



## **A UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS NA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE CORTE POR PLASMA A AR COMPRIMIDO**

**Milton Odajima Gomes**  
**Sebastião Carlos da Costa**

Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Produção e Gestão  
Cx. P. 50 – 37500-903 – Itajubá, MG, Brasil – e-mail: sccosta@unifei.edu.br

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o estudo de comportamento dos parâmetros significativos relacionados à ortogonalidade da superfície de corte, qualidade e perda de material em um processo de corte por plasma a ar comprimido. Baseado em trabalhos anteriores foi planejado um roteiro de experimentos, a partir da metodologia de Análise sobre a Superfície de Resposta (RSM). Como parâmetros do processo foram analisados a intensidade de corrente, a distância tocha-peça e a velocidade de corte. Baseado em tal metodologia, foi possível concluir: a) A corrente exerce maior influência sobre a ortogonalidade esquerda; b) A distância é altamente significativa para a ortogonalidade direita, porém não exerce influência significativa sobre a perda de massa e ortogonalidade esquerda; c) A velocidade de corte foi significativa em todas as respostas; d) Os modelos matemáticos apresentaram boa significância sobre a qualidade de corte e perda de massa, porém quanto às ortogonalidades, o coeficiente de determinação ajustado apresentou níveis relativamente baixos.*

### **Palavras-chave:**

*Corte por Plasma, Metodologia de Superfície de Resposta, Projeto e Análise de Experimentos Plasma Cutting, Response Surface Methodology, Design of Experiments*

## **1. INTRODUÇÃO**

O processo de corte consiste em uma das operações mais utilizadas na área de processos de fabricação. Observa-se uma crescente evolução de sua capacidade operatória no sentido de se obter uma maior precisão e integridade da superfície a ser cortada, dando lugar, à substituição de peças fundidas por peças cortadas e soldadas.

A despeito da geração de calor e conseqüente formação de uma zona termicamente afetada (ZTA) dura e frágil, os processos de cortes térmicos vêm ganhando a preferência industrial nas últimas décadas devido às inúmeras vantagens alcançadas, tais como: velocidade, acabamento, precisão em peças de formas complexas, baixo custo, entre outras. Como principais e mais difundidos processos de corte térmicos pode-se citar o oxi-acetilênico (oxi-corte), corte por plasma e cortes a laser.

O processo de corte por plasma tem apresentado um grande interesse industrial nas últimas décadas e se destaca dentre os processos térmicos por mostrar potencialidades que o credencia a se obter alta qualidade de corte associada a excelente produtividade, desde que o controle das variáveis influentes no processo se faça de uma forma adequada. Dentre os aspectos relacionados à qualidade de corte, o desvio angular da superfície cortada (ortogonalidade) é aspecto de constante

preocupação, dado que inclinações geradas nestas superfícies conduzem muitas vezes a operações de retrabalho por usinagem, acarretando, em consequência, custos operacionais elevados.

No sentido de melhor adequar o processo à novas utilizações evitando retrabalhos posteriores às operações de corte, pesquisas tem sido realizadas no sentido de melhor caracterizar a influência das variáveis do processo aos fatores acima relacionados. De destaque vale mencionar os trabalhos citados por Manohar (1994), Mont'Alvão (1997), Pereira (2000), Morais (2001) e Wang. et al. (2002).

Mais recentemente o corte por plasma a ar comprimido tem sido utilizado em larga escala no ambiente industrial, principalmente para espessuras inferiores a 25 mm, em função de menores custos de equipamento 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 a inclinação da superfície cortada. A maioria das pistolas de corte opõe um movimento helicoidal ao gás de plasma, gerando em consequência um turbilhonamento do gás (Benedict, 1987). Devido ao rendimento do gás, há uma transferência mais efetiva de energia do arco a um dos lados do bordo de corte ao passo que o outro lado haverá a formação de um pequeno chanfro (Slee, 1979). A **Figura 1** ilustra esquematicamente esta geração de ortogonalidade.

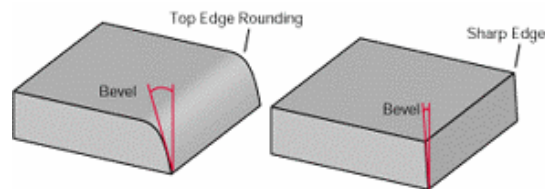


Figura 1: Geração da ortogonalidade em cortes por plasma a ar comprimido

Além deste problema, a qualidade final do corte é de fundamental importância no controle do processo, sendo esta influenciada diretamente por várias variáveis do processo, entre as quais se destacam a velocidade de corte, a distância tocha-peça e a intensidade de corrente.

Para uma melhor utilização do processo de corte por plasma a ar comprimido Pereira (2000) e Morais (2001), em trabalhos anteriores, analisaram os efeitos de alguns parâmetros do processo de corte por plasma a ar comprimido sobre a ortogonalidade da superfície de corte gerada quando utilizando diferentes condições para velocidade de corte, pressão do gás, distância tocha - peça (“standoff”) e intensidade de corrente. Através da técnica de projeto e análise de experimentos (DOE) e mais especificamente do Planejamento Fatorial Fracionado ambos os autores determinaram que a velocidade de corte se mostrou como o mais importante, seguido dos fatores corrente e distância da tocha à peça. A pressão de corte não se revelou como sendo um fator significativo, entretanto resultados obtidos mostraram que níveis crescentes de pressão conduzem a cortes com menos ortogonalidade. Observa-se ainda que não houve uma concordância a respeito da influência dos parâmetros significativos no processo de corte.

