

CORTE A PLASMA: INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NO PROCESSO, NA QUALIDADE DO CORTE E NA ZTA FORMADA NO AÇO AISI 1045*

*Maria Mariana Simões Ferreira¹
Victor Souza Esteves Lima²
Vitor Canesso Gonçalves³
Ivan José de Santana⁴*

Resumo

Devido à crescente necessidade de renovação tecnológica, houve nos últimos anos um aumento expressivo na criação e ou desenvolvimento de processos de corte, visando unir qualidade à velocidade dos processos. O processo de corte a plasma vem sendo cada vez mais utilizado, uma vez que trata-se de um processo que supera em qualidade e velocidade métodos de corte tradicionais, como o oxicorte. Trata-se de um processo em que um arco elétrico gera a energia necessária para o corte por fusão. Este trabalho avalia a influência da corrente elétrica, da velocidade de corte e da distância entre a tocha e a peça, na qualidade da superfície cortada e na microestrutura formada no aço AISI 1045. Para tanto, construiu-se um dispositivo para a fixação dos corpos de prova, no intuito de simular a taxa de resfriamento de peças de grande porte. Além de análises qualitativas a respeito do processo e das superfícies cortadas, a microestrutura foi caracterizada por metalografia e as propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de microdureza Vickers. Os resultados possibilitaram avaliar o comportamento do processo em função dos diferentes parâmetros aplicados, avaliar a extensão da ZTA em cada condição e avaliar os aspectos da superfície de corte.

Palavras-chave: Corte a plasma; Aço AISI 1045 ZTA; Corte AISI 1045

PLASMA CUTTING: INFLUENCE OF PARAMETERS IN THE PROCESS, CUTTING QUALITY AND ZTA FORMED IN THE STEEL AISI 1045

Abstract

Due to the growing demand for new technologies, there has been in the last years an increase on the development and creation of cutting process, aiming to combine quality and speed of the process. The plasma cutting process has recently been increasingly used and studied since it is a process that exceeds in quality and speed traditional cutting methods such as oxyfuel. It is a process that an electric arc of plasma generates heat for the fusion of the metal. In this work, the effects of the electric current, the cutting speed and the distance between the torch and the part on the surfaces quality and the microstructure of the AISI 1045 steel were evaluated. Therefore, a device was built to hold the parts and increase the cooling rate. In addition to qualitative analyzes regarding the process and the cut surfaces, the microstructure were analysed by metallography and the mechanical properties were evaluated by the microhardness test. The results enabled evaluate the ZTA length in each condition and also evaluate the surface characteristics.

Keywords: Plasma cutting; Steel AISI 1045 ZTA, cutting AISI 1045.

¹ *Engenheira de Materiais, Estudante, DEMEC, UFMG, Belo Horizonte, MG Brasil.*

- ² *Engenheiro de Materiais, Estudante, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil.*
- ³ *Engenheiro Mecânico, Mestrando, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil*
- ⁴ *Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, DEMAT, CEFET MG, Belo Horizonte, MG Brasil*

1 INTRODUÇÃO

O processo de corte a plasma consiste em um jato de plasma que gera calor para a fusão do material, que será removido por um jato de gás. Os aços inoxidáveis, os aços ao manganês, as ligas de titânio, o cobre, o magnésio, o alumínio e suas ligas e o ferro fundido podem ser cortados por esse método [1].

Com o avanço cada vez mais rápido dos processos industriais e com o aumento da demanda por produtos dessas indústrias, tornou-se necessário a utilização de processos que possam unir qualidade e velocidade. Sendo assim, o corte a plasma vem sendo introduzido e substituindo processos de corte com tesouras e cortes com chama. [2]

Salonitis e Vatousiano [3] investigaram os parâmetros mais importantes que influenciam na qualidade do corte a plasma. Avaliaram o efeito da corrente elétrica, velocidade de corte e altura da tocha em relação a peça e indicaram os melhores parâmetros utilizados. Concluíram que o parâmetro que mais influencia no aspecto superficial do corte (rugosidade e ondulação da superfície cortada) foi altura da tocha, uma vez que, em alturas maiores o arco adquire um comprimento mais longo e com curvas, gerando irregularidades. Concluíram, também que a velocidade influencia na rugosidade da superfície cortada: velocidades altas geram linhas de arraste na superfície da peça e velocidades baixas levam a um fenômeno de solidificação/fusão/solidificação que geram imperfeições na superfície. Com relação a ZTA relataram uma correlação significativa com a velocidade e com a corrente de corte, pois são elas as responsáveis pelo aporte térmico na peça.

