



ESTUDO DA EXTENSÃO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA NO CORTE POR PLASMA A AR COMPRIMIDO EM O AÇO 4340

Fabiano Farias de Oliveira

Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS – MG
labmecanica@unis.edu.br

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI- Av BPS, 1303 CEP 37500-000
sccosta@unifei.edu.br

Wanderley Xavier Pereira

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas CEFET – MG – Campus VIII- Varginha
wpereira@varginha.com.br

Resumo: *O Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido (PAC – Plasma Air Cutting) tem sido um dos processos mais utilizados dentre os processos de corte térmico aplicados aos materiais ferrosos, principalmente para espessuras inferiores a 25 mm. A despeito de suas vantagens a utilização deste processo normalmente gera defeitos superficiais de inclinação da superfície cortada (ortogonalidade) necessitando muitas vezes de retrabalho. Tais operações têm suas complicações em função dos efeitos metalúrgicos ocasionados na formação da zona termicamente afetada (ZTA) pela grande geração de calor na superfície. Desta forma, este trabalho objetiva estudar o efeito das principais variáveis do processo PAC (pressão, corrente, velocidade e distância do bocal a peça) no corte do aço SAE 4340. Como resposta foram analisados os efeitos das variáveis na extensão da zona termicamente afetada (ZTA). Os Resultados obtidos permitiram determinar a melhor combinação dos parâmetros para melhor compreender a resposta estudada. Para a resposta extensão da ZTA, o uso de todos os parâmetros de entrada em seus níveis superiores permitiu a obtenção dos melhores resultados, sendo que a variável distância tocha peça foi a que provocou maiores alterações na resposta estudada.*

Palavras-chave: *Corte por plasma; Qualidade superficial de corte; Efeitos metalúrgicos de corte; ZTA; SAE 4340*

1. INTRODUÇÃO

O processo de corte por plasma se destaca dentre os processos térmicos por apresentar uma alta qualidade associada a uma boa produtividade. No sentido de melhor adequar o processo às novas utilizações evitando retrabalhos posteriores as operações de corte, pesquisas tem sido realizadas no sentido de melhor caracterizar a influência das variáveis do processo, associadas à qualidade de corte no que tange, principalmente, aos efeitos geométricos e metalúrgicos da superfície cortada. Com relação aos efeitos geométricos, vários fatores têm sido analisados como, por exemplo, a ortogonalidade da superfície de corte, o acabamento superficial, a perda de material e a formação de escória. Dentre os trabalhos relacionados a estes aspectos destacam-se os descritos por Harris (1987), Matsumoto (1988), Manohar (1994), Mont'Alvão (1997). Sob o ponto de vista metalúrgico normalmente as análises se concentram nos efeitos oriundos da zona termicamente afetada (ZTA) caracterizados pelo nível de dureza, formação de trincas, bem como nos efeitos térmicos sobre as peças cortadas, tais como, deformações térmicas e tensões residuais como descritos por Mawson

(1983), Harris (1987), Matsumoto (1988) e Manohar (1994). Os aspectos superficiais da zona de corte com aqueles relacionados às oxidações superficiais sob diferentes tipos de gases de plasma aplicados a diferentes materiais, também são de grande importância no desenvolvimento do processo sendo encontradas informações em trabalhos de Mawson (1983) e Manohar (1994).

Mais recentemente, o corte por plasma a ar comprimido tem sido utilizado em larga escala no ambiente industrial, principalmente para espessuras inferiores a 25mm, em função de menores custos de equipamentos e do fator operacional do processo. Entretanto, de uma maneira geral, a qualidade de corte auferida por este processo é inferior à obtida pelo processo convencional de plasma, principalmente aquelas relacionadas à inclinação da superfície cortada além de uma maior rugosidade. Para uma melhor utilização deste processo, esforços têm sido feitos no sentido de obter, dentro de sua faixa de utilização, uma qualidade de corte. Para isto um melhor conhecimento da influência de suas variáveis na qualidade final do corte se torna necessário, tanto sob o ponto de vista dos fatores geométricos como dos fatores metalúrgicos, sendo os efeitos metalúrgicos, no que tange a área da ZTA, o objetivo principal deste trabalho.

