

ESTUDO DA QUALIDADE DO CORTE A PLASMA AUTOMATIZADO PARA O AÇO AISI 304*

Adriane Lopes Mougó¹
Guilherme Amaral do Prado Campos¹
Juan Carlos Assis da Silva²

Resumo

O corte em chapas metálicas é de muita importância para diversas aplicações da indústria. Sua precisão e qualidade dependem principalmente da boa execução da trajetória de corte e de sua respectiva velocidade, assim como o ajuste da ferramenta que o realizará. Neste trabalho desenvolve-se um mecanismo, que adaptado a uma ferramenta de corte a plasma manual, realiza o controle automático de seu acionamento e posicionamento, e verifica-se a qualidade do corte através da formação de rebarbas para diferentes velocidades e alturas de corte. Os resultados demonstram os parâmetros e ajustes para cortes mais precisos

Palavras-chave: Corte a plasma; processo automático; Aço AISI 304, rebarba

PLASMA CUTTING QUALITY STUDY AUTOMATED IN AISI 304 STAINLESS STEEL

Abstract

The cut in metal sheets is of great importance for several applications of the industry. Its precision and quality depend mainly on the good execution of the cutting trajectory and its speed, as well as the adjustment of the tool that will perform it. In this job a mechanism is developed which, adapted to a manual plasma cutting tool, performs the automatic control of its drive and positioning, and it verifies the quality of the cut through the formation of burrs at different speeds and cutting heights. The results show the parameters and adjustments for more precise cuts.

Keywords: Plasma cutting; automatic process; AISI 304 stainless steel, burr

¹ Professora, Doutora, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil

² Professor, Doutorando, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil

³ Estudante, Graduação, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O corte a plasma baseia-se inicialmente em provocar numa coluna de gás com o auxílio de um arco elétrico, o aumento de sua temperatura o suficiente para que os impactos entre as moléculas de gás provoquem entre si certo grau de dissociação e ionização. Este efeito eleva de maneira sensível a temperatura, possibilitando o aumento da taxa de energia transferida para a peça, sendo o aumento da velocidade do plasma (coluna de gás ionizado) consequência direta da constrição [1].

O arco por plasma do processo de corte é uma extensão do processo TIG de soldagem. No segundo o arco assume forma aproximada de um cone, produzindo uma região relativamente grande da zona aquecida pelo arco. A área da base do cone que se projeta sobre a superfície da peça varia com a distância da tocha à peça (comprimento do arco); portanto pequenas mudanças no comprimento do arco produzem variações relativamente grandes na taxa de calor transferida para a peça, por unidade de área. No primeiro processo o arco é colimado e focalizado pelo bocal de constrição e se projeta em uma área relativamente pequena sobre a peça. A coluna do arco que emerge do bocal pode ser considerada um cilindro e praticamente não ocorre variação da área projetada pelo arco com a variação dentro de certos limites do comprimento do arco [1].

Os processos com arco utilizam uma fonte de calor mais intensa, reduzindo a zona afetada pelo calor e proporcionando um resfriamento mais rápido [2]. Porém, a velocidade com que a ferramenta de corte executa sua trajetória sobre a peça influencia no tempo de exposição da peça ao calor intenso, o que pode aumentar a zona afetada pelo calor.

A qualidade da superfície cortada por plasma é função dos ajustes e dos parâmetros de corte como a altura do bocal até a superfície da peça, do ângulo de inclinação da tocha, da velocidade de corte, do fluxo de gás e da habilidade do operador. No corte automático a atuação do operador fica restrita ao posicionamento da tocha em relação à peça e ao acionamento do gatilho. As peças cortadas à plasma podem ser utilizadas prontamente após o corte ou soldadas para obtenção de produtos finais. Independente da utilização, é importante que as superfícies geradas sejam livres de descontinuidades para evitar a necessidade de uma operação secundária de limpeza, como usinagem ou lixamento. As principais descontinuidades macroscópicas possíveis de ocorrer no corte a plasma são apresentadas na (Figura 1).

