

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA SOLDAGEM PLASMA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DA SOLDA COM ÊNFASE NA ANÁLISE DA ABERTURA E NO
FECHAMENTO DO *KEYHOLE***

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VÍCTOR MANUEL VERGARA DÍAZ

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1999

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA SOLDAGEM PLASMA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DA SOLDA COM ÊNFASE NA ANÁLISE DA ABERTURA E NO
FECHAMENTO DO *KEYHOLE***

VÍCTOR MANUEL VERGARA DÍAZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Júlio César Passos – Coord. Do Curso

Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra – Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eng. Almir Monteiro Quites

Prof. Dr. Eng. Augusto J. de Almeida Buschinelli

Prof. Dr. Eng. Berend Snoeijer

**À Deus, aos meus pais: Edmundo e Luz,
À minha noiva Elizabeth**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e estímulo;

Ao professor René Yung González do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Antofagasta pelo incentivo e apoio para inscrição do mestrado;

Aos Eng^{OS} Raul Gohr Jr, Carlos Baixo, Erwin Werner Teichmann, Larry Fiori Ollé, Andre Leal e Cleide Marqueze, pelo valioso apoio e colaboração;

Aos técnicos Valério Quadros e Jean Alves pela ajuda no trabalho prático;

Ao Eng. Leonardo Bocannera, bolsista Daniel Amorin e o estagiário Carlos Porfírio que auxiliaram nos ensaios metalográficos;

Ao prof. Carlos Niño, pelas suas contribuições a este trabalho;

Ao Eng. José Orlowski do Centro Tecnológico de Aeronáutica, pelas consultas e esclarecimentos de dúvidas;

À Universidade de Antofagasta, pelo apoio financeiro;

À toda a turma de LABSOLDA, em especial aos amigos Aldo Pereira, Alexandre Gomes, Marcos Schiefler, Fabricio Freire, Fabio Demarchi, Fernando Pelizzaro, Tiago Vieira, Sergio Barra, Adriano Maurici, Marcelo Almeida, Moisés Oliveira, Gilson Arima, Rodrigo Pires, Luiz Delgado, Andre Coelho, Luis Galaz, Marcelo Motta, pela amizade.

À minha família, pelos incentivos nas horas difíceis.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
SIMBOLOGIA.....	xv
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
 I – INTRODUÇÃO.....	 1
 II – JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS.....	 3
 III – REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	 6
3.1 – Introdução.....	6
3.1 – Processo de soldagem por plasma.....	7
3.3 – Construção do arco.....	9
3.4 – Tipos de arco.....	10
3.5 – Técnicas de soldagem.....	11
3.6 – Influência dos parâmetros de soldagem.....	14
3.6.1 – Corrente de soldagem.....	14
3.6.2 – Velocidade de soldagem.....	16
3.6.3 – Tipo e vazão de gás de plasma.....	17
3.6.4 – Tipo e vazão de gás de proteção.....	18
3.6.5 – Distância tocha-peça.....	18
3.6.6 – Diâmetros e forma do orifício constritor.....	19

3.6.7 – Ângulo da ponta do eletrodo.....	20
3.6.8 – Recuo do eletrodo.....	21
3.7 – Influência das variáveis e parâmetros de soldagem na abertura e fechamento do <i>keyhole</i>	22
IV – MATERIAIS E METODOS.....	26
4.1 – Bancada de ensaios.....	26
4.1.1 – Central de soldagem inversal 450.....	26
4.1.2 – Módulo plasma.....	27
4.1.3 – Medidores de vazão de Gás MVG-1.....	28
4.1.4 – Controlador de vazão de gás de plasma.....	28
4.1.5 – Softwares.....	28
4.1.6 – Placa de aquisição INTERDATA 3.....	28
4.1.7 – Tocha de soldagem plasma.....	29
4.1.8 – Sistema de deslocamento e posicionamento computadorizado da tocha de soldagem.....	29
4.2 – Materiais.....	30
4.2.1 – Corpos de prova.....	30
4.2.2 – Gases.....	30
4.2.3 – Eletrodo.....	31
4.3 – Metodologia Experimental.....	31
4.3.1 – Procedimento de soldagem.....	31
4.3.2 – Análise geométrica das amostras.....	36
4.3.3 – Padrão de aceitação.....	36

4.4 – Metodologia de tratamentos de dados.....	37
4.4.1 – Introdução.....	37
4.4.2 – Definição de fatores e níveis.....	37
4.4.3 – Fundamentos de análise estatística.....	38
4.4.4 – Modelo estatístico lineal.....	39
4.4.5 – Suposições associadas ao modelo estatístico lineal.....	40
4.4.6 – Hipóteses.....	40
4.4.7 – Estimativa para a variância.....	41
4.4.8 – Modelo fatorial 2^K	43
4.4.9 – Estimativa dos efeitos dos fatores.....	44
4.4.10 – Análise de variância.....	46
4.5 – Procedimentos específicos e dados de soldagem.....	49
V – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
a) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre a abertura do <i>keyhole</i>	60
b) Análise da influência da defasagem da corrente de soldagem em relação à vazão de gás de plasma no fechamento do <i>keyhole</i>	65
c) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre o fechamento do <i>keyhole</i>	68
d) Análise da influência da distância tocha-peça.....	73
e) Análise da influência da velocidade de soldagem.....	76
f) Análise da influência da corrente de soldagem.....	80
g) Análise da influência da vazão de gás de plasma.....	82

h) Análise da influência da vazão de gás de proteção.....	84
i) Análise da influência das variáveis da corrente contínua pulsada.....	87
j) Análise da influência da rampa de descida da velocidade de soldagem no fechamento do <i>keyhole</i>	101
k) Importância da composição química do material de base na soldagem <i>keyhole</i>	102
 VI – CONCLUSÕES.....	 108
VII – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do material de base (% em peso)	30
Tabela 2: Dados típicos para experimentos com um fator	38
Tabela 3-ANOVA para um fator	43
Tabela 4: Matriz do planejamento (2^4)	44
Tabela 5: Matriz para determinação dos efeitos	45
Tabela 6-Análise de variância para o projeto fatorial 2^4	48
Tabela 7: Aço E, espessura 3.2 mm. Corrente contínua constante	56
Tabela 8: Aço E, espessura 3.2 mm. Corrente contínua pulsada	57
Tabela 9: Aço 300M (AMS 6417), espessura 3.5 mm. Corrente contínua constante	58
Tabela 10: Aço E, espessura 3.2 mm e aço A, espessura 2.0 mm	59
Tabela 11: Parâmetros operacionais mantidos constantes	61
Tabela 12: Condições e resultados dos testes utilizados na abertura do <i>keyhole</i>	63
Tabela 13: Resposta geométrica do cordão de solda para diferentes níveis do fator defasagem	66
Tabela 14 :Matriz de planejamento	68
Tabela 15: Efeito dos fatores	69
Tabela 16: Análise de variância para a profundidade no fechamento do <i>Keyhole</i>	69
Tabela 17: Influência do fator distância tocha-peça na tensão e parâmetros geométricos	74
Tabela 18: Resultados de análise de variância para o reforço da raiz	75
Tabela 19: Resultados de análise de variância para a largura da raiz	76
Tabela 20: Resultados de análise de variância para a largura da solda	76

Tabela 21: Dados das condições geométricas do cordão.	79
Tabela 22:- Resultados de análise de variância para a largura da solda L	80
Tabela 23: Dados da corrente de soldagem sobre a largura da solda.	81
Tabela 24: Dados da corrente de soldagem sobre a velocidade de soldagem	81
Tabela 25: Resultados de análise de variância para a largura da solda L	81
Tabela 26: Dados da vazão de gás de plasma sobre a largura média da solda.	83
Tabela 27: Resultados de análise de variância para a largura da solda L	83
Tabela 28: Dados da vazão do gás de proteção sobre as condições geométricas do cordão de solda.	84
Tabela 29: Resultados de análise de variância para o reforço da raiz R	85
Tabela 30: Resultados de análise de variância para a largura da raiz Lr	86
Tabela 31: Resultados de análise de variância para a largura da solda L	86
Tabela 32: Condições de soldagem iniciais adotadas para experimentos utilizando a corrente contínua pulsada na posição plana.	87
Tabela 33: Aço F (TABELA 4.1), espessura 4.8 mm	96
Tabela 34: Aço 300M (AMS 6417), espessura 3.5 mm	97
Tabela 35: Condições e resultados de testes utilizados para avaliar a influência da frequência de pulsação (FP)	98
Tabela 36: Dados da velocidade de soldagem para os níveis de FP	98
Tabela 37: Dados da largura da solda para os níveis de FP	98
Tabela 38: Resultados de análise de variância para a largura da solda	99
Tabela 39: Planejamento do experimento e resultados dos testes	99
Tabela 40: Dados da largura da solda para os níveis de frequência de pulsação	99
Tabela 41: Dados da largura da solda para corrente contínua constante	99

Tabela 42: Composição química dos aços (% em peso). Espessura 6.35 mm	102
Tabela 43: Composição química dos aços (% em peso). Espessura 2.0 mm	103
Tabela 44: Condições de soldagem para avaliar o efeito da variação na composição química dos aços	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Configuração do bocal e parâmetros empregados no processo	8
Figura 2: Tipos de arco. a) Arco transferido, b) Arco não transferido	11
Figura 3: Esquema do processo a arco plasma pela técnica keyhole	13
Figura 4: Influência do fator recuo de eletrodo sobre o grau de constrição do arco	21
Figura 5: Keyhole no final do cordão de solda	23
Figura 6: Esquema da bancada para o processo Plasma	27
Figura 7: a) Tocha de soldagem plasma PWM-300 (Thermal Dynamics) e b) Sistema de deslocamento computadorizado da tocha de soldagem SDP-600	29
Figura 8: Variáveis que definem o ciclo de soldagem na abertura, regime e fechamento	33
Figura 9: Dimensões avaliadas nos cordões de solda	36
Figura 10: 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	51
Figura 11: Representação da profundidade da cratera (“p”) que se forma no fechamento do keyhole	52
Figura 12: Aspecto superficial e de raiz sem a programação de rampas de corrente e vazão de gás na abertura do <i>keyhole</i> . Teste conduzido em corpo de prova E, tabela 1, espessura 3.2 mm	61
Figura 13: Forma de onda da corrente, da vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem utilizadas na abertura do keyhole	62
Figura 14: Aspecto superficial; mordeduras devido ao desalinhamento da tocha em relação à superfície da peça	63
Figura 15: Fechamento no final do cordão	67
Figura 16: Efeito da defasagem na profundidade “p” e largura da cratera	67

Figura 17: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da corrente final (I_f), vazão plasma final (V_{fGP}), tempo de descida da corrente (T_{dI}) e tempo de descida da vazão plasma (T_{dGP})	71
Figura 18: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre corrente final (I_f) e vazão plasma final (V_{fGP})	72
Figura 19: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre o tempo de descida da corrente (T_{dI}) e a corrente final (I_f)	72
Figura 20: Efeito da DTP na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz	75
Figura 21: Efeito do fator distância tocha-peça na tensão do arco	75
Figura 22: Levantamento das condições de obtenção da técnica <i>keyhole</i>	78
Figura 23: Efeito do fator velocidade de soldagem sobre a largura da solda	79
Figura 24: Efeito da corrente de soldagem sobre a velocidade máxima de soldagem	82
Figura 25: Efeito da corrente de soldagem sobre a largura média da solda	82
Figura 26: Efeito da vazão plasma sobre a largura da solda e a velocidade de soldagem	84
Figura 27: Efeito da vazão de gás de proteção na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz	85
Figura 28: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 2.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	89
Figura 29: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 0.5 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	89
Figura 30: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 8.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	90
Figura 31: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 1 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	90

Figura 32: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 3.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	91
Figura 33: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 2.5 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	91
Figura 34: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 2.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	93
Figura 35: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 1.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	93
Figura 36: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 3.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso	94
Figura 37: Efeito da frequência de pulsação sobre a largura da solda e a velocidade de soldagem	98
Figura 38: Efeito da frequência de pulso e I_p/I_b na largura da solda	100
Figura 39: Macrografia de soldas realizadas para a mesma corrente média. (a) Corrente contínua constante (b) corrente contínua pulsada, $I_p/I_b=130/111$. Ataque nital a 2%.	100
Figura 40: Fechamento no final do cordão. Corpo de prova D, espessura 3.2 mm	101
Figura 41: Fechamento no final do cordão. Corpo de prova A, espessura 2.0 mm	102
Figura 42: Aspecto visual da solda. Corpo de prova H, espessura 6.35 mm	104
Figura 43: Aspecto visual da solda. Corpo de prova A, espessura 2.0 mm	105
Figura 44: Aspecto visual da solda. Corpo de prova B, espessura 2.0 mm	106

SIMBOLOGIA

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMS	- Aerospace Material Specifications
A	- Ampere
cm	- Centímetro (10^{-2} m)
CP	- Corpo de prova
CC-	- Corrente contínua com polaridade direta
CC+	- Corrente contínua com polaridade inversa
CTA	- Centro Tecnológico de Aeronáutica
d	- Diâmetro do bocal constritor
DTP	- Distância tocha peça
e	- Espessura
Fo	- F observado (teste de Fischer)
Fcrit	- F critico (teste de Fischer)
FP	- Frequência de pulsação
Ip	- Corrente de pulso
Ib	- Corrente de base
Ii	- Corrente inicial
If	- Corrente final
Im	- Corrente média
INVERSAL 450	- Central de Soldagem Multiprocesso
INTERDATA 3	- Placa de Aquisição de Dados
kW	- quilo watts

l	-	litros
L	-	Largura da solda na face superior
L _r	-	Largura da solda na raiz
LABSOLDA	-	Laboratório de Soldagem e Mecatrônica
m	-	metro
min	-	minuto (60 s)
mm	-	milímetro (10^{-3} m)
ms	-	milissegundo (10^{-3} s)
MAG	-	“Metal Active Gas”
MIG	-	“Metal Inert Gas”
MVG-1	-	Medidor de vazão de gás
MS _T	-	Estimativa total para a variância
MS _{TRATAMENTOS}	-	Estimativa entre amostras para a variância
MS _E	-	Estimativa residual para a variância
PLASMACP	-	Programa computacional para gerenciar o processo
p	-	Profundidade da cratera no fechamento
PWM-300	-	Modelo tocha de soldagem
R	-	Reforço da raiz da solda
s	-	segundo
SDP-600	-	Sistema de deslocamento computadorizado da tocha
SS _T	-	Soma total de quadrados
SS _{TRATAMENTOS}	-	Soma de quadrados entre amostras
S _E	-	Soma de quadrados residual
TIG	-	“Tungsten Inert Gas”

tp	-	Tempo de pulso
tb	-	Tempo de base
tiI	-	Tempo de atuação da corrente inicial
tsI	-	Tempo de subida da rampa de corrente
tiGP	-	Tempo de atuação da vazão de gás inicial
tsGP	-	Tempo de subida da rampa de gás plasma
tiVs	-	Tempo de início de deslocamento da tocha
tsVs	-	Tempo de subida da rampa de velocidade
TdI	-	Tempo de descida da rampa de corrente
tdefI	-	Defasagem da corrente
TdGP	-	Tempo de descida da rampa de gás plasma
tdefGP	-	Defasagem da vazão de gás plasma
tdVs	-	Tempo de descida da rampa de velocidade
tdefVs	-	Defasagem da velocidade de soldagem
ts	-	Tempo de soldagem
tpreG	-	Tempo de pre-gás
tpósG	-	Tempo de pós-gás
U	-	Tensão
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
V	-	Volt
VGP	-	Vazão de gás plasma
Vs	-	Velocidade de soldagem
ViGP	-	Vazão de gás inicial
VfGP		Vazão final de gás de plasma

VGm	Gás de manutenção do arco piloto
VGpg	Vazão de gás de purga
ZAC	Zona Termicamente Afetada
σ^2	Variância

RESUMO

O principal obstáculo na implantação do processo plasma pela técnica *keyhole* é a falta de informações técnicas e operacionais, em especial no tocante às condições necessárias para realizar adequadamente a abertura e fechamento do *keyhole*. Com o intuito de contribuir para a eliminação deste problema, analisa-se neste trabalho a influência do uso –durante a abertura e fechamento– de rampas de vazão de gás de plasma, de corrente e de velocidade de soldagem sobre a qualidade da solda. Para atingir este objetivo, montou-se uma bancada de ensaios automatizada utilizando equipamentos e instrumentos de monitoramento projetados e construídos no LABSOLDA e, para permitir o controle da corrente, da vazão de gás de plasma e da velocidade de soldagem, desenvolveu-se um programa computacional específico. Todos os experimentos foram realizados em juntas de topo em I, com passe único e sem adição de material, sendo a maior parte deles, em chapa de aço carbono de espessuras de 2.0 a 6.35 mm, e em alguns casos também em aço 300M (AMS 6417). Foram comparados os resultados obtidos por soldagem com corrente contínua de valor constante e por soldagem com corrente contínua pulsada. Através deste estudo, constatou-se a importância do uso das rampas de corrente, do controle da vazão de gás de plasma e da velocidade de soldagem, particularmente no caso de soldagens trajetórias fechadas, em função da impossibilidade de descarte das extremidades do cordão.

ABSTRACT

In order to minimize the lack of technical information regarding starting and closing the keyhole on Plasma Welding, a research was conducted to analyse the influence of gas plasma flow rate, welding current and travel speed sloping on the quality of weld beads. The experiments were carried out with equipments and measurement instruments designed at LABSOLDA, including a special software developed to allow the control of gas plasma flow rate, current and travel speed during starting, welding and closing the keyhole. The welds were made on 2.0 up to 6.35 mm thickness carbon steels plates, “I” joint preparation, single pass and without filler metal. Both constant current and pulsed current were adjusted for these tests. Maintaining the same welding technique and joint preparation, in some experiments a 300M (AMS 6417) were used. It was verified that the control of the slope of gas plasma flow rate, current and travel speed is an important way to produce sound welds, specially on closed track welds due to the impossibility of cut of the starting and the ending of the weld beads.

I

INTRODUÇÃO

O aumento das exigências requeridas nas juntas soldadas, sem dispensar a melhoria da produtividade e da versatilidade por parte da indústria, depende fortemente da constante melhoria dos equipamentos e processos de fabricação. O processo de soldagem plasma, apesar de ser utilizado há mais de 40 anos no mundo, continua sendo pouco difundido no Brasil. Tentando alterar este quadro, o LABSOLDA vêm desenvolvendo uma linha de pesquisa na área de soldagem por plasma que envolve o projeto de equipamentos e programas computacionais para monitoração e controle. Visando uma melhor caracterização do processo, foi concluído no ano 1997 um primeiro trabalho exploratório.

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 na maior concentração de energia do arco a qual permite soldar em um único passe, chapas de média espessura (até 6.35 mm), com maiores velocidades de deslocamento, garantindo uma penetração total e uniforme. A zona afetada pelo calor mais estreita, a simplificação nos procedimentos de preparação da junta e a maior tolerância de variação na distância tocha-peça são outras vantagens advindas do processo[1, 2].

Como forma de aumentar a produtividade, a soldagem PLASMA pode ser executada através da técnica denominada de *keyhole* ou furo de fusão. Esta técnica consiste na abertura de um furo,

com formato de funil, passante através do metal base, que se desloca junto com a tocha. O metal fundido é forçado pelo jato 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 é garantia de penetração e de 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, existirão defeitos como falta ou excesso de penetração e mordeduras ao longo dos cordões. Dada a importância que exercem sobre a geometria e o aspecto final dos cordões [3, 4, 5, 6], 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*.

Para proceder o estudo destas variáveis foi necessário o desenvolvimento de novos equipamentos e de melhorias em outros já existentes[3], bem como o desenvolvimento de um *software* para tornar mais versátil o controle do processo de soldagem pela técnica *keyhole*.

II

OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 Justificativas

Apesar das vantagens atribuídas ao processo PLASMA quando usado com a técnica *keyhole* sobre outras de menor concentração de energia, as dificuldades operacionais e a falta de informações técnicas sempre foram um problema para o uso mais amplo deste processo. Uma análise da literatura mostrou que na grande maioria dos trabalhos se estuda somente a região de regime, não apresentando procedimentos com respeito à abertura e fechamento do *keyhole*. Ocorre que durante a abertura o metal fundido tende a ser lançado para atrás, em sentido oposto ao deslocamento da tocha de soldagem, com o qual se forma uma região convexa no início da solda, que muitas vezes apresenta falta de penetração e acúmulo excessivo de material solidificado. Uma descontinuidade mais acentuada pode ocorrer no término da operação de soldagem, quando o furo do *keyhole* fica aberto.

Assim, é difícil poder reproduzir uma condição de soldagem quando se desconhece totalmente o procedimento de abertura do *keyhole*. A bibliografia [1, 3, 4] menciona que ao final da solda, para que o furo seja fechado deve-se programar uma rampa de descida da corrente, vazão de gás de plasma e a velocidade de soldagem com uma defasagem entre estas três variáveis, sendo que a programação só é possível através de equipamentos desenvolvidos especificamente para esta aplicação.

Através da revisão bibliográfica foi verificado a existência de diferenças marcantes entre os resultados de vários pesquisadores. Para exemplificar, Paula Jr [3] relata excelentes resultados na execução do passe de raiz em chapas espessas com chanfro em V. Já Richetti[7], não conseguiu reproduzir os dados encontrados na referência [3]. Embora não se encontrem na literatura as informações completas que permitam tentar explicar estas diferenças, é possível que variações na composição química do metal base, no procedimento de abertura do *keyhole*, variações na vazão de gás de plasma e variações no tipo de preparação da junta contribuam, de alguma forma, para as discrepâncias encontradas.

A técnica *keyhole* pode ser empregada com corrente contínua constante ou corrente contínua pulsada. Apesar das grandes vantagens apresentadas, quando se utiliza a corrente contínua pulsada através da técnica *keyhole*, sua utilização em escala industrial é limitada, especialmente pela dificuldade em estabelecer um campo de trabalho dos parâmetros e variáveis para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão.

A justificativa deste projeto fica ainda mais evidente através de uma aplicação industrial: o CTA (Centro Tecnológico de Aeronáutica) propõe substituir o processo de soldagem TIG pulsado, atualmente empregado, pelo plasma sem adição de arame, com junta de topo e passe único. Esta situação pode resultar em uma economia da ordem de 50%, na fabricação dos envelopes motores de foguetes. Desta maneira, em soldando sem adição de arame se elimina a dependência de materiais e produtos importados.

2.2. Objetivos

- a) Analisar a influência do controle de rampas da vazão do gás de plasma, da corrente e da velocidade de soldagem sobre a abertura e fechamento do *keyhole*, com o objetivo de eliminar o aparecimento da porosidade na região de início da solda, bem como a formação de mordeduras e concavidades no final da mesma.
- b) Analisar a influência da corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma, de forma a identificar combinações de parâmetros, em condição de regime, que permitam a produção de soldas isentas de discontinuidades, tais como mordeduras, excesso e falta de penetração.
- c) Estender o conjunto de ensaios propostos, nos itens a) e b), para a soldagem com corrente contínua pulsada.

III

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 - Introdução

Na metade da década de 50, Robert Gage, pesquisador da Union Carbide Corporation, descobriu que as características do arco do processo TIG poderiam ser modificadas pela constrição do arco[8]. Neste período, foram realizadas, operações de corte de material utilizando-se o processo TIG com pequenas modificações na saída do bocal de gás, que permitiram um aumento considerável na temperatura do arco e na velocidade do jato plasma em relação aos arcos convencionais. Este foi o primeiro trabalho de corte de material utilizando o arco plasma.

A partir de pesquisas realizadas, a Union Carbide Corporation lançou, em 1957, o primeiro processo a arco plasma para operação de corte. Pesquisas posteriores indicavam a possibilidade de adaptar o arco plasma para operações de soldagem. Em meados dos anos 60, os Estados Unidos realizaram uma das primeiras aplicações do processo de soldagem por plasma na montagem do foguete TITAN III-C [8]. No mesmo período, a Thermal Dynamics apresenta uma nova pesquisa, o uso da corrente alternada, para a soldagem por plasma de alumínio, em espessuras até 6.35 mm.

Em 1967, Sciaky Brothers apresenta uma fonte de energia capaz de fornecer corrente alternada, com forma de onda retangular, para operar com o processo TIG . No final dos anos 60, Van Cleave, da Boeing Company, implementou a soldagem por plasma para aplicações com corrente alternada.

Em 1978, a NASA adota este processo, em substituição ao processo TIG, para soldar tanques de alumínio em aeronaves espaciais. Também implementa um programa computacional para o controle dos parâmetros de soldagem, permitindo o ajuste dos parâmetros em função das variações de espessura do material a ser soldado. Este fatos são importantes contribuições no desenvolvimento do processo plasma e atualmente o avanço tecnológico dos equipamentos de soldagem viabilizaram a sua utilização em escala industrial.

3.2 - Processo de soldagem por plasma

O processo de soldagem PLASMA analisado sob o ponto de suas características físicas, 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. 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 da fusão. Como resultado deste efeito de constrição, a soldagem PLASMA permite maiores velocidades de deslocamento, penetração total e uniforme com passe único em chapas de média espessura (em torno de 7 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 [4,6]. Em relação à simplificação nos procedimentos de preparação da junta, soldas de topo podem ser realizadas com êxito, em chapas com espessura em torno de 7 mm, cortando os corpos de prova com guilhotina e lixando as bordas da junta para permitir folga zero. Como a preparação do chanfro, que usualmente é usinado, é eliminada os benefícios estão diretamente relacionados com os custos e tempos de execução da solda.

A configuração básica do bocal constritor é mostrada na Figura 1, onde estão indicados os parâmetros empregados no processo. A distância da face externa do bocal até o material de base define o parâmetro denominado *distância tocha-peça*. O *recoo* do eletrodo é medido desde a ponta do eletrodo até a face externa do bocal constritor. As alterações das características do arco são influenciadas por este fator, o qual define o grau de constrição e a rigidez do jato plasma (o termo rigidez é referido para explicar que o arco é menos afetado por campos magnéticos). O arco é forçado a passar através do bocal de constrição, o qual o perfil do arco é alterado para logo incidir sobre o material base, em um área do formato circular, similar ao do orifício constritor. Devido a este efeito de constrição se garante que a área da seção transversal do arco não sofra variação ao longo de sua extensão, desde a sua saída do orifício constritor até o material base, mesmo que ocorram pequenas variações na distância tocha-peça.