Desta forma este trabalho procura ampliar as pesquisas anteriores fazendo uma investigação mais completa dos parâmetros velocidade de corte, distância tocha-peça e corrente através de um tratamento estatístico adequado, sob o aspecto de qualidade final do corte, expresso pela ortogonalidade gerada tanto do lado esquerdo quanto do lado direito da superfície cortada, bem como na perda de material e qualidade da superfície cortada. Para tanto foi utilizado a metodologia

de superfície de respostas (RSM) sendo esta uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas usadas para análise de problemas sobre a influência de cada variável independente sobre as variáveis dependentes de resposta, tendo como objetivo, otimizar as respostas (Montgomery, 1976). Tal técnica tem sido aplicada com sucesso na otimização de processos de soldagem como citado por Gunaraj (2000).

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para se atingir os objetivos propostos, este trabalho seguiu a mesma orientação dos estudos realizados por Pereira (2000) e Moraes (2001). Entretanto utilizou-se como metodologia de análise a técnica estatística de Superfície de Resposta (RSM) por se tratar de uma otimização do processo face aos trabalhos anteriores.

O experimento apresentou três variáveis controláveis, pois a pressão em ambos os estudos anteriores não se mostrou significativa. Os níveis das variáveis foram definidas na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Fatores e seus respectivos níveis.

Fator	Níveis				
	-2	-1	0	+1	+2
Distância, mm	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Corrente, A	60.00	64.38	66.25	68.13	70.00
Velocidade, cm/min	12.00	14.75	17.50	20.25	23.00

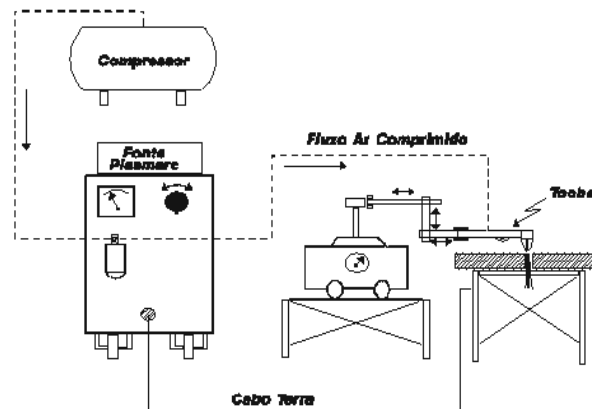
Para o delineamento do experimento foi utilizado o software comercial MINITAB. No intuito de diminuir o número de experimentos, e claro, sem perder informações utilizou-se quatro pontos centrais (“center points”), reduzindo desta forma o número de experimentos de vinte para dezoito. A matriz de planejamento da experimentação é mostrada na **Tabela 4**, em uma ordem aleatória na execução dos ensaios.

O banco de ensaios foi constituído basicamente de um compressor (ar comprimido), tocha (bico de corte), carrinho elétrico com controle de velocidade, trilho, mesa suporte, fonte de tensão, manômetro, calços para o controle da distância bico-peça e a mesa de corte, conforme ilustrado na **Figura 2**. Foi utilizado uma fonte de corte Plasmarc (White Martins) com capacidade para cortes de até 25 mm de espessura. O diâmetro do bico de corte empregado foi definido em 1,32 mm seguindo recomendações do fabricante.

Para a execução dos experimentos foram utilizados corpos de prova com espessura de 16 mm e dimensões de 50 x 100 x 16 mm de aço ABNT 1045 apresentando dureza entre 80 e 110 HV (Pereira, 2001) e composição química conforme **Tabela 2**.

Tabela 2 - Composição Química do Aço ABNT 1045

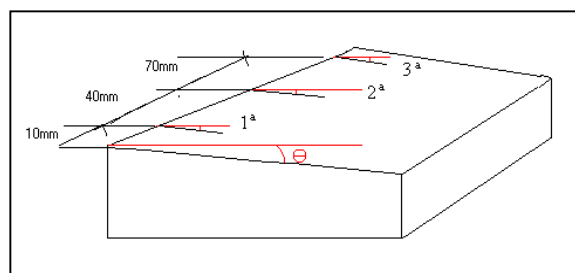
C, %	Mn, %	Si, %	P, %	Cr, %	S, %	Nb, %
0.46	0.78	0.20	0.026	0.020	0.014	0.003



**Figura 2:** Representação esquemática da bancada de ensaios.

Preparados os corpos de prova procedeu-se a regulagem dos equipamentos e preparação do banco de ensaios nas condições na qual o roteiro instruía. Cada corpo de prova foi pesado, sendo a balança com resolução de 0,05 g, antes de cada ação de corte.

Após o corte, os corpos de prova foram pesados novamente, e tiveram avaliada a qualidade de corte, numa escala de 1 à 10, sendo 1 a nota mais baixa. As superfícies foram analisadas sob o ponto de vista de ortogonalidade superficial, tanto para o lado direito (lado bom) quanto para o lado esquerdo (lado de descarte). Posteriormente com o auxílio de um goniômetro, com precisão de 5', mediu-se a inclinação da face cortada em relação à outra adjacente, nos três pontos, a partir da extremidade inicial das amostras 10, 40 e 70 mm conforme mostrado na **Figura 3**.



**Figura 3:** Ilustração do esquema de medição da ortogonalidade.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

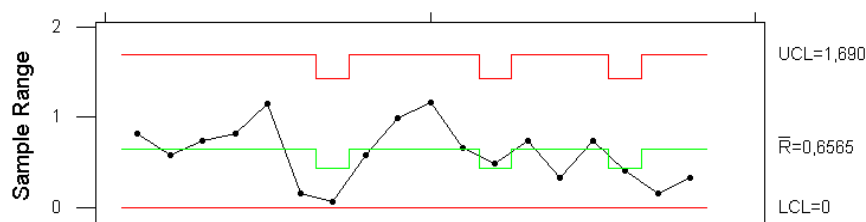
Conforme ensaios realizados de acordo com a metodologia experimental, a **Tabela 3** apresenta os resultados avaliados para a ortogonalidade do lado direito e esquerdo de acordo com as medições mostradas na **Figura 3**. Para se evitar que algumas leituras apresentassem uma dispersão maior do que o previsto ( $3\sigma$ ), realizou-se um refinamento estatístico no sentido de identificar estes limites

toleráveis e, em consequência, promover um ajuste dos dados, sendo que a **Figura 4** apresenta a variação observada.