1.1. Corte por Plasma e os Parâmetros de Análise

O corte por plasma é um processo que emprega um plasma gasoso (gás ionizado) produzido por um arco elétrico confinado em um pequeno orifício calibrado (Benedict, 1987). O calor gerado pelo plasma permite obter temperaturas da ordem de 50.000 °C concentradas em regiões muito reduzidas, podendo desta forma fundir e cortar materiais metálicos, cuja temperatura de fusão seja elevada, já que o metal fundido é expulso pela energia cinética do jato de gás que se desloca a velocidades supersônicas. Em resumo, o processo de corte por plasma envolve corte por fusão associado a energia cinética do gás (Lindberg, 1990; Weller et al, 1984). Dentre as variações deste processo existem o Corte por Duplo Fluxo de Plasma, Corte por Plasma com Proteção de Água, Corte por Plasma com Injeção de Água, Corte por Plasma a Ar Comprimido (PAC). Este último é o alvo de análise deste trabalho e que se difere dos demais por utilizar ar comprimido como gás de proteção e nitrogênio puro ou uma mistura de nitrogênio mais oxigênio (80% de N₂ - 20% de O₂) como gás do plasma. A Figura 1 apresenta de forma esquemática os equipamentos típicos de uma unidade de corte por plasma.

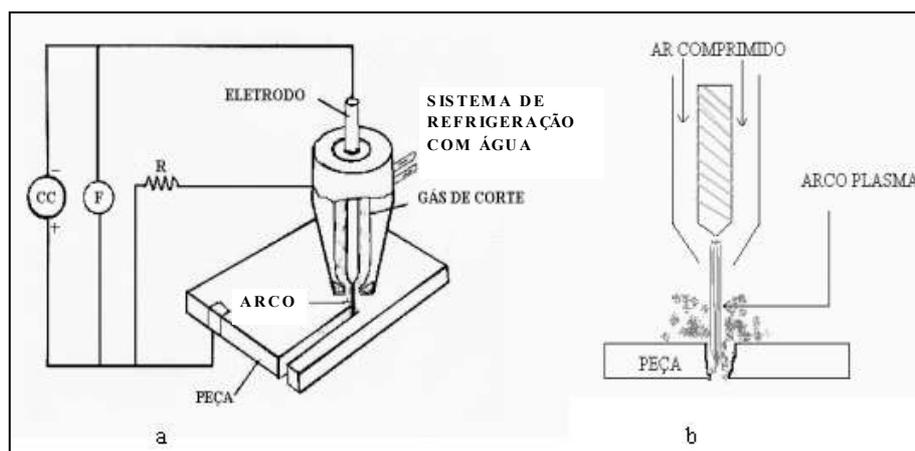


Figura 1: (a) Esquema do equipamento corte por plasma Ar Comprimido; (b) Tocha.

Neste processo de corte por ar comprimido, muitas variáveis influenciam no processo e, conseqüentemente, na qualidade final da superfície cortada. Como fatores principais de qualidade de corte destacam-se a ortogonalidade gerada na superfície, bem como a extensão e nível de dureza da zona termicamente afetada (ZTA). A ortogonalidade, normalmente, surge em função do movimento helicoidal do gás de plasma gerando, em conseqüência, inclinações em ambas as superfícies cortadas. Dependendo do movimento da tocha, observa-se que um dos lados do corte