Chamarthia *et al.* [4] analisaram, por meio do corte de uma placa Hardox 400, os efeitos da tensão, da velocidade de corte e da taxa de fluxo de gás na formação de irregularidade na superfície cortada. Utilizaram para análise dos resultados o software “Analysis of Variance” (ANOVA), que identificou os principais parâmetros do processo, determinando sua otimização para um processo de melhor qualidade. Concluíram em seu estudo que a velocidade de corte varia inversamente proporcional a espessura da chapa cortada, que a tensão do arco é o principal parâmetro que influencia na qualidade do corte, seguida pela velocidade de corte.

Sanda, Margareta e Adriana [5] avaliaram a superfície de aços inoxidáveis cortados a plasma. Os cortes foram feitos em um equipamento CNC e os parâmetros utilizados para a análise do efeito de suas variações foram: velocidade de corte, espessura do material e intensidade de corrente. Os autores concluíram que o processo é adequado para materiais com espessura entre 01 e 600mm, assim como para qualquer material que seja condutor elétrico, incluindo aço carbono, aço inoxidável, cobre, ferro fundido e ligas. Foi verificado que a espessura do material exerceu a maior influência sobre a rugosidade da superfície cortada, seguida da velocidade e da corrente.

Bini *et al.* [6] avaliaram a influência da tensão do arco, velocidade de corte, fluxo de plasma, gás de proteção e composição do gás na posição e no formado do corte. A técnica DoE (*The Design of Experiments*) foi usada para determinar os principais parâmetros que definiriam o perfil do corte. As análises indicaram que a velocidade de corte e a tensão do arco afetaram o mecanismo de formação do corte e a interação entre eles definem a inclinação do corte.

O corte a plasma apesar de não se tratar de um processo novo as informações disponíveis caracterizam-se mais por um grande número de patentes do que por publicações científicas a respeito das características do processo. Há, portanto, uma necessidade de compreensão dos fenômenos mecânicos e físicos do processo, para

dessa maneira, estabelecer parâmetros adequados para obtenção de melhores características de corte. Este trabalho avalia a influência da corrente elétrica, da velocidade de corte e da distância entre a tocha e a peça, na qualidade da superfície cortada e na microestrutura dos corpos de prova de aço AISI 1045. Para tanto, construiu-se um dispositivo para a fixação dos corpos de prova no intuito de simular a taxa de resfriamento de peças de grande porte. Além de análises qualitativas a respeito do processo e das superfícies cortadas, a microestrutura foi caracterizada por metalografia e as propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de microdureza Vickers. Os resultados possibilitaram avaliar o comportamento do processo em função dos diferentes parâmetros aplicados, avaliar a extensão da ZTA formada em cada condição e avaliar os aspectos superficiais da superfície de corte.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O material utilizado para os corpos de prova foi o aço AISI 1045, para a determinação de sua composição química foi utilizado o equipamento Foundry Master Expert da Oxford. Os corpos de prova foram confeccionados com as seguintes dimensões: 76,2mm x 31,75mm x 12,7mm (3" x 1 1/4" x 1/2").

Para a realização do corte foi utilizada uma estrutura composta por: uma mesa de aço, utilizada em procedimentos de corte e soldagem; um tartilope, com velocidade de deslocamento variável, acoplado com hastes para o encaixe da tocha; um dispositivo de aço para o encaixe dos corpos de prova e o equipamento de corte a plasma. A Figura 01 exhibe esquematicamente a montagem do experimento.

O dispositivo de aço utilizado para encaixe dos corpos de prova durante o corte foi utilizado com o intuito de acelerar o resfriamento dos corpos de prova, uma vez que aumenta a troca de calor, portanto a taxa de resfriamento, simulando o corte de estruturas de médio/grande porte.

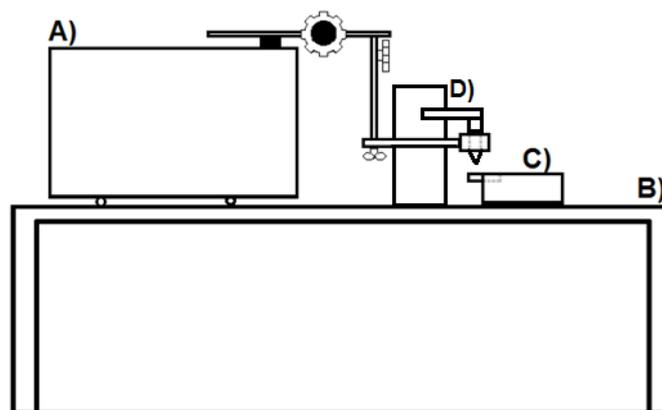


Figura 01. Desenho esquemático da estrutura montada para realização do procedimento. A) Tartilope com haste para encaixe da tocha; B) Mesa de corte; C) Suporte para encaixe do corpo de prova; D) Equipamento de corte a plasma