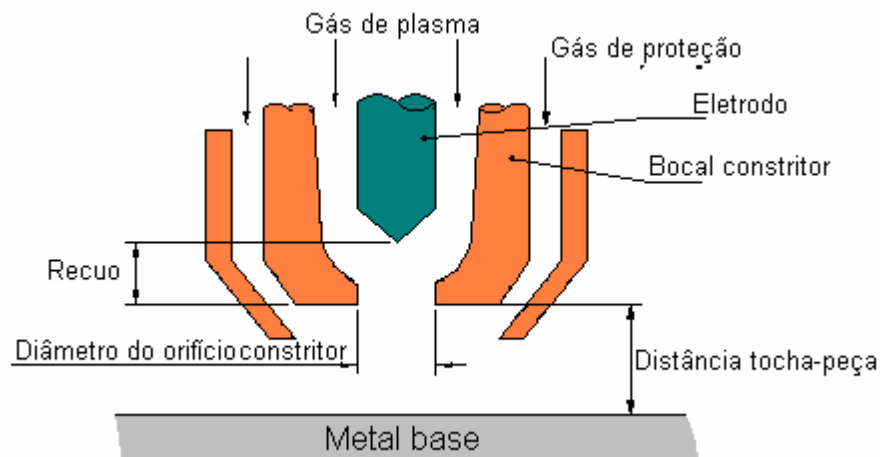


Figura 1: Configuração do bocal e parâmetros empregados no processo

Neste processo são utilizados dois fluxos de gases. O primeiro é o *gás de plasma*, gás inerte, que é forçado a passar através do orifício no bocal constritor onde o eletrodo é fixado concentricamente. Quando circula corrente entre dois eletrodos imersos neste gás, as moléculas serão aceleradas e irão colidir uma com as outras. Como a energia aumenta, esta excede a força

de atração entre os elétrons e seu núcleo. Os elétrons são afastados do seu núcleo e o gás consiste agora de partículas neutras, átomos com carga positiva e elétrons. O gás está ionizado, capaz de conduzir corrente. O gás neste estado é chamado de plasma, o quarto estado da matéria. O segundo fluxo é o *gás de proteção* que passa por um bocal externo, concêntrico ao bocal constritor, este gás é o que vai atuar, efetivamente na proteção da solda contra a contaminação pelo ar atmosférico, podendo ser ativo ou inerte.

Devido ao fato do eletrodo ficar no interior do bocal constritor da tocha de soldagem, torna-se difícil a abertura do arco por contato, sendo então indispensável a utilização de um equipamento, denominado módulo plasma, para estabelecer a abertura do arco. Usa-se um circuito, que gera uma alta tensão em alta frequência, para produzir a ionização da região situada, entre a ponta do eletrodo e o bocal constritor. Quando isto ocorre, abre-se um pequeno arco entre o eletrodo de tungstênio e o bocal, denominado arco piloto. Desta maneira, quando a fonte de energia é acionada, o arco principal é facilmente estabelecido.

O grau de constrição, a força do arco e a densidade de energia do arco são funções da corrente, diâmetro e forma do orifício constritor, recuo do eletrodo, tipo e vazão de gás de plasma e do tipo e vazão do gás de proteção. O ajuste adequado destes parâmetros permite que o arco plasma seja utilizado em várias aplicações: corte e soldagem por plasma.

3.3 - Constrição do arco

A constrição de um arco é um fenômeno no qual o arco é confinado pela passagem por um orifício de pequeno diâmetro, o qual o fluxo de gás aumenta seu perfil de velocidade, induzindo uma maior estabilidade direcional ao jato plasma. Esta estabilidade direcional torna o arco bastante rígido e mais tolerante às variações na distância tocha-peça. Devido a este fenômeno de

construção a área da seção transversal do arco é considerada constante ao longo de toda sua extensão. Estas considerações são as que permitem obter vantagens do processo plasma em relação ao processo TIG, já que este último apresenta um arco cônico [1,3]

A Thermal Dynamics Corporation [10], define o *grau de construção* como um termo que quantifica o efeito do orifício constritor sobre as características do arco. Um elevado recuo do eletrodo, juntamente com um orifício constritor de pequeno diâmetro, definem um alto grau de construção que, permite aumentar a penetração e produzir cordões mais estreitos. Um reduzido recuo do eletrodo, juntamente com um orifício constritor de maior diâmetro, definem um baixo grau de construção do arco, resultando em um cordão de solda mais largo e de baixa penetração.

3.4 - Tipos de arco

No processo plasma podem ser produzidos dois tipos de arco: arco transferido e o arco não transferido.

No arco transferido (Figura 2b), o arco principal é estabelecido entre o eletrodo e a peça. Tanto a peça como o eletrodo são partes integrantes do circuito elétrico. Neste caso, o calor é transferido à peça pela mancha anódica sobre ela, assim como pelo jato de plasma. Deste modo, o arco transferido, pela própria característica, transfere maior energia para a peça, este tipo de arco é o mais utilizado para a soldagem de metais.

O arco não transferido (Figura 2a) é estabelecido entre o eletrodo e o bocal constritor. Neste caso, como não há passagem de corrente entre o eletrodo e a peça, a fusão do material base é feita exclusivamente pelo calor transferido pelo jato plasma. Em relação ao arco transferido, há uma menor quantidade de calor transferido para a peça, razão pela qual não é, utilizado na soldagem de metais. Entretanto, o fato da peça não ser parte integrante do circuito elétrico, o

arco não transferido, pode ser utilizado para o corte e soldagem de materiais não condutores de eletricidade ou em aplicações que requeiram baixa energia térmica.

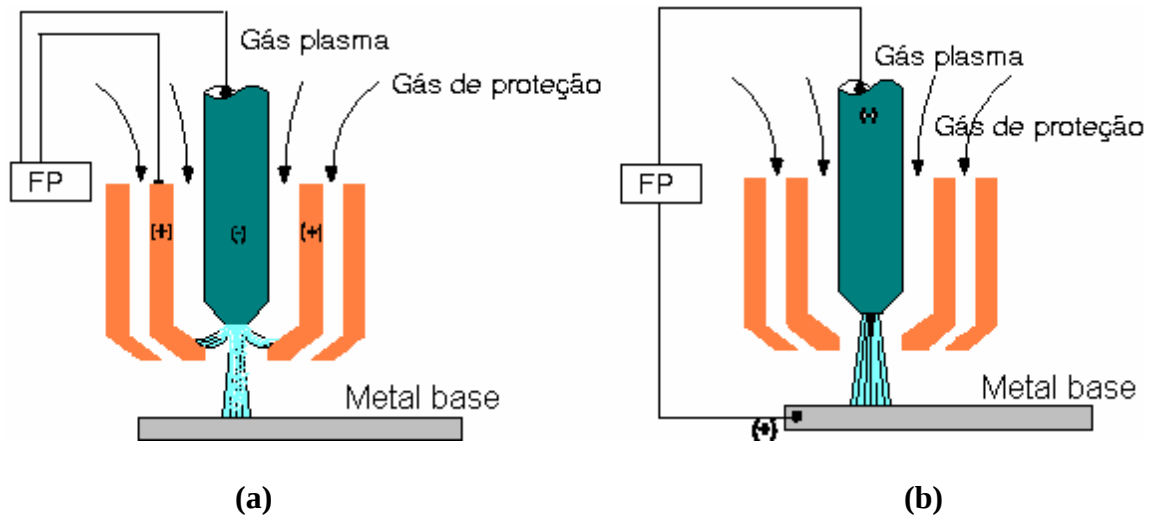


Figura 2: Tipos de arco. a) Arco não transferido, b) Arco transferido

3.5 - Técnicas de soldagem

A espessura do material de base é determinante na técnica de soldagem (variações do arco plasma) a ser utilizada

As técnicas referenciadas na literatura são [1, 3]:

a) Técnica Micro-plasma

O processo de soldagem plasma pela técnica micro-plasma surgiu com o objetivo de propiciar a utilização da soldagem por plasma em níveis de correntes bastante reduzidos, menores que no processo TIG. Esta técnica é normalmente utilizada em operações de soldagem

de chapas finas com espessuras entre 0.01 e 1.5 mm, nas quais a intensidade de corrente não excede a 25 amperes.

b) Técnica “Melt-in”

Nesta técnica, a soldagem por plasma é empregada no modo convencional, similar ao TIG, onde o arco plasma é usado como uma fonte de calor, produzindo soldas com relativamente pequena ação de penetração. Porém, o calor é mais concentrado. A técnica pode ser utilizada com e sem material de deposição.

c) Técnica *keyhole*

Na técnica *keyhole*, é formada uma pequena poça de fusão, com um furo passante através do material base (Figura 3). Esta condição é conseguida pela adequada combinação da vazão do gás de plasma, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão de gás de proteção, definida para determinados tipos e espessuras do metal base. Como a tocha é movimentada mecanicamente ao longo do cordão, o metal fundido é forçado a fluir ao redor do jato de plasma e para trás, onde a poça de fusão está se solidificando.

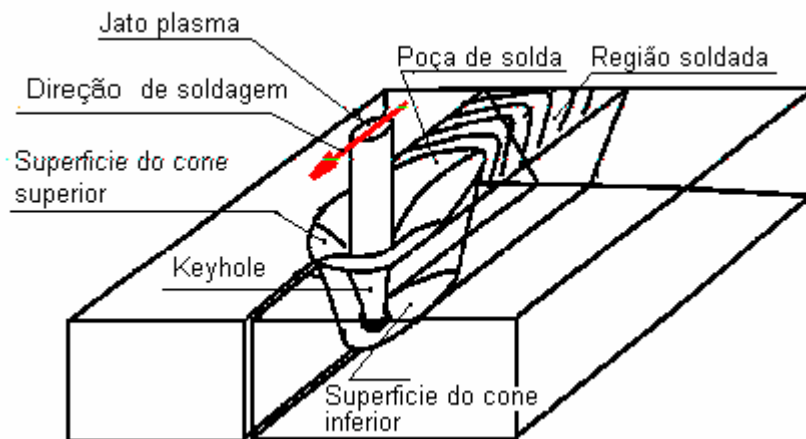


Figura 3: Esquema do processo a arco plasma pela técnica *keyhole*

A literatura [1] cita que a movimentação do metal fundido que ocorre na poça de fusão permite que impurezas ali depositadas fluam para a superfície antes de sua solidificação, minimizando problemas relacionados, como inclusões. Além disto, o jato de plasma, que atravessa completamente o material de base, constitui um caminho de escape de gases, reduzindo a probabilidade de formação de porosidade e o aprisionamento de impurezas no cordão de solda. O volume máximo da poça e o perfil resultante do cordão de solda são influenciados pelo equilíbrio de forças entre a tensão superficial da poça de fusão e as decorrentes da corrente de soldagem e da velocidade do gás de plasma. A qualidade da solda depende da estabilidade do *keyhole* que está relacionada fundamentalmente com a composição química do material a ser soldado e com os parâmetros e variáveis de soldagem a serem utilizados. Quando a tensão superficial de um material é baixa, o controle na poça de fusão se dificulta e os parâmetros e variáveis de soldagem devem ser cuidadosamente ajustados para manter a estabilidade do *keyhole* e a poça de fusão. Instabilidades podem produzir descontinuidades tais como excessiva penetração, penetração incompleta e mordeduras [2].

A partir da abertura do arco, no início do cordão, o jato de plasma começa a penetrar no metal de base, deslocando o metal já fundido, gerando perturbações na poça de fusão enquanto o

keyhole não é formado, prejudicando o seu aspecto visual. No final do cordão, durante a extinção do arco, a velocidade de solidificação da poça de fusão pode impedir o fechamento e o preenchimento do orifício do *keyhole*, gerando uma irregularidade no mesmo.

3.6 - Influência dos parâmetros e variáveis de soldagem

3.6.1 Corrente de soldagem

No processo plasma a corrente contínua em polaridade direta (CC-) é o tipo de corrente mais utilizada para a maioria das aplicações, uma vez que a maior parte da energia gerada no arco incide sobre a peça e o desgaste do eletrodo é bastante reduzido.

A corrente contínua pulsada pode ser usada na soldagem por plasma, abrangendo todas as técnicas (micro-plasma, melt-in, *keyhole*). A corrente pulsada se caracteriza por variar a amplitude entre um valor mínimo (corrente de base) e um valor máximo (corrente de pulso). O período correspondente a I_p representa aquele em que ocorre a fusão e, por conseguinte a penetração no metal base. Na fase de corrente de base o material fundido inicia o processo de solidificação, permanecendo o gás de plasma constante durante a soldagem [11, 12]. Segundo a referência [13] esta condição ameniza problemas de excesso de penetração e de deformação da peça a ser soldada. Na pesquisa realizada por Paula Jr e Lucas [3, 11] foi observado que a corrente contínua pulsada proporciona melhor estabilidade do *keyhole*. A determinação das variáveis em corrente contínua pulsada são função da espessura e composição química do material base. Para materiais de espessura entre 3 e 6 mm, é requerido um tempo de pulso mínimo de 0.1 s para obter o *keyhole* e conseqüentemente uma penetração total. O tempo de base deve ser ajustado aproximadamente igual ao tempo de pulso, sendo esta relação suficiente para permitir uma adequada solidificação entre os pulsos. A referência [3] estudou duas variações, as

quais não apresentaram bons resultados. A primeira foi utilizando tempos de pulsos maiores que os tempos de base, verificando-se um excessivo reforço na raiz, o que caracteriza um excesso de penetração da solda. Para tempos de base maiores que os de pulso ocorreu falta de penetração na raiz uma vez que o material tinha mais tempo para se solidificar e fechar o *keyhole* do que a quantidade de material fundido que se formava na fase de pulso.

Apesar das grandes vantagens apresentadas, quando se utiliza a corrente contínua pulsada através da técnica *keyhole*, sua utilização em escala industrial é limitada, especialmente pela dificuldade em se estabelecer, numa faixa de trabalho, os parâmetros e variáveis para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão [11].

Na soldagem de alumínio é usada, em curtos intervalos de tempo, a corrente contínua em polaridade inversa (CC+). A utilização da polaridade inversa tem a função de eliminar a camada de óxido refratário que se forma na superfície de materiais muito reativos e que inviabiliza a soldagem em polaridade direta. O excessivo aquecimento e conseqüente desgaste do eletrodo são as principais limitações da soldagem com polaridade inversa. Isto ocorre em função da distribuição de calor entre a peça e o eletrodo. A peça, que corresponde ao polo negativo, dissipa cerca de 30% da energia, enquanto que o eletrodo, que é o polo positivo, retém os 70% restantes. Este fato limita a corrente de soldagem em 100 A quando a polaridade utilizada na soldagem for a inversa [1].

A corrente alternada com onda senoidal, auxiliada por um estabilizador de alta frequência ou com onda retangular desbalanceada podem ser utilizadas na soldagem por plasma, isto para todas as técnicas. A faixa de corrente utilizada nestas condições, varia de 10 a 100 A, sendo este limite imposto pela excessiva deterioração do eletrodo quando este se constitui no polo positivo. A principal razão para a utilização da corrente alternada é a limpeza da camada superficial de óxido que se forma em algumas ligas e devido ao menor desgaste do eletrodo em relação à corrente contínua em polaridade inversa [1].

Na soldagem plasma pela técnica *keyhole*, as condições operacionais se mantêm estáveis para uma estreita faixa de variação da corrente de soldagem, situada entre penetração excessiva e penetração incompleta. O aumento excessivo da corrente em relação aos demais parâmetros de soldagem podem produzir o colapso da poça fundida, resultando em soldas com penetração excessiva ou no corte da junta. O motivo destes efeitos está relacionado com as forças provenientes do arco elétrico que se sobrepõem às tensões superficiais da poça de fusão. Reduções na corrente de soldagem, abaixo do nível considerado adequado, em relação aos outros parâmetros de soldagem, resultam na falta de penetração e um acabamento superficial grosseiro.

Corrente excessiva causa a deterioração do eletrodo e do bocal constritor, devido à formação do arco duplo, que é a formação de dois arcos, um entre o eletrodo e o bocal constritor e outro entre o bocal constritor e a peça [2, 14].

3.6.2 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é uma variável que influencia de forma significativa a qualidade das soldas. Apesar de que a velocidade de soldagem não é um fator que atua diretamente nas características do arco, ela está diretamente relacionada com a quantidade de calor transferido à peça por unidade de comprimento.

Quando é considerado o fator produtividade as soldas devem ser realizadas utilizando velocidades de soldagem as mais elevadas, quanto possível. Cordões de soldas estreitos podem ser obtidos quando se utilizam velocidades de soldagem elevadas, podendo resultar na não formação do *keyhole*, falta de penetração e na formação de defeitos, tais como mordeduras e imperfeições superficiais, Martikainen e Moisio [2].

Sob baixas velocidades de soldagem, forma-se um excessivo *keyhole*, causando o colapso da poça fundida, devido ao desequilíbrio das forças que permitem a manutenção do *keyhole*. A

velocidade de soldagem mais adequada é determinada através da combinação das variáveis, tais como corrente de soldagem, tipo e vazão de gás de plasma e diâmetro do bocal constritor.

3.6.3 Tipo e vazão de gás de plasma

A vazão do gás de plasma tem um efeito significativo no comportamento da poça fundida, na qualidade do cordão de solda e velocidade de soldagem. O aumento na vazão de gás de plasma resulta no aumento da velocidade do jato de plasma na saída do bocal de constrição e, portanto, no aumento da pressão do arco sobre a poça de fusão. Este aumento na pressão do arco permite a este deslocar uma maior quantidade do metal fundido da poça de fusão, melhorando as condições de formação do *keyhole*. À medida que se eleva os níveis de vazão, há um aumento na relação profundidade/largura do cordão, atingindo-se os níveis de penetração adequado. Sob vazões excessivas ocorre a expulsão do metal fundido passando-se da solda para o corte [14].

Uma mínima variação na vazão de gás de plasma, para mais ou para menos, pode deslocar a condição de soldagem para fora da faixa de estabilidade do *keyhole*. O resultado disto pode ser a ocorrência de irregularidades no cordão de solda, tais como corte da chapa ou penetração incompleta. Quando o arco não possui força suficiente para dar início ao *keyhole* (penetração incompleta), a agitação causada na poça de fusão resulta em um cordão de solda com um aspecto superficial grosseiro.

A referência [1] cita que a vazão do gás de plasma recomendada para as aplicações mais comuns varia de 0.25 a 5.0 l/min. Este limite é imposto para garantir a qualidade da solda, que pode ser prejudicada pela excessiva força do arco. Segundo pesquisas realizadas no LABSOLDA, a vazão de gás de plasma varia de 0.25 a 2.0 l/min.

3.6.4 Tipo e vazão de gás de proteção

O papel do gás de proteção é proteger o metal em fusão do ar atmosférico, evitando a oxidação da solda. Para se obter a proteção desejada, a vazão de gás deverá ser controlada para cada caso. A seleção da vazão de gás de proteção depende do tipo de gás a ser utilizado. Segundo pesquisas realizadas por Paula Jr [3], utilizando argônio puro foram obtidas com a utilização de vazão de gás entre 6 e 10 l/min, boas condições de soldagem. Foi observado que valores fora desta faixa (para mais ou para menos) produziam perturbações na solda, formando uma depressão superficial em toda sua extensão.

3.6.5 Distância tocha-peça

O processo se caracteriza por ser pouco sensível às variações na distância tocha-peça, permitindo a utilização de comprimentos de arcos bem maiores em relação, por exemplo, ao processo TIG [1].

O grau de influência da distância tocha-peça sobre o cordão de solda depende muito do recuo do eletrodo em relação ao bocal de constrição e do diâmetro do orifício constritor. Quanto maior é o recuo adotado para o eletrodo e menor o diâmetro do orifício constritor, maior é o efeito de constrição do arco, tornando-o mais concentrado e, portanto, menos sensível à variação da distância tocha-peça [10].

Para aplicações com a técnica *keyhole* são utilizados maiores valores de recuo para o eletrodo, na qual o efeito da distância tocha-peça não apresenta um efeito significativo, devido a que o arco apresenta um alto grau de constrição. Na técnica melt-in se utilizam pequenos valores de recuo do eletrodo, sendo o arco submetido a um pequeno grau de colimação, assumindo uma forma cônica. Nesta situação, a variação da distância tocha-peça, mesmo dentro dos limites normais, resulta na alteração das características do cordão de solda, do mesmo modo que ocorre

no processo TIG. Desta maneira, quanto maior é a distância tocha-peça, menor a penetração e maior a largura do cordão devido ao aumento da área de incidência do arco sobre o metal base.

As pesquisas realizadas por Paula Jr [3] mostram que distâncias tocha-peça entre 2.0 e 6.0 mm fornecem boas condições de soldagem. Para valores acima de 6.0 mm, a estabilidade do *keyhole* fica prejudicada pela intensa turbulência gerada no arco e para valores menores que 2.0 mm possibilita o contato entre o bocal de constrição e a poça de fusão.

3.6.6 Diâmetro e forma do orifício do bocal constritor

O bocal constritor, de cobre, onde o eletrodo fica confinado, pode ser de um único ou de múltiplos orifícios. O diâmetro do orifício do bocal constritor tem uma grande influência sobre a qualidade da solda. Os bocais mais utilizados são os que apresentam um simples orifício central pelo qual o arco e todo o volume de gás de plasma passam. O bocal de múltiplos orifícios, que contém dois pequenos orifícios adicionais em cada lado do principal, pode ser usado em condições de elevada densidade de corrente com o intuito de se controlar a forma do arco e da solda, especialmente em operações de soldagem pela técnica *keyhole* [11]. O efeito da vazão de gás, relativamente frio, dos orifícios laterais, produz um arco elíptico que é prolongado ao longo do eixo da solda [14]. Podem ser obtidas velocidades de soldagem de 50 a 100% maiores que as alcançadas com bocais de simples orifícios. Os resultados são soldas com uma menor zona afetada pelo calor (ZAC) e uma maior concentração do jato de plasma na superfície da peça. Uma vazão de gás plasma deficiente afeta a vida do bocal constritor produzindo seu desgaste. A corrente de soldagem fica cada vez mais reduzida a medida em que são utilizados menores diâmetros de orifícios constritores, devido ao aumento de temperatura do arco de soldagem e ao aparecimento do arco duplo [1].

3.6.7 Ângulo da ponta do eletrodo

O ângulo da ponta do eletrodo é um fator que não tem uma influencia significativa na penetração do cordão de solda e é geralmente mantido em 30° [11].

O valor adequado do ângulo da ponta do eletrodo, para sua utilização no processo plasma, foi pesquisado por [3] através de um estudo minucioso realizado em chapas de aço ABNT 1020 de espessura igual a 6.35 mm e para ângulos de ponta de 15°, 30° e 45°. O estudo foi realizado com base na observação visual da solda e medindo-se os valores de reforço na raiz e largura da solda. Nesta análise foi aplicado o teste F.

Os resultados indicam que o ângulo da ponta do eletrodo tende a não afetar o reforço na raiz. No caso da largura, o ângulo do eletrodo exerceu uma certa influência, pois houve diferença significativa entre as amostras. Um fato que marcou a realização destes experimentos foi a não abertura do arco piloto quando se utilizou o ângulo de ponta igual a 60°.

3.6.8 Recuo do eletrodo

O recuo do eletrodo determina a distância do eletrodo em relação à face externa do bocal de constrição. Este parâmetro atua sobre o grau de constrição do arco, influenciando, portanto, a rigidez do arco e a penetração da solda.

Normalmente, os valores máximo e mínimo para ajuste do recuo do eletrodo variam conforme à tocha de soldagem e são definidos pelo fabricante. A título de exemplo, a tocha de soldagem PWM-300, fabricada pela Thernal Dynamics Corporation, possui uma faixa de ajuste para o recuo do eletrodo que varia de 0.8 a 2.4 mm.

A Figura 4, apresenta esquematicamente o efeito devido à variação do recuo do eletrodo. Quando se desejam arcos rígidos e constrictos se deve utilizar um valor de recuo máximo permitido pelo fabricante da tocha. Assim, os cordões de solda produzidos são estreitos e apresentam maior grau de penetração. A utilização do recuo em seu valor máximo, normalmente é empregada na soldagem através da técnica *keyhole*, na qual a alta concentração de energia é um requisito que deve ser satisfeito para garantir a penetração total.

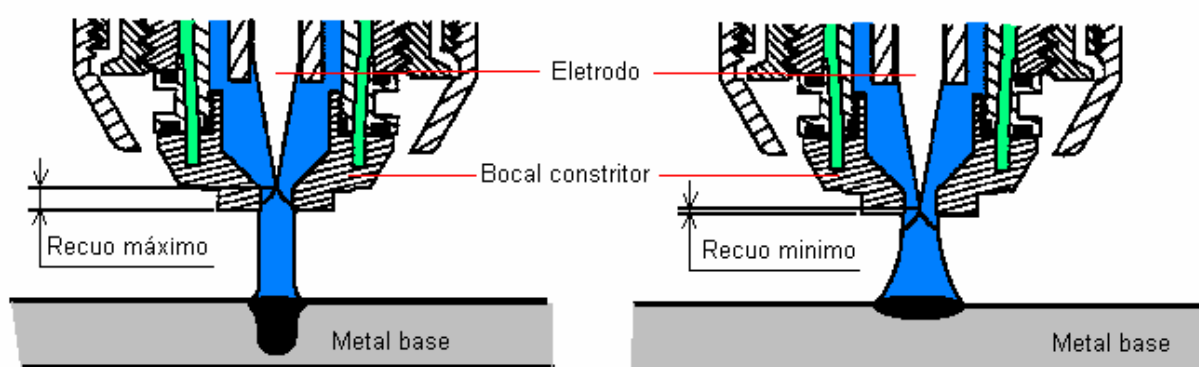


Figura 4: Influência do fator recuo de eletrodo sobre o grau de constrição do arco

À medida que se reduz o recuo do eletrodo, a largura do cordão aumenta e são obtidos cordões com menor profundidade de penetração. Esta variação nas características geométricas do cordão de solda se deve à redução do efeito de constrição, produzindo uma maior área de incidência do arco sobre o metal base. As alterações da geometria do cordão de solda, provocadas pela alteração do recuo do eletrodo, ocorrem pela variação da concentração de energia sobre a peça.

Quando é empregada a técnica “melt-in” (técnica de fusão), similar ao processo TIG, onde não é exigido o requisito de alta penetração, devem-se utilizar pequenos valores de recuo do eletrodo. A eliminação de mordeduras através de um segundo passe (cosmético) é sugerido por Lucas [11], com ou sem adição de arame através do uso do processo plasma (técnica de

fusão). Os passes de enchimento de juntas são também exemplos de aplicação de um menor recuo do eletrodo.

A redução do recuo do eletrodo permite a utilização de uma menor vazão do gás de plasma, para os mesmos níveis de corrente. Isto ocorre devido à não exigência de uma elevada penetração de alguns passes. Este fato contribui também para a utilização de uma maior velocidade de soldagem, aumentando a produtividade[10].

3.7 - Influência dos parâmetros e variáveis de soldagem na abertura e fechamento do keyhole

Na literatura [1] encontra-se referências citando que a soldagem plasma pela técnica *keyhole* em chapas com espessuras de até 3 mm, o arco pode ser conduzido com um conjunto único de parâmetros de início ao fim do cordão sem que este procedimento venha produzir perturbações na poça de fusão. Entretanto, para a soldagem de chapas mais espessas a perturbação na poça de fusão se torna mais evidente. Como solução a este tipo de problemas, na soldagem de chapas de espessura maior que 3 mm, o arco deve ser iniciado e finalizado em orelhas e que devem ser retiradas ao término da soldagem. Para soldagens em tubos, onde é impossível a utilização de orelhas, torna-se necessário programar um procedimento de inicialização do *keyhole* que permita um controle da fusão do metal, aumentando gradualmente a corrente e vazão de gás de plasma. Assim, torna-se possível a formação da poça de fusão sem produzir grandes perturbações até que o jato plasma passe totalmente através do material de base.

