

EFEITO DO SOPRO MAGNÉTICO NA QUALIDADE DO CORTE A PLASMA AUTOMATIZADO*

Adriane Lopes Mougo¹
Guilherme Amaral do Prado Campos¹

Resumo

O desenvolvimento de tecnologias para o corte de materiais é avaliado pela qualidade do produto final. Deste modo, diz-se que um processo de corte apresenta bons resultados se este não modifica as formas e dimensões da peça e mantém suas propriedades mecânicas inalteradas. Dentre os processos de corte, o corte a plasma em chapas metálicas apresenta relevância para diversas aplicações da indústria. Sua precisão e qualidade dependem principalmente da boa execução da trajetória de corte e de sua respectiva velocidade. Neste trabalho utiliza-se um mecanismo que realiza o controle automático da ferramenta de corte e verifica-se a ocorrência do sopro magnético através da formação de rebarbas e da dureza para diferentes velocidades e alturas de corte. Os resultados demonstram os parâmetros e ajustes para cortes mais preciso, sem necessidade de acabamento ou tratamento da superfície após o corte.

Palavras-chave: Corte a plasma automático; sopro magnético; rebarba; dureza

MAGNETIC ARC BLOW IN AUTOMATED PLASMA CUTTING

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 of the burr formation and hardness at different speeds and cutting heights. The results show the parameters and adjustments for more precise cuts.

Keywords: Automatic plasma cutting; magnetic arc blow; burr formation; hardness

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

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias não convencionais para o corte de materiais é avaliado pela qualidade do produto final. Os processos de corte não convencionais mais conhecidos são os de jato de água abrasivo, corte por feixe de elétrons, corte por feixes de plasma e o processo por eletro descarga [1]. Conceitualmente, diz-se que um processo de corte apresenta bons resultados se este não modifica as formas e dimensões da peça e mantém suas propriedades mecânicas inalteradas. No que diz respeito as formas, tem-se a possibilidade de distorção da peça ocasionada pelas tensões térmicas geradas pelo calor excessivo, a formação de rugosidade/ondulações e a geração de rebarbas [1, 2, 3]. Sobre as propriedades mecânicas tem-se a possibilidade de formação de uma zona afetada pelo calor (ZAC) que pode modificar o diâmetro médio dos grãos pelo processo de recristalização e, por consequência, alterar sua resistência mecânica [4, 5, 6]. Dentre os processos de corte, o corte a plasma em chapas metálicas apresenta relevância para diversas aplicações da indústria.

O arco do corte a plasma é uma extensão do processo de soldagem TIG autógeno. Neste, o arco assume forma aproximada de um cone produzindo uma região relativamente grande da zona afetada pelo calor. A área da base do cone que se projeta sobre a superfície da peça varia com a distância da tocha à peça. Portanto, pequenas mudanças no comprimento do arco produzem variações relativamente grandes na taxa de calor transferida para a peça, por unidade de área. Já no corte a plasma 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 para certos limites do comprimento do arco [7].

Os processos com arco utilizam uma fonte de calor mais intensa, reduzindo a zona afetada pelo calor e proporcionando um resfriamento mais rápido [8]. 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. No corte automático a atuação do operador fica restrita ao posicionamento da tocha em relação à peça e ao acionamento do gatilho. É importante que as superfícies geradas sejam livres de discontinuidades e variações microestruturais para evitar a necessidade de uma operação após o corte. As principais discontinuidades possíveis de ocorrer no corte a plasma são apresentadas na (Figura 1).

