

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA SOLDAGEM PLASMA PELA  
TÉCNICA KEYHOLE PARA A DETERMINAÇÃO DE SEUS GRAUS DE RELEVÂNCIA****(1) Víctor Vergara Díaz****(2) Jair Carlos Dutra****(3) Raul Gohr Junior****RESUMO**

Neste trabalho é analisada a influência da forma de onda da corrente de soldagem, da vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem sobre a abertura e, principalmente, o fechamento do *keyhole*. A partir de ensaios conduzidos em chapas de 3 mm de espessura, verificou-se que a abertura do *keyhole* requer que, tanto a corrente, quanto a vazão do gás de plasma, variem gradualmente, desde uma condição inicial, até atingir a condição de regime. Com relação à velocidade de soldagem, o deslocamento da pistola só deve se dar quando o jato de plasma atravessa totalmente a chapa. Caso esta condição não seja satisfeita, verifica-se uma tendência a falhas ao longo da junta. Com relação a finalização da solda, para garantir o fechamento do *keyhole* deve existir uma queda suave, tanto da corrente, quanto da vazão de gás de plasma.

**Palavras-chave:** Soldagem Plasma, *Keyhole*, Instrumentação

**ABSTRACT**

In this paper the influence of the current waveform, the plasma gas flow rate and the welding speed over the *keyhole* starting and terminating is analyzed. Grounded on experiments conducted on 3 mm steel plate thickness, it was verified that a smooth current and plasma gas flow rate increase, since an initial condition, up to welding regime, is required. Regarding the welding speed, the welding gun displacement should began only after the plasma arc pass through the plate thickness, otherwise welding defects at the joint would be present. At the ending of the weld, a smooth welding current and gas flow rate decrease is required, in order to guarantee an adequate *keyhole* terminating.

**Key-Words:** Plasma welding; *Keyhole*; Instrumentation

---

(1) Eng. Mecânico

E – mail: [vergara@labsolda.ufsc.br](mailto:vergara@labsolda.ufsc.br), Florianópolis SC

(2) Dr. Eng., Prof. LABSOLDA/UFSC

Cx. P. 476 – 88040-900 – Fax: (048) 234-6516 – e-mail: [labsolda@emc.ufsc.br](mailto:labsolda@emc.ufsc.br), Florianópolis SC

(3) Eng. LABSOLDA/UFSC

Cx. P. 476 – 88040-900 – Fax: (048) 234-6516 – e-mail: [rgj@labsolda.ufsc.br](mailto:rgj@labsolda.ufsc.br), Florianópolis SC

## 1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista de suas características físicas, o processo de soldagem PLASMA pode ser considerado como uma derivação do processo de soldagem TIG, pois utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e gás inerte para gerar o arco e proteger o metal fundido de contaminação [1]. A principal diferença deste processo reside no confinamento do plasma em um bocal em forma de funil, conferindo ao arco uma distribuição espacial cilíndrica de grande estabilidade e com maior concentração de energia, o que aumenta a eficiência de fusão. Como resultado deste efeito de constrição, o processo PLASMA permite produzir uma soldagem com maiores velocidades de deslocamento, penetração total e uniforme, em um único passe em chapas de média espessura (até 6 mm). Uma menor zona afetada pelo calor, além da simplificação nos procedimentos de preparação da junta e de uma maior tolerância de variação na distância tocha-peça são outras vantagens advindas do processo [1, 8].

Como forma de aumentar a produtividade, a soldagem PLASMA pode ser executada através de uma técnica denominada de *keyhole* ou buraco de fechadura. Esta técnica consiste na abertura de um furo, com formato de funil, passante através do metal base. Dado o efeito de constrição do arco, a soldagem PLASMA *keyhole* permite produzir uma poça metálica de dimensões relativamente pequenas. Após a abertura do *keyhole*, o movimento de translação da tocha força o metal fundido, presente à frente do jato de plasma, a se deslocar em direção à parte posterior da poça de fusão, preenchendo o orifício de *keyhole* e formando, assim, o cordão de solda. Dada a característica da técnica, o furo que se forma se torna um indicador de penetração e uniformidade da solda.