Tabela 3 – Dados relacionados às ortogonalidades.

Ordem	Ortogonalidade Direita				Ortogonalidade Esquerda			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média
16	1,33	0,92	0,50	0,92	1,83	1,92	2,17	1,97
9	1,83	1,25	1,42	1,50	2,08	2,42	1,92	2,14
7	0,17	0,25	0,92	0,45	1,83	3,50	3,92	3,08
15	-0,58	-0,25	0,25	-0,19	5,00	4,33	5,33	4,80
11	2,83	2,67	1,67	2,39	-2,58	-3,17	-2,75	-2,83
8	4,33	4,50	4,42	4,42	6,25	5,25	5,67	5,72
6	6,57	6,50	*	6,54	6,17	8,00	7,93	7,37
3	-0,50	-0,42	-1,00	-0,64	2,42	0,83	1,33	1,53
2	-2,50	-2,08	-1,50	-2,03	7,42	7,17	6,33	6,97
12	5,50	6,67	6,50	6,22	-3,50	-4,08	-4,42	-4,00
4	7,17	6,50	6,58	6,75	-7,17	-7,25	-7,33	-7,25
17	3,58	4,08	*	3,83	-5,33	-4,83	-4,17	-4,78
5	-1,58	-1,33	-0,83	-1,25	5,10	6,17	4,50	5,26
14	1,75	1,42	1,50	1,56	6,17	6,58	6,25	6,33
13	-2,00	-1,50	-1,25	-1,58	7,25	6,92	6,58	6,93
18	*	-0,50	-0,92	-0,71	7,08	7,75	7,75	7,53
1	-2,92	-2,92	-2,75	-2,86	7,17	6,75	7,75	7,22
10	-0,83	-1,17	-1,00	-1,00	7,42	7,83	6,92	7,390

Xbar/R Char for Ortogonalidade Direita



Xbar/R Char for Ortogonalidade Esquerda

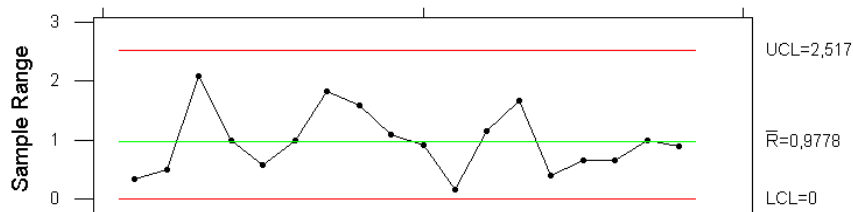


Figura 4 – Gráficos indicadores sobre a variação entre os dados.

As medidas no lado direito apresentaram uma medida irregular nas condições 6, 17 e 18, sendo descartados. O lado esquerdo não apresentou nenhuma irregularidade quanto às variações dentro das medidas de uma superfície representante de uma condição. Feito estes ajustes, a **Tabela 4** apresenta os resultados definitivos obtidos dos experimentos, apresentados aqui em ordem crescente dos experimentos e não da forma aleatória como realizados experimentalmente. Vale observar que os valores entre parênteses representa o nível de experimentação do parâmetro.

Tabela 4 – Resultados finais obtidos dos experimentos.

Ordem	Parâmetros			Respostas			
	Standoff (D)	Corrente (I)	Velocidade (Vc)	Qualidade de Corte (Q)	Massa perdida (PM)	Ortogonal Direita (Orto d)	Ortogonal Esquerda (Orto e)
	mm	A	cm/min	-	[g/cm <sup>2</sup> ]	[°]	[°]
1	3,0 (-2)	62,50 (-2)	12,00 (-2)	6,5	2,45	-2,86	7,22
2	5,0 (+2)	62,50 (-2)	12,00 (-2)	8,5	2,63	-2,03	6,97
3	3,0 (-2)	70,00 (+2)	12,00 (-2)	7,5	2,78	-0,64	1,53
4	5,0 (+2)	70,00 (+2)	12,00 (-2)	6,5	2,97	6,75	-7,25
5	3,0 (-2)	62,50 (-2)	23,00 (+2)	2,0	1,98	-1,25	5,26
6	5,0 (+2)	62,50 (-2)	23,00 (+2)	1,0	1,74	5,75	7,37
7	3,0 (-2)	70,00 (+2)	23,00 (+2)	6,5	1,80	0,45	3,08
8	5,0 (+2)	70,00 (+2)	23,00 (+2)	5,0	1,84	4,42	5,72
9	3,5 (-1)	66,25 (0)	17,50 (0)	10,0	2,00	1,50	2,14
10	4,5 (+1)	66,25 (0)	17,50 (0)	7,5	2,43	-1,00	7,39
11	4,0 (0)	64,38 (-1)	17,50 (0)	5,0	2,57	2,39	-2,83
12	4,0 (0)	68,13 (+1)	17,50 (0)	7,0	2,26	6,22	-4,00
13	4,0 (0)	66,25 (0)	14,75 (-1)	7,0	2,69	-1,58	6,92
14	4,0 (0)	66,25 (0)	20,25 (+1)	6,5	2,31	1,56	6,33
15	4,0 (0)	66,25 (0)	17,50 (0)	5,5	2,23	-0,19	4,89
16	4,0 (0)	66,25 (0)	17,50 (0)	9,0	2,17	0,92	1,97
17	4,0 (0)	66,25 (0)	17,50 (0)	7,0	2,47	4,36	-4,78
18	4,0 (0)	66,25 (0)	17,50 (0)	7,5	2,32	-0,71	7,53