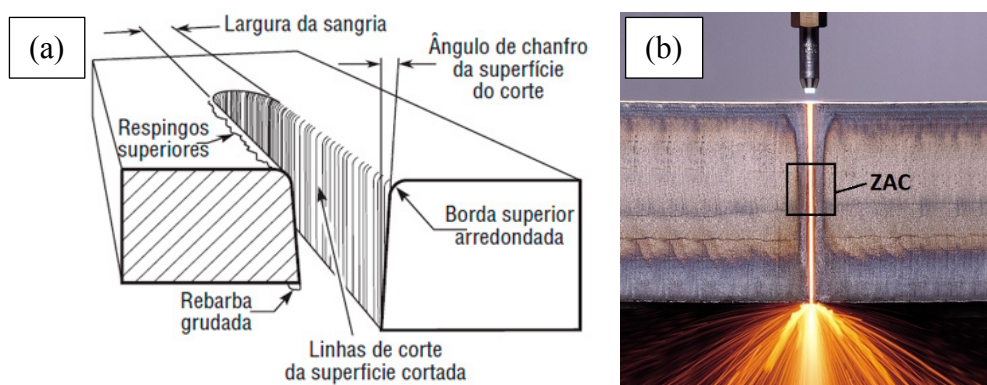


Figura 1. (a) Descontinuidades macroscópicas geradas a partir do corte à plasma e (b) zona afetada pelo calor a partir do corte a plasma.

Segundo [9] 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, 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.

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 [10, 11, 12]. No corte a plasma, a ocorrência deste sopro pode gerar o corte assimétrico e a formação de respingos e rebarbas nas superfícies cortadas [13, 14]. Se os parâmetros de corte já atuam na formação e tamanho da ZAC, a presença de sopro magnético pode aumentar esta região de variação microestrutural para o lado em que o jato de plasma for desviado.

Neste trabalho será realizada a análise da qualidade de corte em chapas de aço considerando a ocorrência do sopro magnético e dois parâmetros de entrada: o comprimento do arco e a velocidade de corte. Os resultados de saída serão a altura da rebarba e a dureza. Deste modo pretende-se fazer um levantamento da influência dos parâmetros de corte e do sopro magnético na qualidade do processo automatizado de corte a plasma para o aço austenítico AISI 304.

2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os recursos e especificações estão descritos nesta seção.

2.1 Material analisado

O material utilizado neste trabalho é o aço inoxidável austenítico AISI 304, de média resistência mecânica 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 o corte a plasma

Para automatizar o corte foi desenvolvido 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 Smart Cut 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).

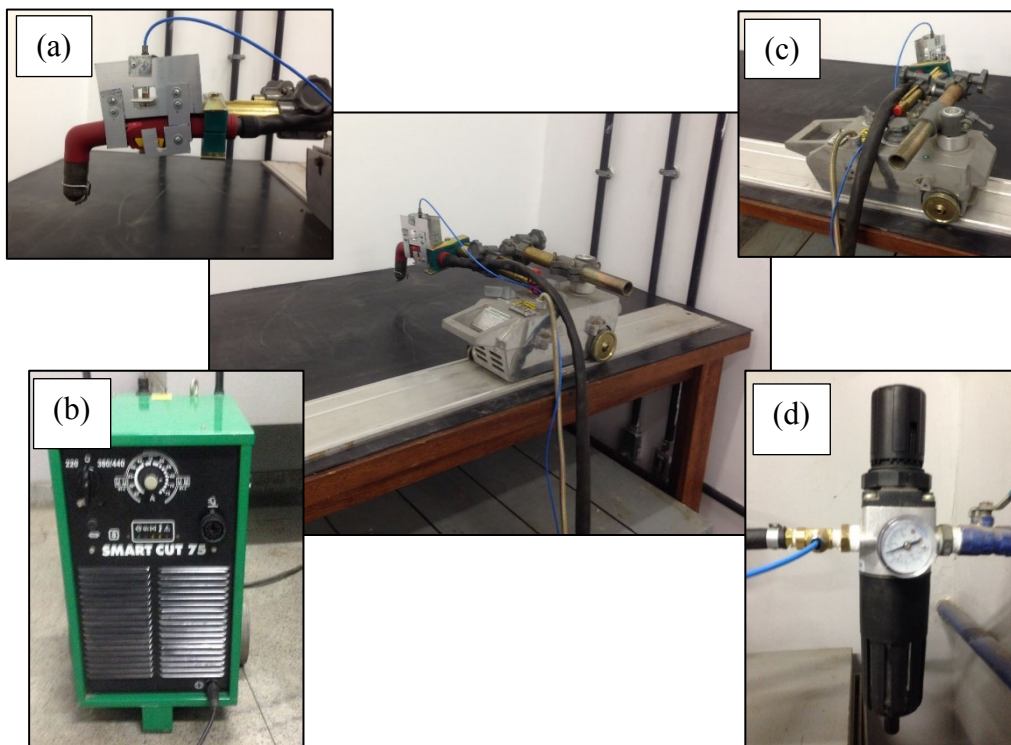


Figura 2. Equipamentos utilizados no corte a plasma manual e automatizado. (a) tocha plasma, (b) fonte de energia, (c) máquina de corte MC-46 e (d) lubrificador,