O controle sobre a abertura e o fechamento *keyhole* pode ser obtido através de combinações das variáveis vazão de gás de plasma, corrente e velocidade de soldagem. Caso estas variáveis não sejam devidamente controladas, defeitos como falta ou excesso de penetração e mordeduras serão observadas ao longo dos cordões. Dada a importância que exercem sobre a geometria e o aspecto final dos cordões [2, 4, 6, 7], analisa-se neste trabalho o efeito das variáveis vazão do gás de plasma, corrente e velocidade de soldagem sobre a abertura e o fechamento do *keyhole*.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma fonte de soldagem operando em conjunto com um módulo plasma. Para o controle e monitoração do gás de plasma foi utilizada uma válvula controladora de vazão mássica e medidores digitais de vazão de gás. Para a movimentação da pistola de soldagem foi utilizado um sistema de deslocamento, interligado a um microcomputador através de uma placa de aquisição e controle de dados. Desta forma, o controle da movimentação, assim como da vazão do gás de plasma e dos níveis de corrente, pode ser executado através de um programa especialmente desenvolvido para a soldagem PLASMA. Como observação, com exceção à válvula de controle de vazão, os demais equipamentos e programas foram desenvolvidos no LABSOLDA.

Como metal de base foram utilizadas chapas de aço ABNT 1020, com espessura de 3,0 mm, preparadas em juntas de topo com folga zero. Utilizou-se bocal constritor de

2,4 mm de diâmetro de orifício. O eletrodo foi o EWTh2 (tungstênio com 2% de tório), de 4,8 mm de diâmetro, ângulo da ponta de 30°, montado no bocal com recuo de 2,4 mm. Os gases utilizados nos experimentos foram argônio (grau de pureza: 99,99%), para o gás plasma e gás de proteção, e nitrogênio, este para a proteção da raiz do cordão de solda. Os ensaios foram realizados na posição plana (1G), em passe único, sem adição de arame e utilizada corrente contínua pulsada. Para verificar a ausência de poros, macrografias foram preparadas a partir de corpos de prova cortados no sentido longitudinal.

Devido ao número de variáveis envolvidas na abertura e no fechamento do *keyhole*, para a execução dos ensaios foram utilizados planejamentos e métodos de análise estatísticos. O método estatístico utilizado consistiu na *análise fatorial em dois níveis* pois este permite determinar, através de um número pré-definido de ensaios, a influência isolada ou combinada das variáveis de soldagem [3].

Para a abertura do *keyhole* foram selecionadas como variáveis (fig. 1):

- a) rampa de subida da corrente (tsl);
- b) rampa de subida da vazão de gás plasma (tsGP);
- c) tempo de retardo do deslocamento da tocha (tiVs) e
- d) vazão inicial do gás de plasma (VPi).

A execução dos experimentos foi conduzida seguindo a matriz de ensaios apresentada na tabela 3. O planejamento desta matriz teve por objetivo definir todas as possíveis combinações de variáveis que poderiam ser executadas nos ensaios. O resultado observado, ou *resposta*, foi o aspecto do cordão de solda. Esta característica foi escolhida por se relacionar diretamente com a abertura do *keyhole* no início do cordão, uma vez que, para produzir boas soldas, o *keyhole* deve permanecer durante a soldagem. Caso esta condição não seja satisfeita, surgirão defeitos na solda. Cabe observar que para a análise destes ensaios não foi utilizado o método estatístico fatorial em dois níveis, uma vez que a *resposta* foi feita em bases qualitativas, ou seja, cordão aprovado/ cordão rejeitado. Na tabela 1 são apresentados os parâmetros de soldagem mantidos constantes ao longo da execução dos 16 testes e na tabela 2 os níveis alto e baixo selecionados para as variáveis, estes definidos em ensaios previamente realizados.