apresenta menor inclinação que o outro, sendo o primeiro considerado como superfície de trabalho e outro como refugo (Benedict, 1987). Com relação a ZTA, que é alvo deste trabalho, a mesma surge em função da grande imposição de calor e de um resfriamento mais rápido que é típico neste processo cujas conseqüências provocam transformações metalúrgicas levando à formação de fases muito duras e frágeis como a martensita, que pode ser prejudicial dependendo da aplicação posterior ao corte. As variáveis influentes na qualidade do processo PAC, passíveis de controle, analisadas neste trabalho são: distância da tocha de corte à peça; velocidade de corte; corrente e pressão do gás. Outros parâmetros tais como tipo de material, tipo de sistema ou características do sistema podem também influenciar no processo porém não foram consideradas neste trabalho. Como técnica de análise utilizou-se a ferramenta projeto e análise de experimentos (DOE – Design of Experiments) que, segundo Neto et al (1995), possibilita um número reduzido de experimentos com um número máximo de informações sobre os efeitos da combinação de variáveis significativas controláveis de um dado processo sobre determinada(s) resposta(s) de interesse. Tal técnica permite identificar o efeito de determinados fatores (variáveis de entrada) em uma superfície de resposta, dentro de uma região de contorno pré-estabelecida, utilizando um número reduzido de experimentos. Muitas das vantagens relativas desta técnica, aplicadas a otimização de processos têm sido largamente discutidas na literatura nos mais diversos campos da engenharia, como por exemplo na usinagem, materiais, soldagem entre outros. De destaque vale mencionar os trabalhos de Gunaraj et al (2000) e Antony (2000).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como já mencionado, o processo estudado apresenta 4 variáveis controláveis que podem influenciar na perda de material durante o corte. O projeto de experimento adotado foi um planejamento fatorial fracionado do tipo 2^{4-1} que resulta em 8 ensaios (condições experimentais) diferentes. Com o objetivo de determinar a significância estatística dos efeitos das variáveis e os efeitos de suas interações, o experimento foi replicado.

Os níveis das variáveis foram escolhidos em função de indicações do fabricante do equipamento de corte (Plasmarc), de resultados obtidos por Mont'Alvão (1997) e de alguns testes preliminares realizados. Definiu-se os seguintes níveis para as variáveis, apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Variáveis e seus níveis

Fator	Unidade	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
Distância (A)	mm	3.0	4.5
Pressão (B)	kgf/cm ²	5.3	7.1
Corrente (C)	A	62.5	70
Velocidade (D)	cm/min	12.4	23.1

Antes de se iniciar a experimentação alguns preparativos foram necessários como: corte dos corpos de prova e identificação através de tipagem; elaboração de planilhas para a coleta dos dados; obtenção dos; ajuste e nivelamento da mesa de corte; ajuste e nivelamento do bico de corte; aferição da velocidade do carinho de corte e confecção de dois calços, um de 3,5 mm e outro de 4,5 mm que permitiram manter a distância entre o bico de corte e a peça o mais próximo possível destes valores. Um esquema da bancada de ensaio é mostrado na figura 2. Foi utilizada uma fonte com capacidade para cortes de até 25 mm de espessura. Os corpos de prova foram definidos nas dimensões 50 mm de largura, 100 mm de comprimento e 15,9 mm de espessura, sendo que os cortes para testes foram realizados ao longo comprimento. Foram utilizadas chapas de aço ABNT 1045 com o objetivo de permitir uma melhor caracterização da influência metalúrgica no corte e permitir comparações com outros trabalhos realizados por Mont'Alvão(1997) com aços ABNT 1020.

Os experimentos realizados foram delineados de acordo com a matriz de planejamento da experimentação gerada por um software comercial Minitab e mostrada na tabela 2. A coluna da ordem da execução é subdividida em duas colunas (primeira e segunda experimentação) e indica a ordem de execução dos ensaios. A coluna ensaio, refere-se a cada uma das 8 diferentes condições experimentais geradas pela matriz de planejamento. O sinal + significa que a variável se encontra no nível superior e o sinal - que se encontra no nível inferior (tabela 1). Como a condição inicial do primeiro ensaio não é igual a condição do último, resolveu-se dividir os ensaios em três blocos de 8 ensaios, de tal modo que fosse possível identificar diferenças nos resultados obtidos. Cada bloco é uma repetição. O ensaio número 1 foi o quarto a ser executado na primeira vez, o sétimo na segunda vez. Os sinais da variável distância são definidos pelo resultado da multiplicação das variáveis pressão, corrente e velocidade, em seus respectivos níveis.