Se durante o processo a extinção do arco ocorre abruptamente podem aparecer, no final do cordão de solda uma variedade de defeitos. O primeiro defeito característico é o furo (Figura 5), pouco desejável, e trincas localizadas entorno deste furo. Devido a este tipo de problemas

torna-se necessário planejar um procedimento para o fechamento do *keyhole*, principalmente para soldas circunferenciais, onde é impraticável a utilização de orelhas. O objetivo principal deste procedimento é poder reduzir gradualmente a força do arco, retendo o calor necessário para manter a poça de fusão à medida que o *keyhole* é fechado.

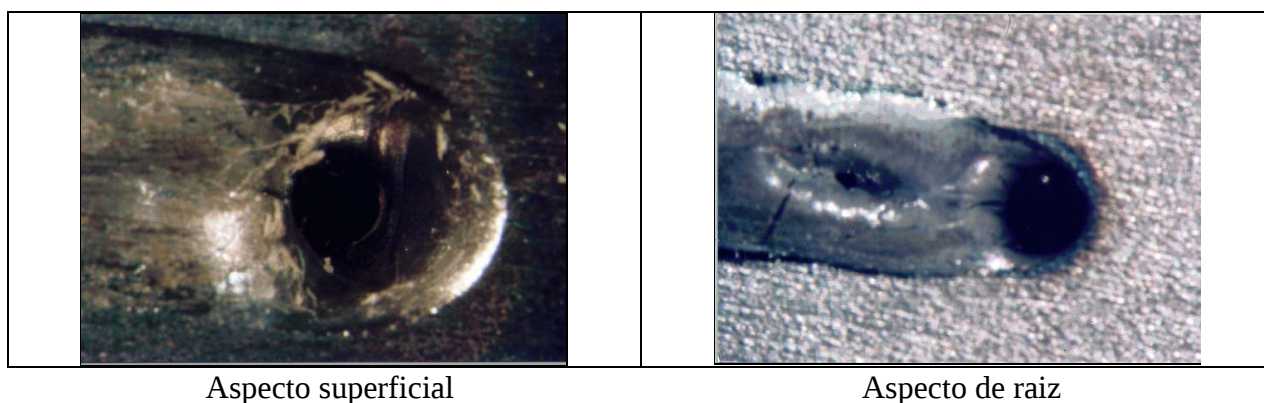


Figura 5: Keyhole no final do cordão de solda

Segundo pesquisas realizadas por Metcalfe e Quigley [15], o fechamento do *keyhole* está relacionado diretamente com a redução na vazão de gás de plasma. Paula Jr [3] em suas pesquisas deixa evidenciado que realmente o controle da vazão de gás de plasma é fundamental para a abertura e principalmente para o adequado fechamento. Lucas [11], através de pesquisas realizadas em tubos de aços inoxidáveis, indica que seu principal problema foi relacionado com o fechamento do *keyhole*. Este problema foi solucionado através da imposição de rampas simultâneas para uma redução gradual, tanto da corrente, quanto da vazão de gás de plasma.

Privoznik e Miller [6], através de um estudo realizado na soldagem de carcaça de motor de foguete de 3048 mm de diâmetro e espessura de 9.525 mm, descrevem um procedimento desenvolvido para a abertura e fechamento do *keyhole* em soldagem circunferencial. Além de estudar as rampas de subida e descida da corrente e vazão plasma, estes autores consideraram os tempos de início e finalização da rotação do material base em função destas variáveis.

Holko [5], cita algumas vantagens do processo plasma pela técnica *keyhole* em comparação com o processo TIG na fabricação de geradores de vapor. Quando é utilizado o processo TIG, 5 passes são realizados para cada solda considerando também a preparação da junta, inspeção e em algumas situações tempo de reparação de soldas efetuadas nos geradores de vapor. Em comparação com o processo plasma, na soldagem destes componentes, só foi necessário um único passe com uma simple preparação da junta de topo. Neste estudo foi desenvolvido um programa para o controle da corrente (corrente contínua com onda triangular), vazão de gás de plasma, velocidade de rotação dos tubos e velocidade de alimentação do arame. Os problemas identificados na abertura e fechamento do *keyhole* foram eliminados através da imposição de rampas de auge e declive da corrente e vazão de gás de plasma considerando também o retardo no deslocamento da tocha.

Segundo pesquisas realizadas por Metcalfe e Quigley [15], o jato plasma pode ser monitorado mediante um fototransistor, montado por baixo do metal base. Esta simples técnica oferece a possibilidade de um controle na penetração beneficiando diretamente a qualidade da solda. Através desta técnica torna-se possível detectar o momento em que o jato plasma passa através do material base e desta maneira iniciar a movimentação da tocha.

IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Bancada de ensaios

A bancada usada neste trabalho é mostrada, em forma esquemática, na figura 6. Nesta figura pode ser visto que a fonte de energia e os dispositivos de controle da vazão plasma, da velocidade de soldagem e da velocidade de arame estão interligados a um microcomputador através de uma placa de aquisição de dados e controle. Desta forma, o controle da movimentação, assim como da vazão do gás de plasma e dos níveis de corrente, podem ser executados através de um programa especialmente desenvolvido para a soldagem plasma que tem a capacidade de gerenciar o processo. A seguir, descreve-se detalhadamente cada um dos equipamentos do sistema de soldagem e dos dispositivos auxiliares.

4.1.1 Central de Soldagem INVERSAL 450 [16]. O equipamento é uma fonte de energia para soldagem multiprocesso, desenvolvida e fabricada pelo LABSOLDA/UFSC que reúne numa mesma fonte, todas as características necessárias para possibilitar sua utilização em vários processos de soldagem.

Esta fonte possui uma corrente nominal de 300 A para um fator de serviço igual a 100%, sendo que a capacidade de corrente é da ordem de 450 A. As principais características desta fonte estão abaixo relacionadas:

- Tensão em vazio: 56 V
- Tipo de corrente: Contínua ou alternada (constante ou pulsada)
- Potência máxima consumida: 12 kW
- Fator de potência: 0.94

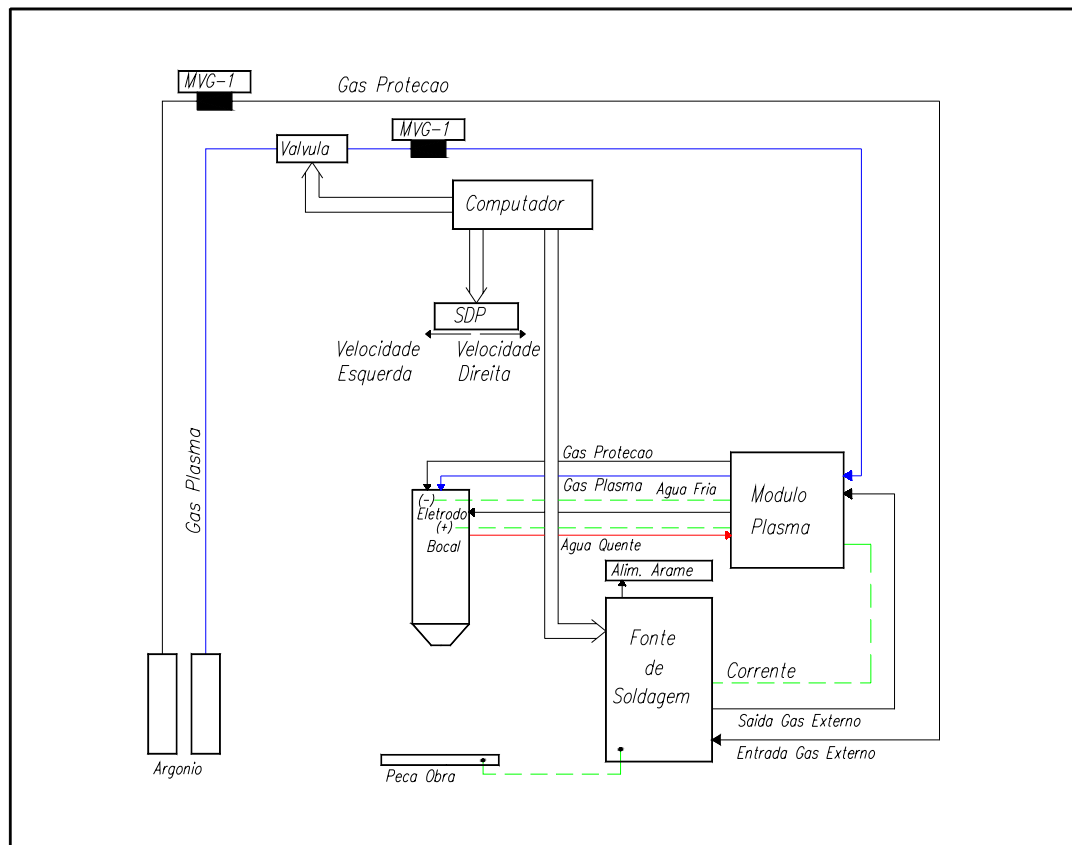


Figura 6: Esquema da bancada para o processo Plasma

4.1.2 Módulo Plasma. A finalidade deste módulo é prover o estabelecimento do arco piloto do processo. Este sistema possui um circuito que gera alta tensão em alta frequência, ionizando o gás presente na região entre a ponta do eletrodo e o bocal de constrição, de modo que um arco de baixa intensidade é estabelecido entre estas partes. Desta forma, quando a fonte de energia é acionada, já existe um caminho preferencial de gás ionizado e condutor de eletricidade, facilitando a abertura do arco entre o eletrodo e o metal de base.

O módulo plasma que corresponde a um ignitor de alta frequência foi desenvolvido no LABSOLDA. Ele fornece uma corrente de partida para a abertura do arco piloto de 7 A.

4.1.3 Medidores de Vazão de Gás MVG - 1. Durante a soldagem dos corpos de prova, foram monitoradas as vazões dos gases de proteção e de plasma, através da leitura dos medidores de vazão digital MVG-1, desenvolvido pelo LABSOLDA/UFSC.

1.- Medidor de gás para formação do plasma. Faixa de operação de 0.4 a 6.0 l/min.

2.- Medidor de gás para proteção da solda. Faixa de operação de 3.0 l/min a 20.0 l/min.

4.1.4 Controlador de Vazão de Gás Plasma. Quando se emprega a técnica *keyhole* o controle da vazão de gás de plasma deve ser feito com precisão, uma vez que pequenas variações podem produzir instabilidade. A vazão do gás de plasma foi controlada através de uma válvula de controle de vazão que com um circuito eletrônico realimentado, controla a vazão de gás a partir de uma tensão de referência colocada pelo sistema. A faixa de operação é de 0.1 l/min a 5.0 l/min. Incerteza de medição: 1% fundo de escala + 2% valor lido

4.1.5 Software. Os “softwares” utilizados neste estudo foram:

PLASMACP: Programa desenvolvido especificamente para esta pesquisa, que permite o controle da corrente, da vazão de gás de plasma e da velocidade de soldagem no ciclo de soldagem (abertura, regime e fechamento).

OSCILOS. Tem por objetivo simular um osciloscópio de memória digital. Neste estudo foi utilizado na aquisição de dados da corrente e da tensão de soldagem.

4.1.6 Placa de aquisição INTERDATA 3 que possui 16 canais de entradas analógicas e permite uma frequência máxima de aquisição por canal de 35 kHz.

4.1.7 Tocha de soldagem Plasma modelo PWM-300 marca Thermal Dynamics. (Figura 7).

Indicada para soldagens em corrente contínua e polaridade direta (CC-). A corrente máxima para a qual a tocha é indicada é de 300 A.

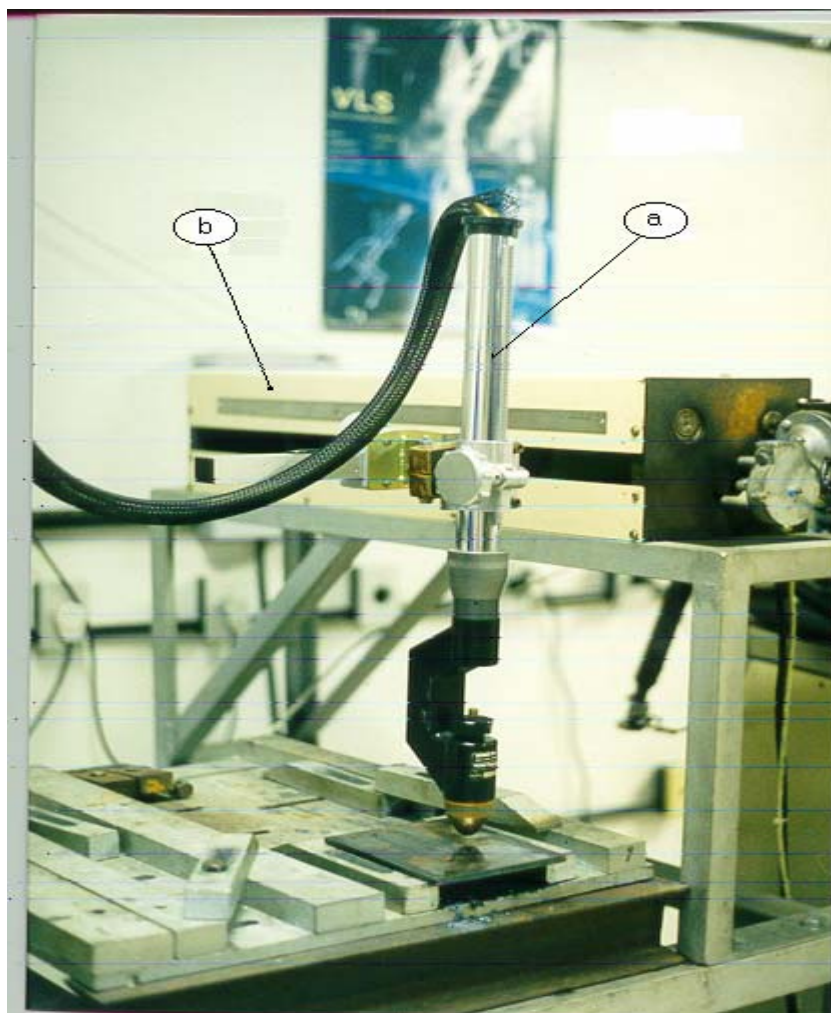


Figura 7: a) Tocha de soldagem Plasma PWM-300 (Thermal Dynamics) e b) Sistema de deslocamento computadorizado da Tocha de Soldagem SDP-600

4.1.8 Sistema de deslocamento e posicionamento computadorizado da tocha de soldagem

SDP-600. O controle da velocidade de deslocamento da tocha de soldagem é realizado através do SDP-600, equipamento eletrônico produzido pelo LABSOLDA/UFSC. A velocidade pode ser controlada pelo painel do aparelho ou por um microcomputador. A velocidade máxima de deslocamento é de 50 cm/min.

4.2 Materiais

4.2.1 Corpos de prova

Os ensaios foram realizados em chapas de aço baixo carbono e aço 300M (AMS 6417). Na tabela 1 são apresentadas as espessuras das chapas utilizadas, assim como as composições químicas correspondentes.

	e [mm]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
A	2.0	0.04	-	0.3	0.02	0.01	0.07	0.02	0.04
B	2.0	0.02	-	0.4	0.01	0.008	0.007	0.01	0.01
C	3.5	0.30	1.84	0.8	0.007	0.001	0.8	0.4	1.66
D	3.0	0.03	-	0.3	0.02	0.01	0.04	0.01	0.008
E	3.0	0.005	0.02	0.2	0.02	0.01	0.06	0.02	0.06
F	4.8	0.1	0.2	0.5	0.02	0.007	0.03	0.01	0.02
G	6.35	0.06	-	0.3	0.007	0.01	0.04	0.01	0.03
H	6.35	0.15	0.4	1.6	0.02	0.01	0.03	0.002	0.03
		Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn
A		0.04	0.06	0.04	0.01	0.002	0.005	0.02	-
B		0.003	0.06	0.03	0.006	0.0008	0.001	0.02	-
C		0.03	0.06	0.13	0.001	0.005	0.07	0.01	-
D		0.06	0.04	0.03	0.0009	0.001	0.001	-	-
E		0.04	0.1	0.05	0.02	0.07	0.01	0.04	-
F		0.03	0.04	0.02	0.003	0.001	0.002	-	-
G		0.06	0.02	0.03	0.002	0.001	0.005	0.006	-
H		0.06	0.02	0.03	0.001	0.004	0.005	0.006	-

Tabela 1: Espessura [e] e composição química do material de base [% em peso].

Análises química (*Espectrometria de emissão ótica*) realizada pela empresa PRESICAST.

4.2.2 Gases.

Os seguintes gases foram utilizados durante a pesquisa:

Como gás de plasma e gás de proteção, o argônio com pureza de 99.99% e como gás de purga (proteção gasosa de raiz do cordão de solda) foi utilizado nitrogênio.

4.2.3 Eletrodo.

Utilizou-se um eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório (EWTh-2) com diâmetro de 4.8 mm. O ângulo de ponta do eletrodo foi mantido em 30° para todos os experimentos, pois, segundo a referência [3], o aumento do ângulo de ponta do eletrodo conduz a uma condição em que o ponto preferencial para a abertura do arco piloto (ponta do eletrodo) é substituído por pontos da região lateral do mesmo. Isto acarreta, em algumas situações, dificuldade para a abertura do arco piloto pelo fato da região lateral do eletrodo possuir vários pontos preferenciais (igualmente distantes do bocal constritor), o que torna difícil a existência de um único ponto de emissão de elétrons.

4.3 Metodologia experimental

4.3.1 Procedimento de soldagem

- Preparação dos corpos de prova.

O tipo de junta nos corpos de prova foi a junta de topo em I com folga zero, com as bordas das chapas usinadas na região da junta. Em alguns casos os corpos de prova foram cortados com guilhotina e após lixados na região da junta para poder permitir folga zero. Utilizou-se lixa de granulometria 150. Objetiva-se com isto fazer uma comparação entre os dois tipos de preparação (corte com guilhotina ou usinadas) sob o ponto de vista econômico considerando a diminuição dos tempos na confecção dos corpos de prova.

Os corpos de prova do aço 300M (AMS 6417) foram constituídos de duas chapas de 200x60 mm, sendo que ambos os lados da sua superfície foram submetidos a jateamento com

microesferas de vidro e as partes a unir limpas com acetona. Os corpos de prova para os outros aços da tabela 1, foram constituídos de duas chapas de 160x65 mm. A superfície em ambos os lados foi submetida a um lixamento prévio para remoção da carepa de laminação que se forma sobre o material. Utilizou-se lixa de granulometria 80. As chapas foram ponteadas em cada uma das extremidades para formar a junta .

- Ajuste da tocha de soldagem.

O valor ajustado para o recuo do eletrodo foi de 2.4 mm, introduzindo-se um calibre padrão, acessório que acompanha a tocha de soldagem. Observou-se atentamente a centralização do eletrodo. A tocha foi alinhada verticalmente a 90° com o metal de base usando um esquadro.

- Posicionamento do corpo de prova.

O corpo de prova foi alinhado de tal modo que o movimento da tocha percorresse toda a linha central da junta.

- Ajuste da distância tocha-peça.

A distância tocha-peça foi ajustada com auxílio de um padrão, sendo o valor medido a partir da face externa do bocal até a superfície do corpo de prova. Este posicionamento foi feito através de uma cremalheira no sistema de fixação da tocha.

- Programação das variáveis.

Os corpos de prova foram soldados com ajuda do programa PLASMACP. A figura 8, apresenta a forma de onda da corrente de soldagem, da vazão de gás de plasma e da velocidade de soldagem na abertura e fechamento do *keyhole*.

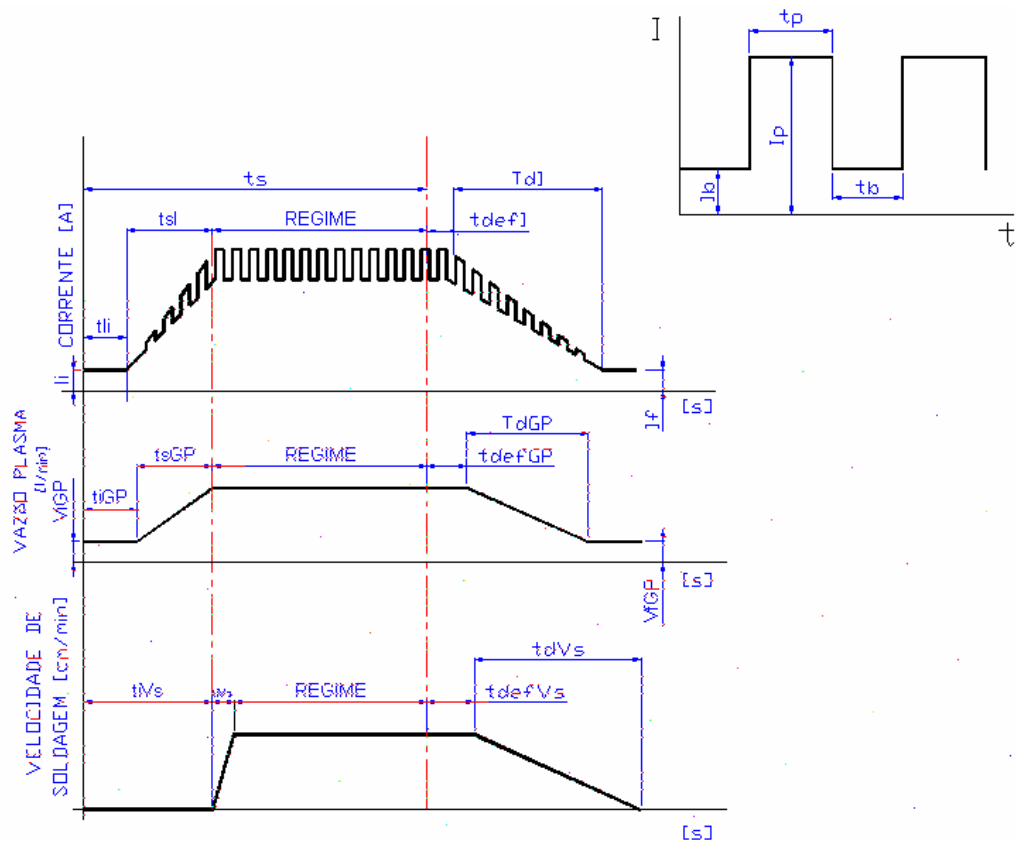


Figura 8: Variáveis que definem o ciclo de soldagem na abertura, regime e fechamento

A abertura do *keyhole* requer que, tanto a corrente quanto a vazão de gás de plasma, variem gradualmente, desde uma condição inicial, até atingir a condição de regime. Com relação ao início do deslocamento da pistola, esta deve se dar quando o jato plasma atravessa o material base. Através da combinação das variáveis corrente inicial (I_i), tempo de atuação da corrente inicial (t_{iI}), vazão de gás inicial (V_{iGP}) e tempo de atuação da vazão de gás plasma inicial (t_{iGP}) é possível produzir um período de estabilização, na zona onde se inicia a abertura do *keyhole*. Após esta estabilização, são programadas as rampas de aclave (Figura 8).

O programa PLASMACP. Programa desenvolvido especificamente para gerenciar o processo, através da programação das variáveis, definidas a seguir:

Variáveis de soldagem no regime

Corrente de pulso	$I_p(A)$
Tempo de pulso	$t_p(s)$
Corrente de base	$I_b(A)$
Tempo de base	$t_b(s)$
Vazão de gás plasma	$VGP(l/min)$
Velocidade de soldagem	$V_s(cm/min)$

Observação: Para experimentos que são conduzidos em modulação de corrente contínua constante, as variáveis I_p e I_b devem ter o mesmo valor ($I_p=I_b$).

Variáveis de soldagem na abertura**Corrente**

Corrente inicial	$I_i(A)$
Tempo de atuação da corrente inicial	$t_{iI}(s)$
Tempo de subida da rampa	$t_{sI}(s)$

Gás plasma

Vazão de gás inicial	$V_{iGP}(l/min)$
Tempo de atuação da vazão de gás inicial	$t_{iGP}(s)$
Tempo de subida da rampa	$t_{sGP}(s)$

Deslocamento da tocha

Tempo de início do deslocamento	$t_{iVs}(s)$
Tempo de subida da rampa de velocidade	$t_{sVs}(s)$

Variáveis de soldagem no fechamento

Corrente

Tempo de descida da rampa	$TdI(s)$
Corrente final	$If(A)$
Defasagem da corrente	$tdefI(s)$

Gás plasma

Tempo de descida da rampa	$TdGP(s)$
Vazão final de gás	$VfGP(l/min)$
Defasagem da vazão de gás plasma	$tdefGP(s)$

Velocidade de soldagem

Tempo de descida da rampa	$tdVs(s)$
defasagem da veloc. de soldagem	$tdefVs(s)$

- Tempo de soldagem, $ts(s)$: Variável que considera o tempo desde a abertura do arco até o instante em que se inicia a programação das rampas de declive. Este ponto é considerado como de referência para determinar a defasagem das variáveis: corrente, vazão de gás de plasma e velocidade de soldagem (figura 8).

- Gás de manutenção, $VGm(l/min)$: O programa também possibilita o controle da vazão de gás para a manutenção do arco piloto.

- $t_{preG}(s)$, $t_{pósG}(s)$: Correspondem aos tempos de atuação de pre-gás e pós-gás, respectivamente.

- Realização das soldas.

Todas as soldas foram realizadas de forma automatizada e na posição plana. Para dar início à soldagem, o arco principal era aberto em uma das extremidades do corpo de prova. Quando o arco atravessava totalmente a espessura do metal base era acionado o movimento da tocha com a velocidade programada.

4.3.2 Análise geométrica das amostras. Os corpos de prova foram seccionados no sentido transversal ao cordão de solda e submetidos a uma preparação metalográfica. O ataque químico foi nital a 2%. A figura 9 mostra as dimensões medidas nos cordões de solda: largura da solda na face superior (L), reforço da raiz da solda (R) e largura da solda na raiz (Lr).

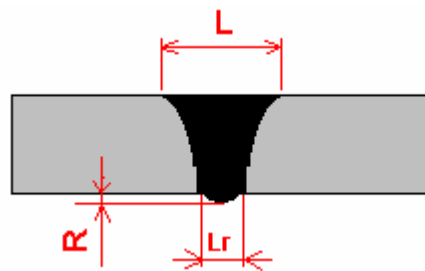


Figura 9: Dimensões avaliadas nos cordões de solda

4.3.3 Padrão de aceitação. O padrão de aceitação adotado foi: soldas com penetração total, bom aspecto superficial e ausência de defeitos, tais como porosidades, trincas e mordeduras acentuadas [3].