Para o estudo do fechamento do *keyhole* foram selecionadas como variáveis (fig.1):

- a) tempo de descida da corrente (Tdl);
- b) tempo de descida da vazão plasma (TdGP),
- c) corrente final (If) e
- d) vazão de gás plasma final (VGPF).

Para a análise dos resultados foi utilizada análise fatorial com o objetivo de identificar quais das variáveis selecionadas permitem produzir, de forma isolada ou combinada, a menor profundidade na cratera que se forma no fechamento do *keyhole* (fig. 2 e 3). Para simplificar a manipulação dos dados no processo de cálculo estatístico, as variáveis (Tdl), (TdGP), (If) e (VGPF) foram denominadas pelas letras A, B, C e D, respectivamente. Na tabela 1 são apresentados os parâmetros operacionais mantidos constantes ao longo dos ensaios. Na tabela 4 são apresentados os níveis alto e baixo utilizados para as variáveis A, B, C e D e na tabela 5, a matriz de planejamento e a resposta utilizada como referência para a execução dos ensaios. Os sinais (-) e (+)

significam, respectivamente, os níveis alto e baixo aplicados para as variáveis de soldagem.

### **3. RESULTADOS E ANÁLISES**

#### **3.1 - Abertura do *keyhole*.**

Na tabela 3 são apresentados os resultados (resposta) referentes a influência das variáveis utilizadas na abertura do *keyhole* sobre a penetração e o aspecto superficial na região de início da solda. Os melhores resultados foram obtidos para a combinação envolvendo uma vazão inicial de gás de plasma de 0,25 l/min e as variáveis (tsl), (tsGP), (tiVs) em fase no instante em que o processo entra em regime. Mantidas constantes as variáveis (tsl), (tsGP) e (tiVs), a mudança na vazão inicial para 0,5 l/min resultou no aparecimento de um excesso de penetração e de mordeduras na região de início dos cordões.

Verificou-se que a existência de um retardo no início do movimento da tocha (tiVs) se constitui em um fator significativo na abertura do *keyhole*. O aparecimento de mordedura ao longo da extensão do cordão se torna presente quando a tocha de soldagem inicia seu movimento após, tanto a vazão do gás de plasma, quanto a corrente de soldagem atingirem seus valores de regime. Tempos de retardo maiores tornaram mais evidentes o excesso de penetração e mordeduras. Como regra geral, a presença de mordeduras no início da solda foi evidente para duas situações:

- o deslocamento da tocha se inicia quando a vazão plasma atinge o valor de regime, mas antes da corrente alcançar sua condição de regime;
- o deslocamento da tocha se inicia quando a corrente atinge o valor de regime, mas antes da vazão plasma alcançar sua condição de regime.

Para os ensaios onde a corrente de soldagem atingiu seu valor de regime a) antes que a vazão plasma alcançasse a esta condição ou b) antes do início do deslocamento da tocha, o resultado foi o aparecimento de penetração excessiva na região de início da solda. A medida que se elevou a vazão de plasma, observou-se um aumento na penetração.

#### **3.2 - Fechamento do *keyhole*.**

Na tabela 5 são apresentados os resultados de duas medições de profundidade de cratera no fechamento do *keyhole* (*replicações* I e II), obtidas para cada condição de soldagem executada. A partir da análise fatorial em dois níveis observou-se, para o intervalo analisado, que as variáveis (If) e (VGPF) exercem influência significativa sobre o fechamento do *keyhole* (tabela 6). Esta influência se dá, tanto de forma isolada, quanto nas combinações a) tempo de descida da corrente e corrente final (Tdl\*If) e b) corrente final e vazão de gás de plasma final (If\*VGPF)