O equipamento de corte a plasma utilizado foi o da marca Hypertherm, modelo Powermax 85. Este equipamento pode ser aplicado manualmente ou mecanizado/automatizado com possibilidade de aplicação de corrente elétrica de 85 amperes (A).

O experimentos de corte a plasma dos corpos de prova foram divididos em 05 procedimentos:

- Procedimento 01

Foram fixados os valores de corrente (60 A), a altura da tocha (3,6 mm) e a velocidade de corte (19,10 cm/min). Utilizou-se dois corpos de prova variando-se apenas o sentido de corte: direção de corte de um corpo de prova oposto a direção de corte do segundo.

- Procedimento 02

Foram fixados os valores de corrente (60 A), a altura da tocha (3,6 mm) e sentido de corte. Utilizou-se sete corpos de prova, variando as velocidades de corte entre eles: 16,4 cm/min; 21,8 cm/min; 24,5 cm/min; 29,9 cm/min; 40,8 cm/min; 57,0 cm/min e 78,7 cm/min.

- Procedimento 03

Foram fixados os valores de corrente (48 A), altura da tocha (3,6 mm) e sentido de corte. Utilizou-se três corpos de prova, variando as velocidades de corte entre eles: 24,5 cm/min; 29,9 cm/min e 35,4 cm/min.

- Procedimento 04

Foram fixados os valores de corrente (48 A), velocidade (35,4 cm/min) e sentido de corte. Utilizou-se dois corpos de prova e variou-se as alturas da tocha: 2,4mm e 1,2mm.

- Procedimento 05

Foram utilizados os valores de corrente (48 A), velocidade (24,5 cm/min) e sentido de corte. Utilizou-se dois corpos de prova e variou-se a altura da tocha: 6,0 mm e 7,2mm.

Os corpos de prova do procedimento 02 foram cortados aumentando gradativamente a velocidade de corte até que a realização do corte não fosse mais possível.

O primeiro teste do procedimento 03, tem seu valor de corrente e velocidade reduzidos em aproximadamente 20% em relação ao quarto teste do procedimento 02, com o intuito de avaliar se o corte continuaria sendo executado com a mesma eficiência em valores de corrente e velocidade mais baixas. O corte ocorreu normalmente, logo, manteve-se a corrente de 48 Amperes e aumentou-se apenas a velocidade de corte até que este não ocorresse mais.

No procedimento 04, os corpos de prova foram cortados utilizando os mesmos parâmetros de corrente e velocidade do último teste do procedimento 03, o teste em que o corte não ocorreu. Porém, reduziu-se a altura da tocha, afim de verificar se a sua aproximação possibilitaria a ocorrência do corte.

No procedimento 05, os corpos de prova foram testados utilizando os mesmos parâmetros de corrente e velocidade do primeiro teste do procedimento 03, o teste em que o corte ocorreu normalmente. Porém, aumentou-se a altura da tocha, afim de verificar se o seu afastamento levaria a uma mudança nas características do corte.

Foram selecionados para análise de sua microestrutura e ZTA, os corpos de prova que sofreram o corte térmico. Estes foram preparados por meio dos processos de embutimento a frio, lixamento, polimento e ataque químico com Nital 5%. Após essa preparação, as imagens de micrografia das amostras foram capturadas utilizando microscópio ótico, modelo IM713 da empresa Kontrol.

Foram realizadas análises de microdureza nessas amostras, por meio do microdurometro HMV da Shimadzu, para avaliar quantitativamente o aumento de dureza na ZTA formada e para possibilitar a determinação da extensão da ZTA. O perfil de microdureza foi obtido a partir da extremidade da superfície cortada (ZTA) em direção ao metal base, o procedimento era interrompida quando os valores de dureza apresentavam uma queda brusca nos valores (dureza do metal base),

indicando o fim da ZTA. A Figura 02 apresenta uma representação esquemática do procedimento.