4.4 Metodologia de tratamentos de dados

4.4.1 Introdução

Geralmente, a determinação dos efeitos dos parâmetros de soldagem sobre uma dada propriedade do cordão é obtida por tentativa e erro, após a realização de um elevado número de soldas. Além disso, a presença de interações dificulta a análise dos parâmetros em relação à resposta obtida. Entretanto, as mesmas conclusões poderiam ser alcançadas, analisando-se um pequeno número de experiências, estabelecidas estatisticamente.

Suponha-se que o propósito é investigar os efeitos de cada fator em um intervalo pré-estabelecido, (níveis dos fatores) os quais serão usados no experimento. O objetivo, portanto, é maximizar a informação dos fatores em relação à resposta.

O projeto fatorial é a opção mais econômica na execução de um experimento, quando o número de variáveis a serem controladas, é elevado em um dado processo. Obtém-se, assim, uma considerável redução no tempo e material dedicado ao experimento.

Em uma pesquisa planejada é possível que poucos dados preliminares sejam necessários para indicar quais são os fatores mais importantes (significativos), e com esses fatores realizar experiências no intervalo desejado. Assim, ganha-se em simplicidade quando os fatores a serem analisados são muitos, e quando os valores da experiência disponíveis são difíceis de organizar.

4.4.2 Definição de fatores e níveis. Os fatores representam as variáveis independentes enquanto os níveis indicam as suas variações. Em alguns experimentos, com “n” repetições, serão analisados os efeitos de um fator: Corrente, velocidade de soldagem, vazão de gás de plasma, vazão de gás de proteção e distância tocha-peça. Para estudar o comportamento das variáveis na abertura e fechamento do *keyhole* serão analisados os efeitos de 4 fatores.

a) Abertura: Rampa de subida da corrente, rampa de subida da vazão plasma, tempo de início do deslocamento da tocha e vazão de gás plasma inicial.

b) Fechamento: Tempo de descida da corrente, tempo de descida da vazão plasma, corrente final e vazão de gás plasma final. Uma vez que os fatores são fixos, as conclusões obtidas a partir desta análise serão válidas somente entre os intervalos definidos pelas variáveis escolhidas.

4.4.3 Fundamentos da análise estatística. O objetivo da análise estatística é verificar as hipóteses formuladas no início da pesquisa científica. Descreve-se a seguir o procedimento adotado neste trabalho com base nas abordagens de Montgomery ,1997 [17]. O modelo é denominado análise de variância de um simple fator já que somente um fator é pesquisado. O problema consiste na verificação da influência dos “a” níveis deste fator sobre uma variável “y” em questão. Uma forma de se determinar a existência desta influência é comparar as médias populacionais da variável “y” sob o efeito dos “a” tratamentos. Os dados devem apresentar-se como a tabela 2. A técnica mais importante para a solução deste problema é a análise de variância. Este método é muito poderoso na identificação de diferenças entre médias populacionais devido a várias causas atuando simultaneamente sobre os elementos da população.

Tratamentos (níveis)	Observações						Total	Média
1	y_{11}	y_{12}	.	.	.	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	.	.	.	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
a	y_{a1}	y_{a2}	.	.	.	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
							$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Tabela 2: Dados típicos para experimentos com um fator

Da tabela 2, $y_{i.}$ representa o total das observações dos i tratamentos e pode ser calculada através de:

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad [1]$$

A média para cada tratamento i, é dada por:

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad [2]$$

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$y_{..}$ representa o total das observações realizadas; que é dada por :

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad [3]$$

$\bar{y}_{..}$ representa a média total de todas as observações, ou seja:

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad [4]$$

onde $N = an$; é o número total de observações

4.4.4 Modelo estatístico lineal. O modelo estatístico associado a experimentos com um fator é:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i=1,2,\dots,a \\ j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad [5]$$

onde:

y_{ij} : Observação correspondente a j-ésima repetição submetida ao i-ésimo nível do fator

μ : Média geral comum a todas as observações

τ_i : Efeito do i-ésimo tratamento

ε_{ij} : erro casual associado à observação y_{ij}

4.4.5 Suposições associadas ao modelo estatístico lineal. As suposições implícitas básicas à modelo estatístico são que os erros, ε_{ij} , são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas com distribuição $N(0, \sigma^2)$. Dai acontece que as observações y_{ij} , são normalmente distribuídas e independentes com média e variância σ^2 [17].

4.4.6 Hipóteses. É interesse, no presente trabalho, testar a igualdade da média dos “a” tratamentos. A hipótese geral para o problema é:

$$H_o: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad [6]$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \quad [7]$$

Observa-se que sendo H_o verdadeira, todos os tratamentos tem média comum μ . Se H_o não é verdadeira então se deve aceitar a hipótese alternativa H_1 . Para simplificar o desenvolvimento do método estatístico, adota-se a seguinte notação:

- a) SS_T : Soma total dos quadrados
- b) $SS_{\text{Tratamentos}}$: Soma de quadrados entre amostras
- c) SS_E : Soma de quadrados residual

a) Soma total de quadrados.

$$SS_T = SS_{\text{Tratamentos}} + SS_E \quad [8]$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad [9]$$

b) Soma de quadrados entre amostras

$$SS_{Tratamentos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad [10]$$

c) Soma de quadrados residual

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamentos} \quad [11]$$

A análise de variância fundamenta-se no fato de que, sendo verdadeira a hipótese H_0 , existem três formas de se estimar a variância, σ^2 , comum implicitamente a todas as populações ou seja:

- a) a estimativa total, MS_T
- b) a estimativa entre amostras, $MS_{Tratamentos}$
- c) a estimativa residual, MS_E .

4.4.7 Estimativas para a variância, σ^2 **a) A Estimativa total, MS_T**

Considera-se as “a” amostras reunidas em uma só e calcula-se a variância MS_T . Esta só será uma estimativa válida de σ^2 se e somente a hipótese H_0 for verdadeira. Desta forma todas as populações seriam identicamente distribuídas (normais, de mesma média e mesma variância) e justificaria a fusão das “a” amostras em uma só. A estimativa total de σ^2 é:

$$MS_T = \frac{SS_T}{N - 1} \quad [12]$$

onde: SS_T : soma de quadrados total

$N-1$: graus de liberdade

b) **A Estimativa total, $MS_{Tratamentos}$**

Sendo verdadeira a hipótese H_0 , pode-se também considerar as médias $\bar{y}_i$ das “a” amostras como uma mostra de “a” valores retirados da população dos possíveis valores de $\bar{y}$, a qual é normalmente distribuída com variância σ^2 / n . Portanto, a variância da amostra formada pelos “a” valores de $\bar{y}_i$ estima σ^2 / n . Logo, a estimativa de σ^2 é:

$$MS_{Tratamentos} = \frac{SS_{Tratamentos}}{a - 1} \quad [13]$$

onde: $SS_{Tratamentos}$: soma de quadrados entre amostras

a-1: graus de liberdade

b) **A Estimativa Residual, MS_E**

A variância comum σ^2 pode ser também estimada individualmente a partir dos elementos de cada uma das “a” amostras, ou seja, dentro de cada amostra. Tem-se, portanto, “a” estimativas individuais de σ^2 , todas elas válidas, independentemente da veracidade de H_0 .

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad [14]$$

onde: SS_E : soma de quadrados entre residual

N-a: graus de liberdade

A tabela 3, apresenta o procedimento resumido para o análise de variância para um fator de efeitos fixos [17]. O problema consiste agora na comparação de duas variâncias mediante o teste de Fischer (teste F), ou seja:

$$F_o = \frac{MS_{Tratamentos}}{MS_E} \quad [15]$$

Assim, rejeita-se H_0 ao nível de significância α se:

$$F > F_{\alpha, a-1, N-a}$$

Rejeitando-se H_0 , conclui-se que há diferenças significativas, ao nível de significância α , entre as médias dos diferentes níveis. O nível de significância, α , representa a probabilidade de se rejeitar H_0 , sendo H_0 verdadeira.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos Quadrado	$F_{\text{observado}}$	F_{critico}
Tratamentos	$SS_{\text{Tratamentos}}$	$a-1$	$MS_{\text{Tratamentos}}$	$F_o = \frac{MS_{\text{Tratamentos}}}{MS_E}$	$F_{\alpha, a-1, N-1}$
Residual	SS_E	$N-a$	MS_E		
Total	SS_T	$N-1$			

Tabela 3-ANOVA para um fator

4.4.8 Modelo fatorial 2^K . Na análise fatorial em dois níveis o número mínimo de ensaios necessários para estudar quatro parâmetros é $2^4 = 16$. A ordem de execução dos 16 cordões sobre os corpos de prova é aleatória e não na ordem padrão mostrada na matriz, para evitar que os resultados apresentem desvios tendenciosos. Os níveis dos fatores são fixos. A matriz de planejamento e a resposta obtida com duas repetições são apresentadas nas tabelas 4 e 5. Os valores assumidos pelos parâmetros a cada ensaio são conforme o disposto na matriz, tabela 5.

Os sinais -1 e 1 significam, respectivamente, os níveis inferior e superior da faixa de variação previamente selecionada para os parâmetros em estudo.

	A	B	C	D
(1)	-1	-1	-1	-1
a	1	-1	-1	-1
b	-1	1	-1	-1
ab	1	1	-1	-1
c	-1	-1	1	-1
ac	1	-1	1	-1
bc	-1	1	1	-1
abc	1	1	1	-1
d	-1	-1	-1	1
ad	1	-1	-1	1
bd	-1	1	-1	1
abd	1	1	-1	1
cd	-1	-1	1	1
acd	1	-1	1	1
bcd	-1	1	1	1
abcd	1	1	1	1

Tabela 4: Matriz do planejamento (2^4)

4.4.9 Estimativa dos efeitos dos fatores. O efeito de A, por exemplo, é calculado a partir da comparação entre resultados de ensaios em que apenas o fator A varia, ou muda de nível. A referência [17] apresenta uma forma resumida para o cálculo dos efeitos:

$$AB...K = \frac{2}{n2^K} [\text{Contraste}_{AB...K}] \quad [16]$$

Onde n: número de repetições

Utilizando os valores da tabela 5, pode-se estimar o efeito dos fatores da forma seguinte:

	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	REPETIÇÕES	
																I	II
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	P1	P17
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	P2	P18
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	P3	P19
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	.	.
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	.	.
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	.	.
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	.	.
abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	.	.
d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	.	.
ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	.	.
bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	.	.
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	.	.
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	.	.
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	.	.
bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	.	.
abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	P16	P32

Tabela 5: Matriz para determinação dos efeitos

Efeito A

$$A = \frac{1}{16} [-(1) + a - b + ab - c + ac - bc + abc - d + ad - bd + abd - cd + acd - bcd + abcd]$$

Efeito B

$$B = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_B)$$

$$B = \frac{1}{16} [-(1) - a + b + ab - c - ac + bc + abc - d - ad + bd + abd - cd - acd + bcd + abcd]$$

Efeito C

$$C = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_C)$$

$$C = \frac{1}{16} [-(1) - a - b - ab + c + ac + bc + abc - d - ad - bd - abd + cd + acd + bcd + abcd]$$

Efeito D

$$D = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_D)$$

$$D = \frac{1}{16} [-(1) - a - b - ab - c - ac - bc - abc + d + ad + bd + abd + cd + acd + bcd + abcd]$$

Pode ser que o efeito da variação de um parâmetro seja influenciado pelo nível em que se encontram os outros parâmetros. A isto se chama efeito de interação. Tem-se então:

Efeito AB

$$AB = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_{AB})$$

$$AB = \frac{1}{16} [(1) - a - b + ab + c - ac - bc + abc + d - ad - bd + abd + cd - acd - bcd + abcd]$$

Efeito AC

$$AC = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_{AC})$$

$$AC = \frac{1}{16} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc + d - ad + bd - abd - cd + acd - bcd + abcd]$$

Efeito BC

$$BC = \frac{2}{n2^k} (\text{Contraste}_{BC})$$

$$BC = \frac{1}{16} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc + d + ad - bd - abd - cd - acd + bcd + abcd]$$

É importante destacar que cada interação pode ser determinada através da tabela 5, multiplicando a primeira coluna de contrastes com a coluna do efeito a determinar.

4.4.10 Análise de variância. A análise de variância é utilizada para determinar quais são as variáveis mais significativas dentre as quatro definidas neste estudo. Para o cálculo se precisa determinar a soma de quadrados. Segundo a referência [17] esta soma pode ser determinada através da seguinte equação:

$$SS_{AB...K} = \frac{1}{n2^K} [\text{Contraste}_{ab...k}]^2 \quad [17]$$

A equação 18, permite determinar a soma total de quadrados:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{ab} \quad [18]$$

Onde a=2 e b=16

A soma de quadrados do erro se determina através de:

$$SS_{Error} = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{ABCD} \quad [19]$$

O análise de variância é resumido na tabela 6.

Portanto, experimentos fatoriais são particularmente apropriados para descrever o comportamento empírico do processo no intervalo analisado.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade
Efeitos principais		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
Interação de dois fatores		
AB		
AC	SS_{AB}	1
.	SS_{AC}	1
.	.	.
.	.	.
JK	.	.
Interações de três fatores	SS_{JK}	1
ABC		
ABD		
.	SS_{ABC}	1
.	SS_{ABD}	1
.	.	.
IJK	.	.
Interação de k fatores	.	.
ABC...K	SS_{IJK}	1
Residual		
	$SS_{ABC...K}$	1
Total	SS_E	$2^k(n-1)$
	SS_T	$n2^k - 1$

Tabela 6-Análise de variância para o projeto fatorial 2^4

4.5 Procedimentos Específicos e Dados de Soldagem.

(a) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre a abertura do *keyhole*.

Os testes foram conduzidos no corpo de prova E, tabela 1, espessura 3.2 mm, corrente contínua pulsada. Neste estudo se propõe a configuração da figura 10, que é controlada através de “software”.

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 [17].

Para a abertura do *keyhole* foram selecionadas como variáveis (fig. 10):

- a) rampa de subida da corrente (tsI);
- 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 (ViGP).

O planejamento dos experimentos 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 8, coluna (a), são apresentados os parâmetros de soldagem mantidos constantes ao longo da execução dos 16 testes e os níveis alto e baixo, selecionados para as variáveis, estes definidos em ensaios previamente realizados.

Com relação à penetração, foi adotada uma classificação baseado em uma análise visual, ou seja:

- 1.- Penetração correta (*keyhole* estável durante toda a extensão do cordão)
- 2.- Penetração excessiva (Reforço excessivo na raiz da solda)
- 3.- Penetração incompleta (Não foi executado o *keyhole*)
- 4.- Penetração irregular (Cordão com comportamento variável entre *keyhole*, penetração incompleta e penetração excessiva)

Com relação ao acabamento do cordão de solda, foi adotada uma classificação subjetiva baseado no aspecto visual, isto é:

- 1.- Bom (Acabamento de aspecto bom e uniforme. Ausência de mordeduras)
- 2.- Razoável (Acabamento caracterizado por pequenas mordeduras)
- 3.- Ruim (Acabamento com mordeduras intensas)

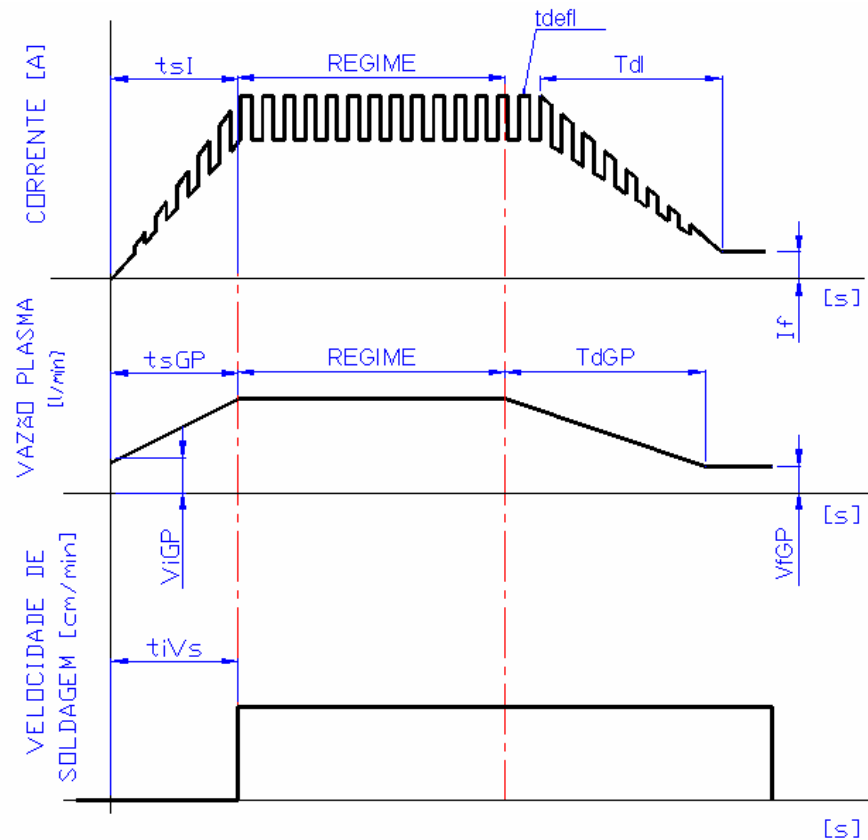


Figura 10: Forma de onda da corrente, da vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem utilizadas na abertura, em regime e fechamento do keyhole.

(b) Análise da influência da defasagem da corrente de soldagem em relação à vazão de gás de plasma no fechamento do *keyhole*.

As variáveis e parâmetros de soldagem utilizados para verificar a influência da defasagem que deve ser programada no fechamento do *keyhole*, são apresentadas na tabela 7, coluna (a). Os testes foram conduzidos no corpo de prova E, tabela 1, espessura 3.2 mm. A avaliação foi feita através das medições da profundidade “p” da cratera, largura do cordão em regime (L) e largura no fechamento (l).

(c) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre o fechamento do *keyhole*.

Os testes foram conduzidos no corpo de prova E, tabela 1, espessura 3.2 mm, corrente contínua pulsada. Para o estudo do fechamento do *keyhole* foram selecionadas como variáveis (fig.10):

- a) tempo de descida da corrente (TdI);
- b) tempo de descida da vazão plasma ($TdGP$),
- c) corrente final (I_f) e
- d) vazão de gás plasma final ($VfGP$).

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. 10). Para simplificar a manipulação dos dados no processo de cálculo estatístico, as variáveis (TdI), ($TdGP$), (I_f) e ($VfGP$) foram denominadas pelas letras A, B, C e D, respectivamente. Na tabela 8 são apresentados os parâmetros operacionais ao longo dos ensaios.

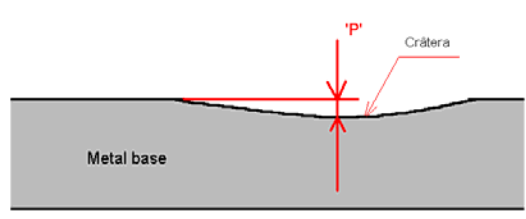


Figura 11: Representação da profundidade da cratera (“p”) que se forma no fechamento do *keyhole*

(d) Análise da influência da distância tocha-peça.

A avaliação deste fator foi realizada a partir dos parâmetros de soldagem indicados na tabela 7, e na coluna (d) são apresentados os níveis do fator distância tocha-peça. Este estudo foi realizado, baseando-se em medições da largura da solda (L), largura da raiz (Lr) e reforço da solda (L). Estes valores são submetidos a uma análise estatística utilizando a análise de variância e teste F.

(e) Análise da influência da velocidade de soldagem.

A influência da velocidade de soldagem foi avaliada de forma estatística a partir dos valores de largura da solda (L), largura da raiz (Lr) e reforço da solda (R), medidos em cordões realizados com os parâmetros indicados na tabela 9, coluna (e).

(f) Análise da influência da corrente de soldagem.

A influência da corrente de soldagem foi avaliada de forma estatística a partir dos valores de largura da solda (L) medidos em cordões realizados com os parâmetros indicados na tabela 9, coluna (f). Também foi avaliada a influência deste fator na velocidade de soldagem.

(g) Análise da influência da vazão de gás de plasma.

A influência da vazão de gás de plasma foi avaliada de forma estatística a partir dos valores de largura da solda (L), medidos em cordões realizados com os parâmetros indicados na tabela 9, coluna (g). Também foi avaliada a influência deste fator na velocidade de soldagem.

(h) Análise da influência da vazão do gás de proteção

A influência da vazão de gás de proteção foi avaliada de forma estatística a partir dos valores de largura da solda (L), largura da raiz (Lr) e reforço da solda (R), medidos em cordões realizados com os parâmetros indicados na tabela 7, coluna (h).

(i) Análise da influência das variáveis da corrente contínua pulsada.

Foi utilizado como material de base o aço F, tabela 1, de espessura de 4.8 mm e o aço 300M (AMS 6417) de espessura de 3.5 mm. Verificou-se o efeito da frequência de pulsação sobre a largura da solda (L) e a velocidade de soldagem (Vs). Também são comparadas soldagens realizadas em uma mesma corrente média, mas com diferentes estruturas da corrente pulsada. Este estudo foi realizado a partir dos parâmetros de soldagem indicados nas tabelas 32, 33 e 34.

(j) Análise da influência da rampa de descida da velocidade de soldagem no fechamento do keyhole.

Foi utilizado como material de base os corpos de prova E e A (tabela 1) de espessura 3.2 e 2.0 mm respectivamente. Para avaliar o efeito da rampa de descida da velocidade de soldagem sobre o fechamento do *keyhole* foram conduzidos experimentos com os parâmetros indicados na tabela 10.

(k) Importância da composição química do material de base na soldagem *keyhole*

Foi utilizado como material de base os corpos de prova G e H (tabela 1) de espessura 6.35 mm. e os corpos de prova A e B de espessura 2.0 mm. Os experimentos são conduzidos com as mesmas condições de soldagem e a avaliação foi o aspecto visual do cordão de solda. Os parâmetros de soldagem são indicados na tabela 44.

Aço E, tabela 1, espessura 3.2 mm				
Variáveis de soldagem no regime		(a) Defasagem	(d) DTP	(h) VGPr
Corrente de pulso	Ip(A)	125		
Tempo de pulso	tp(s)	0.25		
Corrente de base	Ib(A)	125		
Tempo de base	tb(s)	0.25		
Corrente média	Im(A)	125		
Tensão	U(V)	28.1		
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	0.9		
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0	9.0	15, 12.5, 7.5, 9.0
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	23.5		
Variáveis de soldagem na abertura				
Corrente				
Corrente inicial	Ii(A)	0		
Tempo de atuação	tiI(s)	0		
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3		
Gás plasma				
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.25		
Tempo de atuação	tiGP(s)	0		
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3		
Deslocamento da tocha				
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3		
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0		
Variáveis de soldagem no fechamento				
Corrente				
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	8		
Corrente final	If(A)	40		
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3, 4, 5, 6	3	3
Gás plasma				
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	11		
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25		
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0		
Velocidade de soldagem				
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	8		
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1		
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25		
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0		
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0		
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0		
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.4		
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0	3, 5, 4, 6, 2	4

Tabela 7: Variáveis e parâmetros de soldagem

Variáveis de soldagem no regime		(b) Abertura	(c) Fechamento
Corrente de pulso	Ip(A)	145	
Tempo de pulso	tp(s)	0.25	
Corrente de base	Ib(A)	96	
Tempo de base	tb(s)	0.25	
Corrente média	Im(A)	120.5	
Tensão	U(V)	27	
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	0.9	
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0	
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	23.5	
Variáveis de soldagem na abertura			
Corrente			
Corrente inicial	Ii(A)	0	
Tempo de atuação	tiI(s)	0	
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3 e 4	3
Gás plasma			
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.25 e 0.50	0.25
Tempo de atuação	tiGP(s)	0	
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3 e 4	3
Deslocamento da tocha			
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3 e 4	3
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0	
Variáveis de soldagem no fechamento			
Corrente			
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	8	6 e 8
Corrente final	If(A)	40	10 e 40
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3	
Gás plasma			
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	9	9 e 11
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25	0.25 e 0.5
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0	
Velocidade de soldagem			
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	8	
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1	
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25	
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0	
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0	
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0	
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.4	
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0	

Tabela 8: Variáveis e parâmetros de soldagem

Modulação de corrente: corrente contínua constante

Aço 300M (AMS 6417), espessura 3.5 mm

Variáveis de soldagem no regime	(e) Vs	(f) Corrente	(g) VGP
---------------------------------	--------	--------------	---------

Corrente de pulso	Ip(A)	135		
Tempo de pulso	tp(s)	0.25		
Corrente de base	Ib(A)	135		
Tempo de base	tb(s)	0.25		
Corrente média	Im(A)	135	100, 110, 120, 135	135
Tensão	U(V)	26.7		
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	0.9	0.9	0.9 e 1.0
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0		
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	23, 24, 25 26	25	25
Variáveis de soldagem na abertura				
Corrente				
Corrente inicial	Ii(A)	0		
Tempo de atuação	tiI(s)	0		
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3		
Gás plasma				
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.25		
Tempo de atuação	tiGP(s)	0		
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3		
Deslocamento da tocha				
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3		
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0		
Variáveis de soldagem no fechamento				
Corrente				
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	8		
Corrente final	If(A)	40		
Defasagem da corrente	tdefI(s)	4		
Gás plasma				
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	9		
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25		
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0		
Velocidade de soldagem				
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	8		
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1		
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25		
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0		
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0		
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0		
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.4		
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0		

Tabela 9: Variáveis e parâmetros de soldagem

Modulação de corrente: corrente contínua pulsada

Aço E, espessura 3.2 mm e aço A, espessura 2.0 mm (tabela 1)

Variáveis de soldagem no regime		Espessura 3.2	Espessura 2.0
Corrente de pulso	Ip(A)	125	75

Tempo de pulso	tp(s)	0.25	0.25
Corrente de base	Ib(A)	125	75
Tempo de base	tb(s)	0.25	0.25
Corrente média	Im(A)	125	75
Tensão	U(V)	28.1	28.8
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	0.9	0.5
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0	12.0
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	23.5	30
Variáveis de soldagem na abertura			
Corrente			
Corrente inicial	Ii(A)	0	0
Tempo de atuação	tiI(s)	0	0
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3	3
Gás plasma			
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.25	0.25
Tempo de atuação	tiGP(s)	0	0
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3	3
Deslocamento da tocha			
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3	3
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0	0
Variáveis de soldagem no fechamento			
Corrente			
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	8	8
Corrente final	If(A)	40	20
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3	3
Gás plasma			
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	11	5
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25	0.25
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0	0
Velocidade de soldagem			
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	8	12
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1	1
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25	0.25
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0	2.0
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0	2.0
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0	5.0
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.4	1.6
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0	3.5

Tabela 10: Variáveis e parâmetros de soldagem

RESULTADOS E DISCUSSÃO

(a) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre a abertura do *keyhole*.