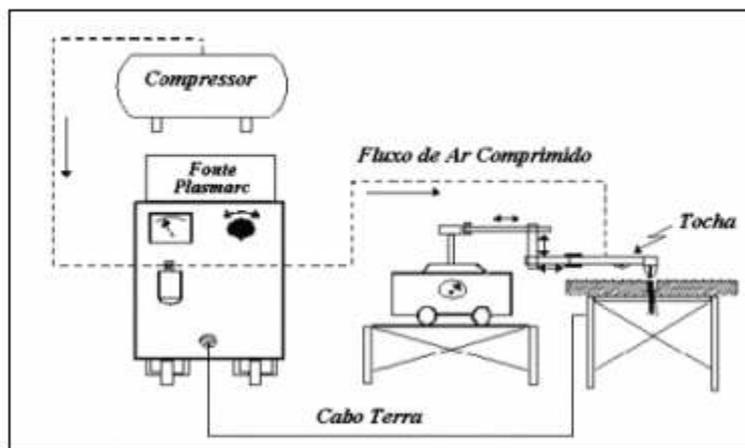


Figura 2: Bancada de ensaios.

Após o corte, as superfícies foram analisadas sob o ponto de vista metalúrgico. Como critério de avaliação das condições metalúrgicas mediu-se a extensão da ZTA. Cada corpo de prova foi seccionado a frio a 10 mm da extremidade final para a retirada de uma área transversal. Após esses procedimentos as amostras foram embutidas, preparadas (lixadas e polidas) e atacadas com nital a 2%. A seguir a superfície atacada foi fotografada com uma câmera digital sendo a área termicamente afetada determinada com auxílio do software Auto CAD-14 através da ferramenta polilyne aliada a um fator de conversão de escala (figura 3).

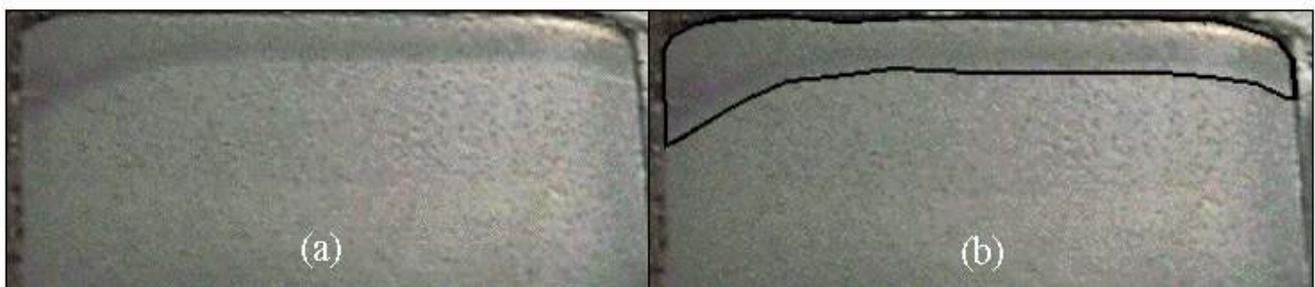


Figura 3: Foto de um CP sem e com demarcação da ZTA.

3. RESULTADOS

A tabela 2 mostra a seqüência de execução dos experimentos, os ensaios realizados e os resultados obtidos, nos dois blocos de experimentos, para área e dureza da ZTA.

Tabela 2: Matriz de planejamento da experimentação.

Ordem de Execução		Tratamentos	Ensaio				Área ZTA	
			A	B	C	D		
			mm	kgf/cm ²	Amp	cm/min	mm ²	
3	6	1	-	-	-	-	26,71	26,89
7	8	2	+	-	-	+	28,89	30,04
8	7	3	-	+	-	+	29,70	29,66
1	3	4	+	+	-	-	29,13	27,42
2	4	5	-	-	+	+	32,06	32,88
4	2	6	+	-	+	-	28,22	27,88
5	1	7	-	+	+	-	30,97	30,58
6	5	8	+	+	+	+	24,25	26,50

Para a análise dos resultados utilizou-se um “software” comercial Minitab, considerando-se um nível de significância (α) igual a 5 %, sendo portanto a confiabilidade dos resultados de 95%. Desta forma valores de “p_value” menores que 0,005 indicam que os efeitos são considerados significativos.