Na figura 4 são apresentados os valores médios da profundidade de cratera de fechamento em função da corrente final (If), da vazão de gás de plasma final (VGPF), do tempo de descida da corrente (Tdl) e do tempo de descida do gás de plasma (TdGP). Nesta figura, que descreve os efeitos isolados de cada variável, os valores da

esquerda ( $X = -1$ ) representam a profundidade média obtida quando as variáveis ( $I_f$ ), ( $VGP_f$ ), ( $T_{dl}$ ) e ( $T_{dGP}$ ) se encontram nos valores mínimos, enquanto os pontos da direita ( $X = +1$ ) representam a profundidade média obtida para as variáveis em nível alto. Destes dados observou-se que:

- a) Por ser altamente significativa, uma diminuição no valor da profundidade da cratera final pode ser obtida com a diminuição na vazão final do gás de plasma;
- b) A influência da corrente final é altamente significativa, sendo igualmente possível diminuir a profundidade da cratera incrementando o valor da corrente final.
- c) O tempo de descida do gás de plasma e o tempo de descida da corrente são variáveis significativas, mas em proporção inferior a dos dois parâmetros inicialmente analisados. Apesar de menos significativo, uma diminuição na profundidade pode ser obtida a partir da diminuição do tempo de descida da vazão plasma ou do aumento do tempo de descida da corrente.

Na figura 5 é apresentado o efeito das interações entre a vazão final do gás de plasma e a magnitude final da corrente de soldagem ( $VGP_f \cdot I_f$ ). A partir deste gráfico verifica-se que:

- a) Ocorre uma diminuição na profundidade quando a vazão final do gás de plasma ( $VGP_f$ ) se encontra em níveis baixos e a corrente final em níveis altos ( $I_f$ );
- b) Para qualquer valor da corrente final ( $I_f$ ), a profundidade não apresenta grandes variações quando se a vazão final de gás de plasma ( $VGP_f$ ) se encontra em nível alto.

Na figura 6 é apresentado o efeito das interações entre tempo de descida da corrente e a magnitude final da corrente de soldagem ( $T_{dl} \cdot I_f$ ). A partir deste gráfico verifica-se que a corrente final ( $I_f$ ) não produz efeito sobre a profundidade da cratera final quando o tempo de descida da corrente se encontra em níveis baixos. O efeito só se torna significativo quando o tempo de descida da corrente se encontra em níveis altos. Com relação a profundidade da cratera, os melhores resultados foram obtidos quando o tempo de descida da corrente e a corrente final se mantiveram em níveis altos.

#### **4 – CONCLUSÕES**

Através deste estudo constatou-se a necessidade de um controle apurado sobre a corrente, a vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem, tanto na abertura, quanto no fechamento do *keyhole*. Os testes permitiram demonstrar que o tempo de retardo do deslocamento da tocha se constitui em um fator crítico para a abertura do *keyhole*. Caso este parâmetro não esteja em fase com a corrente e vazão do gás de plasma, criam-se condições para o surgimento de falta ou de um excesso de penetração, além de mordeduras em toda a extensão do cordão. A utilização de sistemas que permitam executar o controle sobre a corrente, a vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem assume importância ainda maior na soldagem circunferencial em função da impossibilidade do descarte das extremidades do cordão [4].

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Welding Handbook. AWS, v.2- Welding process, eighth edition, 1991.
- [2] Paula JÚNIOR. O.S. : “Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica *keyhole*”, Dissertação de mestrado, UFSC, Brasil. 1997. 111p.
- [3] Douglas C. Montgomery, Design and analysis of experiments, Arizona State University, fourth edition, 1997,703p.
- [4] Miller, H. R. and Filipski, S. P. “Automated Plasma Arc Welding for Aerospace and Cryogenic Fabrications” Welding Journal, p. 493s-501s. 1966.
- [5] Lucas, W. (1990). “Tig and PLASMA Welding”. England: Abington Publishing, 112p
- [6] Holko, K. H.. “Plasma arc welding 21/4Cr-1Mo tubing”. Welding Journal, v.57, n.5, p. 23s-31s, May 1973.
- [7] Privoznik, L. J. and Miller, H. R. “Evaluation of plasma arc welding for 120 in diameter rocket motor cases” Welding Journal, p.717-725, 1966.
- [8] Martikainen, J. K. and Moisio, T. J. I. “Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc *keyhole* welding of structural steels” Welding Journal, v.72, n. 7, p.329s-340s, July 1993.