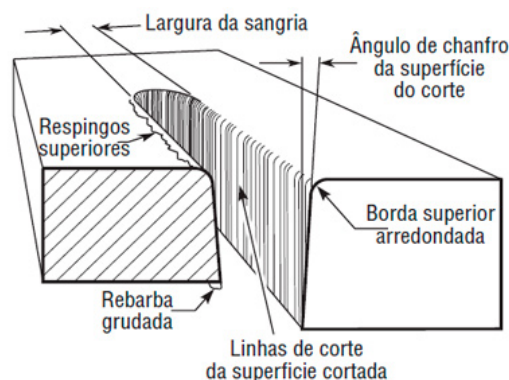


Figura 1. Descontinuidades macroscópicas geradas a partir do corte à plasma.

Segundo [3] a superfície pode apresentar linhas de corte direcionadas no sentido vertical de fluxo do plasma, gerando faces lisas ou mais rugosas. O ângulo de

chanfro é aquele formado entre a superfície da face e um plano perpendicular à superfície de corte. Se o objetivo não é criar chanfros para posterior soldagem, o ideal é que este ângulo de chanfro seja de 0°. Outras possibilidades são o arredondamento da aresta superior, refundição de um volume de material na aresta inferior (rebarbas) e respingo de material a partir da aresta superior. Por fim, outra característica importante é a largura da sangria. Se a superfície for livre de descontinuidades, o corte pode alcançar as dimensões finais da peça. Caso contrário, é necessário fornecer uma margem de segurança para operações secundárias posteriores.

Além dos parâmetros de corte, outros fatores podem comprometer a qualidade do corte a plasma. Um destes fatores é a possibilidade de desvio do jato de plasma ocasionado pelo sopro magnético. Como resultado a arco passa de defletir lateralmente, tendo este efeito a aparência similar de um leve sopro sobre a chama de uma vela.

O sopro magnético é um fenômeno comum em processos de corte e de soldagem a arco elétrico. Na soldagem, o sopro magnético pode causar principalmente a deposição irregular do cordão de solda e a falta de fusão em uma de suas extremidades [4, 5, 6, 7]. No corte a plasma, a ocorrência deste sopro pode gerar o corte assimétrico e a formação de respingos e rebarbas nas superfícies cortadas [8, 9]. Yamaguchi et al. [7] apresentaram uma investigação experimental da ocorrência do sopro magnético no corte a plasma, pois o jato de plasma deflectido afeta a qualidade de corte, causando danos ao eletrodo e ao bocal por causa da descarga anormal do arco duplo. Os autores concluíram que a diminuição da corrente e o aumento do fluxo de gás tendem a suprimir esta deflexão do arco.

Neste trabalho será realizada a análise da qualidade de corte em chapas de aço inoxidável autêntico AISI 304 para dois parâmetros de entrada: comprimento do arco e velocidade de corte. O corte automatizado é realizado através do acoplamento de uma tocha de plasma manual a um carrinho sobre trilhos com ajuste de velocidade e do desenvolvimento de um mecanismo de acionamento automático da tocha, composto por um sistema pneumático. Os resultados da formação da rebarba serão investigados por análise de variância e será determinada a condição ótima de corte.

2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os recursos e especificações utilizados para a execução dos procedimentos experimentais estão descritos nesta seção.

2.1 Material analisado

O material utilizado neste trabalho é o aço AISI 304, de média resistênciamecânica e bastante utilizado em componentes estruturais de pontes, edifícios, galpões, máquinas agrícolas e implementos rodoviários. As dimensões dos corpos de prova foram padronizadas em 100 mm x 300mm x 5 mm. A espessura média da chapa de 5 mm foi obtida a partir de 3 medidas tomadas ao longo de seu comprimento.

2.2 Equipamentos

Para automatizar o corte, foi desenvolvido neste trabalho o acionamento automático à distância para evitar qualquer contato manual do operador e, por consequência,

preservar sua integridade física. A (Tabela 1) apresenta os parâmetros de corte utilizados nesta etapa. Os equipamentos utilizados são apresentados a seguir.

Tabela 1. Parâmetros fixos do corte a plasma.