Segundo Miller and Filipiski [4] para soldagens longitudinais e circunferenciais de chapas com espessuras até 3 mm, com o emprego da técnica *keyhole*, o arco pode ser conduzido com um conjunto único de parâmetros de início ao fim do cordão. Para confrontar a referência [4], realizaram-se testes que permitiram identificar níveis de corrente, velocidade de soldagem e vazão plasma que, em conjunto, promovessem o *keyhole* para o aço E (tabela 1) de espessura 3.2 mm. A figura 12 mostra o aspecto da solda enquanto os parâmetros de soldagem se apresentam na tabela 11. Através dos testes verificou-se que o *keyhole* é executado a uma distância de 10 mm a partir da abertura do arco. Sem a utilização de equipamentos que possibilitem a programação de rampas de gás, corrente e tempo de retardo na velocidade de deslocamento da tocha é possível executar o *keyhole* para espessuras de 3.2 mm, mas não é garantida uma boa qualidade da solda.



a) Aspecto da face superior



b) Aspecto de raiz

Figura 12 : Aspecto superficial e de raiz sem a programação de rampas de corrente e vazão de gás na abertura do *keyhole*. Teste conduzido em corpo de prova E, tabela 1, espessura 3.2 mm

Baseado nas referências [3, 4, 5, 6, 11], foi necessária a programação das rampas de active para a corrente, vazão plasma e velocidade de soldagem para iniciar o *keyhole*. A figura 13, apresenta a forma de onda, onde os sinais (-1) e (1) significam respectivamente os níveis inferior e superior destas variáveis.

Parâmetros	Unidades	Valores
Espessura do material base	mm	3.2
Corrente média	Im(A)	125
Tensão	U(V)	28.1
Vazão de gás plasma	VGP(l/min)	0.9
Vazão de gás de proteção	VGPr (l/min)	9
Vazão de gás de purga	VGPpg (l/min)	5
Velocidade de soldagem	Vs (cm/min)	23.5
Defasagem da corrente	tdefI (s)	3.0
Defasagem vazão plasma	tdefGP (s)	0
Diâmetro do bocal constritor	mm	2.4
Distância tocha-peça	DTP (mm)	4.0

Tabela 11: Parâmetros operacionais mantidos constantes

A execução dos experimentos foi conduzida seguindo a matriz de ensaios apresentada na tabela 12. 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.

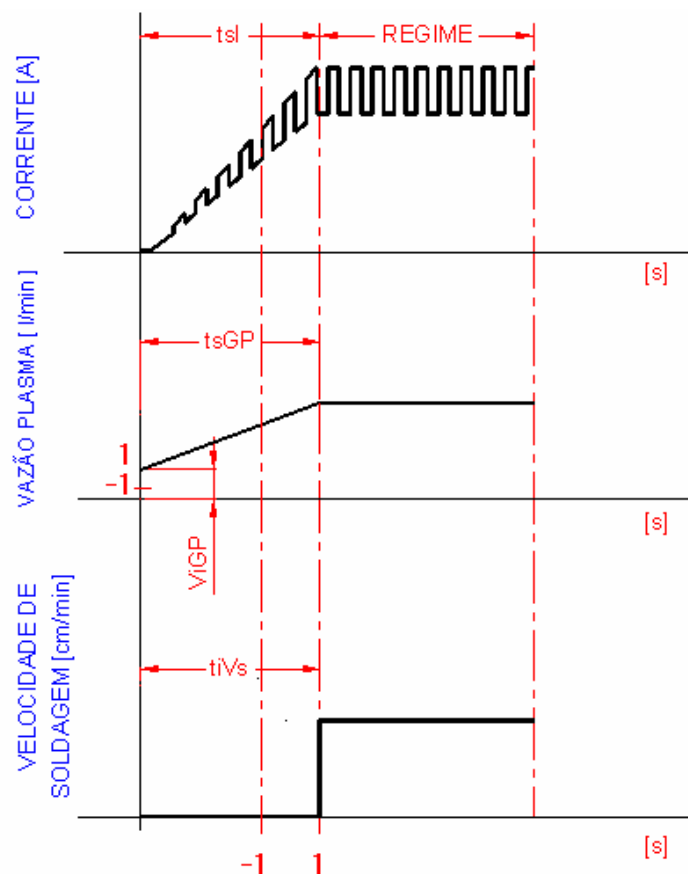


Figura 13: Forma de onda da corrente, da vazão do gás de plasma e da velocidade de soldagem utilizadas na abertura do *keyhole*.

Nº	tsI	tsGP	tiVs	ViGP	Resultados	
					Penetração	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	Ruim
11	-1	1	-1	1	Correta	Ruim
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 12: Condições e resultados dos testes utilizados na abertura do *keyhole*

O teste 1*, da tabela 12, apresenta mordeduras somente em um lado da solda (Figura 14). Este tipo de defeito pode ser provocado por vários fatores. Por exemplo, o desalinhamento da tocha em relação à superfície da peça e a descentralização do eletrodo em relação ao orifício constritor.

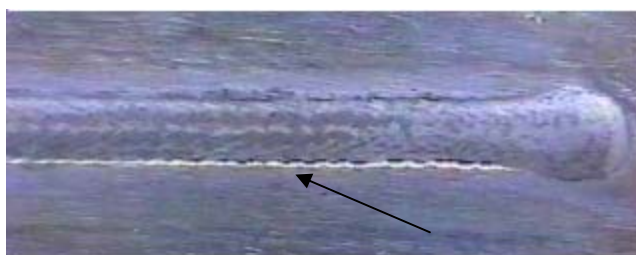


Figura 14 : Aspecto superficial; mordeduras devido ao desalinhamento da tocha em relação à superfície da peça

Realizou-se o alinhamento da tocha para garantir que o calor imposto pelo arco plasma fosse igualmente distribuído em ambos lados do *keyhole*. Repetiu-se o teste 1* e verificou-se que o desalinhamento da tocha foi o fator que originou o defeito de mordedura. Com respeito à

abertura do *keyhole*, os melhores resultados foram obtidos para a combinação envolvendo uma vazão inicial de gás de plasma de 0.25 l/min e as variáveis (tsI), (tsGP), (tiVs) em fase no instante em que o processo entra em regime (testes 1 e 8). Mantidas constantes as variáveis (tsI), (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 (testes 9 e 16).

O teste 2 apresenta mordeduras na região de abertura. 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 teste 10 apresenta a mesma situação, só que a vazão plasma inicial (ViGP) se acha no nível máximo. Devido ao aumento de ViGP de 0.25 a 0.5 l/min as mordeduras foram mais acentuadas.

O teste 3 apresenta mordeduras na região de abertura. O deslocamento da tocha se inicia quando a corrente de soldagem atinge o valor de regime, mas antes da vazão plasma alcançar esta condição.

Com relação aos testes 3 e 11, observa-se que, quando a corrente de soldagem e a velocidade de soldagem entram em regime, a vazão de plasma continua aumentando durante 1s.

Esta defasagem de vazão plasma em relação à corrente de soldagem e o tempo de início do deslocamento da tocha produzem mordeduras no início da solda.

Na análise dos testes 3 e 11, observa-se que eles se diferenciam na vazão de plasma inicial. Devido ao aumento da vazão de plasma inicial (ViGP) de 0.25 a 0.5 l/min os resultados são mordeduras mais acentuadas.

No teste 4, o deslocamento da tocha se inicia antes de a corrente de soldagem e a vazão plasma atinjam seus valores de regime. Utilizando-se esta configuração, a defasagem de tiVs não afeta significativamente a qualidade final da solda. A mesma situação se apresenta no teste 12, a diferença é a vazão plasma inicial (ViGP) que se acha no nível máximo (0.5 l/min).

Os testes 5 e 13 apresentam claramente os efeitos produzidos quando o deslocamento da tocha se inicia após, a vazão de gás de plasma e a corrente de soldagem terem atingido seus valores de regime. Este tipo de configuração nunca deve ser utilizado, já que produz mordeduras em toda a extensão do cordão. Observa-se que o fator mais significativo nos testes 5 e 13 é a variável t_{iVs} .

Os testes 6 e 14 apresentaram mordeduras e excesso de penetração. O deslocamento da tocha se iniciou quando a corrente de soldagem atingiu o valor de regime, mas antes da vazão plasma ter alcançado esta condição. Observa-se que quando a vazão plasma entra em regime, há um acréscimo na pressão do arco durante 1s, acompanhado pelo tempo excessivo em que a tocha está parada.

Os testes 7 e 15 apresentaram penetração excessiva. O deslocamento da tocha se iniciou quando a vazão plasma atingiu o valor de regime, mas antes da corrente ter alcançado esta condição. À medida que se eleva a vazão plasma, há um aumento na penetração. Com relação ao tempo de início de deslocamento da tocha, caso este parâmetro seja elevado, defeitos como excesso de penetração e mordeduras tornam-se evidentes.

(b) Análise da influência da defasagem da corrente de soldagem em relação à vazão de gás de plasma no fechamento do *keyhole*.

No escopo deste trabalho está considerado o desenvolvimento de um sistema que permita um controle no fechamento do *keyhole*, sem utilizar material de adição. Através de uma análise experimental chegou-se a determinar a importância da defasagem que deve existir entre a corrente de soldagem e a vazão de gás de plasma de forma que o fechamento do *keyhole* ocorra de modo estável, ou seja, um fechamento com uma aparência lisa e sem mordeduras. Tal defasagem é possível de ser programada, via computador, que atua em tempo real na fonte de

soldagem e na válvula controladora da vazão de gás-plasma. Para conseguir um adequado fechamento do *keyhole* é indispensável poder programar a defasagem seguida de rampas de declives da vazão plasma e corrente de soldagem e em alguns casos, é possível obter benefícios, reduzindo simultaneamente, com a corrente e vazão de plasma, a velocidade de soldagem que ajuda a manter a poça fundida durante o tempo que o *keyhole* é fechado. Neste item, o interesse é poder determinar o efeito da defasagem no fechamento do *keyhole*.

A tabela 13 apresenta as respostas do procedimento experimental para avaliar o efeito do tempo de defasagem da corrente de soldagem em relação à vazão de gás de plasma. Para avaliar o efeito da defasagem da corrente em relação à vazão de gás de plasma no fechamento do *keyhole* foram medidos os aspectos geométricos, isto é profundidade “p” da cratera, largura do cordão no fechamento (l) e largura do cordão no regime (L). Esta última foi considerada como parâmetro de comparação (Figura 15).

A figura 16, apresenta graficamente a resposta dos parâmetros geométricos para os diferentes níveis de defasagem utilizados. Também foram realizados ensaios para tempos de defasagem de 0, 1 e 2 segundos, os quais não são considerados na tabela 13, por apresentarem mordeduras excessivas na região de fechamento.

Ensaio	Fator	Valores observados		
	Defasagem (s)	Largura no regime L (mm)	Profundidade “p” da cratera (mm)	Largura no fechamento l (mm)
1	6	5.70	0.3	6.65
2	5	5.48	0.4	7.00
3	4	5.48	0.4	6.45
4	3	5.38	0.4	5.80

Tabela 13: Resposta geométrica do cordão de solda para diferentes níveis do fator defasagem

Em relação à profundidade “p” não existe uma diferença significativa para os diferentes níveis de defasagem testados. Com o aumento no fator de defasagem (de 3 para 6 segundos)

verifica-se uma tendência de aumento da largura da cratera. Os melhores resultados foram verificados para um defasagem de 3 segundos, onde, a largura da cratera está mais próxima à largura do cordão na região de regime.

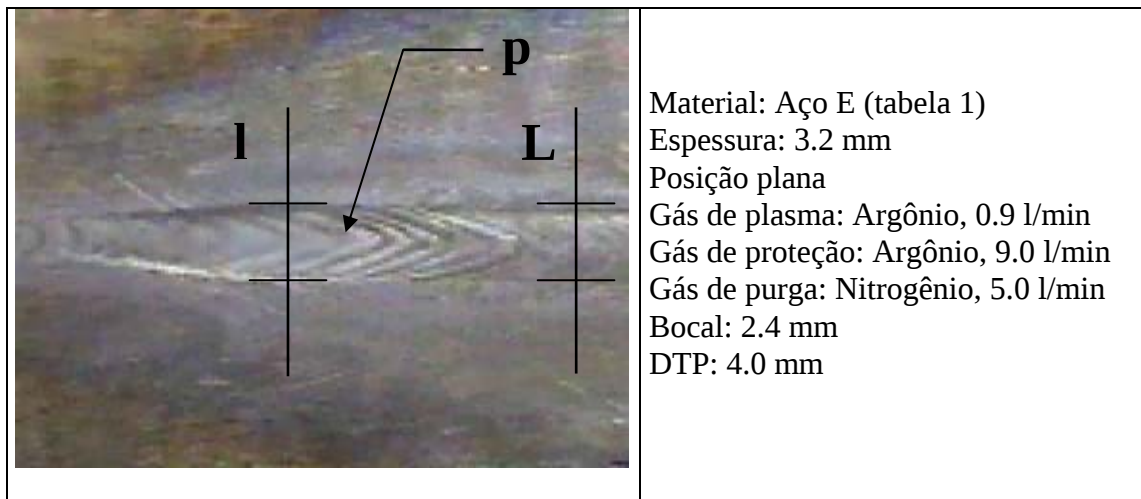


Figura 15: Fechamento no final do cordão

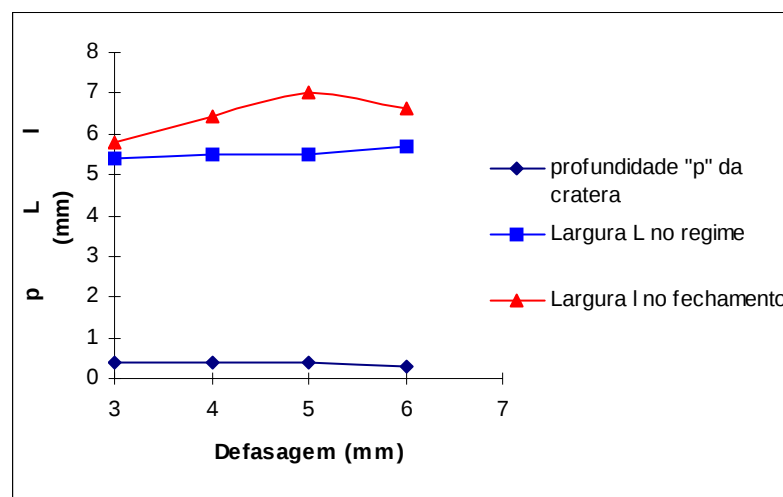


Figura 16: Efeito da defasagem na profundidade “p” e largura da cratera.

(c) Análise da influência do controle da vazão de gás de plasma, corrente de soldagem e velocidade de soldagem sobre o fechamento do *keyhole*.

A matriz de planejamento e a resposta obtida na execução dos ensaios é apresentada na tabela 14. Os sinais (-) e (+) significam, respectivamente, os níveis alto e baixo aplicados para as variáveis de soldagem.

	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	REPETIÇÕES	
																I	II
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	0.30	0.35
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.50	0.40
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	0.40	0.40
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0.30	0.40
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0.30	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	0.40	0.40
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	0.50	0.45
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.40	0.50
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.30	0.40
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

Tabela 14 :Matriz de planejamento

Em experimentos de análise fatorial, geralmente se examina a **magnitude** e **direção** dos efeitos dos fatores para determinar que variáveis são mais importantes. A tabela 15 apresenta os efeitos dos fatores e pela magnitude pode-se verificar que a corrente final ($C=-0.059$), vazão final do gás plasma ($D=0.0781$) e as interações tempo de descida da corrente-corrente final ($AC=-0.059$), corrente final-vazão final do gás plasma ($CD=0.0406$) são os efeitos mais significativos. A análise de variância é resumida na tabela 16 e ela confirma esta interpretação.

A=-0.022	AB=-0.034	BD=0.0156	ACD=-0.009
B=0.0281	AC=-0.059	CD=0.0406	BCD=-0.034
C=-0.059	AD=-0.009	ABC=0.0156	ABCD=-0.009
D=0.0781	BC=-0.009	ABD=0.0281	

Tabela 15: Efeito dos fatores

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Fo	Fcrit	Significância	
A	1	0.00382813	0.00382813	1.87	<	5.83	NÃO Significativo
B	1	0.00632813	0.00632813	3.10	<	5.83	NÃO Significativo
AB	1	0.00945313	0.00945313	4.60	<	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	23.90	>	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	0.00204				
Total	31	0.1843					

Tabela 16: Análise de variância para a profundidade no fechamento do *Keyhole*

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

Na tabela 14 são apresentados os resultados de duas medições de profundidade de cratera no fechamento do *keyhole* (repetições 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 (VfGP) exercem influência significativa sobre o fechamento do *keyhole* (tabela 16). Esta influência se dá, tanto de forma isolada, quanto nas combinações a) tempo de descida da corrente e corrente final (TdI*If) e b) corrente final e vazão de gás de plasma final (If*VfGP).

Na figura 17 são apresentados os valores médios da profundidade de cratera de fechamento em função da corrente final (If), da vazão de gás de plasma final (VfGP), do tempo de descida da corrente (TdI) 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 (If), (VfGP), (TdI) e (TdGP) 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 pode-se concluir 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 18 é apresentado o efeito das interações entre a vazão final do gás de plasma e a magnitude final da corrente de soldagem ($VfGP \cdot If$). A partir deste gráfico verifica-se que:

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

Na figura 19 é apresentado o efeito das interações entre tempo de descida da corrente e a magnitude final da corrente de soldagem ($TdI \cdot If$). A partir deste gráfico verifica-se que a corrente final (If) 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.

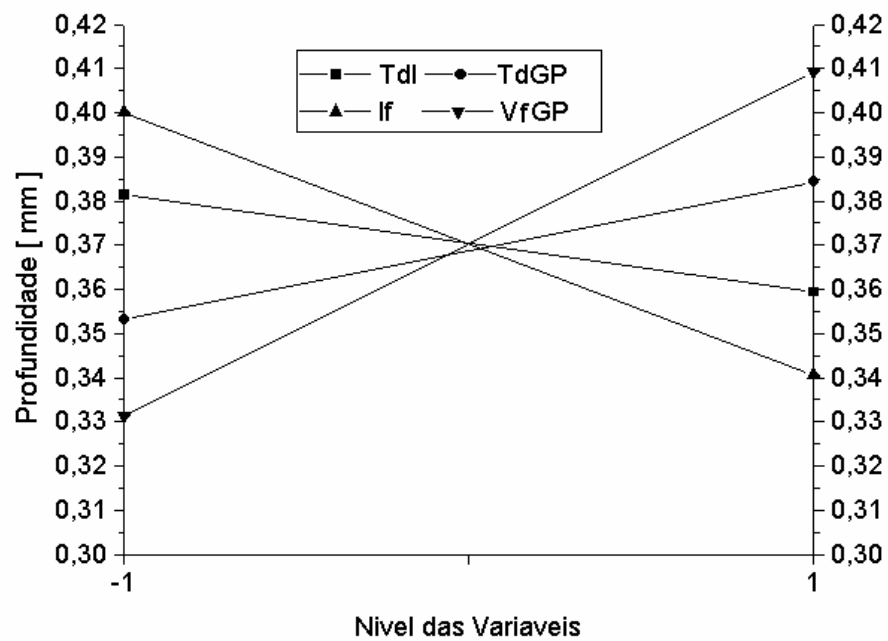


Figura 17: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da corrente final (I_f), vazão plasma final (V_{fGP}), tempo de descida da corrente (T_{dI}) e tempo de descida da vazão plasma (T_{dGP})

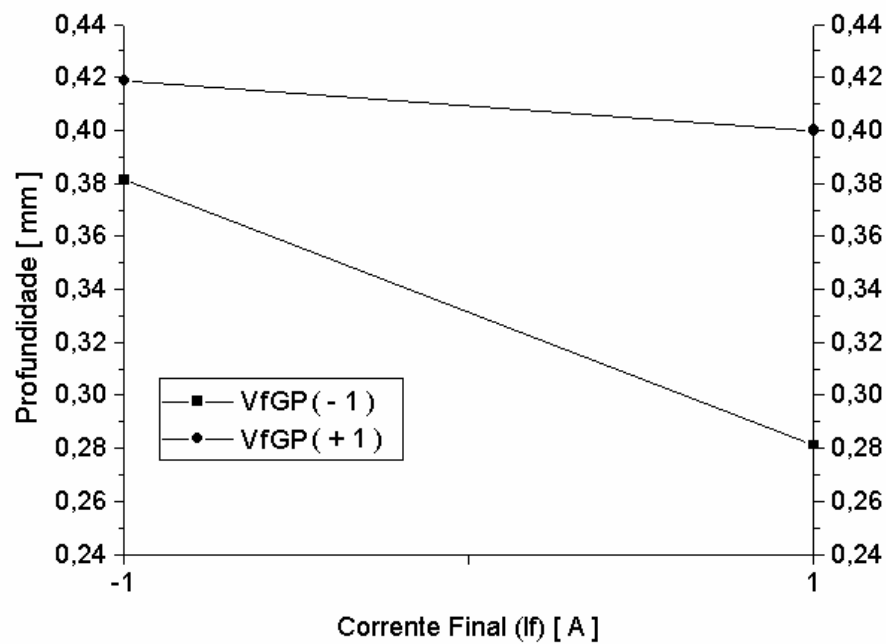


Figura 18: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre corrente final (I_f) e vazão plasma final (V_{fGP})

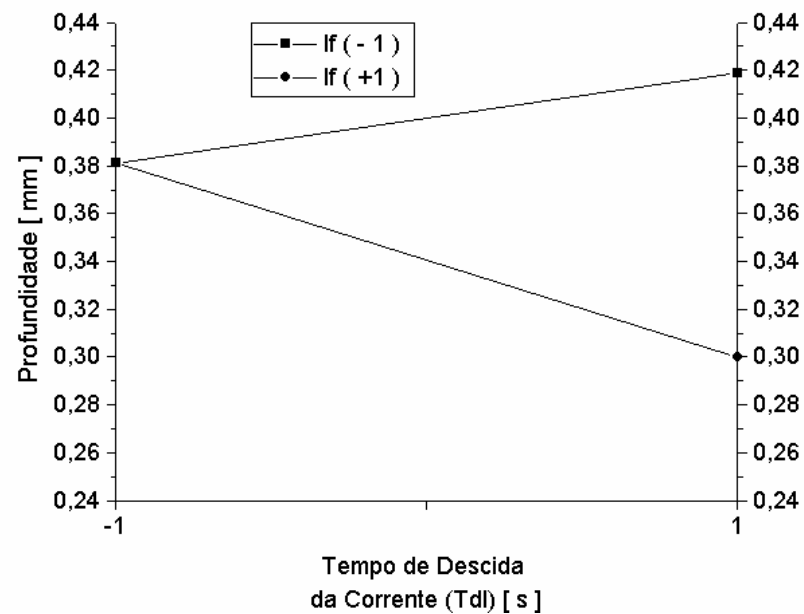


Figura 19: Valores médios da profundidade da cratera de fechamento em função da interação entre o tempo de descida da corrente (T_{dI}) e a corrente final (I_f).

(d) Análise da influência da distância tocha-peça (DTP).

Conforme [1], no processo plasma a natureza colunar do arco constrito faz com que o processo seja pouco sensível às variações na distância tocha-peça, permitindo a utilização de comprimentos de arcos bem maiores em comparação com os processos convencionais. Com o objetivo de conhecer ainda mais esta característica do processo e comparar com a literatura [1], foram conduzidos alguns experimentos.

A tabela 17 apresenta os resultados sobre as condições geométricas do cordão, para uma faixa de variação da distância tocha-peça entre 2 e 6 mm., enquanto as tabelas 18, 19 e 20 indicam os resultados da análise de variância. A figura 20 indica o efeito da distância tocha-peça na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz. A figura 21, indica o efeito do fator distância tocha-peça na tensão do arco.

A análise da figura 20, reforçada com a análise de variância (tabelas 18, 19 e 20), indica que, de uma forma geral, a distância tocha-peça não afeta significativamente o reforço da raiz. No entanto, percebe-se um efeito significativo na largura do cordão e na largura da raiz.

Observou-se que o aumento excessivo da distância tocha-peça, resulta na perda das características do arco, que se torna cônico. Neste caso, o cordão da solda apresenta uma largura maior e uma raiz mais estreita.

Por outro lado, a utilização de uma distância tocha-peça muito reduzida pode causar o contato entre o bocal de constrição e o metal fundido da poça de fusão. Se este contato se efetuar durante a soldagem, o bocal de constrição será inutilizado e a solda será contaminada pelo material do bocal que é transferido para a poça de fusão. O valor mínimo permitido para a distância tocha-peça, é de 2 mm.

Os melhores resultados foram verificados para uma distância tocha-peça compreendida entre 2 e 5 mm. Nesta faixa, observa-se que as soldas apresentam um aspecto superficial

satisfatório, com penetração total e uniforme. Finalmente, destaca-se que é possível produzir soldas de qualidade mas todas apresentaram diferenças nas condições geométricas. Pesquisas já existentes não mencionam este fato e destacam somente que o processo é pouco sensível às variações na distância tocha-peça.

Outro fato importante a ser considerado é a variação da tensão no arco em função da variação da distância tocha peça, figura 21. Para uma distância tocha-peça de 2 mm a tensão foi de 25 V e para a maior distância tocha-peça, 6 mm a tensão medida foi de 30 V. Estas mudanças na tensão explicam as variações na largura do cordão de solda e a largura da raiz. A medida que a distância tocha-peça se torna maior, a largura da solda L aumenta e a largura da raiz L_r , diminui. Resultados semelhantes foram obtidos por Tomsic e Jackson [18] demonstrando que a distância tocha peça apresenta um efeito no comportamento da largura da solda e a largura da raiz.

ENSAIO	Fator	Valores observados									
	Distância Tocha-peça (mm)	Tensão (V)	Reforço da raiz (mm)			Largura da raiz (mm)			Largura da solda (mm)		
1	3	26.8	0.30	0.30	0.25	3.50	3.20	3.00	5.35	5.40	5.30
2	5	28.0	0.30	0.25	0.35	1.70	1.80	1.95	5.65	5.45	5.65
3	4	27.6	0.30	0.30	0.30	2.45	2.55	2.35	5.60	5.65	5.55
4*	6	30.0	-			-			6.75	6.90	7.00
5	2	25.0	0.30	0.30	0.30	2.75	2.60	2.55	6.00	6.20	6.35

teste 4*: Falta de penetração total

Tabela 17: Influência do fator distância tocha-peça na tensão e parâmetros geométricos do cordão.

