustrado um exemplo de corte para a espessura de 6mm, em uma corrente de corte de 80 A, sendo que no 304L a velocidade de corte foi de 1700mm/min e pressão de corte de 65 pés cúbico por hora para gás de plasma, no caso F5, e de 60 pés cúbicos por hora para gás de proteção, no caso nitrogênio. Isso permitiu a obtenção de um corte limpo, sem escória visível no 304L.

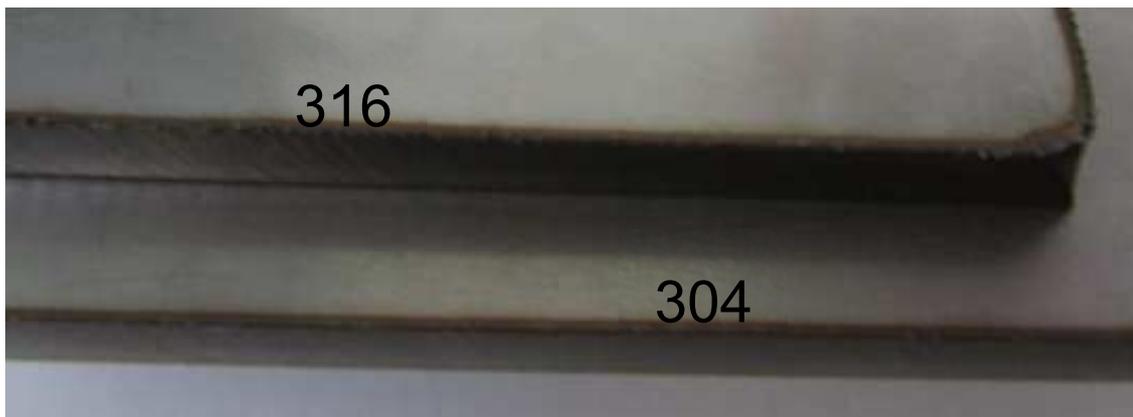


Figura 6 – Amostra de corte em 304L evidenciando a limpeza do corte e borda livre de escória e corte em 316L com uma borda mais áspera e presença de escória de fácil remoção.

Para o corte do aço 316L, a qualidade de corte foi aperfeiçoada para se igualar a do aço 304L, aumentando-se ligeiramente a velocidade de corte para 1900mm/min e a pressão do gás de proteção para 65 pés cúbicos por hora com fins de aumento da velocidade do jato e da tocha para retirada da escória gerada no 316L que é menos fluída do que a gerada no 304L. Esta dificuldade pode ser maior no corte de aços inoxidáveis austeníticos de alta resistência à corrosão como os UNS S31254 (conhecido por 254 SMO) e o 904L, e os aços austenoferríticos (duplex) UNS S32101, UNS S32304, UNS S32205 e UNS S32750.

Um outro fato importante quanto aos consumíveis foi observado por Lindsay et al. [8] o qual propôs nova tecnologia para os bicos de corte plasma para melhoria da qualidade de corte de aço carbono na última década. Neste processo o bico de corte passa a receber um pequeno canal interno de ventilação. O bico quando acoplado na tocha de corte permite a ligação da câmara interna do bico/eletrodo com a parte externa bico/capa interna de proteção, ilustrada pela Figura 7.

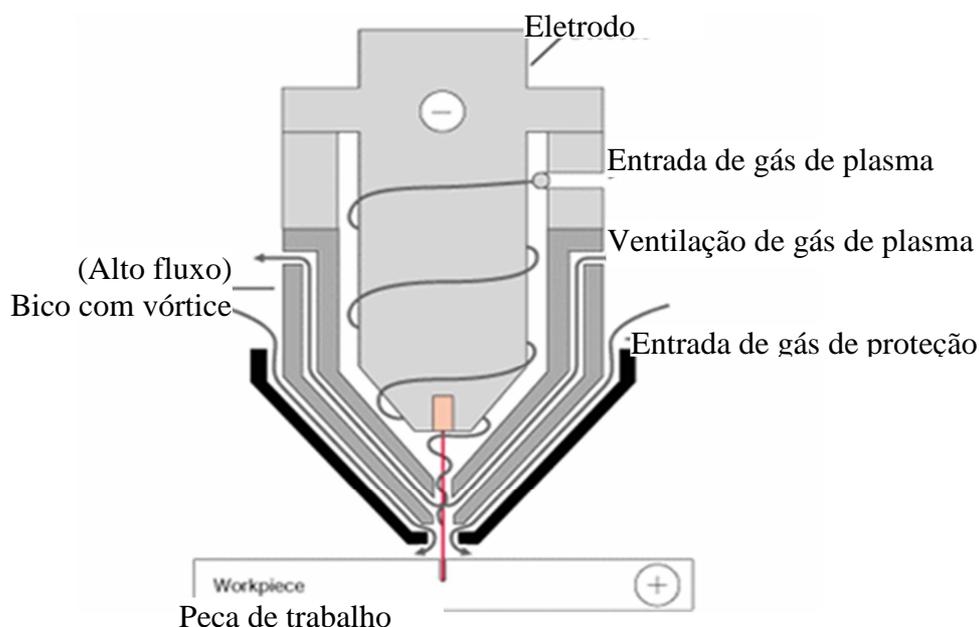


Figura 7 – Ilustração da tecnologia de bico ventilado proposta por Lindsay et al. (2000) e hoje disponível para corte em aço inoxidável de espessura de até 6mm.