Parâmetros de corte	Valores
Corrente (A)	65
Pressão de trabalho (bar)	6
Diâmetro do orifício (mm)	1.9

- Tocha do tipo ERGOCUT S75, comprimento e altura máximos de 6 e 1 metros, respectivamente, consumo de ar de 150 l/min, pressão do ar de 6 bar e ciclo de trabalho de 60% e 100% para 70 A e 50 A, respectivamente (Figura 2a);
- Equipamento de corte a plasma SmartCut 75, corrente de corte de 25 – 75 A e espessura máxima de corte de 25 mm (Figura 2b);
- Máquina de corte MC-46 com corpo inteiramente fundido em liga de alumínio de grande resistência e durabilidade, com a vantagem de ser leve e à prova de corrosão. Possui capacidade de corte de 5 a 200 mm, ângulo de inclinação do maçarico entre 0º e 45º e velocidade de corte entre 100 e 1000 mm/min (Figura 2c);
- Suprimento de ar lubrificado com conexões à pistola e ao mecanismo de automatização (Figura 2d).

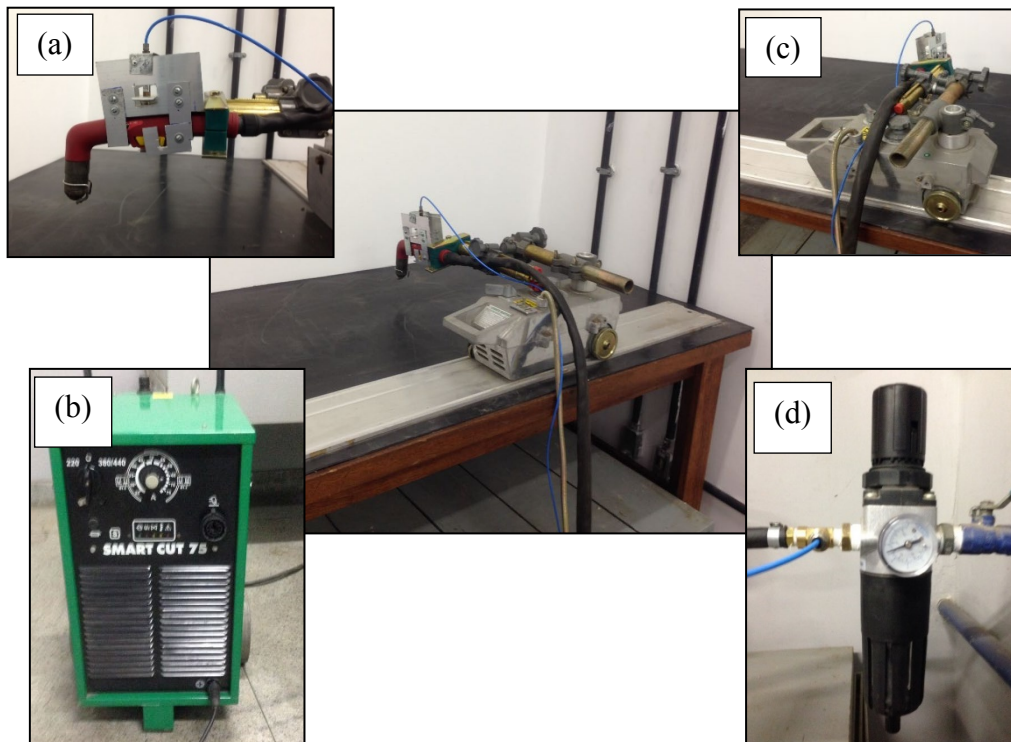


Figura 2. Equipamentos utilizados no corte a plasma manual e automatizado. (a) tocha plasma, (b) fonte de energia, (c) máquina de corte MC-46 e (d) lubrificador,

3PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os procedimentos executados foram planejados em padrões repetidos em todos os testes para garantir que apenas as variáveis estudadas influenciassem no resultado final. Nesta seção é descrito a sequência do experimento realizado.

Nesta etapa o planejamento experimental foi desenvolvido com o objetivo principal de verificar a formação da rebarba considerando os parâmetros de corte. Deste modo, será realizada a análise de variância para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de uma variável de saída com a variação de uma ou mais variáveis de entrada. No caso deste trabalho, a variável de saída é a espessura da rebarba de topo gerada na aresta de corte e as variáveis de entrada são a altura de corte, formada entre o bocal e a superfície do corpo de prova, e a velocidade de corte. Serão utilizados dois níveis para cada parâmetro de entrada. Deste modo, tem-se o modelo chamado de *Two-Factor Factorial Design*. Os fatores são considerados independentes, ou seja, a variação na altura de corte não influencia na velocidade de corte, e vice-versa. Na Tabela 2 é apresentada esta configuração.