A tabela 3 mostra os resultados obtidos da ANOVA Análise de Variância (ANOVA) ressaltando os efeitos principais obtidos para o experimento, considerando as interações de até 2ª ordem. Os valores destacados em negrito são aqueles considerados significativos.

Tabela 3: Estimativa dos efeitos para a área da ZTA.

Fatores	p_value
Distância (A)	0,001
Pressão (B)	0,133
Corrente (C)	0,165
Velocidade(D)	0,090
Intereção (AB)	0,014
Interação (AC)	0,000
Interação (AD)	0,005
S = 0,8017; R ² _{sq} = 93,2; R ² _{adj} = 87,2	

Pelos resultados mostrados na tabela 3, o fator distância e suas interações com a pressão do gás, corrente e velocidade de corte se mostraram significativos na resposta extensão da ZTA. A figura 4 mostra os efeitos principais da área da ZTA. Com relação ao fator distância tocha-peça (A), nota-se que o aumento em seu nível dentro da superfície de contorno estudada (3,0 mm a 4,5 mm) reduz, em consequência o valor numérico da resposta, que significa uma aproximação do valor ótimo para a extensão da ZTA. A explicação para tal pode-se basear no fato de que o arco formado a partir da tocha assume um formato cônico, possuindo um comprimento ótimo de corte. Tal comprimento, provavelmente, se situa dentro da superfície de contorno estudada. Entretanto, o aumento excessivo da distância tocha-peça conduziria, com certeza, a partir de um nível superior a

4,5 mm o aumento da extensão da ZTA, provocando um espalhamento do arco e diminuindo a ação efetiva de corte.

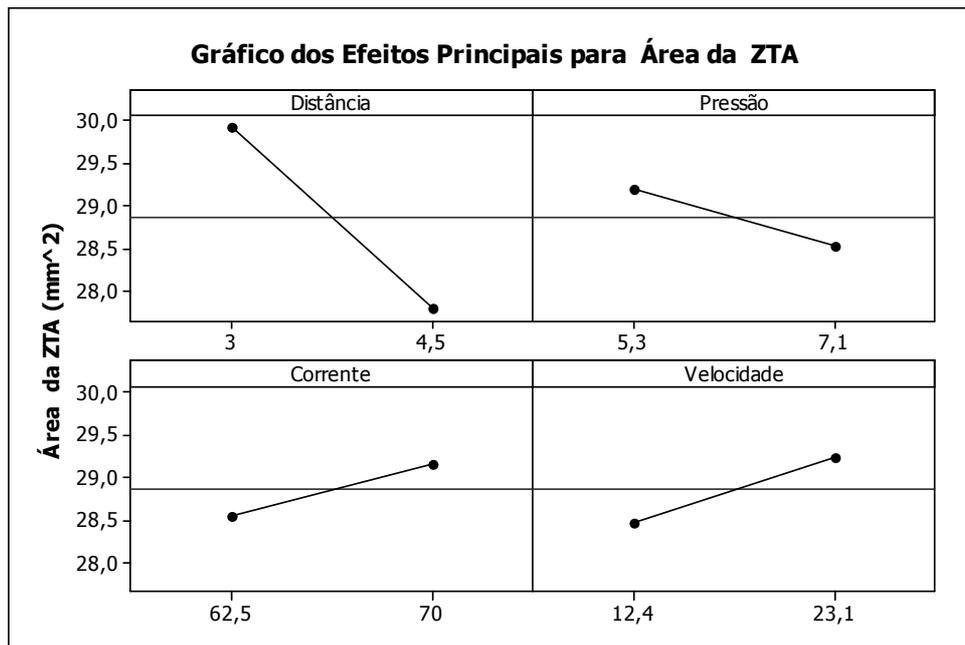


Figura 4: Efeitos principais para a área da ZTA.