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental foi desenvolvido com o objetivo de verificar a formação da rebarba e a variação de dureza pela ocorrência da zona afetada pelo calor considerando dois parâmetros de corte. Os resultados serão divididos em análise qualitativa e quantitativa. Na análise quantitativa será realizada 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 será a rebarba e a dureza 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 rebarba e a dureza não variam com o parâmetro em questão;
- H1 – hipótese alternativa – a rebarba e a dureza variam 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

O processo de corte a plasma é passivo de gerar inúmeras descontinuidades 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 para a formação de rebarbas e da zona afetada pelo calor 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 e com a chapa em resfriamento.

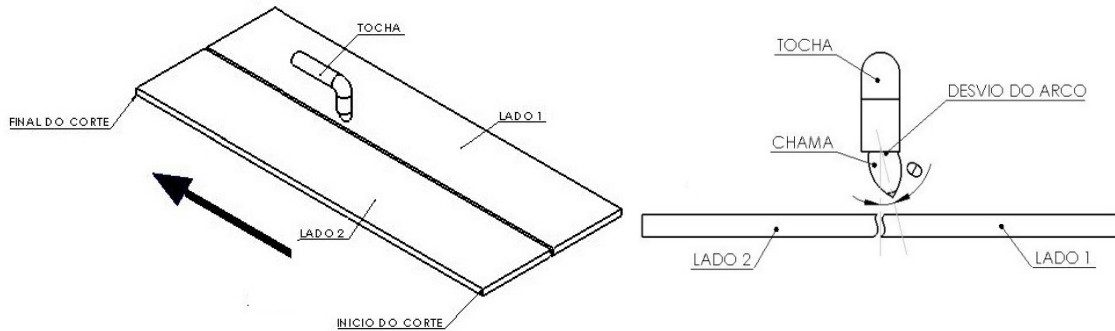


Figura 3. Percurso da tocha a plasma indicando os lados 1 e 2 formados após o corte.

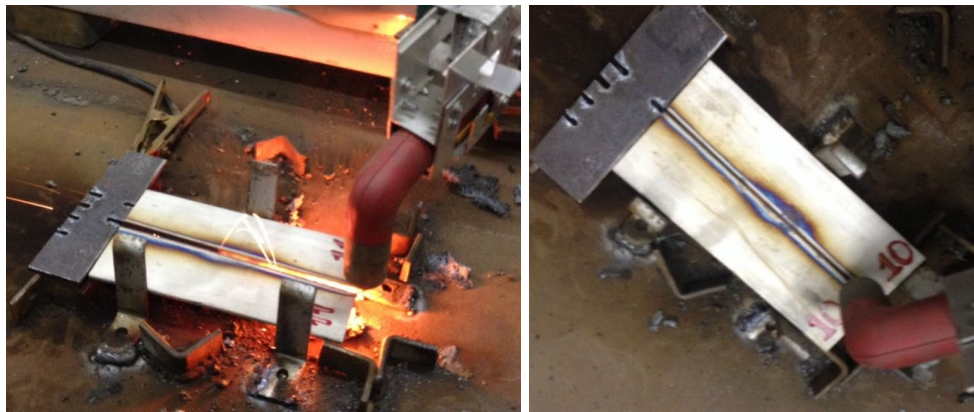


Figura 4. Etapas do processo de corte.

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 [15] 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 5 apresenta um exemplo detalhado destes resultados para o teste 10.

As chapas obtidas com velocidade de corte de 580 m/min e altura de 8 mm apresentaram menor ocorrência tanto de rebarbas quanto da zona afetada pelo calor.