Vale ressaltar que a perda de massa ao ser representada por unidade de área, deveu-se ao fato de que em dois experimentos (5 e 6) o corte não se realizou por completo havendo a necessidade de seccionamento em algumas partes, dificultando desta forma a comparação com os outros resultados.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como mencionado, a função que representa a resposta parte de uma função  $Y=f(D,I,Vc)$  pode ser representado a partir de uma função de segundo grau:

$$Y = b_0 + b_1D + b_2I + b_3Vc + b_{11}D^2 + b_{22}I^2 + b_{33}Vc^2 + b_{12}DI + b_{13}DVc + b_{23}IVc \quad (1)$$

### 5.1 Adequação dos Modelos Desenvolvidos

Para checagem da adequação dos modelos, foi utilizada a metodologia de Análise de Variância (ANOVA) sendo que o valor P para regressão representa uma medida de significância global da equação de regressão múltipla. Isto permite que a expressão possa ser utilizada para predição. No caso das ortogonalidades, o processo de regressão pode não ser satisfatório, devido a um comportamento de correlação não-linear.

A **Figura 5** apresenta as correlações entre os dados as quais interferem nos aspectos de regressão e, conseqüentemente nos cálculos dos modelos representativos de cada resposta.

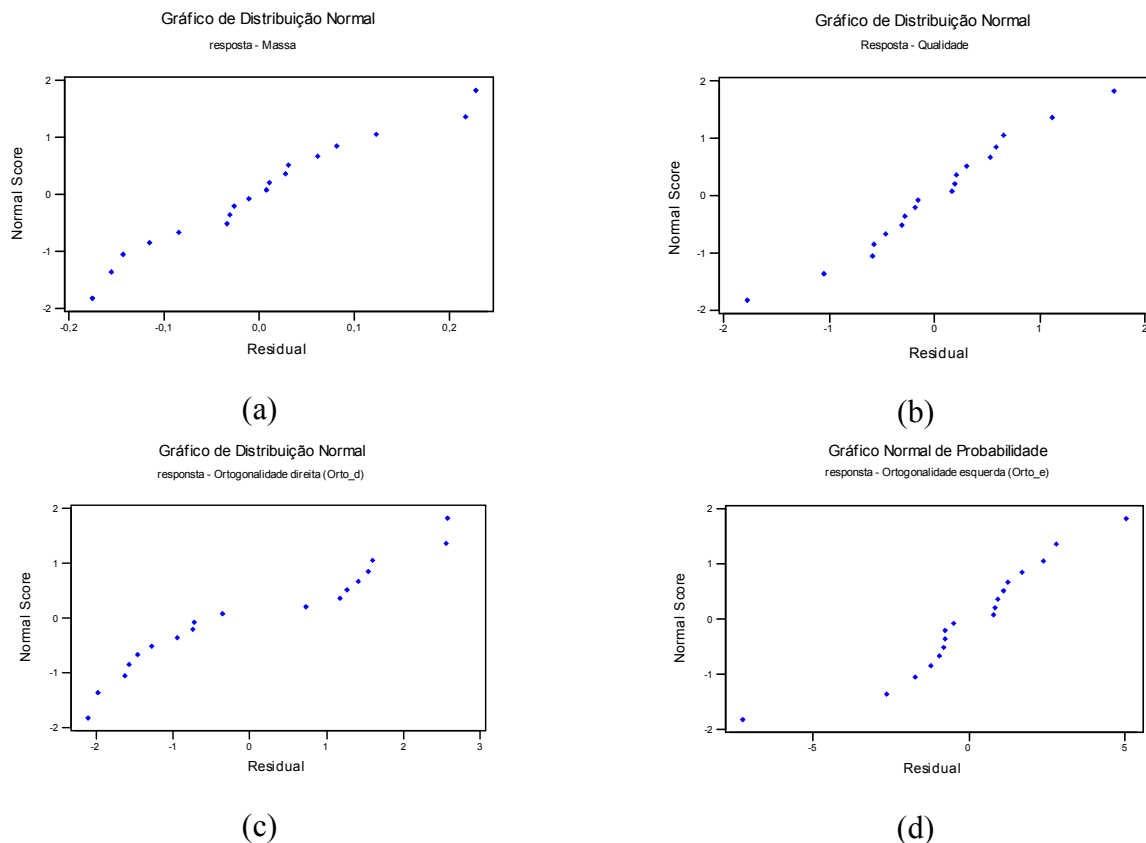


Figura 5 – Aspectos de Regressão (a) Sobre a Perda de Massa; (b) Sobre a Qualidade de Corte; (c) Sobre a Ortogonalidade Direita; (d) Sobre a Ortogonalidade Esquerda

As equações (2), (3), (4) e (5) apresentam os modelos matemáticos iniciais (na forma decodificada) para a qualidade de corte (Q), perda de massa (PM), ortogonalidade direita (Orto\_d) e ortogonalidade esquerda (Orto\_e) respectivamente.