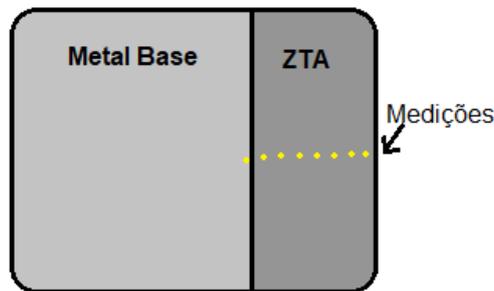


Figura 02. Procedimento de determinação da dureza das amostras e da extensão da ZTA.

2.2 Resultados e Discussões

Por meio dos resultados da análise química do aço utilizado, mostrado na Tabela 01, pôde-se concluir que o aço utilizado é um AISI 1045 [10, 11].

Tabela 01. Composição química aço 1045 utilizado (resultado)

Elemento	Fe	C	Mn	Si	Cr
%	98,5	0,45	0,62	0,23	0,05

Os corpos de prova do procedimento 01 foram cortados, independente da direção de corte, e microestrutura analisada, possibilitando concluir que o sentido de corte não influencia no processo e nem na microestrutura ou nas características da superfície cortada.

A Figura 03 apresenta a superfície formada após o corte dos corpos de prova do segundo procedimento. Pode-se verificar a presença de sulcos ao longo de todas as superfícies, percebeu-se também que houve uma diferença de inclinação desses sulcos entre os corpos de prova, sendo que, os corpos de prova que foram cortados com velocidades de corte mais altas 40,8 e 57,0 cm/min, apresentaram sulcos com inclinação mais acentuada. O aumento da velocidade acima de um certo limite, faz com que o plasma diminua sua estabilidade, não sendo capaz de acompanhar a tocha, gerando assim as chamadas linhas de arraste. Influenciando, portanto, na rugosidade da superfície cortada.

As Figuras 04 a 09 apresentam os gráficos com os valores das microdurezas observadas nas amostras cortadas dos corpos de prova do procedimento 02.

Analisando os valores encontrados nos testes de microdureza, percebeu-se que a medida que se aumentou a velocidade de soldagem houve também o aumento da dureza da ZTA. Isso pode ser correlacionado com a velocidade de resfriamento dos corpos de prova cortados. Nas velocidades maiores o aporte térmico foi menor, já que a tocha permaneceu menos tempo sobre o corpo de prova, desse modo, maior foi o gradiente de temperatura e a taxa de resfriamento, formando estruturas mais duras. Sendo o contrário também verdadeiro, à velocidades menores o aporte térmico foi maior, já que a tocha permaneceu mais tempo sobre o corpo de prova, desse modo, menor foi o gradiente térmico e a taxa de resfriamento, formando estruturas menos duras.

Percebeu-se também que os valores de dureza em todas as amostras caíram gradativamente, apresentando uma fase de transição da estrutura da ZTA e do metal de base.