Tabela 2. Parâmetros fixos do corte a plasma.

	Parâmetro	Limite inferior (-)	Limite superior (+)
P1	Altura de corte (mm)	5	8
P2	Velocidade de corte (mm/min)	350	580

Para cada fator ajustado tem-se duas hipóteses para avaliar:

- H0 - hipótese nula - a espessura da rebarba de topo não varia com o parâmetro em questão;
- H1 - hipótese alternativa - a espessura da rebarba de topo varia com o parâmetro em questão.

A ordem dos testes precisa garantir a aleatoriedade dos experimentos. Este fato é relevante para certificar que os resultados obtidos não sejam influenciados pelo desgaste da tocha e dos consumíveis, mas unicamente pelas variáveis de entrada. Considerando um planejamento experimental com 2 fatores, 2 níveis cada e 3 réplicas de cada experimento tem-se um total de 4 experimentos e 12 testes. Na Tabela 3 e 4 são apresentados os dados experimentais e os testes randomizados respectivamente.

Tabela 3. Dados experimentais

Experimento	H (mm)	Vc (mm/min)
A	5	350
B	5	580
C	8	350
D	8	580

Tabela 4. Planejamento experimental randomizado

Teste	Experimento	Réplicas	Altura (mm)	Velocidade de corte (mm/min)
1	D	2	8	580
2	A	3	5	350
3	A	1	5	350
4	D	1	8	580
5	B	1	5	580
6	C	3	8	350
7	C	3	8	580

8	B	3	5	580
9	B	2	5	580
10	A	2	5	350
11	D	1	8	350
12	C	2	8	350

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do corte a plasma do aço inoxidável austenítico AISI 304 para diferentes valores de altura e velocidade de corte

4.1 Análise qualitativa

Como apresentado na Introdução, o processo de corte a plasma é passivo de gerar inúmeras discontinuidades macroscópicas nas faces cortadas, desde simples ondulações até rebarbas refundidas na aresta superior (entrada do arco) e inferior (saída do arco). Nesta seção serão apresentados os resultados qualitativos do corte através da análise visual. A Figura (3) apresenta o esquema geral do processo e a ocorrência do desvio do arco, fenômeno de sopro magnético. Nesta figura apresenta-se o sentido de corte e a nomenclatura das chapas (Lado 1 e Lado 2) que será usada nos demais resultados a seguir. A Figura (4) apresenta as etapas de corte com a chama acesa, ao final do corte e com a chapa em resfriamento.

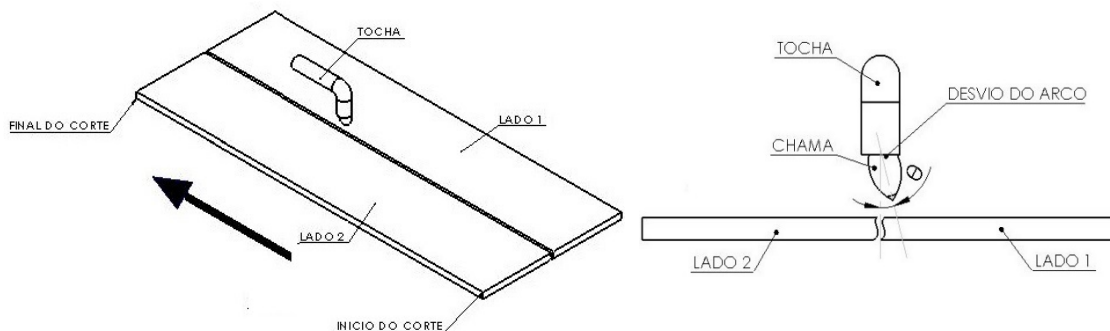


Figura 3. Percurso da tocha a plasma indicando os lados 1 e 2 formados após o corte.



Figura 4. Etapas do processo de corte.