$$Q = -1554,12 - 36,9311 * D + 49,5119 * I - 1,16918 * Vc + 5,71609 * D^2 - 0,375745 * I^2 - 0,0755011 * Vc^2 - 0,116667 * D * I - 0,0795455 * D * Vc + 0,0575758 * I * Vc \quad (2)$$

$$PM = 33,544 + 4,994 * D - 1,168 * I - 0,269 * Vc - 0,670 * D^2 + 0,009 * I^2 + 0,016 * Vc^2 + 0,010 * D * I - 0,013 * D * Vc - 0,005 * I * Vc \quad (3)$$

$$Orto\_d = 3273,5 + 34,7767 * D - 104,507 * I + 11,4997 * Vc - 5,0037 * D^2 + 0,79808 * I^2 - 0,20023 * Vc^2 + 0,091389 * D * I + 0,080114 * D * Vc - 0,069242 * I * Vc \quad (4)$$

$$Orto\_e = -7033,43 - 58,7841 * D + 223,602 * I - 26,2908 * Vc + 8,84622 * D^2 - 1,69816 * I^2 + 0,538388 * Vc^2 - 0,266556 * D * I + 0,313106 * D * Vc + 0,097596 * I * Vc \quad (5)$$

A partir destes modelos iniciais procedeu-se a sua redução eliminando os fatores não significativos às respostas determinados através do “p\_value”, visando assim obter um maior valor do Coeficiente de Determinação Ajustado ( $R^2_{adj}$ ) e menor valor da estimativa de erro (S). Os valores de  $R^2$  e da estimativa de erro padrão para o modelo original (completo) e reduzido estão apresentados na **Tabela 5**. As equações (5), (6), (7) e (8) apresentam os modelos reduzidos para Q, PM, Orto\_d e Orto\_e.

Tabela 5 – Comparação entre o Coeficiente de Determinação Ajustado e Estimativa de Erro dos modelos completos e reduzidos

Ordem N°	Parâmetros de Resposta	$R^2_{adj}$		Estimativa de Erro (S)	
		Modelo Completo	Modelo Reduzido	Modelo Completo	Modelo Reduzido
1	Qualidade de Corte	0,718	0,718	1,167	1,167
2	Perda de Massa	0,767	0,802	0,1684	0,1551
3	Ortogonalidade Direita	0,420	0,508	2,322	2,138
4	Ortogonalidade Esquerda	0,375	0,413	3,775	3,659

$$Q = -1554,12 - 36,9311 * D + 49,5119 * I - 1,16918 * Vc + 5,71609 * D^2 - 0,375745 * I^2 - 0,0755011 * Vc^2 - 0,116667 * D * I - 0,0795455 * D * Vc + 0,0575758 * I * Vc \quad (6)$$

$$PM = -7,844 + 5,123 * D + 0,093 * I - 0,343 * Vc - 0,606 * D^2 + 0,018 * Vc^2 - 0,013 * D * Vc - 0,005 * I * Vc \quad (7)$$

$$Orto\_d = 2529,99 + 2,20333 * D - 80,9322 * I + 14,6701 * Vc + 0,62291 * I^2 - 0,28166 * Vc^2 - 0,069242 * I * Vc \quad (8)$$

$$\text{Orto}_e = -5723,68 + 181,504 * I - 30,077 * Vc - 1,3885 * I^2 + 0,68235 * Vc^2 + 0,09760 * I * Vc \quad (9)$$

Os modelos matemáticos referentes à qualidade, perda de massa e ortogonalidade direita obtiveram boa significância global, podendo ser utilizado para predições. Para Ortogonalidade Esquerda, tratado como lado de descarte, a predição não será tão fiel à realidade, mesmo porque esta resposta não é o principal foco de controle do processo. A **Tabela 6** apresenta a análise da significância para os fatores bem como de suas interações sobre os respectivos modelos reduzidos.

Tabela 6 – Análise de Significância

Termos	Qualidade (Q)	Perda de Massa (PM)	Ortogonalidade Direita (Orto <sub>d</sub> )	Ortogonalidade Esquerda (Orto <sub>e</sub> )
	p_value	p_value	p_value	p_value
Constante	0,091	0,072	0,078	0,025
D	0,145	0,068	0,012	-
I	0,088	0,084	0,072	0,023
Vc	0,741	0,416	0,023	0,008
D*D	0,067	0,081	-	-
I*I	0,086	-	0,067	0,021
Vc*Vc	0,423	0,119	0,074	0,016
D*I	0,320	-	-	-
D*Vc	0,320	0,223	-	-
I*Vc	0,021	0,118	0,086	0,146

Uma primeira análise sobre a qualidade, mostra que a interação entre corrente e velocidade de corte foi altamente significativa. A qualidade engloba aspectos como acabamento, formação de escória e regularidade na superfície de corte.

Na análise sobre ortogonalidade direita, os fatores mais influentes são a velocidade de corte e a distância, confirmando estudos anteriores de Morais (2001) e Pereira (2000). Sobre a ortogonalidade esquerda, há alta influência da corrente, velocidade de corte e a relação quadrática das duas variáveis.

A evidente diferença entre as variáveis significativas relacionadas à ortogonalidade indica influência de outros fatores em pelo menos em um dos lados. O fato do sentido anti-horário do fluxo do plasma beneficiar o lado direito (considerado o lado bom de corte) evidencia a preocupação do fabricante em projetar mecanismo que minimizem as imperfeições de corte ou a sensibilidade a parâmetros do processo. As variáveis mais significativas da ortogonalidade direita, velocidade de corte e distância interferem diretamente no controle do fluxo do plasma.

### 5.3 Efeitos diretos dos parâmetros do processo

Os principais efeitos das diferentes variáveis do processo sobre os parâmetros de resposta sobre o acabamento do corte a plasma estão representados de acordo com a **Figura 6(a), (b), (c) e (d)**.

O gráfico relacionando a distância (“standoff”), **Figura 6 (a)**, indica a existência de níveis ótimos ao longo do eixo das variáveis. Obtém-se melhor Qualidade (Q) e menor perda de massa (PM) nos níveis extremos de distância tocha-peça. Tal fato pode ser explicado pelo formato da

chama, onde nos extremos adotados ocorre maior concentração de calor. A menor influência sobre a perda de massa é esperada em todos os níveis e em todas as variáveis porque para gerar plasma somente com alta taxa de energia fazendo-se necessário concentrar energia, pelo menos em curto espaço de tempo.