A Figura 6 apresenta uma vista superior e inferior da chapa para o teste 1 com estes parâmetros. Vale ressaltar que o termo ZAC utilizado até este ponto do trabalho refere-se unicamente a mudança visível da coloração do aço que teve contato direto com o plasma. A possível variação microestrutural verificada pelo teste de dureza será apresentada nas próximas seções.

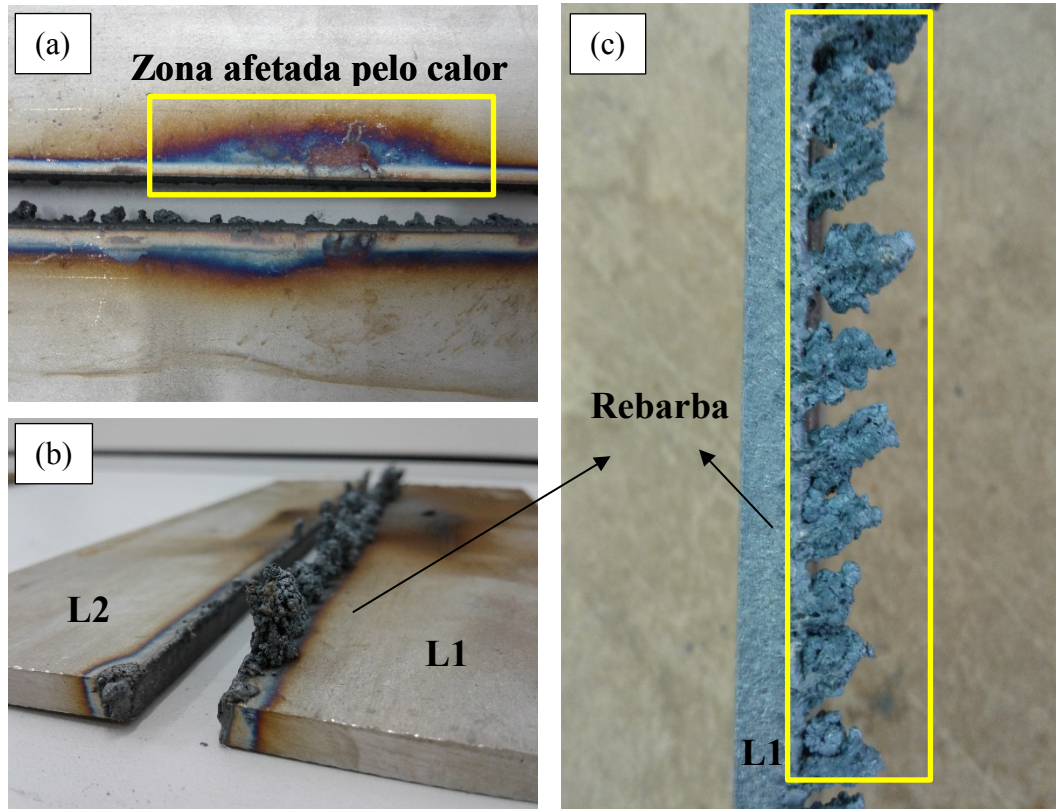


Figura 5. Experimento 10 ($V_c = 350$ mm/min e $H=5$ mm). (a) Vista superior indicando a ZAC pela coloração azulada; (b) e (c) Vista inferior indicando a formação de rebarbas na saída da chama.

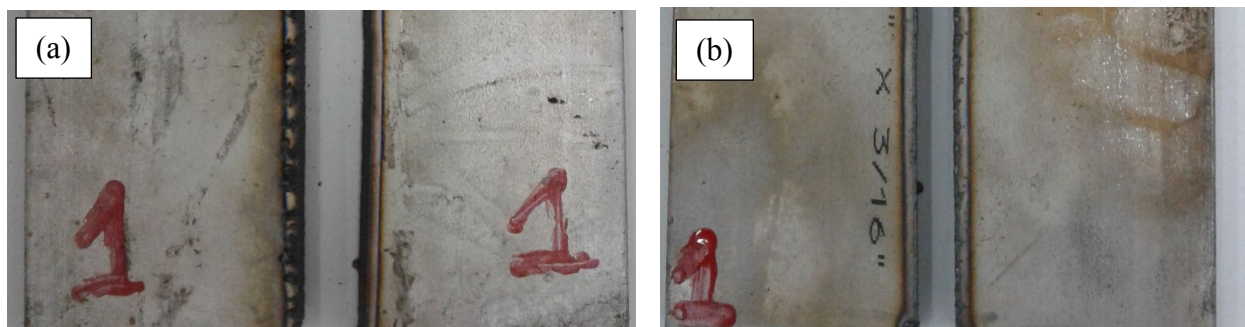


Figura 6. Experimento 1 ($V_c = 580$ mm/min e $H=8$ mm). (a) Vista superior e (b) Vista inferior.