**Tabela1: Parâmetros Operacionais Mantidos Constantes**

Parâmetros	Unidades	Valores
Espessura do material base	mm	3,0
Corrente de pulso	Ip(A)	145
Tempo de pulso	tp(ms)	250
Corrente de base	Ib(A)	96
Tempo de base	tb(ms)	250
Corrente media	Im(A)	120,5
Tensão	U(V)	26,7
Vazão gás plasma	VGP(l/min)	0,9
Vazão de gás de proteção	VGPr (l/min)	9
Vazão de gás de purga	VGPg (l/min)	5
Velocidade de soldagem	Vs (cm/min)	23,5
Defasagem da corrente	dI (s)	3,0
Defasagem vazão plasma	dVP (s)	0
Diâmetro do bocal constritor	mm	2,4
Distância tocha-peça	DTP (mm)	4,0

**Tabela 2: Níveis dos fatores na abertura**

Variáveis	Simbologia	-1	1
Rampa de subida da corrente	tsl (s)	3	4
Rampa de subida da vazão plasma	TsGP (s)	3	4
Tempo de início de deslocamento da tocha	tiVs (s)	3	4
Vazão plasma inicial	VPI (l/min)	0,25	0,5

**Tabela 3: Condições e resultados dos testes utilizados na abertura do *keyhole***

Nº	Tsl (s)	TsGP (s)	tiVs	VPi	Penetração	Resultados	
						Aspecto superficial	
1*	-1	-1	-1	-1	Correta	Ruim	
1	-1	-1	-1	-1	Correta	Bom	
2	1	-1	-1	-1	Excessiva	Ruim	
3	-1	1	-1	-1	Correta	Ruim	
4	1	1	-1	-1	Correta	Razoável	
5	-1	-1	1	-1	Excessiva	Ruim	
6	1	-1	1	-1	Excessiva	Ruim	
7	-1	1	1	-1	Excessiva	Razoável	
8	1	1	1	-1	Correta	Bom	
9	-1	-1	-1	1	Excessiva	Ruim	
10	1	-1	-1	1	Correta	Razoável	
11	-1	1	-1	1	Correta	Razoável	
12	1	1	-1	1	Correta	Razoável	
13	-1	-1	1	1	Excessiva	Ruim	
14	1	-1	1	1	Excessiva	Ruim	
15	-1	1	1	1	Excessiva	Ruim	
16	1	1	1	1	Excessiva	Razoável	

**Tabela 4: Níveis dos fatores no fechamento**

		-1	1
Tempo de descida da corrente	Tdl (s)	6	8
Tempo de descida vazão plasma	TdGP (s)	9	11
Corrente final	If (A)	10	40
Vazão de gás plasma final	VGPf (l/min)	0,25	0,5

**Tabela 5 :Matriz de planejamento**

	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	REPLICAÇÕES	
																	I
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	0,3	0,35
A	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0,5	0,4
B	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	0,4	0,4
Ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,3	0,4
C	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0,3	0,25
Ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0,25	0,25
Bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,35	0,35
Abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,25	0,25
D	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,35	0,35
Ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,4	0,4
Bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,45	0,45
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,5	0,45
Cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,4	0,5
Acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,3	0,4
Bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,45	0,45
Abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,35	0,35

Legenda: A= Tempo de Descida da Corrente (Tdl); B= Tempo de descida da Vazão do Gás de Plasma (TdGP); C= Corrente Final (If); D= Vazão Final do Gás de Plasma (VGPf).