Com relação às interações entre a distância e os outros fatores, observa-se na tabela 3 que a interação mais significativa foi a da distância com a corrente AC (figura 5). Através da eliminação de efeitos não significativos é possível verificar que melhores resultados para o processo em questão são obtidos para utilizações do fator distância e pressão em seus níveis máximos e corrente e velocidade em seus níveis mínimos estudados. É interessante observar que os fatores corrente e velocidade estão diretamente relacionados à energia imposta a peça de trabalho. No caso da corrente, é de se esperar que um aumento em seu nível conduz a um aumento do nível de energia imposto à peça e, em consequência, a uma maior extensão da ZTA.

Uma provável explicação para o fato de distância e a pressão gerarem uma menor área de ZTA, quando mantidos em seus níveis máximos é que a ação dos gases de expulsão deve gerar um resfriamento do arco cortante e provavelmente uma redução do nível de energia imposta. Entretanto, tal suposição mereceria um estudo mais detalhado. No caso da velocidade, era de se esperar que um aumento de seu nível que reduz a energia imposta à peça, geraria uma diminuição na extensão da ZTA formada, mas isto não ocorreu. Entretanto o fator velocidade não se mostrou significativo dentro da resposta ZTA, de forma que este comportamento contraditório pode ser atribuídos aos erros aleatórios. E se considerar que no trabalho de Pereira (2003), sobre os efeitos destas mesmas variáveis na qualidade geométrica da peça, o fator velocidade no seu nível maior garantiu melhores resultados assim pode se sugerir a utilização do fator velocidade em seu nível máximo para que o processo tenha um melhor compromisso entre propriedades metalúrgicas e qualidade de corte.

Baseado nestes resultados pode-se perceber que a menor extensão da ZTA pode ser obtida com a manutenção da distância tocha-peça, pressão do gás em seus níveis máximos e a corrente e velocidade pode ser utilizado também em seus níveis máximos embora isto não implique em menor ZTA, mas sim para garantir a otimização com outras resposta conforme confirmados na literatura.

Seguindo a mesma forma de análise, das interações significativas AB e AD, as menores ZTA's geradas são obtidas com pressão, e distância bico-peça em seus níveis superiores. É interessante observar que os fatores corrente e velocidade estão diretamente relacionados à energia imposta a peça de trabalho.

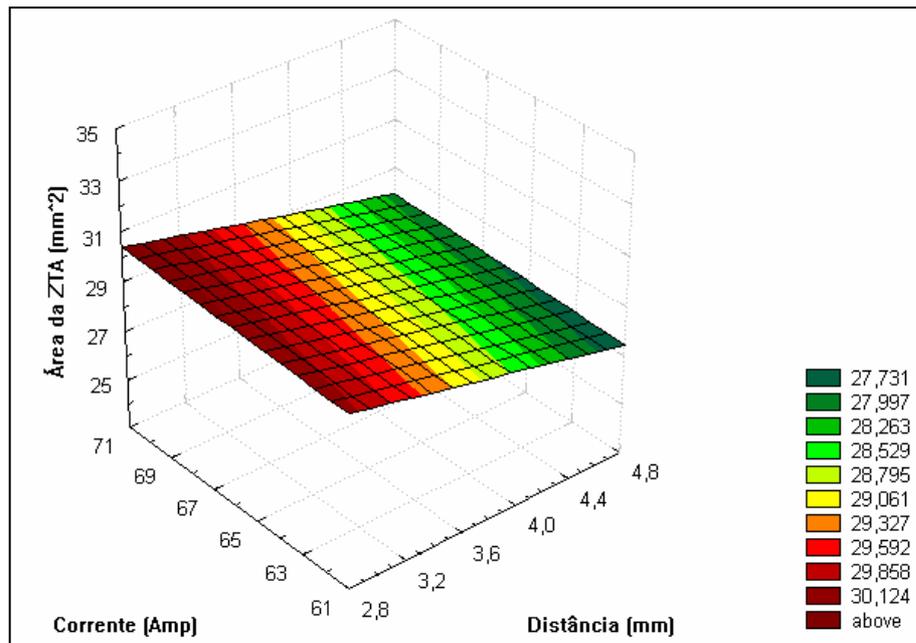


Figura 5: Resposta estimada para a interação distância-corrente na extensão da ZTA

4.CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e analisados, é possível através da análise da influência dos parâmetros melhorar o nível de qualidade das superfícies geradas. As condições para a melhoria da extensão e ZTA foram estabelecidas. Dentre os parâmetros influentes para a extensão da ZTA se observou que a distância bico-peça e pressão devem ser mantidas em seus níveis superiores e de sua interações percebeu-se que a pressão também deve ser utilizado em seu nível superior, e embora a corrente e a velocidade que não se mostraram influentes nesta reposta devem também ser utilizadas em seus níveis superiores, para que a qualidade da superfície cortada também seja otimizada.