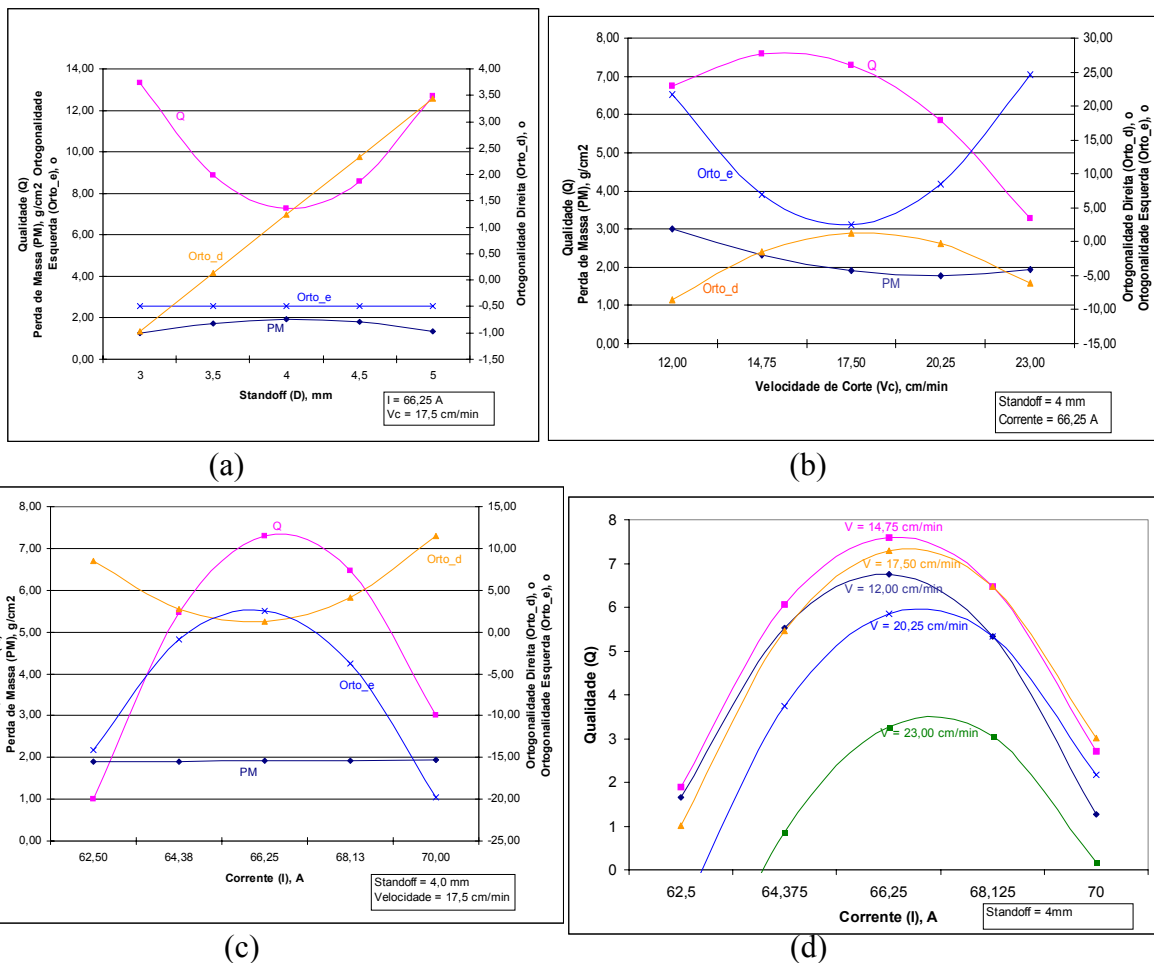


Figura 6-Efeito das variáveis sobre os quatro tipos de respostas: (a) “Standoff”; (b) Velocidade de Corte; (c) Corrente; (d) Corrente \* Velocidade de Corte.

A função da Ortogonalidade Direita (Orto\_d) varia linearmente, adotando uma postura crescente à medida que a distância aumenta. O nível de significância da distância sobre a ortogonalidade é altíssimo. A Ortogonalidade Esquerda (Orto\_e) não apresenta variações significativas frente à distância

Sobre a função qualidade extrapolar seu valor máximo (nota 10), é explicado pelo seu modelo ser apenas uma aproximação, não descrevendo perfeitamente a situação real. E uma nota superior a 10 indica a possibilidade em se obter cortes com maior qualidade em relação aos cortes avaliados no experimento.

A **Figura 6 (b)** mostra que respostas Q, PM, Orto\_d e Orto\_e obtiveram melhor resultado em um ponto intermediário da velocidade de corte próximo a 17,50 cm/min. Para Orto\_d e Orto\_e, a

velocidade de corte se apresentou altamente significativo. Tal fato é explicado pela concentração de energia em certo intervalo de tempo, e pela condução do fluxo em espiral, que é gerado no bocal de corte. O fluxo em espiral ocorre quando a camada limite turbulenta se encontra com o arco, na constante injeção de gás plasma, ocorrendo turbulência no arco, e aumento da convecção forçada e do campo.

A **Figura 6 (c)** indica haver um ponto ótimo sobre a corrente para se obter dados significativos para  $Q$ ,  $Orto\_d$  e  $Orto\_e$ , no intervalo considerado. Tal ponto ótimo se localiza próximo à intensidade de 66,25 A. A ortogonalidade, tanto direita quanto esquerda se mostraram muito sensíveis à variação da corrente, assim como a velocidade de corte. Quanto a PM, esta se mostrou crescente, conforme esperado, pois se há maior energia aplicada, maior é a quantidade de material a ser removido, desde que tenha uma distância fixada (sendo considerado no gráfico).