Tabela 6: Análise de Variância para a profundidade no fechamento do *keyhole*

Fonte	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Médias de Quadrado	Fo	Fcrit	Significativo
			S			
A	1	0,00382813	0,00382813	1,87	< 5,83	NÃO Significativo
B	1	0,00632813	0,00632813	3,098	< 5,83	NÃO Significativo
AB	1	0,00945313	0,00945313	4,6	< 5,83	NÃO Significativo
C	1	0,02820313	0,02820313	13,9	> 5,83	Significativo
AC	1	0,02820313	0,02820313	13,8	> 5,83	Significativo
BC	1	0,00070313	0,00070313	0,34	< 5,83	NÃO Significativo
D	1	0,04882813	0,04882813	23,9	> 5,83	Significativo
AD	1	0,00070313	0,00070313	0,34	< 5,83	NÃO Significativo
BD	1	0,00195313	0,00195313	0,95	< 5,83	NÃO Significativo
CD	1	0,01320313	0,01320313	6,46	> 5,83	Significativo
Erro	21	0,04289375	0,0,00204			
Total	31	0,1843				

Legenda: A= Tempo de Descida da Corrente (Tdl); B= Tempo de descida da Vazão do Gás de Plasma (TdGP); C= Corrente Final (If); D= Vazão Final do Gás de Plasma (VGPF).

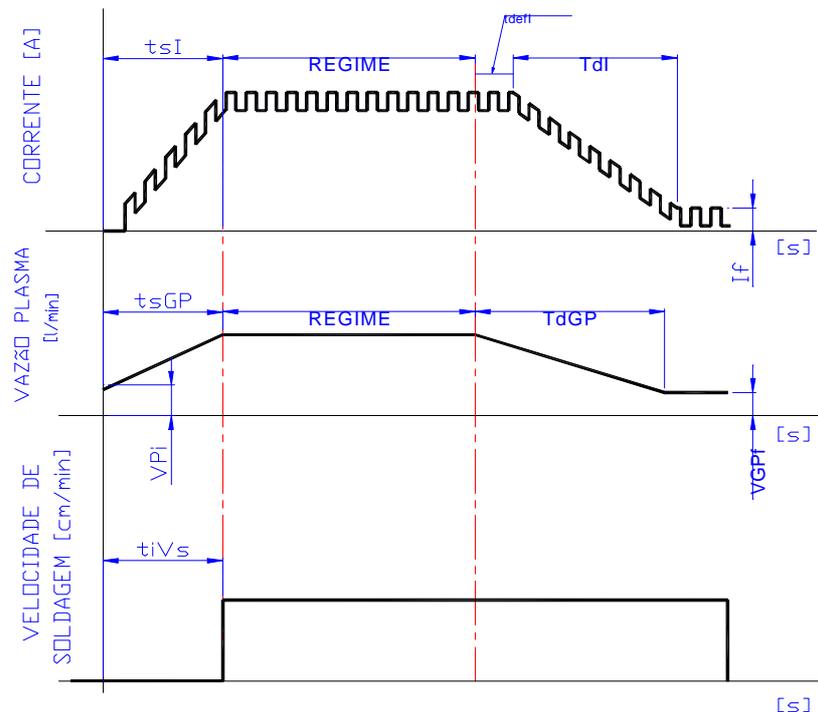


Figura 1: Forma de onda da corrente, da vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem utilizadas na abertura, em regime e fechamento do *keyhole*.

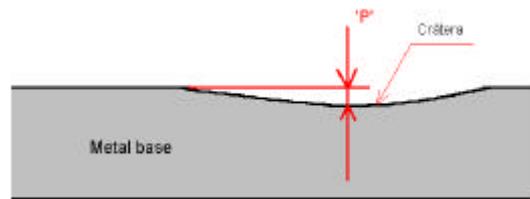


Figura 2: Representação da profundidade da cratera ( $p$ ) que se forma no fechamento do *keyhole*.