A Figura (5) a vista superior e inferior para uma réplica de cada experimento. Pode-se observar que a maior ocorrência de rebarba foi para as chapas cortadas com os parâmetros de Velocidade de corte menor (350 mm/min). Para estas mesmas chapas foi observada tanto a formação de rebarba mais espessa para o LADO 1, indicando a possibilidade de ocorrência de sopro magnético, quanto a coloração azulada e marrom no aço mais próximo à chama de plasma.

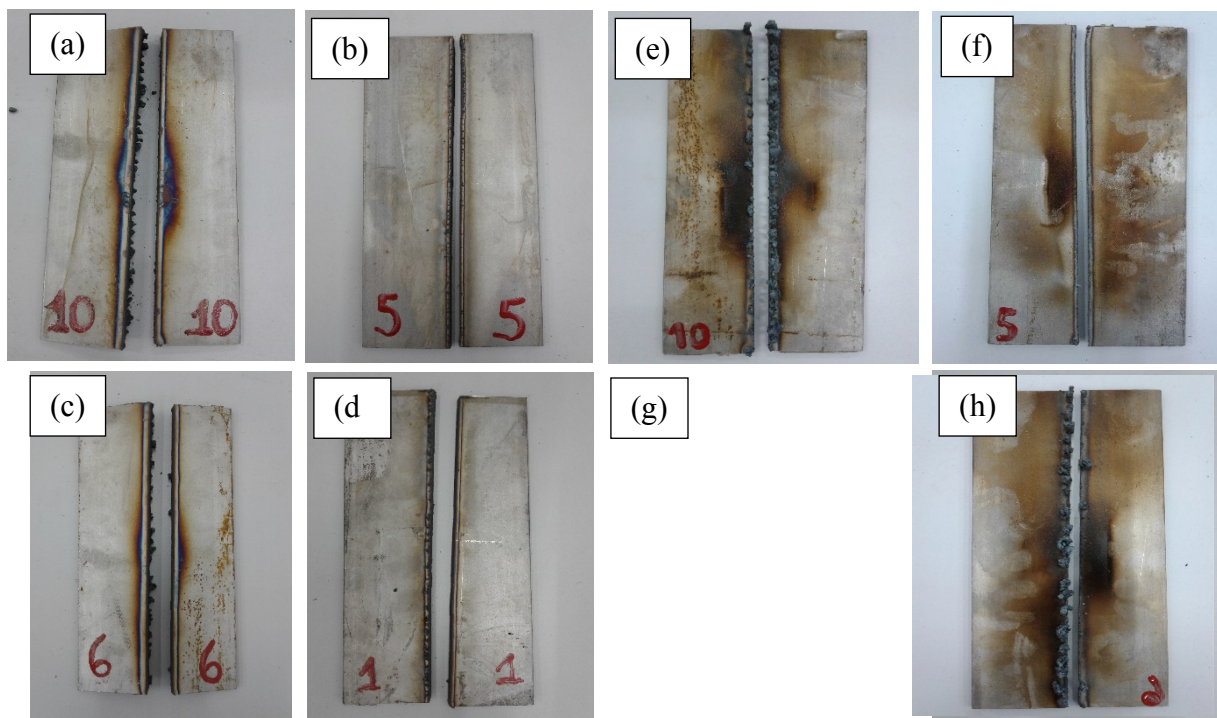


Figura 5. Chapas após o corte a plasma: (a), (b), (c), (d) vista superior e (e), (f), (g), (h) vista inferior. Onde (a), (e) $V_c = 350$ mm/min e $H = 5$ mm; (b), (f) $V_c = 580$ mm/min e $H = 5$ mm; (c), (g) $V_c = 350$ mm/min e $H = 8$ mm; (d), (h) $V_c = 580$ mm/min e $H = 8$ mm.