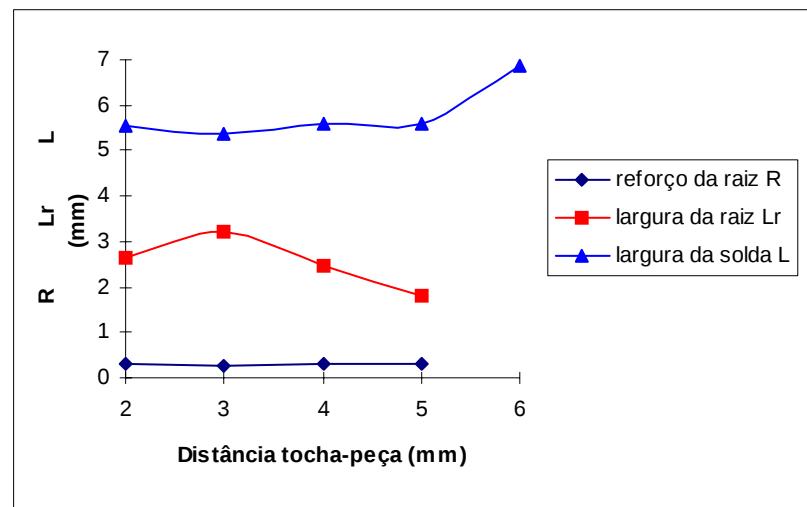


Figura 20: Efeito da DTP na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz

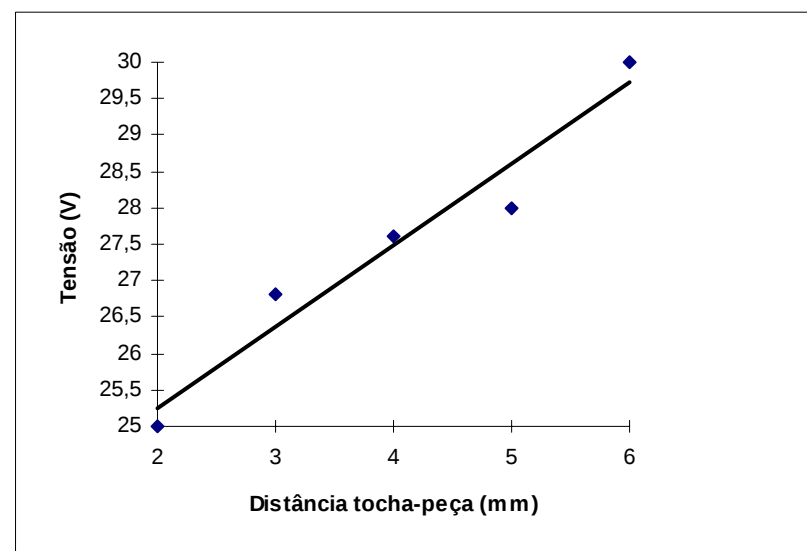


Figura 21: Efeito do fator distância tocha-peça na tensão do arco

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	$F_{\text{observado}}$	F_{critico}
Distância tocha-peça	0.000556	2	0.000278	$F_o = 0.25$	< 5.14
Residual	0.00667	6	0.0011		
Total	0.00722	8			

Tabela 18: Resultados de análise de variância para o reforço da raiz

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F _{observado}	F _{crítico}
Distância tocha-peça	3.022	2	1.51	Fo = 50.83	> 5.14
Residual	0.1783	6	0.029		
Total	3.022	8			

Tabela 19: Resultados de análise de variância para a largura da raiz

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	F _{observado}	F _{crítico}
Distância tocha-peça	4.38	2	1.46	Fo = 155.73	> 4.066
Residual	0.075	6	0.009375		
Total	4.455	8			

Tabela 20: Resultados de análise de variância para a largura da solda

(e) Análise da influência da velocidade de soldagem.

Antes de iniciar o estudo da influência das variáveis principais (corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás de plasma), foi necessário proceder ao levantamento da região de obtenção da técnica *keyhole*, utilizando-se como material base, o aço 300M (6417). A região operacional apresentada na figura 22, é a região que possui as condições de soldagem que efetivamente possibilitam a soldagem através da técnica *keyhole*. O uso de parâmetros da região determinada deve resultar na realização da técnica e sua validação, prevê a repetibilidade de resultados para qualquer uma destas condições. A figura 22, apresenta a macrografia da solda para os pontos A e B, selecionados na faixa operacional.

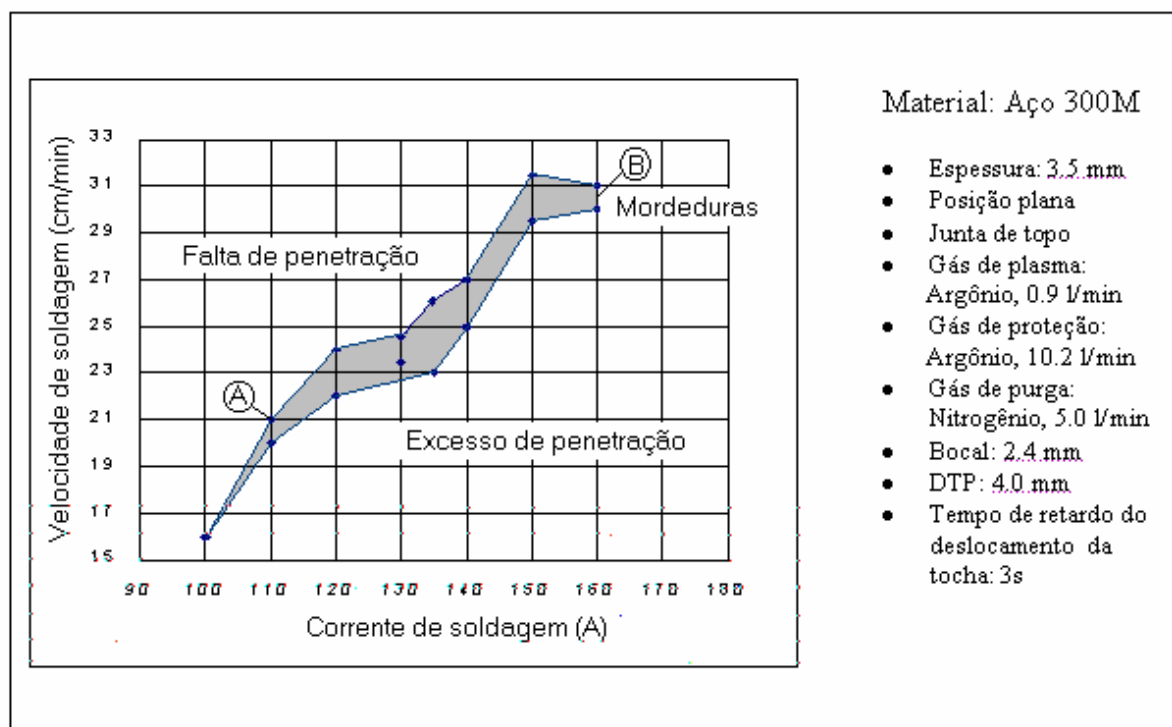
A tabela 21 apresenta os resultados das condições geométricas do cordão, para uma faixa de variação de velocidade de soldagem entre 23 e 26 cm/min, enquanto a tabela 22 indica os resultados de análise de variância. A figura 23, indica o efeito do fator velocidade de soldagem na largura da solda. Nota-se que a medida que a velocidade de soldagem aumenta, a largura da

solda L e a largura da raiz L_r diminuem. Resultados semelhantes foram obtidos por Tomsic e Jackson [18], demonstrando que a velocidade de soldagem apresenta um efeito marcante no comportamento da largura da solda e a largura da raiz.

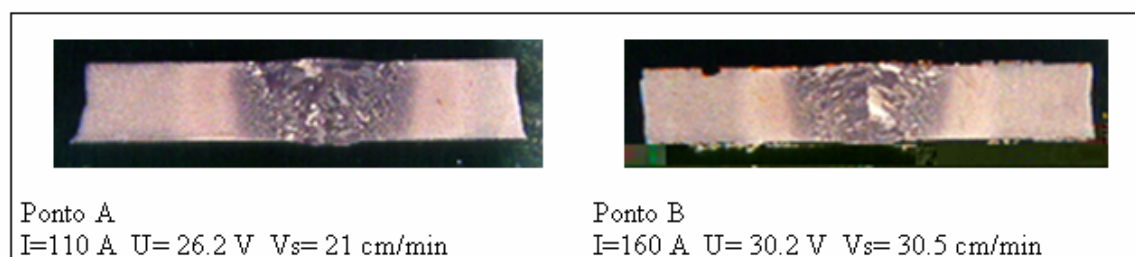
A baixa tolerância do processo plasma com a técnica *keyhole*, em termos de variação de velocidade de soldagem, é verificada neste trabalho, onde foi utilizada uma chapa de aço 300M de 3.5 mm de espessura, corrente de 135 A e vazão de gás de plasma de 0.9 (l/min), a obtenção e manutenção do *keyhole* só foi conseguida para velocidades de soldagem que variaram de 23 a 26 cm/min, ou seja, uma faixa operacional de 3.0 cm/min.

Segundo pesquisas de Paula Jr. [3], onde foi utilizada uma chapa de aço carbono de 6.35 mm de espessura, corrente de 225 A e vazão de gás de plasma de 1.4 (l/min), a obtenção e manutenção do *keyhole* só foi conseguida para velocidades de soldagem que variaram de 17.5 a 20 cm/min, ou seja, uma faixa operacional de 2.5 cm/min.

Pela análise da figura 23, reforçada com a análise de variância (tabela 5.11), percebe-se um efeito significativo na largura do cordão.



Faixa operacional



Macrografias dos pontos A e B selecionados da faixa operacional. Ataque com nital a 2%

Figura 22: Levantamento das condições de obtenção da técnica do *keyhole*

Velocidade de soldagem (cm/min)	Largura da solda(mm)				
	1	2	3	4	Média
23	7.6	7.6	7.4	7.75	7.6
24	7.0	7.2	7.15	7.0	7.09
25	6.8	6.8	6.85	6.85	6.8
26	6.6	6.7	6.65	6.6	6.64
	Reforço da raiz (mm)				
	1	2	3	4	Média
23	0.4	0.4	0.35	0.4	0.388
24	0.25	0.15	0.3	0.35	0.2625
25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
26	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Largura da raiz (mm)				
	1	2	3	4	Média
23	4.35	4.3	4.15	4.2	4.25
24	3.45	3.10	3.25	3.95	3.44
25	3.95	2.7	3.25	3.6	3.375
26	2.8	2.8	2.75	3.35	2.93

Tabela 21: Dados das condições geométricas do cordão.

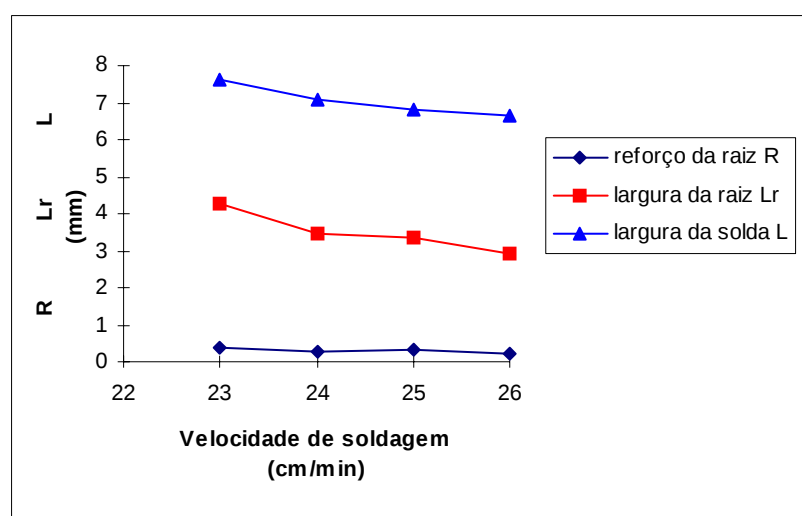


Figura 23: Efeito do fator velocidade de soldagem sobre a largura da solda

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{observado}	F _{critico}
Velocidade de soldagem	2.040	3	0.68	Fo=79.145	> 3.49
Residual	0.103125	12	0.0086		
Total	2.144	15			

Tabela 22:- Resultados de análise de variância para a largura da solda L

(f) Análise da influência da corrente de soldagem.

A tabela 23 apresenta os resultados sobre as condições geométricas do cordão, para uma faixa de variação da corrente entre 100 e 160 A. A tabela 24 apresenta os resultados sobre a velocidade de soldagem, enquanto a tabela 25 indica os resultados da análise de variância. A figura 24 relaciona a corrente com a velocidade de soldagem e a figura 25 indica o efeito da corrente sobre a largura da solda.

O análise da figura 25, bem como da tabela 25, indica que a corrente de soldagem afeta significativamente na largura da solda. Observa-se que a menor largura da solda é obtida para uma corrente de soldagem de 110 A com uma velocidade de soldagem de 21 cm/min.

Foram conseguidos resultados semelhantes aos obtidos pela referência [18], demonstrando que a corrente de soldagem apresenta um efeito marcante no comportamento da largura da solda e na largura da raiz.

Corrente de soldagem (A)	Largura da solda (mm)				
	1	2	3	4	Média
100	8.1	8.05	8.2	8.15	8.125
110	6.0	5.9	6.1	5.9	5.98
120	6.5	6.35	6.2	6.5	6.38
130	6.4	6.4	6.2	6.3	6.33
135	6.45	6.45	6.1	6.1	6.3
140	7.5	7.2	7.5	7.45	7.4
150	6.2	6.2	6.1	6.1	6.15
160	6.3	6.2	6.2	6.2	6.2

Tabela 23: Dados da corrente de soldagem sobre a largura da solda.

Corrente de soldagem (A)	Velocidade de soldagem máxima (cm/min)
100	16
110	21
120	24
135	26
140	27
150	31.5
160	31

Tabela 24: Relação entre a corrente de soldagem e a velocidade máxima de soldagem

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	$F_{\text{observado}}$	$F_{\text{crítico}}$
Corrente de soldagem	15.411	6	2.569	$F_o=177.57 >$	2.57
Residual	0.304	21	0.0144		
Total	15.715	27			

Tabela 25: Resultados de análise de variância para a largura da solda L

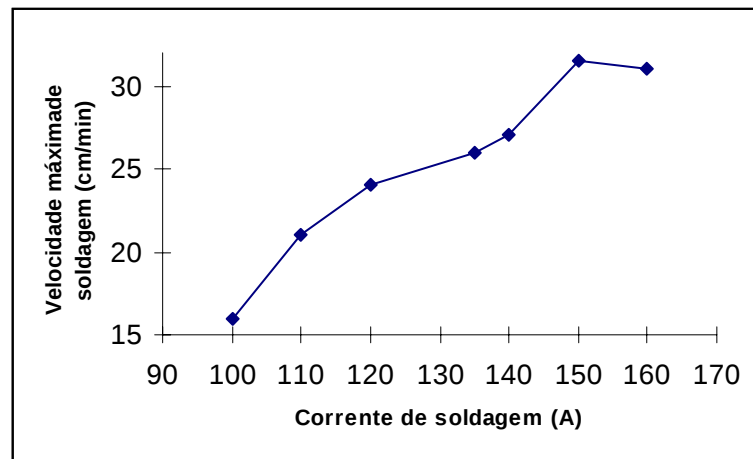


Figura 24: Efeito da corrente de soldagem sobre a velocidade máxima de soldagem

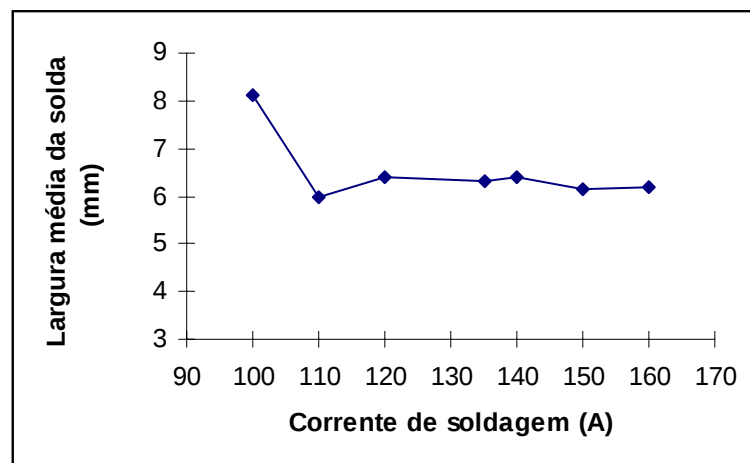


Figura 25: Efeito da corrente de soldagem sobre a largura média da solda

(g) Análise da influência da vazão de gás de plasma.

A tabela 26 apresenta os resultados sobre as condições geométricas do cordão, para dois níveis de vazão de gás plasma (0.9 e 1.0 l/min). A figura 26, indica o efeito do fator vazão de gás de plasma sobre a largura da solda e a velocidade de soldagem, pela análise desta figura, reforçada com a análise de variância (tabela 27), percebe-se um efeito significativo na largura do cordão.

Segundo pesquisas realizadas por Lucas [11], variações de 0.2 l/min na vazão de gás de plasma causam significantes alterações na solda. Esta afirmação pode ser conferida através da figura 26, na qual uma variação de 0.1 l/min apresentou um efeito na largura da solda e na velocidade de soldagem, ou seja, para uma vazão alta de 1 l/min o efeito é menor largura da solda e velocidade de soldagem mais elevada em comparação a uma vazão de 0.9 l/min. Através deste estudo é possível justificar o equipamento que tem a capacidade de fornecer, na região de regime, uma vazão de gás de plasma constante, considerado também como uma contribuição científica do trabalho.

Vazão de gás plasma (l/min)	Velocidade de soldagem máxima (cm/min)	Largura da solda (mm)				
		1	2	3	4	Média
0.9	21	6.00	5.90	6.10	5.90	5.98
1.0	25	5.30	5.40	5.45	5.40	5.40

Tabela 26: Dados da vazão de gás de plasma sobre a largura média solda.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	$F_{\text{observado}}$	F_{critico}
Vazão de gás plasma	0.69	1	0.69	$F_o=105.19 > 5.987$	
Residual	0.039375	6	0.006563		
Total	0.7297	7			

Tabela 27: Resultados de análise de variância para a largura da solda L

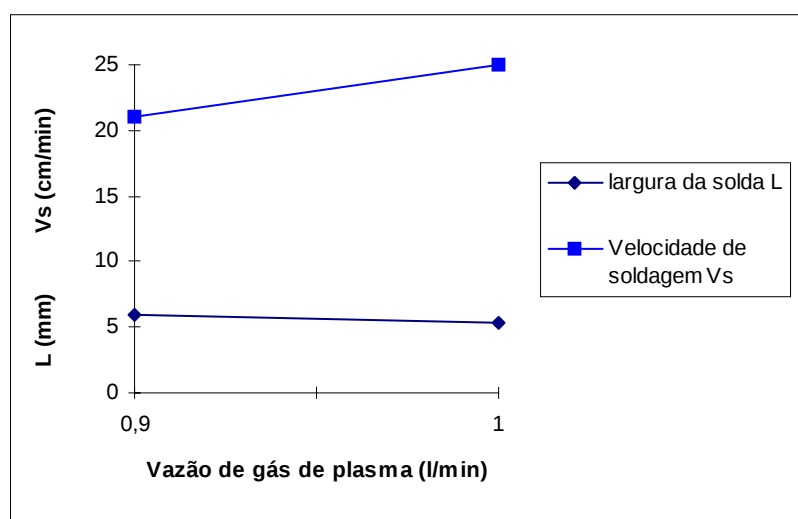


Figura 26: Efeito da vazão plasma sobre a largura média da solda e a velocidade máxima de soldagem

(h) Análise da influência da vazão do gás de proteção.

A tabela 28 apresenta os resultados sobre as condições geométricas do cordão para uma faixa de variação da vazão do gás de proteção entre 7.5 e 15 l/min, enquanto as tabelas 29, 30 e 31 indicam os resultados da análise de variância. A figura 27 indica o efeito da vazão do gás de proteção na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz.

ENSAIO	Gás de proteção (l/min)	Reforço da raiz (mm)	Largura da raiz (mm)	Largura da solda (mm)
1	15.0	0.35- 0.30- 0.30	2.40- 2.40- 2.40	5.00 - 5.20 - 5.25
2	12.5	0.35- 0.35- 0.35	2.30- 2.40- 2.35	5.30 - 5.25 - 5.25
3*	7.5	0.45- 0.35- 0.35	2.55- 2.30- 2.45	5.30 - 5.35 - 5.30
4	9.0	0.30- 0.30- 0.30	2.45- 2.55- 2.35	5.30 - 5.30 - 5.30

Teste 3: O cordão de solda na parte central da superfície apresenta depressão

Tabela 28: Dados da vazão do gás de proteção sobre as condições geométricas do cordão de solda.

A análise da figura 27, reforçada com a análise de variância (tabelas 29, 30 e 31), indica que, de uma forma geral, a vazão de gás de proteção não afeta significativamente as condições geométricas do cordão: largura do cordão, largura da raiz e reforço da raiz. No entanto, percebe-

se um efeito significativo nas descontinuidades superficiais caracterizadas pela formação de uma depressão ao longo de toda sua extensão, quando foi utilizada uma vazão de gás de proteção no nível mínimo de 7.5 l/min.

Os melhores resultados foram verificados para uma vazão de gás de proteção compreendida entre 9 e 15 l/min. Nesta faixa observa-se que as soldas apresentam um aspecto superficial satisfatório, com penetração total e uniforme.

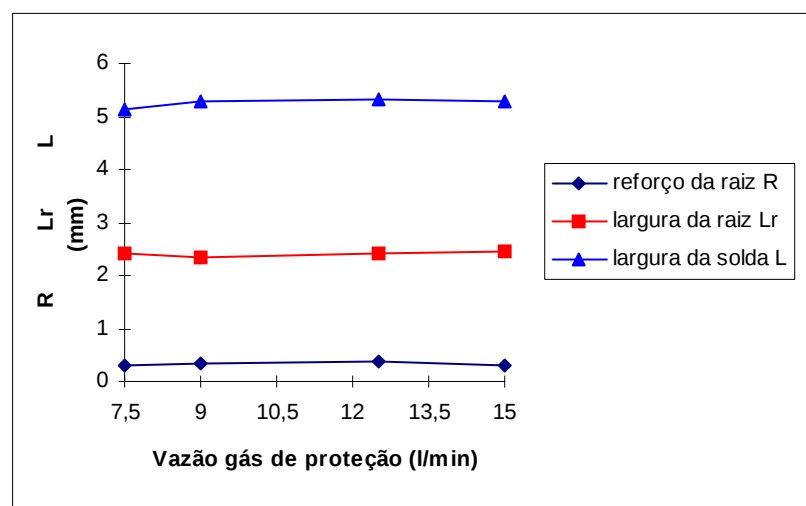


Figura 27: Efeito da vazão de gás de proteção na largura da solda, reforço da raiz e largura da raiz

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	$F_{\text{observado}}$	F_{critico}
Vazão gás de proteção	0.01229167	3	0.004097	Fo=3.93	< 4.066
Residual	0.0083333	8	0.001042		
Total	0.020625	11			

Tabela 29: Resultados de análise de variância para o reforço da raiz R

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{observado}	F _{critico}
Vazão gás de proteção	0.0175	3	0.00583	Fo=0.82	< 4.066
Residual	0.056667	8	0.007083		
Total	0.0741667	11			

Tabela 30: Resultados de análise de variância para a largura da raiz Lr

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{observado}	F _{critico}
Vazão gás de proteção	0.05083	3	0.01694	Fo=3.54	< 4.066
Residual	0.0383	8	0.00479167		
Total	0.089167	11			

Tabela 31: Resultados de análise de variância para a largura da solda L

(i) Análise da influência das variáveis da corrente contínua pulsada.

O emprego da corrente pulsada baseou-se nos relatos de vários autores [3, 11, 13, 19]. A primeira condição para soldagem com corrente contínua pulsada, foi baseada no trabalho de Paula Jr. [3]. Esta condição é apresentada a seguir:

Parâmetros/variáveis de controle		
Espessura do material base 4.8 mm. Aço F ,tabela 1.		
Corrente de pulso	A	220
Tempo de pulso	ms	250
Corrente de base	A	90
Tempo de base	ms	250
Vazão de gás de plasma	l/min	2.0
Vazão de gás de proteção	l/min	9.4
Velocidade de soldagem	cm/min	17.5
Distância tocha-peça	mm	4.0
Diâmetro do bocal constritor	mm	3.2
Ângulo do eletrodo	graus	30

Tabela 32: Condições de soldagem iniciais adotadas para experimentos utilizando a corrente contínua pulsada na posição plana [3].

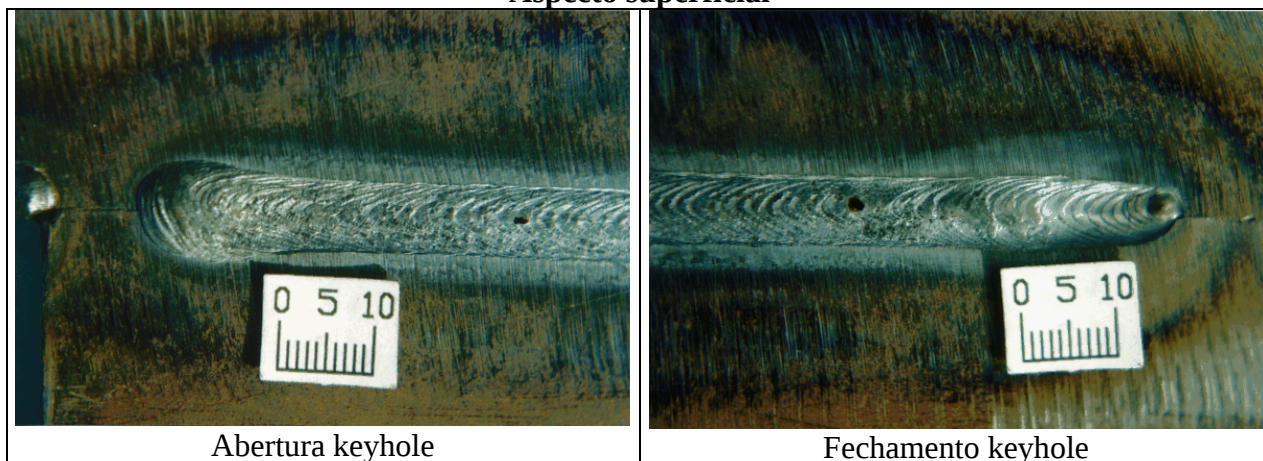
As variáveis de controle indicadas na tabela 32, são programadas para proceder à soldagem com a ajuda do programa PLASMACP. Nos testes realizados verificou-se a necessidade de um melhor ajuste dos parâmetros em relação à abertura e fechamento do *keyhole*. Este ajuste foi realizado através da programação das variáveis tais como: tempo de início do deslocamento da tocha, rampas de subida e descida da corrente de soldagem, rampas de subida e descida da vazão de gás de plasma e rampa de descida da velocidade de soldagem. A figura 28 apresenta o aspecto do cordão de solda com o ajuste das variáveis para o início e fechamento do *keyhole*. A tabela 33 apresenta as variáveis e parâmetros de soldagem ajustados. Procedeu-se a avaliar a influência da frequência de pulsação (FP) fazendo testes para 0.5, 8.0, 1.0 e 3.0 Hz, utilizando os mesmos parâmetros e variáveis da tabela 33. Nas figuras 29 a 32, podem ser

observados os corpos de prova soldados. Nos quatro testes realizados verificou-se o aparecimento de mordeduras na superfície do cordão de solda e a raiz se apresenta contínua, exceto para a frequência de pulsação de 0.5 Hz, em que a raiz tem aspecto de escamas devido à sobreposição formada a partir da pulsação da corrente. Finalmente foi feito um último ensaio para uma frequência de pulso de 2.5 Hz, variando a velocidade de soldagem de 17.5 cm/min a 19.5 cm/min. Os resultados foram mordeduras em toda a extensão do cordão e uma raiz uniforme (figura 33).