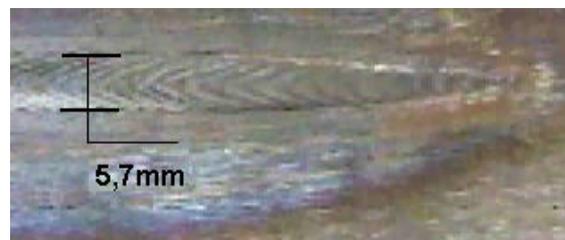


Figura 3: Aspecto da cratera que se forma no fechamento do *keyhole*.

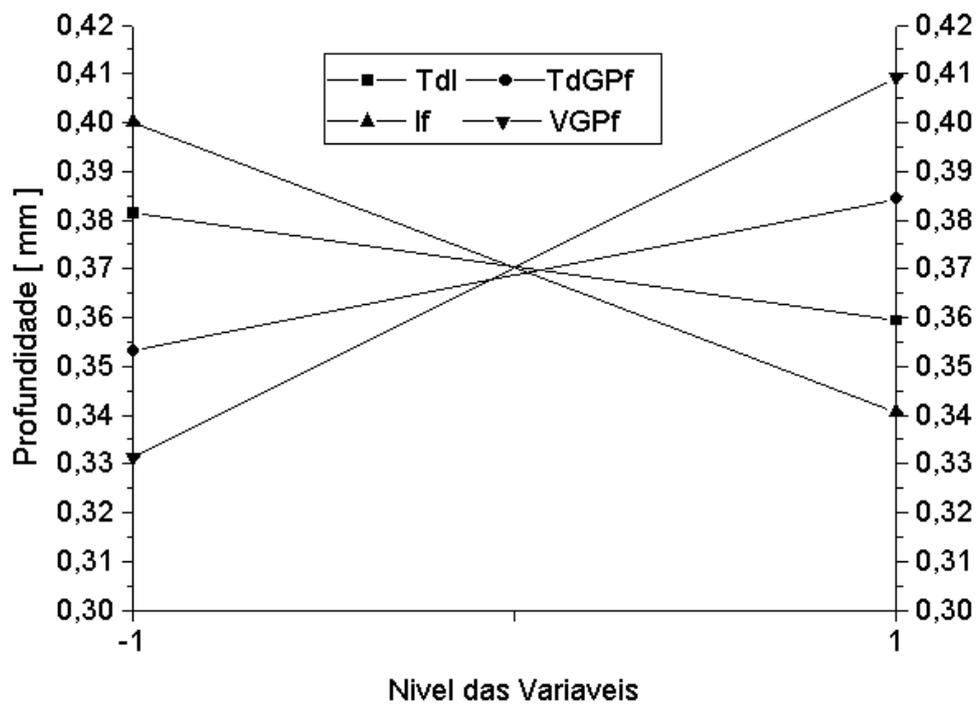


Figura 4: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da corrente final ( $I_f$ ), vazão plasma final ( $V_{GPf}$ ), tempo de descida da corrente ( $T_{dl}$ ) e tempo de descida da vazão plasma ( $T_{dGP}$ )