Pela análise qualitativa foi possível observar que os testes com baixa velocidade de corte (350 mm/min) apresentaram maior formação da região afetada pelo calor. As colorações azulada e marrom nas bordas que tiveram contato direto com chama indicam a reação química entre o metal e o gás de plasma usado no corte. Esta mudança de coloração é mais evidente em aços inoxidáveis. Na usinagem, por exemplo, quando a temperatura entre o contato da ferramenta com o cavaco atinge altos valores, a chance de se obter cavacos com cores semelhantes é alta. Venkatesh et al [10] estudaram a relação entre os parâmetros de corte ortogonal e a coloração dos cavacos utilizando ferramenta de metal duro e material da peça de AISI 1018. Os autores encontraram a coloração azulada e marrom para cavacos que alcançaram temperaturas de corte de 981°C e 900°C, respectivamente. Os testes com $V_c = 350$ mm/min (2, 3, 6, 10, 11, 12) apresentaram esta mudança significativa

na coloração e a formação de rebarbas mais evidentes, independente da altura de corte. A Figura 7 apresenta um exemplo detalhado destes resultados para o teste 10.

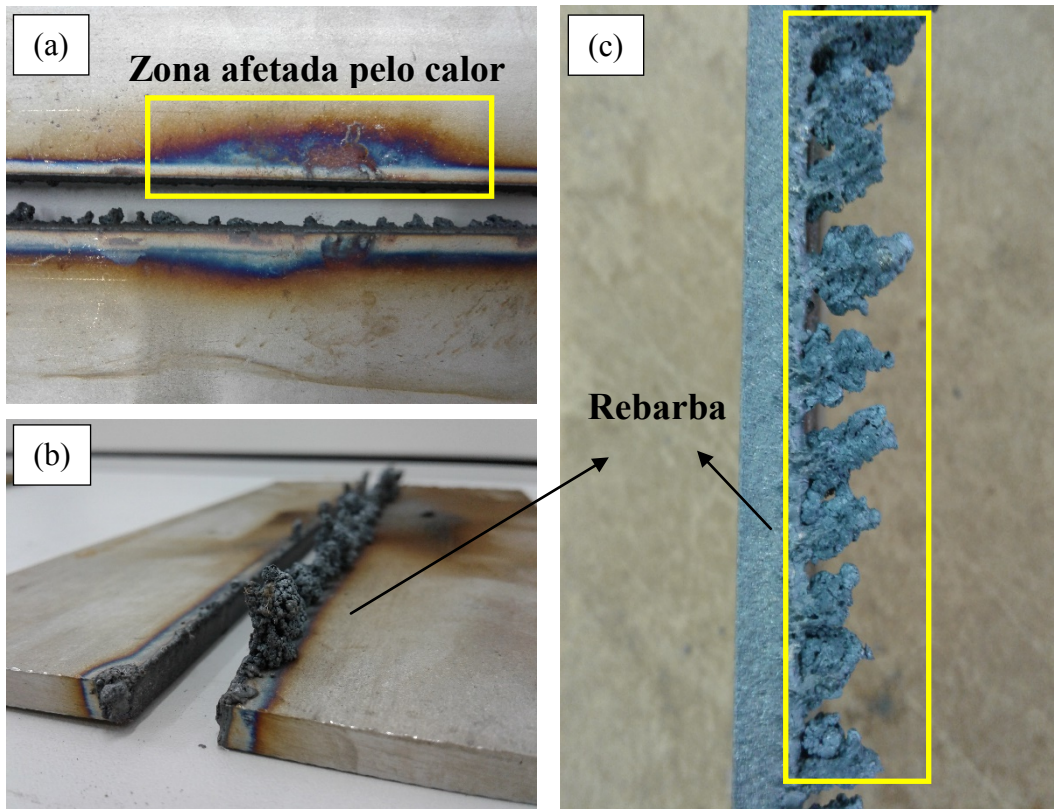


Figura 7. Experimento 10 ($V_c = 350$ mm/min e $H=5$ mm/min). (a) Vista superior indicando a zona afetada pelo calor da chama pela coloração azulada do aço; (b) e (c) Vista inferior indicando a formação de rebarbas na saída da chama.

4.2 Análise de Variância - ANOVA

A espessura da rebarba formada após o corte foram medidas com auxílio de um paquímetro com leitura de 0,02 mm, conforme apresentado no esquema da Figura (8). Foram realizadas 10 medidas em cada chapa com distância de 2 cm uma da outra. Os resultados foram analisados para identificar qual dos parâmetros é mais influente no processo de corte a plasma automatizado quando o foco é a qualidade macroscópica da região cortada.