Para continuar com este estudo foram realizados testes usando tiras de aço 300M (198x60x3,5 mm) que permitiram identificar níveis de corrente, velocidade de soldagem e vazão de gás plasma, que em conjunto promovessem a técnica do furo, de modo a produzir cordões contínuos, isentos de defeitos superficiais e com penetração uniforme ao longo de seu comprimento. Os resultados são apresentados na tabela 34 e figura 34.

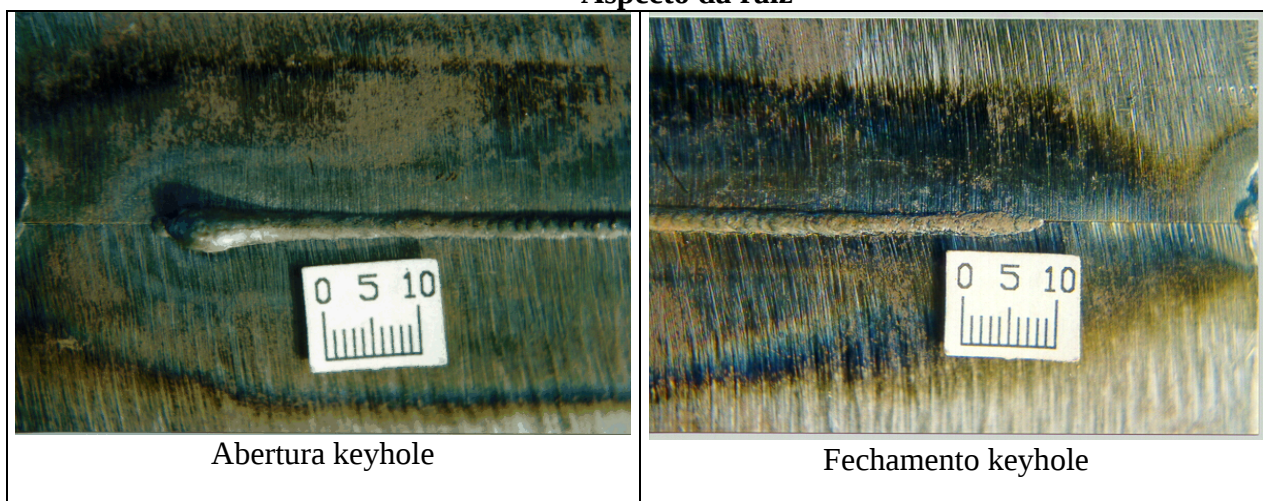
Segundo Paula Jr. [3], a vazão de gás de plasma utilizada em corrente contínua pulsada para a obtenção de uma solda de qualidade foi um pouco superior aquela adotada para soldagem com corrente contínua constante (de 1.4 para 2.0 l/min). Essas observações divergem dos resultados dos testes realizados neste estudo, para o aço 300M, de espessura 3.5 mm, cuja vazão de gás de plasma para corrente contínua constante e corrente contínua pulsada foi de 0.9 l/min. Observa-se que as soldas realizadas em corrente contínua pulsada, alcançaram uma menor velocidade de soldagem, comparadas com as soldas realizadas em corrente contínua constante (material de base de mesmo tipo e espessura). Resultados semelhantes foram obtidos pela referência [4] envolvendo aços ABNT 1020.

Verificou-se aparecimento de mordeduras para velocidades de soldagem acima da velocidade de regime, 23.5 cm/min, o que leva a concluir, a estreita faixa de trabalho dos parâmetros para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça de fusão. Verificou-se a influência da

Aspecto superficial

Abertura keyhole

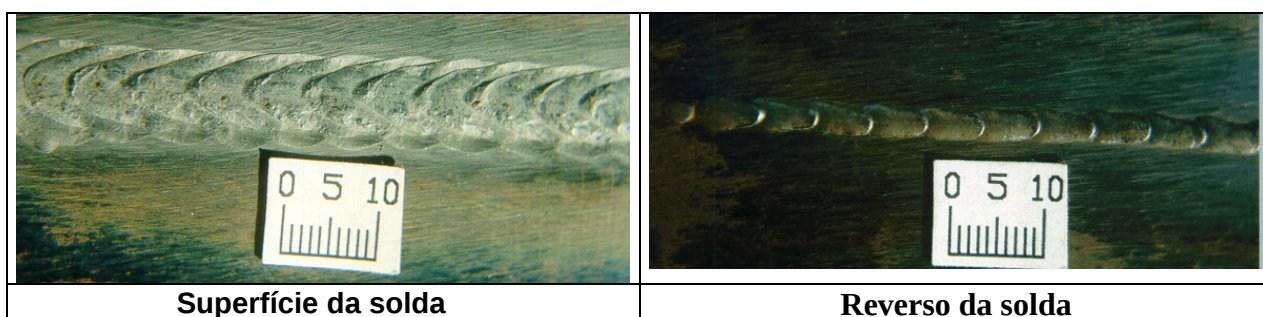
Fechamento keyhole

Aspecto da raiz

Abertura keyhole

Fechamento keyhole

Figura 28: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 2.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso



Superfície da solda

Reverso da solda

Figura 29: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 0.5 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

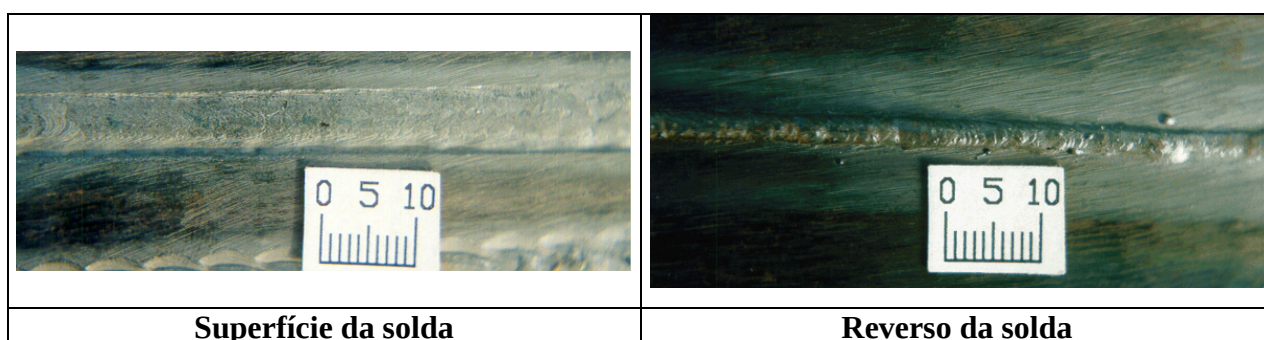


Figura 30: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 8.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

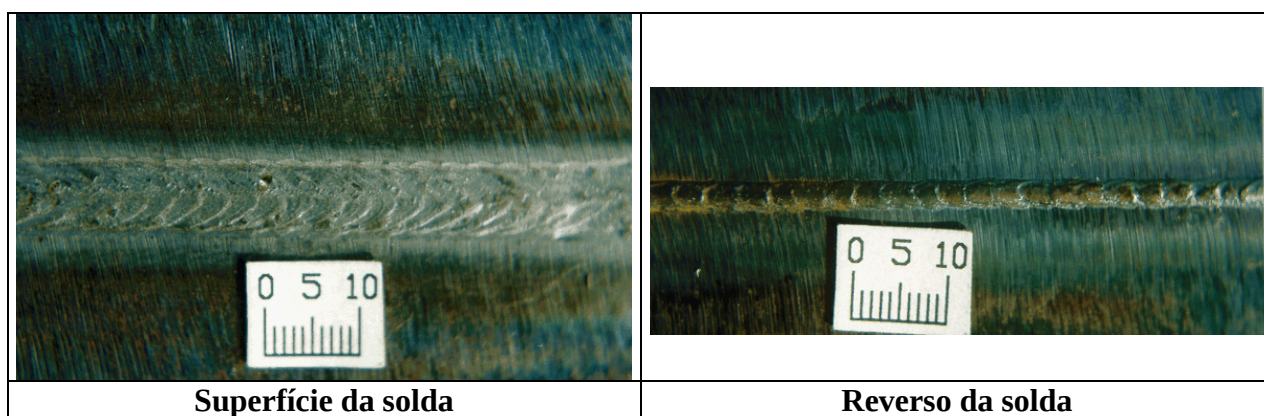


Figura 31: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 1.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

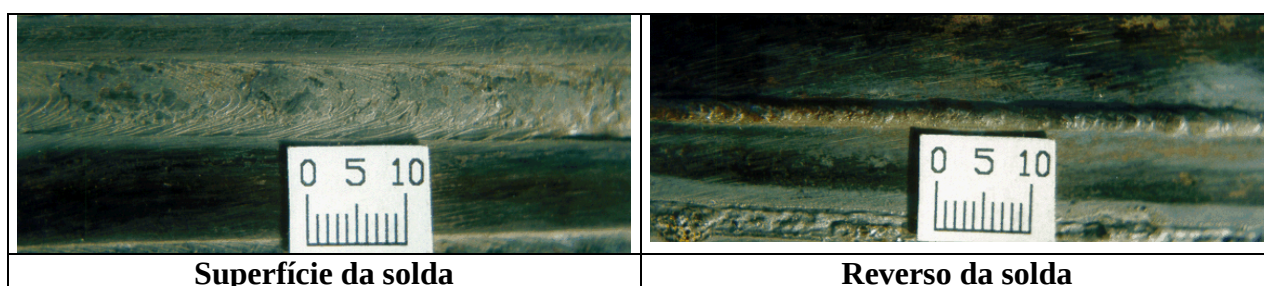


Figura 32: Aspecto visual da solda. Frequência de pulsação 3.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

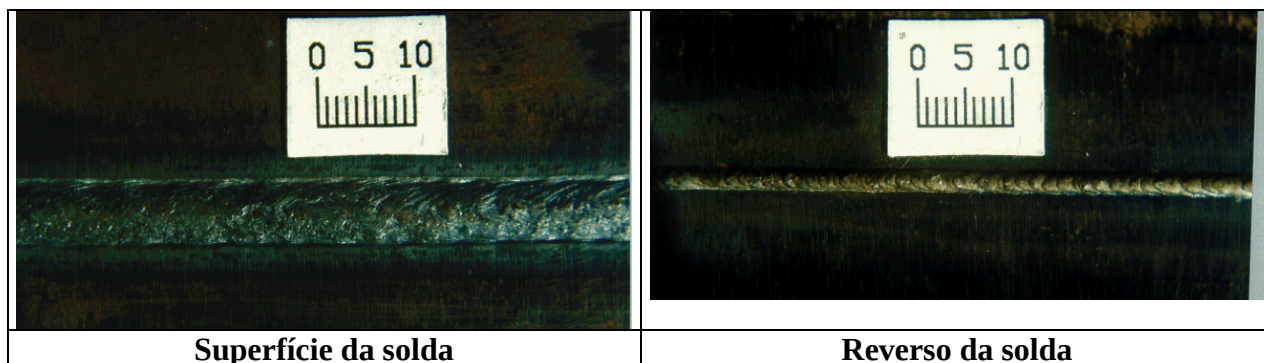


Figura 33: Aspecto visual da solda. Frequência de pulsação 2.5 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

influência da frequência de pulsação, fazendo testes para 1 e 3 Hz, utilizando os mesmos parâmetros e variáveis da tabela 34 e considerando que

$$\frac{tp}{tb} = 1 \quad [20]$$

Para a frequência de pulsação de 1Hz ($tp=tb=0.5$ s), figura 35, na superfície da solda verifica-se a presença de pequenas mordeduras e o reforço da raiz apresenta penetração irregular, ou seja, o comportamento é variável entre *keyhole* e penetração incompleta. A falta de penetração é produzida na fase do tempo de base. Devido ao excessivo tempo de base o material se solidifica e fecha o *keyhole* já formado na fase de pulso.

Para a frequência de pulsação de 3 Hz ($tp=tb=0.17$ s), figura 36, e com uma velocidade de soldagem de 23.5 cm/min, a solda apresenta bom aspecto superficial e excesso de penetração, o que sugere fazer testes para velocidades de soldagem mais elevadas, 25 e 26 cm/min. Para a velocidade de soldagem de 26 cm/min, o cordão apresenta falta de penetração e os melhores resultados são para uma velocidade máxima de 25 cm/min. A tabela 35, resume os testes para verificar a influência da frequência de pulsação na utilização da corrente contínua pulsada.

A tabela 36 apresenta os resultados sobre a velocidade de soldagem, para dois níveis de frequência de pulsação (2 e 3 Hz), enquanto a tabela 37 indica os dados obtidos sobre as condições geométricas. A figura 37, indica o efeito do fator frequência de pulsação sobre a largura da solda (L) e a velocidade de soldagem (Vs).

Os resultados dos testes mostram que mudanças na frequência de pulsação influenciam diretamente na velocidade de soldagem. Este ganho em velocidade de soldagem permite uma diminuição na largura do cordão (L). A análise da figura 37, reforçada com a análise de variância (tabela 38), permite perceber um efeito significativo na largura do cordão.

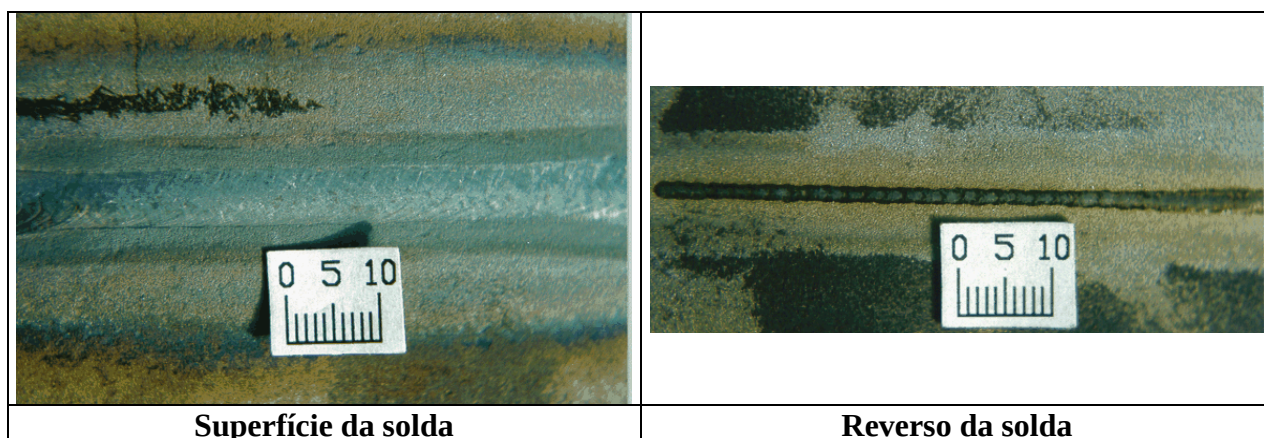


Figura 34: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 2.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

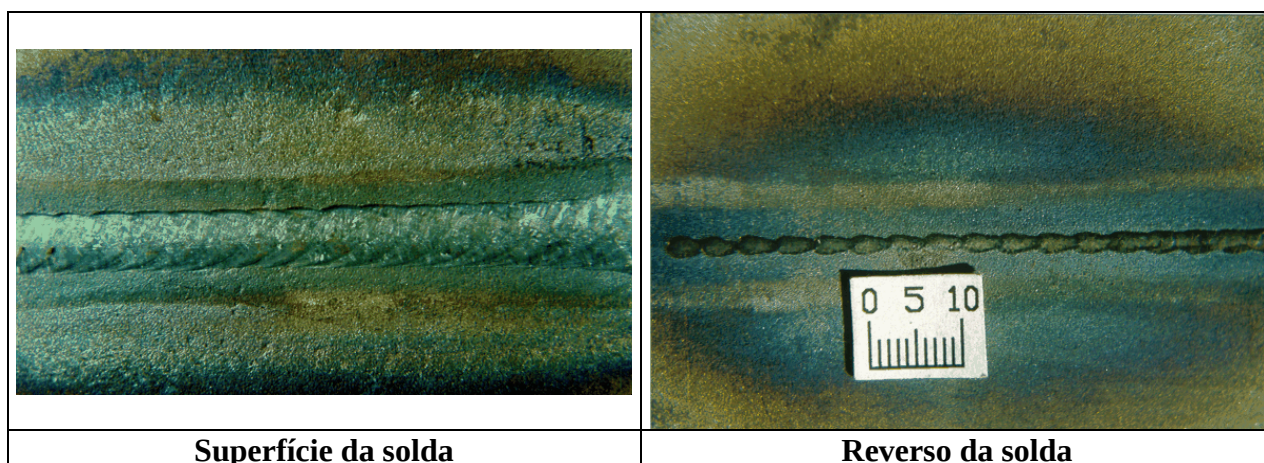


Figura 35: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 1.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso.

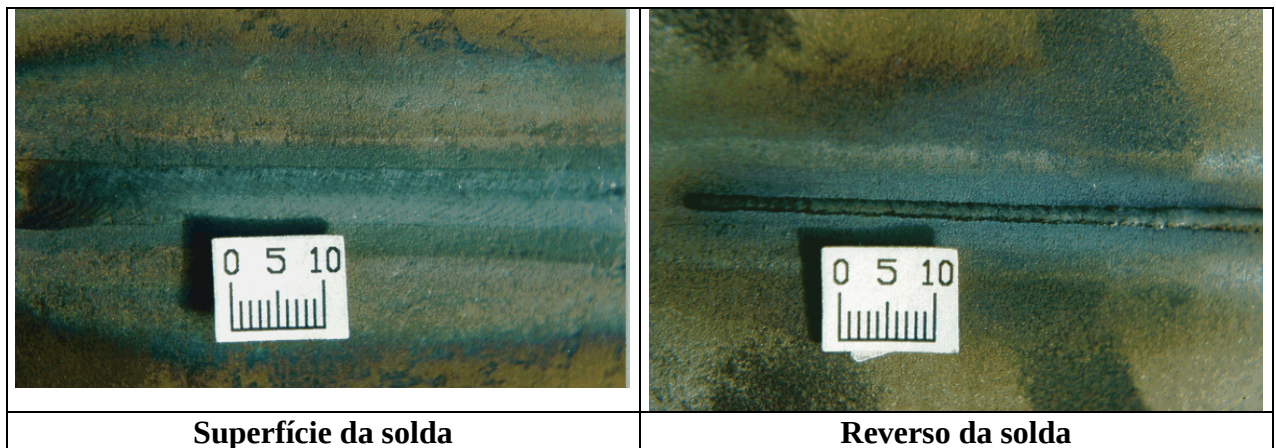


Figura 36: Aspecto visual da solda com frequência de pulsação 3.0 Hz. O tempo de base é igual ao tempo de pulso

Prosseguindo com este estudo são comparadas soldagens realizadas em uma mesma corrente média (equação 21), mas com diferentes estruturas da corrente pulsada.

$$I_m = \frac{I_{tp} + I_{tb}}{tp + tb} = cte \quad [21]$$

Em todos os corpos de prova soldados a corrente média foi de 120.5 (A). Para que isto fosse conseguido, as soldas em corrente pulsada foram realizadas com uma relação $\frac{I_p}{I_b}$ de

$$\frac{I_p}{I_b} = \frac{145}{96} = \frac{140}{101} = \frac{135}{106} = \frac{130}{111}$$

Em todos os casos a relação $\frac{tp}{tb}$ foi constante e igual a 1. Utilizou-se frequências de pulsação de 2 e 3 Hz. Na tabela 39 é apresentado o planejamento do experimento e o resultado dos testes. Nos oito testes realizados todos eles forneceram condições para a manutenção de

keyhole, demonstrando com isto que para o aço 300M com espessura de 3.5 mm, não existe uma única condição de soldagem quando é empregada a técnica *keyhole* utilizando a corrente contínua pulsada. Por inspeção visual se pode verificar alguma diferença na largura da solda para os diferentes testes. A tabela 40 apresenta a largura das soldas. A figura 38 apresenta o efeito da frequência de pulso e o efeito da relação I_p/I_b sobre a largura da solda, os resultados são também comparados com a soldagem em corrente contínua constante. A figura 39 mostra a macrografia para soldas realizadas com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. Como pode ser observado, a corrente contínua pulsada apresentou menor largura em relação à corrente contínua constante, para uma mesma corrente média.

É interessante se observar que os menores valores na largura da solda são obtidos para frequências maiores. No que concerne à relação I_p/I_b , os menores valores da largura são para relações baixas de I_p/I_b .

Ao comparar os resultados em corrente contínua constante ($I_{ccc}=120.5$ A) a largura da solda é sempre menor para qualquer valor da relação I_p/I_b para uma frequência de pulsação de 2 Hz, esta redução na largura está relacionada intimamente com a velocidade de soldagem (25 cm/min em corrente contínua constante e 23.5 cm/min em corrente contínua pulsada).

Para frequências de pulsação de 3 Hz, as vantagens são claramente visualizadas, em comparação à corrente contínua constante, somente para $I_p/I_b=130/111$, em que a largura apresenta seu menor valor. Observa-se também que não existe uma diferença significativa na largura da solda, quando se utilizam relações de I_p/I_b igual a 135/106 e 145/96, em comparação com a corrente contínua constante.

Modulação de corrente: corrente contínua pulsada		
Aço F (tabela 1), espessura 4.8 mm		
Variáveis de soldagem no regime		
Corrente de pulso	Ip(A)	220
Tempo de pulso	tp(s)	0.25
Corrente de base	Ib(A)	90
Tempo de base	tb(s)	0.25
Corrente média	Im(A)	155
Tensão	U(V)	27
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	2.0
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	17.5
Variáveis de soldagem na abertura		
Corrente		
Corrente inicial	Ii(A)	0
Tempo de atuação	tiI(s)	0
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3
Gás plasma		
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.5
Tempo de atuação	tiGP(s)	0
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3
Deslocamento da tocha		
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3
	tsVs(s)	0
Tempo de subida da velocidade		
Variáveis de soldagem no fechamento		
Corrente		
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	10
Corrente final	If(A)	40
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3
Gás plasma		
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	13
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.5
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0
Velocidade de soldagem		
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	14
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.5
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	3.2
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0

Tabela 33: Variáveis e parâmetros de soldagem

Modulação de corrente: corrente contínua pulsada
Aço 300M (AMS 6417), espessura 3.5 mm

Variáveis de soldagem no regime

Corrente de pulso	Ip(A)	145
Tempo de pulso	tp(s)	0.25
Corrente de base	Ib(A)	96
Tempo de base	tb(s)	0.25
Corrente média	Im(A)	120.5
Tensão	U(V)	27.7
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	0.9
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9.0
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	23.5

Variáveis de soldagem na abertura

Corrente

Corrente inicial	Ii(A)	0
Tempo de atuação	tiI(s)	0
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	3

Gás plasma

Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.25
Tempo de atuação	tiGP(s)	0
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	3

Deslocamento da tocha

Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	3
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0

Variáveis de soldagem no fechamento

Corrente

Tempo de descida da rampa	TdI(s)	8
Corrente final	If(A)	40
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3

Gás plasma

Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	11
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0

Velocidade de soldagem

Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	8
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1

Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	5.0
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.4
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0

Tabela 34: Variáveis e parâmetros de soldagem

FP (Hz)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Acabamento	Penetração
1	23.5	Bom	Irregular
2	23.5	Bom	Correta
3	23.5	Bom	Excessiva
3	25	Bom	Correta
3	26	Razoável	Incompleta

Tabela 35: Condições e resultados de testes utilizados para avaliar a influência da frequência de pulsação (FP)

Tempo de base (ms)=Tempo de pulso (ms) $T_p/T_b = 1$	FP (Hz)	Velocidade de soldagem (cm/min)
250	2	23.5
170	3	25

Tabela 36: Dados da velocidade de soldagem para os níveis de FP

FP (Hz)	Largura da solda (mm)				
	1	2	3	4	Média
2	6.75	6.4	6.35	6.3	6.45
3	5.95	5.95	5.95	5.85	5.93

Tabela 37: Dados da largura da solda para os níveis de FP

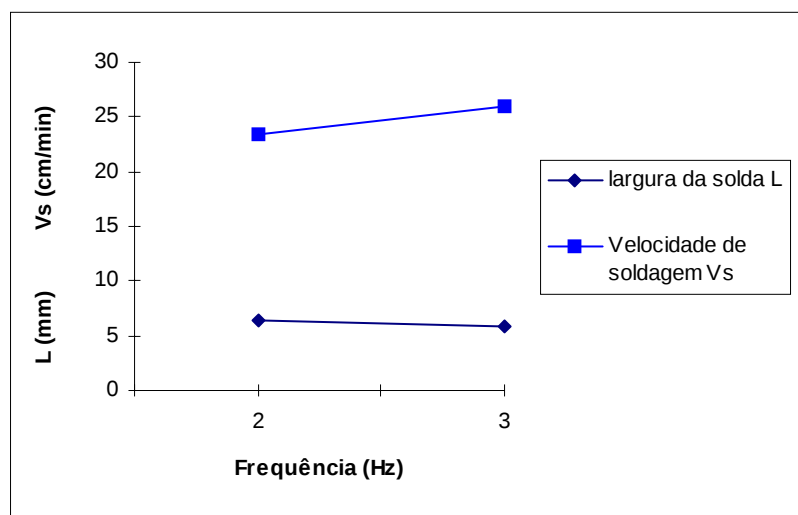


Figura 37: Efeito da frequência de pulsação sobre a largura da solda e a velocidade de soldagem

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F _{observado}	F _{crítico}
FP	0.55125	1	0.55125	Fo=24.96	> 5,987
Residual	0.1325	6	0.022083		
Total	0.68375	7			

Tabela 38: Resultados de Análise de Variância para a largura da solda

Ensaio	Ip/Ib	tp = tb (ms)	FP Hz	Vs (cm/min)	Acabamento	Penetração
1	145/96	250	2	23.5	Bom	Correta
2	145/96	170	3	25	Bom	Correta
3	140/101	250	2	23.5	Bom	Correta
4	140/101	170	3	25	Bom	Correta
5	135/106	250	2	23.5	Bom	Correta
6	135/106	170	3	25	Bom	Correta
7	130/111	250	2	23.5	Bom	Correta
8	130/111	170	3	25	Bom	Correta

Tabela 39: Planejamento do experimento e resultados dos testes

Ip/Ib	FP (Hz)	Largura da solda (mm)				
		1	2	3	4	Média
145/96	2	6.35	6.55	6.40	6.3	6.4
145/96	3	6.15	6.0	6.0	6.1	6.06
140/101	2	6.7	6.8	6.8	6.75	6.76
140/101	3	6.55	6.56	6.4	6.45	6.49
135/106	2	6.85	6.95	6.85	6.45	6.775
135/106	3	6.1	6.0	6.0	6.05	6.0375
130/111	2	6.4	6.45	6.4	6.45	6.425
130/111	3	5.8	5.85	5.75	5.95	5.8375

Tabela 40: Dados da largura da solda para os níveis de frequência de pulsação

Im(A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Largura da solda (mm)				
		1	2	3	4	Média
120.5	25	5.85	5.95	6.1	6.1	6.0

Tabela 41: Dados da largura da solda para corrente contínua constante.