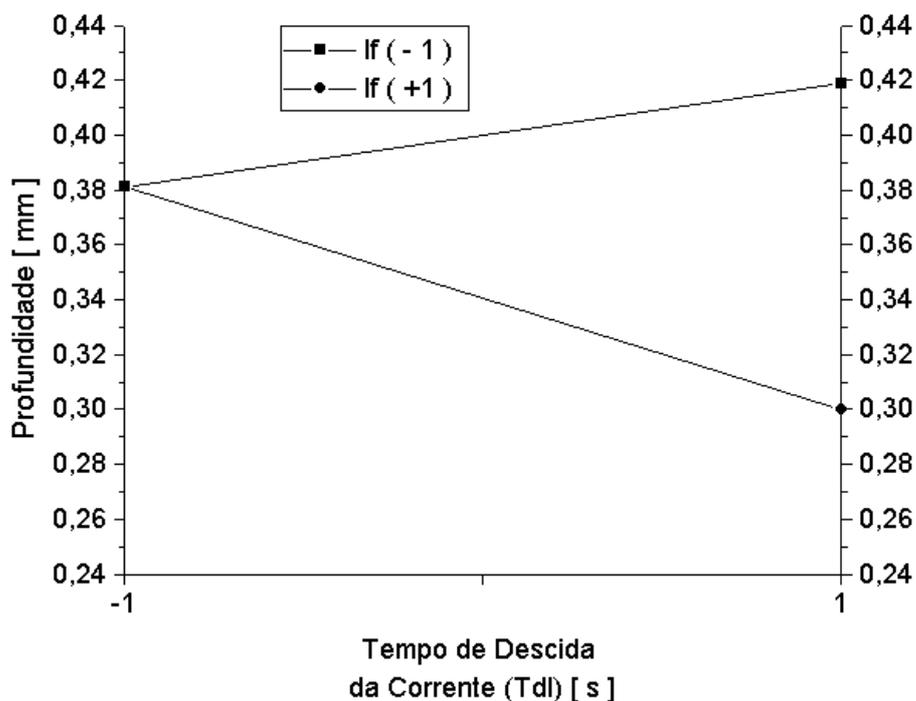


Figura 5: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre corrente final ( $I_f$ ) e vazão plasma final (VGPF)

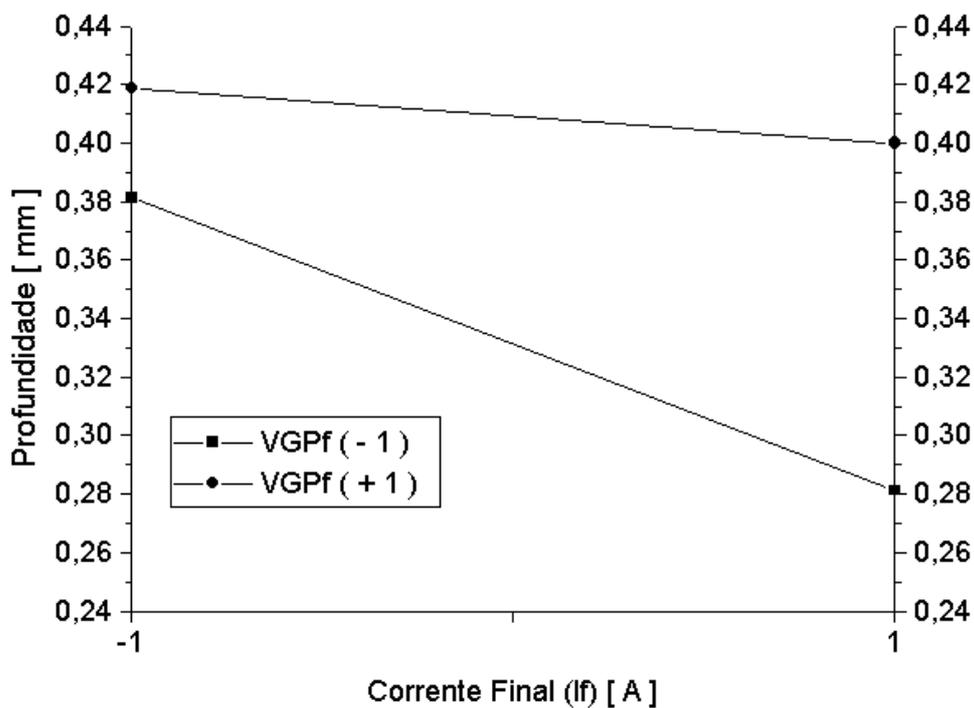


Figura 6: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre o tempo de descida da corrente (Tdl) e a corrente final ( $I_f$ ).