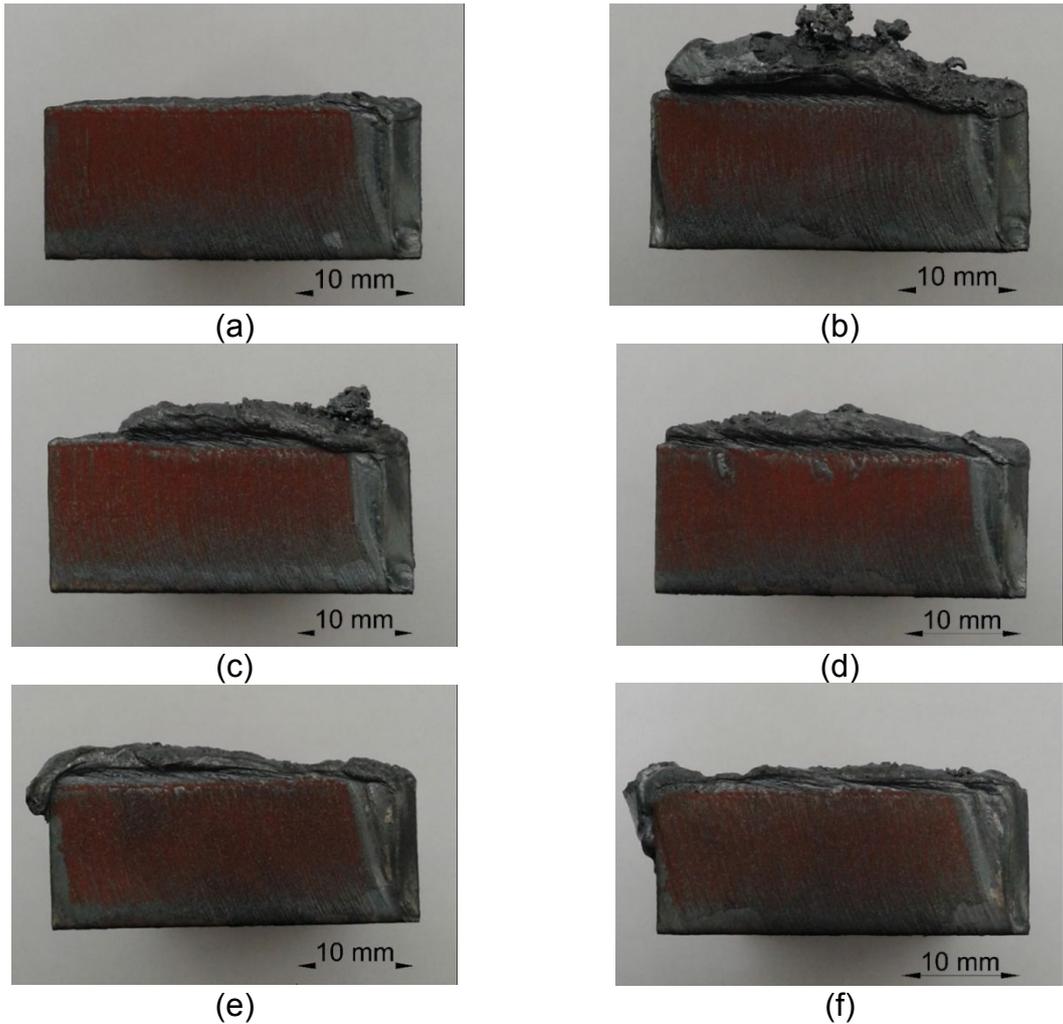


Figura 03. Superfície pós corte dos corpos de prova do segundo procedimento, corrente: 60 A e altura da tocha: 4,2mm: a) V= 16,4 cm/min, b) V= 21,8 cm/min, c) V= 24,5 cm/min, d) V= 29,9 cm/min, e) V= 40,8 cm/min e f) V=57,0 cm/min.)

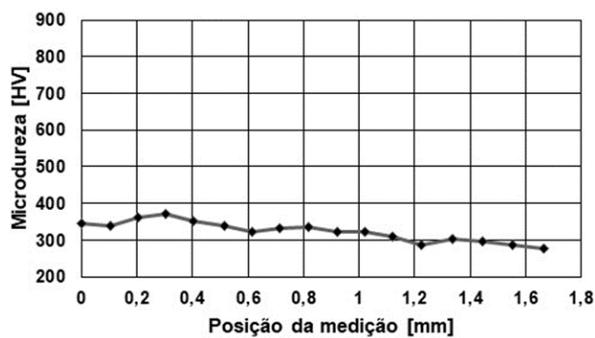


Figura 04. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 16,4 cm/min, procedimento 02.

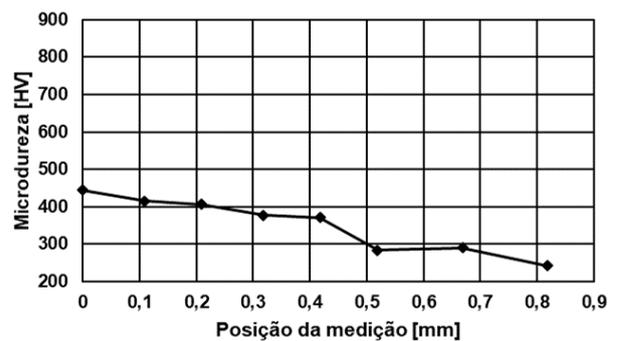


Figura 05. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 21,8 cm/min, procedimento 02.

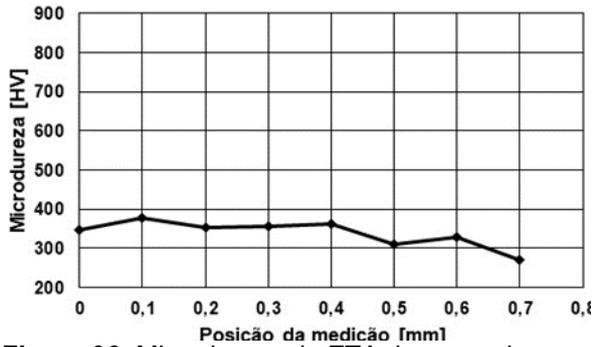


Figura 06. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 24,5 cm/min, procedimento 02.