5.REFERÊNCIAS

- Antony, J.,2000, "Improving the Manufacturing Process Quality and Capability using Experimental Design: a Case Study", International Journal of production Research, vol.38 n°12,pp.2607-2618
- Benedict, G F., 1987, "Nontraditional Manufacturing Processes", New York - Marcel Dekker, Inc., pp.333 – 348.
- Dally, J.W., Riley, W.F, and Mc Connell.,K.G.,1993,"Instrumentation on for Engineering Measurements", Jonh Wiley and Sons, 2ª edição.
- Gunaraj,V.and Murugan, N., 2000, "Prediction and Optimization of Weld Bead Volume for the Submerged Arc Process – Part 1", Welding Journal, pp.286s – 294s.
- Harris, I.D – Lucas, W.,1987, " Improved Cutting Perfomance from the Addition of Water to the Plasma Gas in Plasma Arc Cutting", Welding Institute Members Report, 3 – 11.
- Manohar, M. And Snyder II,J., 1994,"Dross Formation during Plasma Arc Cutting of Steels", Welding Journal, november,pp.45-51.
- Matsumoto, J.,1988, "Effects of Plasma Cut Surfaces on the Quality of Aluminium Alloy Welds", Welding International, n° 4,pp.322-342.
- Mawson, M., 1983, "hermal Cutting in Fabrication",Metal Construction, pp.444-447.
- Mont'alvão, C.A. ,1997,"Determinação dos Fatores Significativos do Processo de Corte por Plasma

a Ar Comprimido Através da Utilização do Projeto e Análise de Experimentos”, Dissertação de Mestrado”, EFEI, Itajubá.

Neto, B B - Scarmínio, IS - Bruns, R E., 1995 “ Planejamento e Otimização de Experimentos”, Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas.

Pereira WX. 2003 “Mais Um Passo Para a Otimização do Processo de Corte Por Plasma Através do Estudo da Qualidade Superficial de Corte do Aço SAE 1045” COBEF- Uberlândia -MG

Weller, EJ - Haavisto, M., “Nontraditional Machining Processes”, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

STUDY OF THE HEAT-AFFECTED ZONE (HAZ) GENERATED BY A PLASMA AIR CUTTING PROCESS FOR THE STEEL SAE 4340

Fabiano Farias de Oliveira

Centro Universitário do sul de Minas – UNIS – MG

labmecanica@unis.edu.br

Sebastião Carlos da Costa

Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI- Av BPS, 1303 CEP 37500-000

sccosta@unifei.edu.br

Wanderley Xavier Pereira

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas CEFET – MG – Campus VIII- Varginha

wpereira@varginha.com.br

***Abstract:** The Plasma Air Cutting (PAC) process has been one of the processes more used among the processes of thermal cut applied in ferrous alloys, mainly for thickness up to 25 mm. Despite of its advantages this process usually generates superficial defects especially that generated by the angle of the cut face (orthogonality). Such operations have your complications in the metallurgical effects caused by the Heat-Affected Zone (HAZ) formation. In this way, this work aims to study the effect of the principal variables of the PAC process (gas pressure, current level, cutting speed and standoff distance) during the cutting of a SAE 4340 steel plates. The answer analysed were that related to the extension of the Heat-Affected Zone. The results allowed to determine the best combination of parameters level in order to optimise the values of the output variables investigated. For the HAZ extension formation studied, the best results were obtained when all the parameters in their maximum level were employed.*

***Keywords:** Air Plasma Cutting, Design of Experiments, Metallurgical Effect, HAZ formation SAE 4340, Steel*