Durante o corte foi possível observar que o arco desviou prioritariamente para fora, ou seja, para a chapa de lado 1 (L1) conforme foi esquematizado na Figura 3. De modo geral foi notado que as placas L1 apresentaram maior ocorrência de formação de rebarba, mas a coloração não apresentou visualmente grande variação de largura entre L1 e L2.

4.2 Análise de Variância – REBARBA

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 (7). 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.

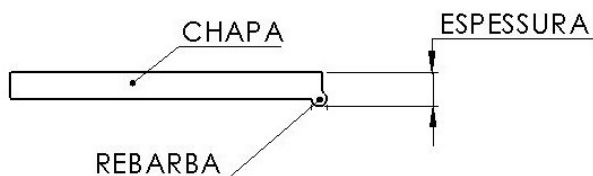


Figura 7. Medida da espessura da rebarba.

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_{critico} da Tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor [8], para um nível de significância $\alpha = 5\%$.

Para se obter o valor de F_{critico} 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_{critico} 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.

Foram realizadas análises de variância para cada lado da placa cortada para verificar a ocorrência de descontinuidades aparentes no Lado 1 devido o desvio do arco. As Tabelas (4) e (5) apresentam as análises de variância da espessura da rebarba do Lado 1 e Lado 2, respectivamente. O F_{critico} 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
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
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.

4.3 Análise de Variância - Dureza

Para análise de dureza foi utilizada uma máquina da Instron Wolpert, com carga de 60 kgf (588,4N), penetrador de diamante e medida de dureza na escala Rockwell A. Foram realizadas 5 medidas no metal de base distante da região mais afetada pelo calor. Em seguida, foram tomadas 5 medidas nesta região. A distância entre as medidas foi de aproximadamente 5 mm e a distância entre a borda da chapa até a ZAC foi de aproximadamente 3 mm. A Figura 8 apresenta a máquina utilizada, o detalhe durante a endentação e distâncias citadas anteriormente.



Figura 8. Ensaio de dureza Rockwell A.

Inicialmente foram realizadas análises de variância para cada lado da placa cortada para verificar a variação da dureza na ZAC em função dos parâmetros de corte para cada lado da placa. As Tabelas (6) e (7) apresentam as análises de variância da dureza do Lado 1 e Lado 2, respectivamente. O $F_{\text{crítico}}$ para estas duas tabelas é 4,49 com nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela 6. Dureza Lado 1

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob>F
Velocidade de corte	12,168	1	12,168	3,4	0,0838
Altura de corte	17,298	1	17,298	4,83	0,043
Erro	57,264	16	3,579		
Total	88,53	19			

Tabela 7. Dureza Lado 2

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob>F
Velocidade de corte	14,45	1	14,45	2,53	0,1311
Altura de corte	5,408	1	5,408	0,95	0,3448
Erro	91,312	16	5,707		
Total	222,562	19			

Da Tabela (6) é possível observar que o Fator $F > F_{\text{crítico}}$ para a altura de corte. Deste modo, este parâmetro atua mais significativamente na variação da dureza da ZAC para o Lado 1. Já na Tabela (7) o Fator $F < F_{\text{crítico}}$ para os dois parâmetros de corte, indicando que estes não exercem grande influência na variação da dureza da ZAC para o Lado 2.

A Figura 9 apresenta a média dos valores de dureza para uma amostra de cada teste realizado, onde MB é metal de base e ZAC é a zona afetada pelo calor. L1 e L2 se referem aos lados das placas após o corte, como explicado anteriormente.