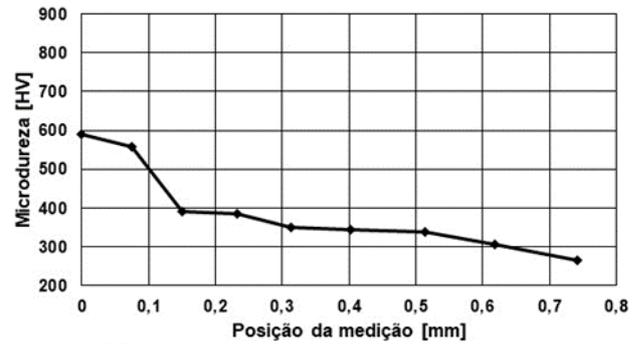


Figura 07. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 29,9 cm/min, procedimento 02.

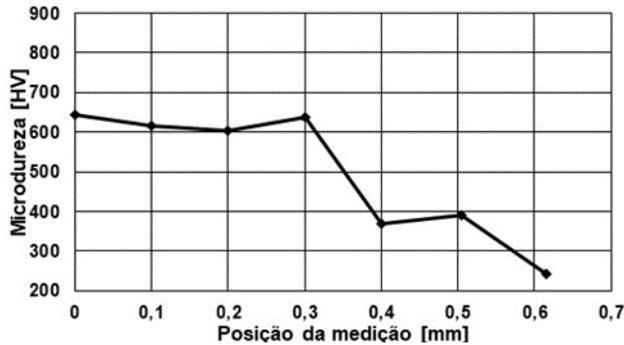


Figura 08. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 40,8 cm/min, procedimento 02.

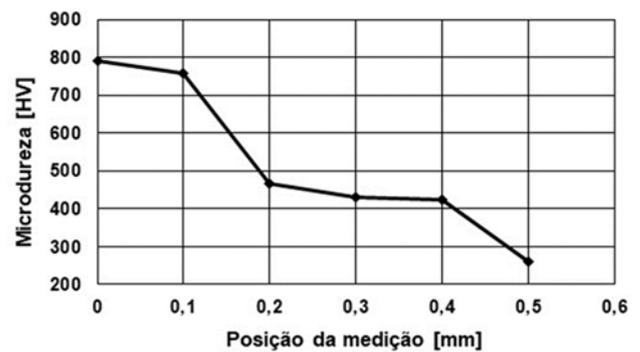


Figura 09. Microdureza da ZTA do corpo de prova com a velocidade de 57,0 cm/min, procedimento 02.

O tamanho da ZTA também foi determinado por meio das análises de microdureza das amostras, pois determina-se o fim da ZTA quando o metal não apresenta mais alterações em sua estrutura, ou seja, quando o metal possui a mesma dureza que possuía antes do processo. Logo, ao registrar valores próximos a 250 HV considerou-se o final da ZTA registrando a posição em que essa medição foi realizada. A Tabela 02 apresenta os valores relativos à extensão da ZTA dos corpos de prova utilizados no procedimento 02.

Tabela 02. Extensão da ZTA dos corpos de prova utilizados no procedimento 02

Velocidade de corte [cm/min]	16,4	21,8	24,5	29,9	40,8	57,0
Extensão da ZTA [mm]	1,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5

Notou-se que, no geral, a ZTA formada nesse processo é bem pequena e que o aumento da velocidade de corte ocasionou uma diminuição na sua extensão. Isso pode ser explicado pois a diminuição da energia térmica, que ocorre com o aumento da velocidade de corte, aumenta o gradiente de temperatura, diminuindo o tempo de permanência em altas temperaturas resultando em menor ZTA.

A Figura 10 “a” representa a superfície do corpo de prova cortado no procedimento 03 com velocidade de 24,5 cm/min, corrente de 48 Amperes e altura da tocha de 4,2mm, o único corpo de prova desse procedimento que o corte pôde ser realizado utilizando os parâmetros propostos. A Figura 10 “b” representa a superfície do corpo de prova cortado no procedimento 05, com velocidade de 24,5 cm/min, corrente de 48 amperes e altura da tocha de 7 mm, o único corpo de prova desse procedimento que o corte pôde ser realizado utilizando os parâmetros propostos.