#### **5.4 Efeitos da interação das variáveis**

A interação entre velocidade e corrente dentro da qualidade se mostrou significativa (**Figuras 6 (d) e 7**). As velocidades maiores (23,00 e 20,25 cm/min) apresentaram os valores mais baixos de qualidade. O melhor resultado foi obtido para uma velocidade próxima de 17,50 cm/min, o que confirma a existência de um ponto ótimo próximo deste nível. O mesmo ocorre com a corrente sendo que o provável ponto ótimo está próximo de 66,25 A, ou seja, em um nível médio da intensidade da corrente.

Quando a corrente atinge o nível médio (66,25 A), a ortogonalidade direita apresenta menor valor, e quando a velocidade atinge seu valor médio, maior valor da ortogonalidade direita é apresentado. Porém, para adquirir a melhor resposta, é necessário adequar para cada unidade de corrente, um nível de velocidade.

Para a ortogonalidade esquerda, observa-se que para níveis extremos de velocidade, a ortogonalidade atinge maiores valores. E só é possível obter ortogonalidade igual à zero, quando a velocidade atingir valores próximos aos médios. Mas, deve-se tomar cuidado, pois somente se alcançará o valor ideal, quando há uma combinação entre corrente e velocidade, ou seja, se quiser aumentar a velocidade, o nível de corrente também deverá mudar para manter o padrão anterior (**Figura 10**).

Gráfico de Superfície para Qualidade

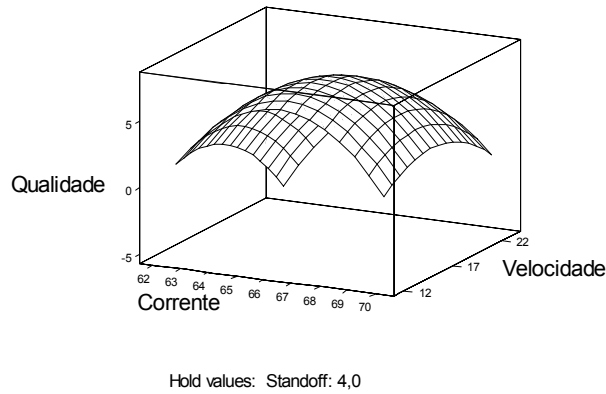
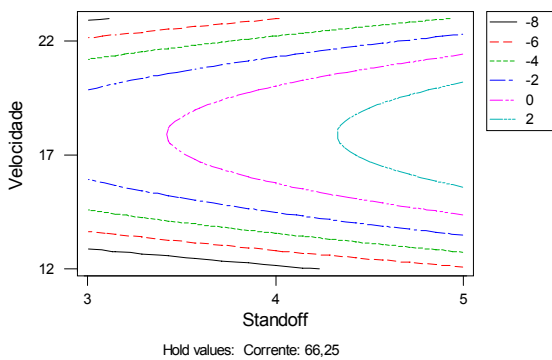
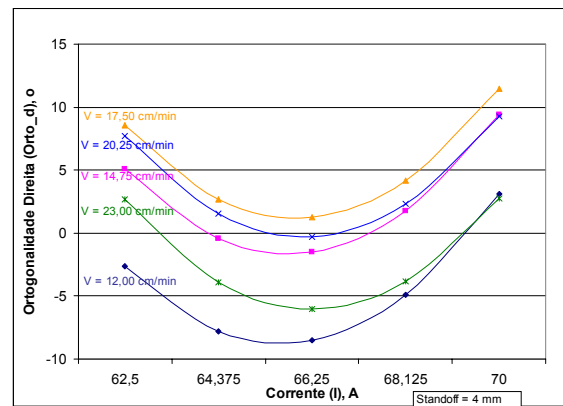


Figura 7 – Interação entre Corrente e Velocidade de Corte sobre a Qualidade de Corte

Superfície de Contorno para Ortogonalidade Direita

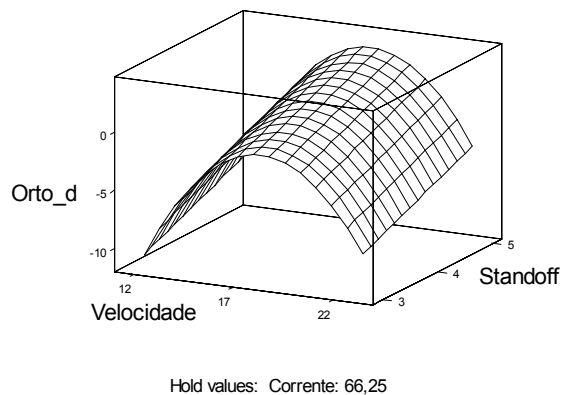


(a)



(b)

Gráfico de Superfície para Ortogonalidade Direita



(c)

Figura 8 – Influência da interação dos parâmetros na ortogonalidade direita: (a) “standoff” e velocidade; (b) corrente e velocidade; (c) velocidade e “standoff”.

Em relação ao “standoff”, este parâmetro somente se mostrou significativo quando envolvido com a ortogonalidade direita, mas de forma isolada. Porém sua interação com os demais parâmetros, mostrou-se pouco significativa. A superfície da **Figura 8 (c)** demonstra grande influência da velocidade e do “standoff”, havendo entre estes níveis uma relação linear existente, sendo que a condição ideal da ortogonalidade direita depende muito da combinação entre os dois níveis.

Sobre a qualidade do corte, as relações entre “standoff” com os níveis velocidade e corrente, mostraram ter semelhantes comportamentos, obtendo a mesma interpretação. Os níveis extremos foram os que obtiveram melhores resultados. Porém, os resultados da qualidade nestes níveis foram extrapolados além do máximo permitido, confirmando que o modelo gerado não foi perfeito. Sobre a ortogonalidade esquerda, o “standoff” não se mostrou significativo.