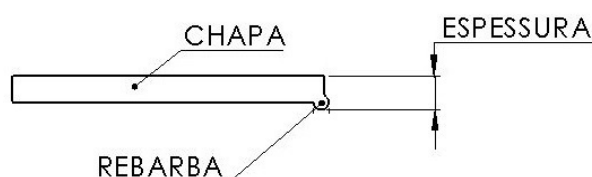


Figura 7. Medida da espessura da rebarba.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado através da análise de variância (ANOVA), considerando dois fatores e dois níveis. Para isso, compara-se o valor da estatística F do fator analisado, na tabela ANOVA, com o valor de $F_{\text{crítico}}$ da Tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor [8], para um nível de significância $\alpha = 5\%$. Para se obter o valor de $F_{\text{crítico}}$ utiliza-se o grau de liberdade do parâmetro analisado (altura de corte ou velocidade de corte) como numerador e o erro como denominador na Tabela de distribuição de Fisher. Se o fator F (ANOVA) for maior que $F_{\text{crítico}}$ significa que a hipótese nula é rejeitada e, portanto, o parâmetro influencia na variável de resposta (rebarba). O resultado da ANOVA é comumente apresentado no modelo da Tabela (4), onde SQ é a soma dos quadrados, GL é o grau de liberdade e MQ são os quadrados médios. A primeira coluna desta tabela apresenta a fonte de variação, a segunda coluna apresenta a soma dos quadrados de cada um dos fatores e sua variabilidade e a terceira coluna mostra os graus de liberdade que está relacionado com o número de níveis de cada fator. Inicialmente foram realizadas análises de variância para cada lado da placa cortada para verificar a ocorrência de descontinuidades aparentes no Lado 1 devido a possibilidade de desvio do arco. As Tabelas (5) e (6) apresentam análises de variância da espessura da rebarba do Lado 1 e Lado 2, respectivamente. O $F_{\text{crítico}}$ para estas quatro análises é 5,32 com nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela 4. Espessura da rebarba Lado 1

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob>F
Velocidade de corte	80,9641	1	80,9641	196,46	0
Altura de corte	0,0752	1	0,0752	0,18	0,6805
Interação	0,7252	1	0,7252	1,76	0,2213
Erro	3,2969	8	0,4121		
Total	85,0614	11			

Tabela 5. Espessura da rebarba Lado 2

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob>F
Velocidade de corte	0,96333	1	0,96333	45,42	0,0001
Altura de corte	2,55763	1	2,55763	120,6	0
Interação	0,41813	1	0,41813	19,72	0,0022
Erro	0,16967	8	0,02121		
Total	4,10877	11			

Da Tabela (4) é possível observar que o Fator $F > F_{\text{crítico}}$ para a velocidade de corte. Deste modo, este parâmetro atua mais significativamente na formação de rebarba do Lado 1. Já na Tabela (5) o Fator $F > F_{\text{crítico}}$ os dois parâmetros, indicando que estes influenciam na espessura da rebarba formada do Lado 2. Finalmente, a interação entre os parâmetros $F (1,76) < F_{\text{crítico}} (5,32)$ indica que não há uma dependência entre os parâmetros sobre a espessura da rebarba formada. Em seguida, foi realizada uma análise de variância considerando apenas espessura rebarbas, unindo os resultados dos Lados 1 e 2. Assim é possível verificar a importância dos parâmetros de corte sem considerar o efeito do desvio do arco. O $F_{\text{crítico}}$ encontrado para os dois casos foi de 4,35 com nível de significância de 5%. A Tabela (6) apresenta a análise de variância para a espessura.

Tabela 6. Espessura da rebarba L1 + L2

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob>F
Velocidade de corte	49,795	1	49,795	11,23	0,0032
Altura de corte	1,755	1	1,755	0,4	0,5364
Interação	1,122	1	1,1223	0,25	0,6204
Erro	88,683	20	4,4342		
Total	141,356	23			

Da Tabela (6) é possível observar que $F > F_{\text{crítico}}$ somente para a velocidade de corte. Assim, de modo geral, este parâmetro de corte exerce maior influência na espessura da rebarba, independente da ocorrência de desvio do arco. A interação entre os parâmetros $F (0,25) < F_{\text{crítico}} (4,35)$ indica que não há uma dependência entre os parâmetros sobre a espessura da rebarba formada. Finalmente, pode-se afirmar que as dimensões das rebarbas podem ser melhor controladas pela velocidade de corte.