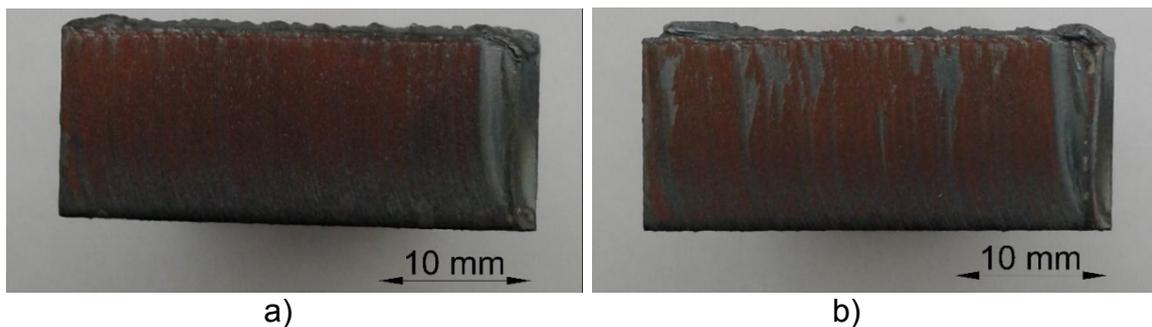


Figura 10. Superfície pós corte do corpo de prova do procedimento 3 com altura de tocha de 4,2 mm e superfície pós corte do corpo de prova do procedimento 5 com altura de tocha de 7 mm

Avaliando as superfícies desses corpos de prova, notou-se que as linhas de arrastes apresentam inclinações muito próximas. Entretanto, as linhas do corpo de prova do procedimento 05 são mais acentuadas e apresentam curvaturas. Lembrando que ambos os corpos de prova foram cortados com os mesmos valores de corrente, velocidade e sentido de corte, variando entre eles somente a altura da tocha. O que explica a característica diferente das linhas de arraste, pois a alturas maiores o arco de plasma é mais longo e curvo levando a formação de linhas de arraste acentuadas e curvaturas na superfície [3].

Os parâmetros do primeiro teste do procedimento 03, foram definidos a fim de compará-lo com o quarto teste do procedimento 02. Seus valores de corrente e velocidade foram 20% menores, para assim, verificar se o corte continuaria a ocorrer. O que se observou foi que o corte ocorreu. Sendo explicado pelo fato de que apesar da redução do calor transferido à peça com a diminuição da corrente, houve uma compensação de energia com o aumento do calor transferido a mesma ao reduzir a velocidade. Já em relação a característica dos cortes observou-se que o corte realizado no procedimento 03 possui linhas de arraste mais inclinadas, explicadas pela maior velocidade de corte utilizada.

O procedimento 05 foi realizado para verificar se o primeiro teste do procedimento 03, em que o corte ocorreu, sofreria modificações com o aumento da altura da tocha. O fato de o corte ter sido completado com sucesso, juntamente com o fato de que a ZTA de ambos os corpos de prova possuírem tamanhos muito próximos, permitiu inferir que a altura da tocha não influencia diretamente na ocorrência corte e nem no calor transferido à peça.

O procedimento 04 foi realizado com o intuito de verificar se o corte, que não ocorreu no procedimento 03, devido à combinação não efetiva da corrente e da velocidade, ocorreriam ao diminuir a altura da tocha, ou seja, ao aproximar a tocha da peça. Foi verificado que o corte não ocorreu mesmo com essa aproximação. Pode-se reforçar, por meio deste resultado, que a altura da tocha não influencia diretamente na ocorrência do corte e nem no calor transferido à peça.

As microestruturas das amostras foram analisadas e foi notado a formação de uma mesma estrutura na ZTA de todos as amostras. A Figura 11, apresenta a micrografia da terceira amostra do procedimento 02.