Esta tecnologia de bico ventilado passou a ser aplicada ao corte de aço inoxidável, proporcionando melhores resultados em chapas de aço inoxidável de até 6mm de espessura. Isso se dá pelo fato do aumento do volume de gás de plasma, sendo que parte deste volume sai pelo canal de ventilação, aumentando a pressão na saída do bico para a formação de uma constrição sobre o arco plasma. Esta constrição mais alta permite o uso de um bico de corte com orifício menor e uma maior densidade de energia, deixando o arco plasma mais definida, com redução da sangria gerada e aumento da consistência do corte durante a vida útil dos consumíveis. Além disso, a ventilação melhora a vida útil do bico devido à constrição do arco e ao fato de os fluxos maiores de gases aumentarem diretamente as taxas de resfriamento do bico. Esta tecnologia permite a redução da angularidade no corte permitindo-se obtenção de cortes com qualidades de grau 2 a 4 conforme a normativa ISO 9013.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que os desafios adicionais apresentados pelo corte a plasma de aço inoxidável incluem a viscosidade do material fundido. Ao cortar aço-carbono com oxigênio como gás de plasma e ar comprimido como gás de proteção (O_2/ar), a viscosidade do material fundido é muito menor do que ao cortar aço inoxidável, de modo que a escória resultante que endurece no fundo da chapa é muito fácil de ser removida e, frequentemente, não requer operações secundárias, como o lixamento. A viscosidade da escória de aço inoxidável é muito mais elevada, de modo que pode ser muito difícil removê-la. Um dos métodos encontrados pela indústria atual para evitar a escória é girar o gás de proteção no sentido oposto ao do gás de plasma. Isso faz com que a escória adira aos retalhos da chapa, em vez de aderir à peça cortada, o que se alcança com a devida seleção de consumíveis para corte em aço inoxidável.

Além disso, as tecnologias recentes de corte plasma para aço inoxidável consideram cinco fatores que podem reduzir ou mesmo eliminar a formação de escória de aço inoxidável, com aumento da qualidade da superfície de corte, diminuição da angularidade de corte e melhoria da borda de topo no corte. Entre elas estão:

- O tipo e seleção do gás com seus devidos ajustes;
- Ajustes nas velocidades de corte em função do material;
- Seleção apropriada de consumíveis para espessuras finas, até 6mm;
- A altura de corte para perfuração.
-

Os resultados mostraram que a melhoria de qualidade alcançada na utilização de F5 como gás de plasma e nitrogênio como gás de proteção, com uma superfície lisa, sem oxidação e borda de topo afiada. Pela literatura esta solução deve ser utilizada somente para espessuras até 9.5mm, com correntes de corte de 60 e 80 A.

REFERÊNCIAS

- 1 BADDOO, N. R. "Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities", Journal of Constructional Steel Research, volume 64, número 11, página 1199-1206, 2008.
- 2 MESQUITA, Eduardo L. A.; RUGANI, Léo L. "Conformação dos aços inoxidáveis", Acesita, Dezembro, 1997.
- 3 WALSH, Matt "Plasma Cutting: Then and Now", The Fabricator, September, 2005
- 4 COUCH Jr., Richard W. et al. "Process for high quality plasma arc and laser cutting of stainless steel and aluminum", U.S. Patent n. 5.380.976, 10 jan. 1995.

- 5 ADOLPHO, Daniel; LUALDI, Bruno. “Comparativo entre a produtividade e custo operacional dos processos de corte plasma convencionais e a tecnologia de corte plasma utilizando água como gás secundário”, EXPOSOL - Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção, p. 1-8, 2008.
- 6 PUTNAM, Geoffrey; RENAULT, Thierry; HUSARY, Nakhleh, “You can plasma cut it, but can you weld it?” The Fabricator, March, 2009.
- 7 SHINTANI, Toshiya. “Plasma cutting method suitable for cutting thin stainless steel sheet material”, U.S. Patent n. 5,653,895, 5 ago. 1997.
- 8 LINDSAY, Jon; EICKHOFF, Stephen T.; VANDIVER, Michael W. “Plasma arc torch with vented flow nozzle retainer”. U.S. Patent n. 6,084,199, 4 jul. 2000.