A perda de massa sempre irá ocorrer, porque a separação das superfícies é por meio destrutivo de fusão localizada. Existe uma quantidade de energia aliada a taxa de tempo para que a remoção de material seja a menor possível, explicando o fato da região de menor perda de massa estar próximo dos pontos médios de velocidade e de corrente, sendo a velocidade de corte o fator de maior influência (**Figura 9**). Similar resultado pode ser observado com relação a ortogonalidade esquerda (**Figura 10**).

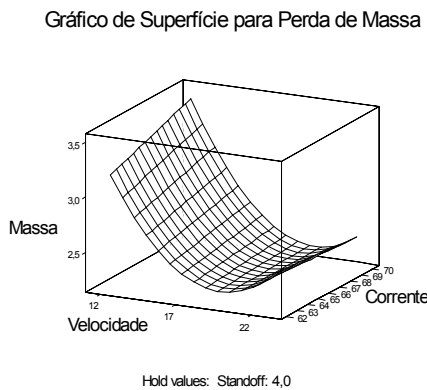


Figura 9 – Influência da interação da corrente e velocidade para a perda de massa

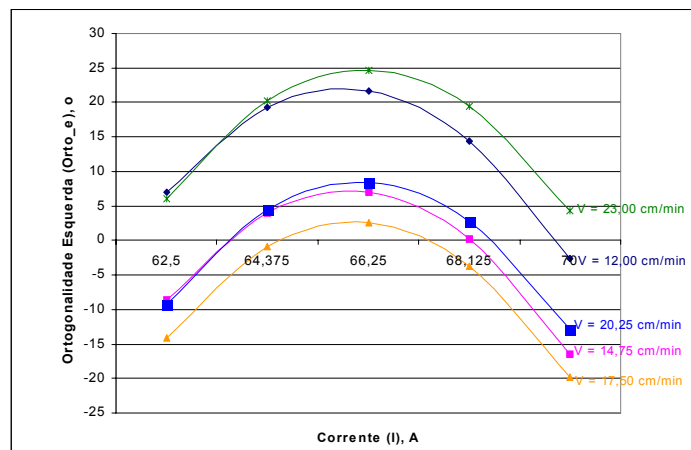


Figura 10 – Influência da interação corrente e velocidade sobre a Ortogonalidade Esquerda

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu concluir que a metodologia RSM, utilizando três variáveis, foi satisfatória. Além de demonstrar um modelo próximo às condições reais, permitiu diminuir



significativamente o número de experimentos, sem perder a qualidade dos dados. O processo para se chegar ao modelo se mostra eficiente para se conhecer as condições reais do equipamento. Também se pôde conhecer a relação de causa e efeito sobre as respostas.

Em geral, a ortogonalidade direita apresentou melhores efeitos sobre a ortogonalidade esquerda graças ao fluxo em espiral realizado pelo plasma.

A corrente obteve maior significância sobre a ortogonalidade esquerda, e as melhores respostas estão situadas próximos ao ponto médio. As interações, principalmente com a velocidade de corte, se apresentaram significativas em todas as respostas.

A distância é altamente significativa em relação à ortogonalidade direita, obtendo melhor resposta quando tal parâmetro se apresentar no menor nível. Apesar de não exercer influência significativa sobre a perda de massa e a ortogonalidade esquerda, sua influência sobre a qualidade e ortogonalidade direita, fazem deste um parâmetro importantíssimo no corte à plasma.

A velocidade de corte exerceu boa significância, demonstrando que seus níveis médios obtiveram melhores resultados em todas as respostas. É altamente significativo para as ortogonalidades.

Os modelos gerados apresentaram boa significância em pelo menos dois modelos: qualidade e perda de massa. A aproximação para os modelos de ortogonalidades também foram satisfatórias para com a situação real do processo, indicando que os fatores relevantes, suas significâncias e interpretações se dizem coerentes ao processo de corte por plasma à ar comprimido.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Benedict, G.F. (1987) - *Nontraditional Manufacturing Processes*”, New York, Marcel Dekker, Inc..
- Gunaraj, V. & Murugan, N. (1999) - Application of Response Surface Methodology for Predicting Weld Bead Quality in Submerged Arc Welding of Pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, n° 88, pp 266-275.
- Gunaraj, V. & Murugan, N. (2000) - Prediction and Optimization of Weld Bead Volume for the Submerged Arc Process – Part 1, *Welding Journal*, October, pp 286 – 294.
- Manohar, M. & Snyder II, J.P. (1994) - Dross Formation during Plasma Arc Cutting of Steels. *Welding Journal*, november, pp. 45 – 51.
- Montgomery, D. C. (1976) - *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, New York, USA, Second Edition.
- 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.
- Morais, M. S. & Lanfredi, J. (2001) - Análise da Influência das Variáveis do Corte do Aço ABNT 1045 Utilizando o Processo a Ar Comprimido Através de Análise Fatorial Fracionada. Iniciação Científica, Unifei, Itajubá, Brasil.



*Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção*  
*n.2, p. 54 – 68, jul 2004*

Pereira, W. (2000) - Estudo das Variáveis Influentes na Qualidade de Corte de Aço SAE 1045 Através do Processo de Corte por Plasma a Ar Comprimido, Dissertação de Mestrado – Unifei, Itajubá, Brasil.

Slee, B. (1979) - The Economics of NWI Plasma Arc Cutting. Metal Construction, pp. 549 – 553.

Wang, J.Y.; Kusumoto, K.O.; Nezu, K. (2002) – Characteristics of Kerf Shape in Plasma Arc Cutting. International Journal for the Joining of Materials, vol. 14, pp. 38 – 43.