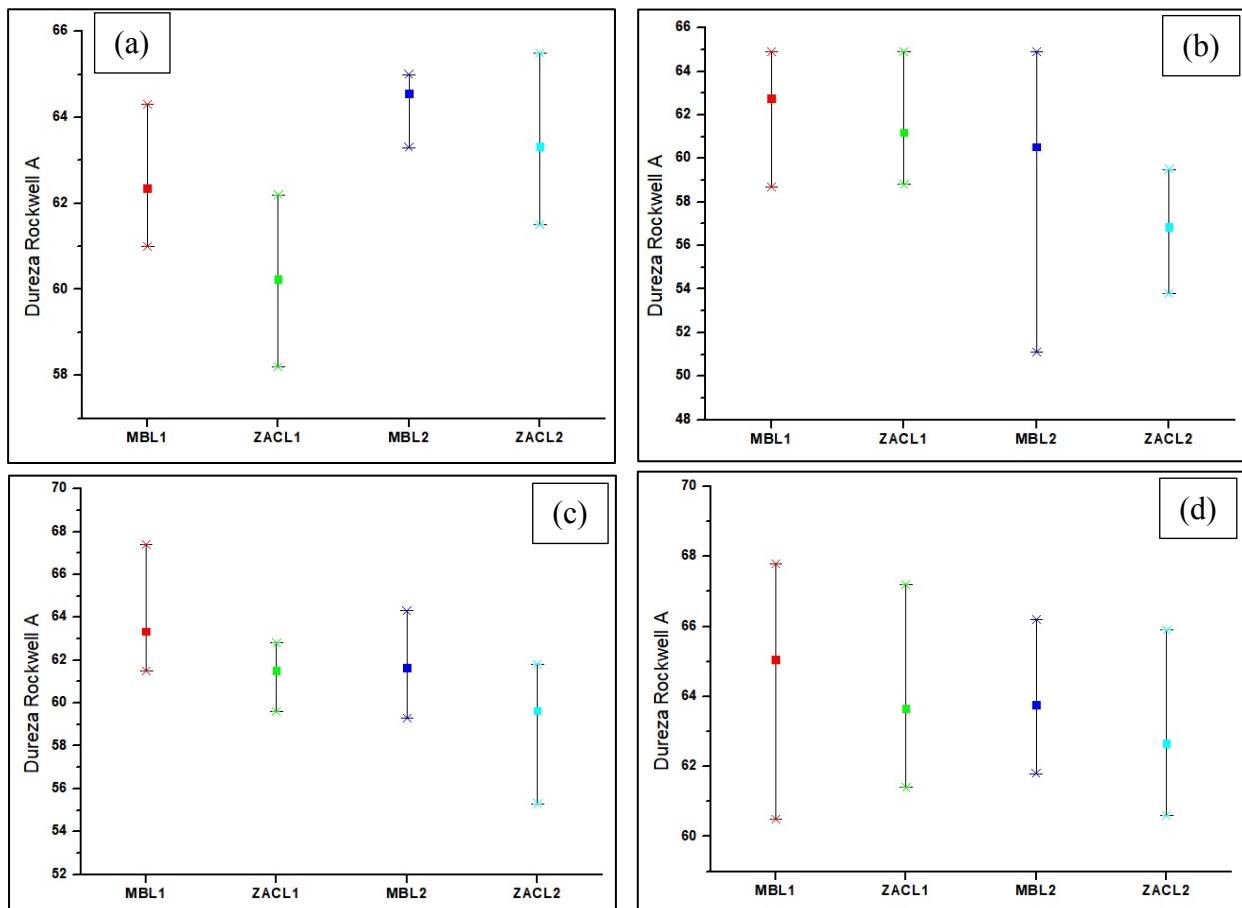


Figura 9. Resultado do ensaio de dureza Rockwell A: (a) $V_c = 350$ mm/min e $H=5$ mm; (b) $V_c= 580$ mm/min e $H= 5$ mm; (c) $V_c = 350$ mm/min e $H= 8$ mm; (d) $V_c = 580$ mm/min e $H = 8$ mm.