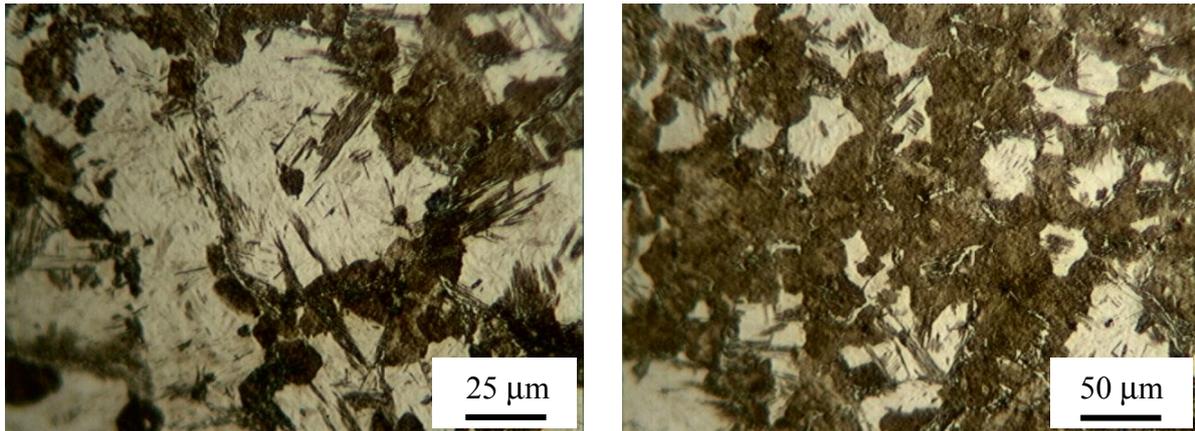


Figura 11. Micrografia da ZTA da amostra do terceiro teste do procedimento 2

É possível observar na microestrutura da amostra a formação de ferrita proeutetóide e martensita. O que segundo a bibliografia pode ser explicado pela composição do aço e pelo tipo de resfriamento que ele sofreu [11 e 12]. Nos procedimentos realizados, os corpos de prova foram cortados encaixados em um suporte de aço, o que acelera o processo de resfriamento da peça, uma vez que, o mecanismo de transferência de calor que passa a prevalecer é o de condução (mais eficiente dos três existentes para o aço nesta situação). O resfriamento mais rápido, combinado à composição do aço AISI 1045 contribuiu para a formação de martensita. A ferrita presente se explica pela própria composição do aço, que possui concentração de carbono próximo ao ponto eutetóide (0,76% de Carbono) [11 e 12].

3 CONCLUSÃO

Pelo desenvolvimento do trabalho, com suas inerentes análises, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O sentido de corte não influencia nos resultados do processo. O corte ocorreu normalmente com a variação de direção e o tamanho da ZTA formada, a microestrutura e a superfície cortada não foram alteradas.
- A velocidade de corte é um parâmetro que influencia não só na ZTA da peça cortada, mas também na superfície cortada e na formação de rebarba. Velocidades mais altas geram menos rebarbas e linhas de arraste com inclinações mais intensas na superfície, pois quando a tocha se move mais rapidamente o plasma não consegue manter a sua estabilidade.
- A velocidade de corte influencia no aporte térmico, por consequência na taxa de resfriamento da peça. Portanto, a velocidade de corte influencia o tamanho da ZTA e a dureza desta.
- A corrente elétrica é um parâmetro que influencia na formação e extensão da ZTA.
- A distância entre tocha e peça influencia a superfície cortada, uma vez que, alturas maiores formam um arco mais alongado, curvo e mais instável.
- A altura da tocha não influenciou na quantidade de energia imposta a peça, pois não se verificou alteração na ZTA.
- Alguns procedimentos propiciaram a formação de estrutura martensítica em alguns corpos de prova do AISI 1045.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são direcionados aos responsáveis pelo Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET MG (DEMAT CEFET MG). Em especial a Profa. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, gestora do laboratório de Metalografia.

REFERÊNCIAS

- 1 Marques P V, Modenesi PJ, & Bracarense AQ. Soldagem Fundamentos e Tecnologia. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- 2 Ramalho JP. Oxicorte: estudo da transferencia de calor e modelamento por redes neurais artificiais de variáveis do processo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalurgica e de Materiais, São Paulo, 2008
- 3 Salonites K, Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process. Science Direct. 2012
- 4 Chamarthia, S, Reddyb N, Elipeyc M, Reddyd D. Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material. Science Direct. 2013
- 5 Sanda M, Coteana M, Munteanu A. Experimental results concerning the Variation of Surface Roughness parameter (Ra) at Plasma arc cutting of a stainless steel workpiece International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2010
- 6 Bini R, Colosimo BM, Kutlu AE, Monno M. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plasma arc cutting system. Science Direct. 2017.
- 7 Nemchinsky V, Severance S. What we know and what we do not know about plasma arc cutting. Journal of Physics. 2006.
- 8 Hyperterm. (2015). Manual do operador 806657 revisão 3.
- 9 Chiaverini, V. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008. 599p.
- 10 Callister, W.D.JR. Ciência e Engenharia De Materiais: Uma Introdução. 5 Ed. Rio De Janeiro: LTC, 2006. 589P.
- 11 Krauss, G. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. 6 Ed. Ohio: Asm International, 2000. 497p.
- 12 Reed-hill, R.E. Princípios de Metalurgia Física. 2º ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1982. 776P.