5 CONCLUSÕES

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho. O objetivo principal deste trabalho foi apresentar a possibilidade de realizar o corte a plasma com acionamento e deslocamento automático e verificar a qualidade do corte pela análise visual e pela análise de variância a partir de dois níveis de velocidade e altura de corte:

- A partir da análise visual foi observada a formação de salpicos em cima das peças, principalmente para velocidade de corte de 580 mm/min. Este tipo de salpico ou respingo frequentemente está associado ao corte com velocidade rápida ou ao corte com maiores distância entre o bocal e a superfície da peça (tensão de arco alta);
- Pela análise de variância foi possível observar que o Lado 1 da placa apresentou maior ocorrência de rebarba, sendo sua espessura influenciada principalmente pela velocidade de corte;
- Em seguida, para desconsiderar o efeito do desvio do arco, foram realizadas análises para todas as medidas tomadas nos dois lados da placa e os resultados ratificaram que as dimensões da rebarba são altamente afetadas pela velocidade de corte;
- Suprimindo a ocorrência de sopro magnético, o corte a plasma automatizado é mais indicado por garantir o controle da altura e da velocidade de corte, evitando a ocorrência de respingos e rebarbas nas superfícies superior e inferior da peça cortada. O acionamento automático, adicionalmente, evita o contato direto do operador com as regiões próximas ao plasma, já que este pode alcançar temperaturas de aproximadamente 28000°C ao tocar na superfície da peça;
- Para evitar o corte assimétrico e a ocorrência de discontinuidades é importante diminuir ou evitar o ângulo de inclinação do arco. Para isso, podem-se realizar trabalhos futuros variando a corrente e a vazão do fluxo de gás.
- Para trabalhos futuros serão realizados testes de microdureza para verificar a extensão da região afetada pelo calor e a magnitude da variação microestrutural em função dos parâmetros de corte.

REFERÊNCIAS

- 1 Wainer, E., Brandi, S.D. and MELLO, F.D., 1992. "Soldagem: processos e metalurgia". Edgard BlücherLtda, São Paulo
- 2 Askeland, D.R. and Phulé, P.P., 2008. Ciência e engenharia dos materiais. Cengage Learning.
- 3 Colt, J., 2015. "Troubleshooting cnc plasma cutting, part ii,".PracticalWeldingToday.
- 4 HORI, K., WATANABE, H., MYOGA, T. and KUSANO, K., 2003. "Development of hot wire tig welding methodsusing pulsed current to heat filler wire: Research on pulse heated hot wire tig welding processes (report 1)". Quarterlyjournal of the Japan Welding Society, Vol. 21, No. 3, pp. 362–373.
- 5 Jones, R.B., February 1995. "New system to control magnetic arc blow in welding". JournalofShipProduction, Vol. 11,No. 1, pp. 30–33.
- 6 Lee, H.k., Park, S.h. and Kang, C.Y., 2015. "Effect of plasma current on surface defects of plasma-mig welding incryogenic aluminum alloys". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 223, pp. 203–215.
- 7 Yamaguchi, Y., Katada, Y., Itou, T., Uesugi, Y., Tanaka, Y. andIshijima, T., 2015. "Experimental investigation of magnetic arc blow in plasma arc cutting". Welding in the World, Vol. 59, No. 1, pp. 45–51.
- 8 Kumar, A., Joshi, H., Prahlad, V. and Singh, R., 2010. "Effect of magnetic field on laser-blow-off plasma plume: Structuredtemporal emission profile". Physics Letters A, Vol. 374, No. 25, pp. 2555–2560.
- 9 Kumar, R., Singh, R. and Kumar, A., 2012. "Effects of magnetic field on oscillatory structures in laser-blow-off plasma".Physics Letters A, Vol. 377, No. 1-2, pp. 93–98.
- 10 V. C. Venkatesh, D. Q. Zhou, W, Xue.A Study of Chip Surface Characteristics during the Machining of Steel, 1993.Annals of the CIRP 42/7/7993.