É possível observar que para todos os resultados a dureza média da ZAC foi menor que aquela medida no metal de base longe da região de corte. Este resultado pode indicar o aumento do tamanho de grão pela recristalização do material e, por consequência, a diminuição da área de contorno de grão e da resistência do material. Por fim, é possível afirmar que a condição onde é observada a maior influência dos parâmetros em relação aos lados L1 e L2 é na Figura 9 (a), com menor velocidade de

corte e menor altura. Esta condição foi a mais agressiva para o material, pois o plasma permanece mais tempo e mais próximo à chapa durante o 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:

- Pela análise visual foi possível observar o desvio do arco de plasma para a placa de Lado L1 e confirmado pelo chanframento involuntário do mesmo. Para esta placa foi observada a maior formação de rebarba principalmente na superfície de saída do arco;
- A velocidade de corte apresentou maior influência na formação de rebarba para L1, enquanto que L2 foi influenciado pelos dois parâmetros de corte;
- Pela análise de variância foi possível verificar também a maior influência da altura de corte nos valores de dureza da zona afetada pelo calor para a placa L1. Já para a placa L2 nenhum parâmetro se mostrou relevante na variação desta propriedade mecânica;
- De modo geral, nota-se que para todos os resultados a dureza média da ZAC foi menor que aquela medida longe da região de corte. Este resultado pode indicar o aumento do tamanho de grão pela recristalização do material e, por consequência, a diminuição da área de contorno de grão e da resistência do material.
- Para verificar esta ocorrência propõem-se para trabalhos futuros o preparo metalográfico de corpos de prova, a análise por microscopia e o mapeamento da dureza pelo ensaio Vickers.

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 evitar erros na operação. O acionamento automático, adicionalmente, impede 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.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ Campus Maracanã, ao professor Luís Felipe Souza e ao Técnico Marcelo Avelas pela disponibilidade e auxílio durante o teste de dureza.

REFERÊNCIAS

1. Adnan Akkurt. Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 16, 2009, pp. 373-384.
2. K. Salonitis, S. Vatousianos. "Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process". 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 3 (2012), pp. 287 – 292.
3. S. Cicero, T. García, J.A. Álvarez, A. Bannister, A. Klimpel, A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal. Fatigue behaviour of structural steels with oxy-fuel, plasma and laser cut

- straight edges. Definition of Eurocode 3 FAT classes. *Engineering Structures* 111 (2016) 152–161.
4. Daniel Krajcarz. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. *Procedia Engineering* 69 (2014) 838 – 843.
 5. A.K. Tingaev, R.G. Gubaydulin, I.A. Ilin. Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition of the Edges of Workpieces Made of Steel Brands S345, S390. *Procedia Engineering* 150 (2016) 1783 – 1790.
 6. D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal, A. Bannister, A. Klimpel. Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests. *Materials Characterization* 119 (2016) 55–64.
 7. Wainer, E., Brandi, S.D. and Mello, F.D., 1992. “Soldagem: processos e metalurgia”. Edgard Blücher Ltda, São Paulo
 8. Askeland, D.R. and Phulé, P.P., 2008. *Ciência e engenharia dos materiais*. Cengage Learning.
 9. Colt, J., 2015. “Troubleshooting CNC plasma cutting, part II”. *Practical Welding Today*.
 10. Hori, K., Watanabe, H., Myoga, T. and Kusano, K., 2003. “Development of hot wire tig welding methods using pulsed current to heat filler wire: Research on pulse heated hot wire tig welding processes (report 1)”. *Quarterly journal of the Japan Welding Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 362–373.
 11. Jones, R.B., February 1995. “New system to control magnetic arc blow in welding”. *Journal of Ship Production*, Vol. 11, No. 1, pp. 30–33.
 12. Lee, H.k., Park, S.h. and Kang, C.Y., 2015. “Effect of plasma current on surface defects of plasma-mig welding in cryogenic aluminum alloys”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 223, pp. 203–215.
 13. Kumar, A., Joshi, H., Prahlad, V. and Singh, R., 2010. “Effect of magnetic field on laser-blow-off plasma plume: Structured temporal emission profile”. *Physics Letters A*, Vol. 374, No. 25, pp. 2555–2560.
 14. 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.
 15. 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.