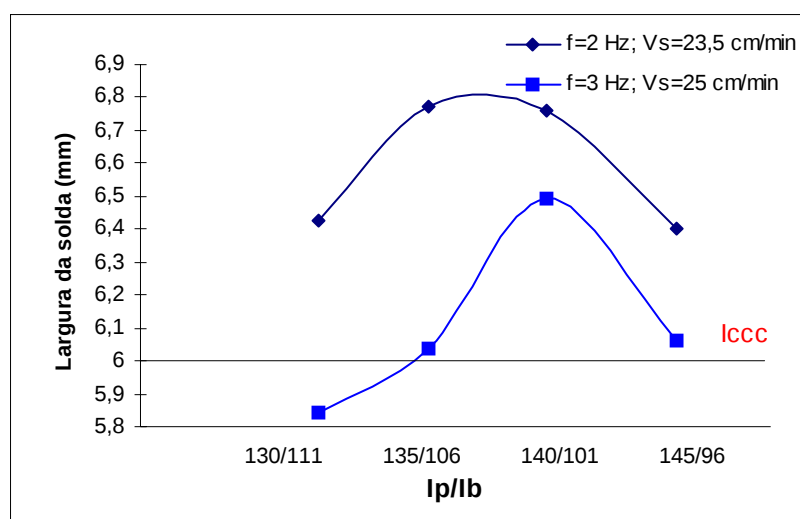


Figura 38: Efeito da frequência de pulso e I_p/I_b na largura da solda.

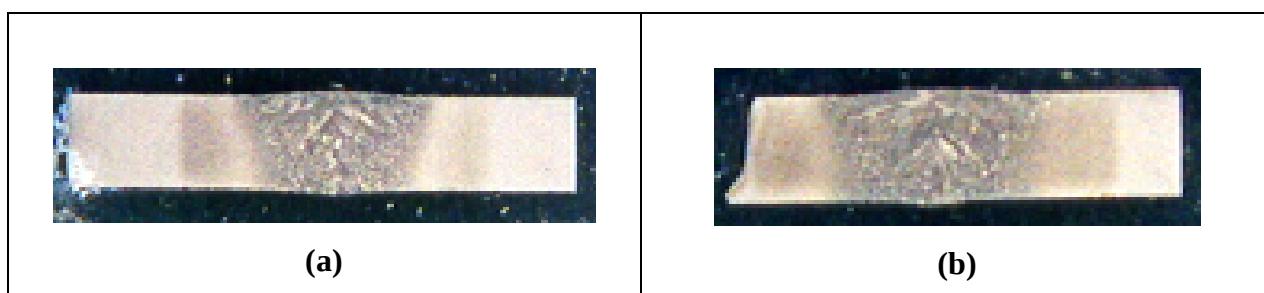


Figura 39: Macrografia de soldas realizadas para a mesma corrente média (a) Corrente contínua constante (b) Corrente contínua pulsada, $I_p/I_b = 130/111$. Ataque com nital a 2%.

(j) Análise da influência da rampa de descida da velocidade de soldagem no fechamento do *keyhole*.

Os experimentos realizados neste trabalho foram efetuados com velocidade de soldagem constante (sem rampa de descida). Mesmo assim decidiu-se realizar alguns experimentos empregando uma rampa de descida na velocidade de soldagem para avaliar o efeito da mesma sobre o fechamento do *keyhole*.

Com o emprego desta rampa de declive, na velocidade de soldagem, conseguiu-se estabelecer um bom procedimento de soldagem, cujos dados estão apresentados no item 5.5 (j). Nas figura 40 e 41 podem ser observados os corpos de prova soldados. Duas características são evidentes: quando se utiliza rampa de descida a região de fechamento do *keyhole* apresenta maior largura (em relação à região de regime) e menor comprimento comparadas com o fechamento sem rampa de descida da velocidade de soldagem.

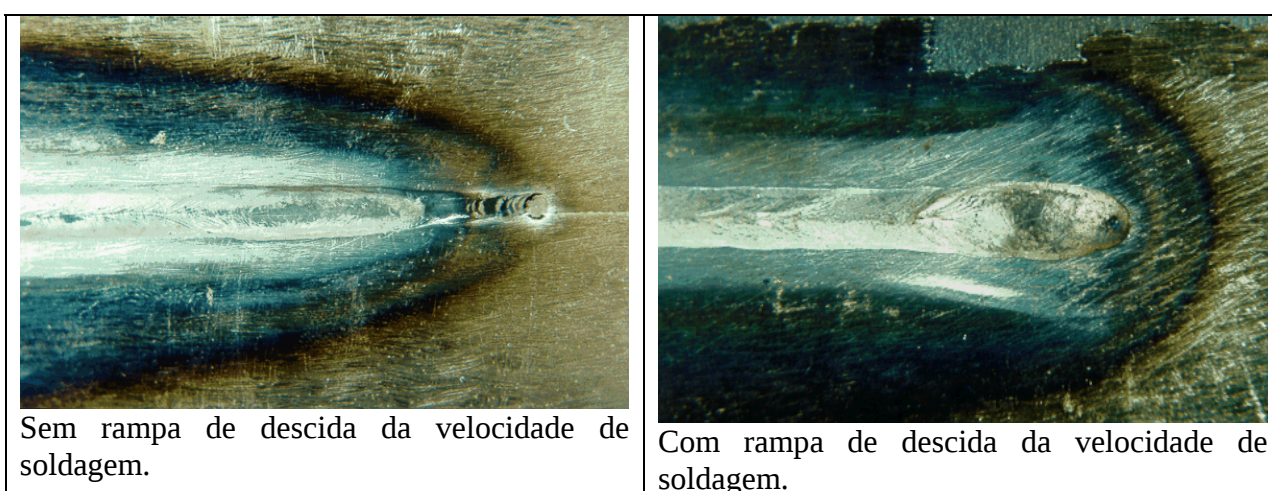


Figura 40: Fechamento no final do cordão. Corpo de prova D (tabela 1), espessura 3.2 mm

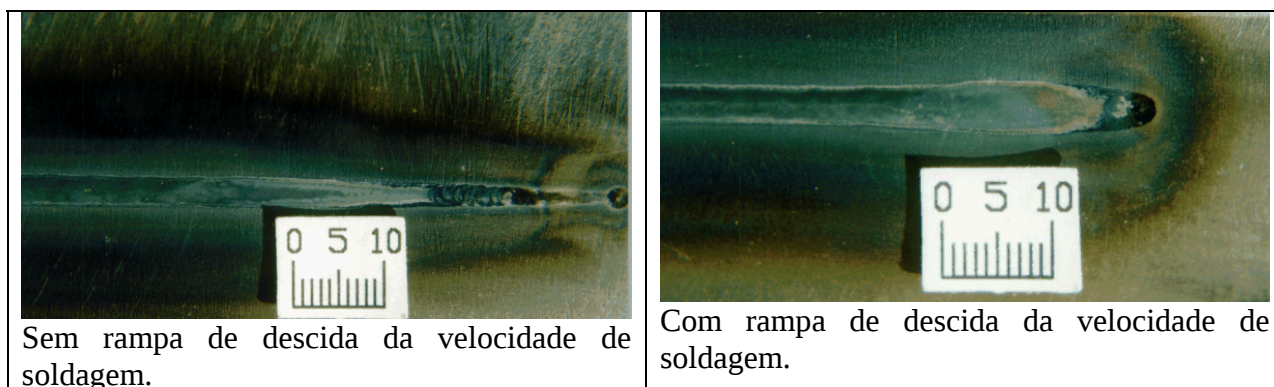


Figura 41: Fechamento no final do cordão. Corpo de prova A (tabela 1), espessura 2.0 mm

(k) Importância da composição química do material de base na soldagem *keyhole*

A qualidade nas juntas soldadas depende da estabilidade do *keyhole* que está relacionada com as variáveis/parâmetros de soldagem a ser utilizados e especialmente da composição química do material a ser soldado. Quando a tensão superficial de um certo material é baixa o controle na poça de fusão se dificulta e as variáveis/parâmetros de soldagem devem ser cuidadosamente ajustadas para manter a estabilidade do *keyhole* e a poça de fusão. Para que se pudesse verificar o efeito da variação na composição química foram conduzidos ensaios em dois materiais com a mesma espessura, segundo a tabela 42.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
CP G	0.0561	-	0.327	0.00723	0.0108	0.0425	0.0117	0.0318
CP H	0.152	0.370	1.57	0.0169	0.0107	0.0297	0.005	0.0350
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn
CP G	0.0577	0.0207	0.0335	0.00196	0.00114	0.00637	0.00726	-
CP H	0.0626	0.0236	0.0294	0.005	0.00384	0.005	0.05	0.005

Tabela 42: Composição química dos aços (% em peso). Espessura 6.35 mm.

Os primeiros testes foram conduzidos no corpo de prova H e as condições de soldagem encontradas são apresentadas na tabela 44. Em seguida estas mesmas condições de soldagem

foram utilizadas para soldar o corpo de prova G, realizando-se 3 testes sendo que em nenhum deles conseguiu-se boas condições para a manutenção do *keyhole*. Foi observado que, ao iniciar a soldagem, a poça de fusão entrava em colapso e o corpo de prova era cortado.

Segundo a referência [2], a proteção gasosa da raiz do cordão de solda assume grande importância porque permite assegurar uma solidificação uniforme em materiais que apresentam uma elevada fluidez. Tomsic e Jackson [18], citam que as forças que suportam a poça fundida são a tensão superficial e a pressão do gás de purga. Em função destas afirmações foi utilizada uma vazão de 5 l/min de gás de purga, além de um ajuste das variáveis/parâmetros de soldagem apresentados na tabela 44.

Observou-se da tabela 42, que o carbono, o silício e o manganês por estarem presentes em níveis diferentes, provavelmente alteraram a fluidez e a tensão superficial da poça e que estes fatos determinaram comportamento totalmente diferentes para uma mesma condição de soldagem. A figura 42 apresenta o aspecto visual da junta soldada para o corpo de prova H.

A avaliação do efeito de diferenças na composição química do material de base, também foi avaliado em dois aços de espessura 2.0 mm, tabela 43.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
CP A	0.0383	-	0.314	0.0205	0.0117	0.0811	0.0216	0.0477
CP B	0.0169	-	0.338	0.0098	0.0075	0.0024	0.0104	0.0085
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn
CP A	0.0361	0.0614	0.0434	0.0132	0.00153	0.00530	0.0170	-
CP B	-	0.0476	0.0236	0.0036	0.00071	0.00013	-	-

Tabela 43: Composição química dos aços (% em peso). Espessura 2.0 mm.

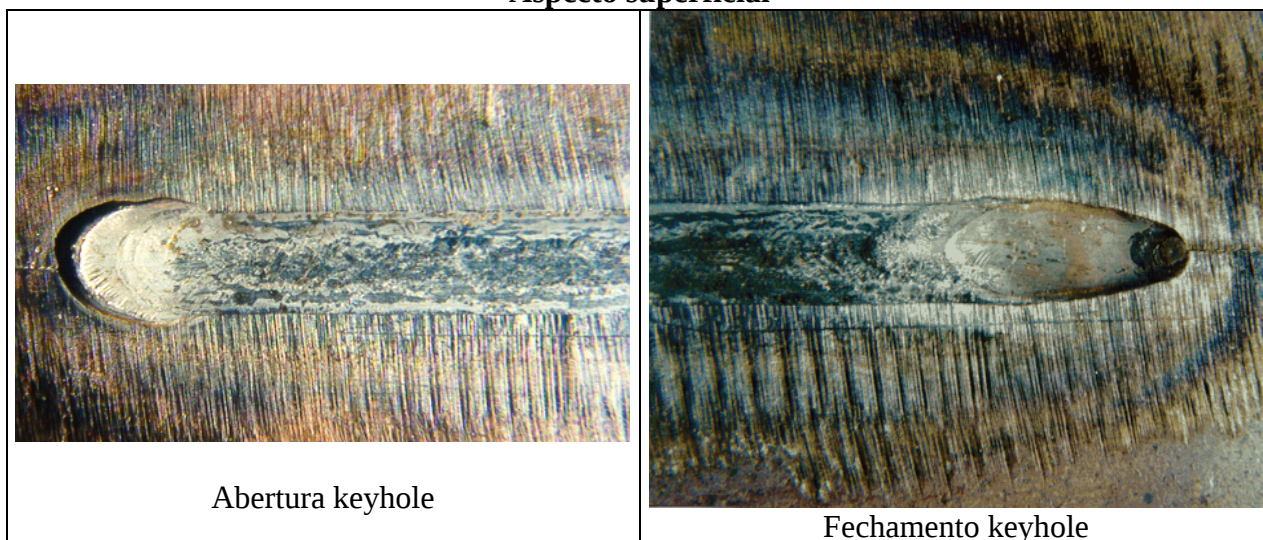
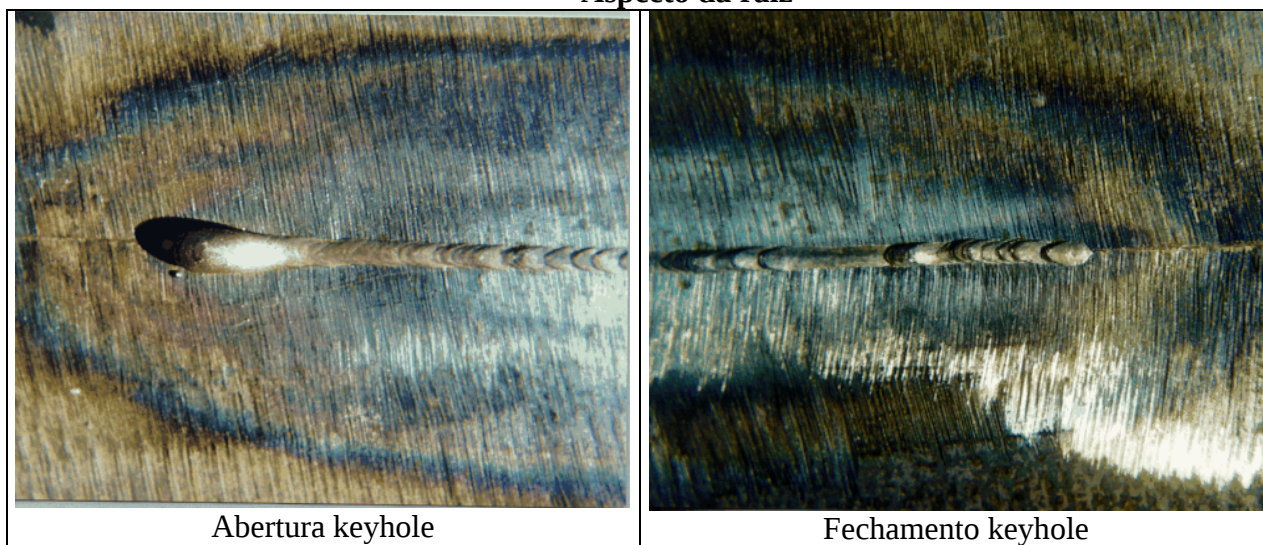
Aspecto superficial**Aspecto da raiz**

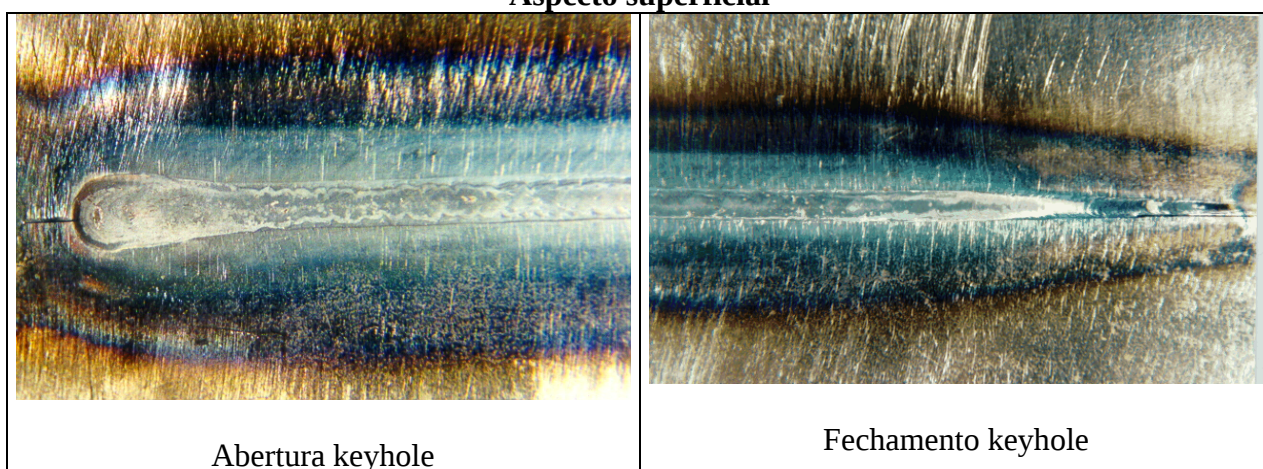
Figura 42: Aspecto visual da solda. Corpo de prova H, espessura 6.35 mm

Foram conduzidos testes no corpo de prova A, encontrando-se condições de soldagem que permitiram a obtenção e manutenção do *keyhole*. Os resultados são apresentados na tabela 44 e a figura 43, mostra o aspecto visual do cordão de solda..

Estas mesmas condições de soldagem são utilizadas para soldar o corpo de prova B e os resultados são porosidades localizadas na região de regime e protuberâncias de material na

região de fechamento, segundo mostra a figura 44. Analisando a composição química dos aços, observa-se uma diferença no teor de carbono, que de alguma forma influencia na fluidez e tensão superficial do material fundido o que explica a diferença na qualidade dos cordões de solda obtidos para as mesmas condições de soldagem.

Aspecto superficial



Aspecto da raiz

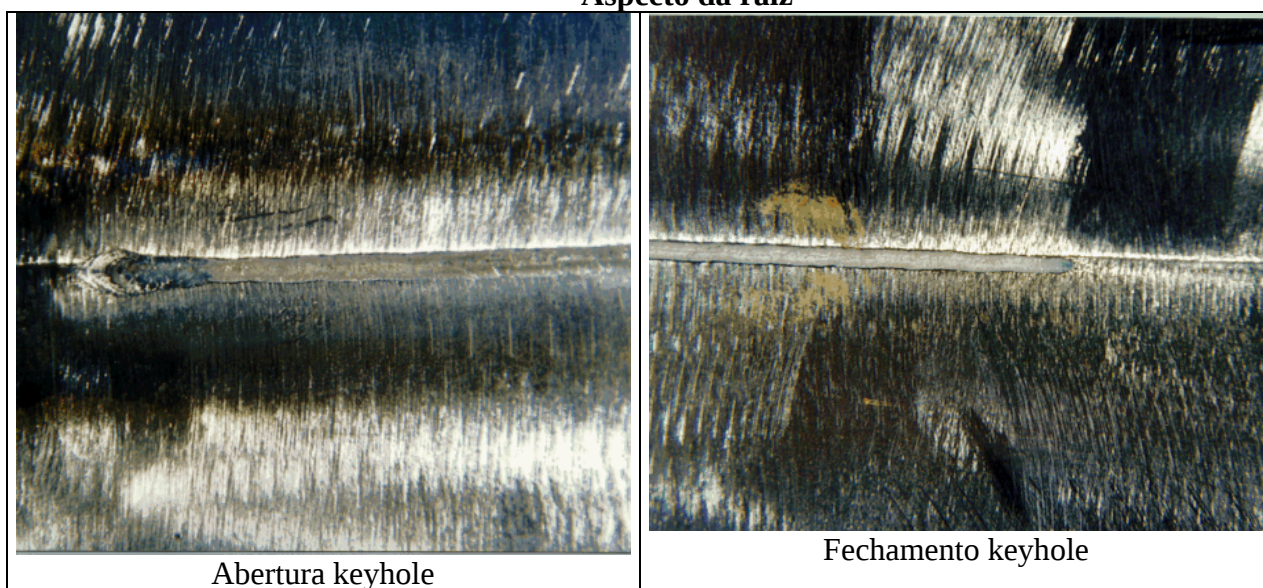


Figura 43: Aspecto visual da solda. Corpo de prova A, espessura 2.0 mm

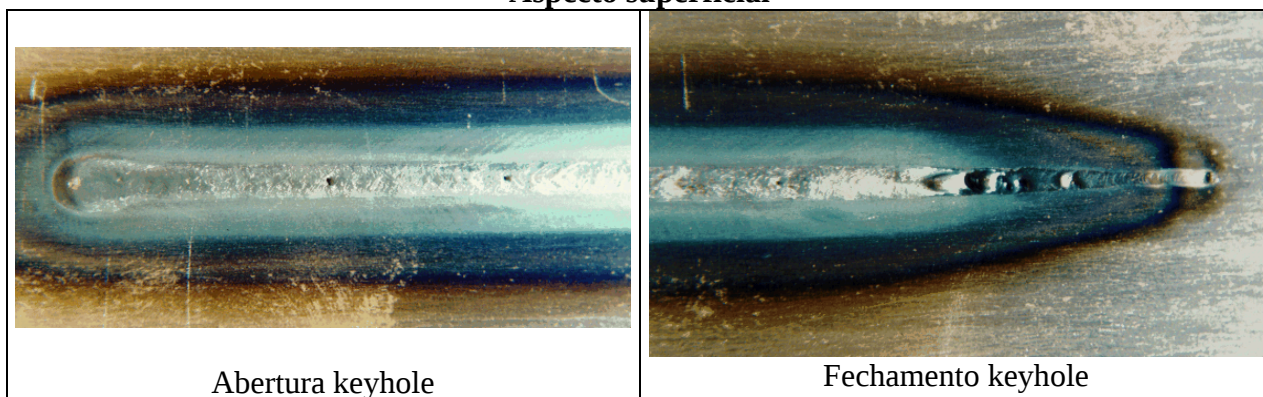
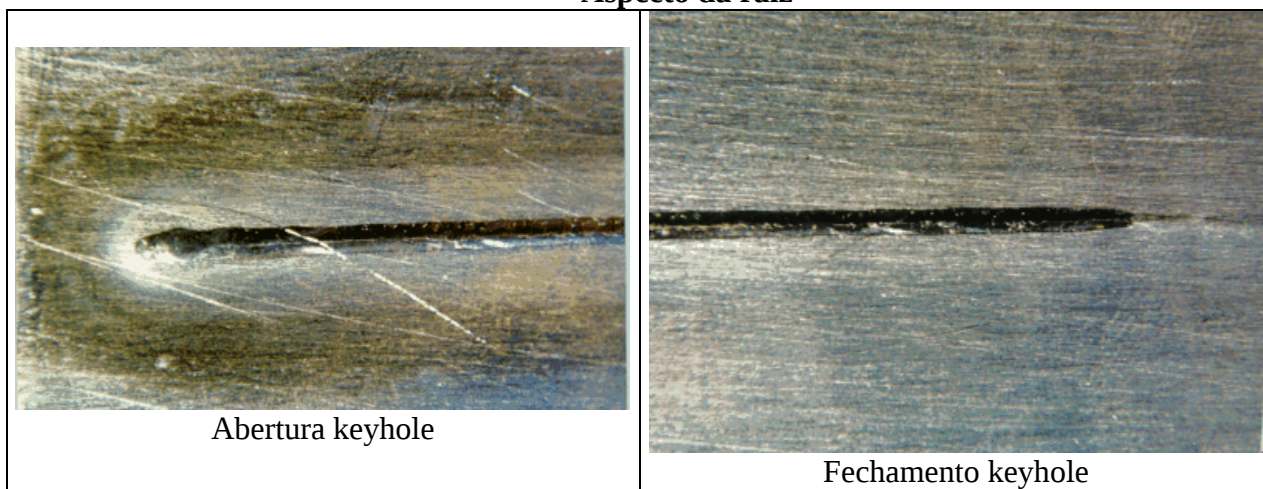
Aspecto superficial**Aspecto da raiz**

Figura 44: Aspecto visual da solda. Corpo de prova B, espessura 2.0 mm

Modulação de corrente: corrente contínua constante				
Variáveis de soldagem no regime		Corpo de prova H	Corpo de prova G	Corpo de prova A
Corrente de pulso	Ip(A)	230	210	75
Tempo de pulso	tp(s)	0.25	0.25	0.25
Corrente de base	Ib(A)	230	210	75
Tempo de base	tb(s)	0.25	0.25	0.25
Corrente média	Im(A)	230	210	75
Tensão	U(V)	37	31.0	28.8
Vazão de gás de plasma	VGP(l/min)	1.2	1.4	0.5
Vazão de gás de proteção	VGPr(l/min)	9	9	12
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	25	17	30
Variáveis de soldagem na abertura				
Corrente				
Corrente inicial	Ii(A)	20	0	0
Tempo de atuação	tiI(s)	2	0	0
Tempo de subida da rampa	tsI(s)	10	5	3
Gás plasma				
Vazão de gás inicial	ViGP(l/min)	0.5	0.5	0.25
Tempo de atuação	tiGP(s)	2	0	0
Tempo de subida da rampa	tsGP(s)	10	5	3
Deslocamento da tocha				
Tempo início do deslocamento	tiVs(s)	9.40	4.0	3.0
Tempo de subida da velocidade	tsVs(s)	0.5	0.0	0.0
Variáveis de soldagem no fechamento				
Corrente				
Tempo de descida da rampa	TdI(s)	10	10	8
Corrente final	If(A)	40	40	20
Defasagem da corrente	tdefI(s)	3	3	3
Gás plasma				
Tempo de descida da rampa	TdGP(s)	13	13	5
Vazão final de gás	VfGP(l/min)	0.25	0.5	0.25
defasagem vazão gás plasma	tdefGP(s)	0	0	0
Velocidade de soldagem				
Tempo de descida da rampa	tdVs(s)	14	14	12
Defasagem veloc. de soldagem	tdefVs(s)	1	1	1
Gás manutenção, arco piloto	Vgm(l/min)	0.25	0.5	0.25
Tempo de pre-gás	tpreG(s)	2.0	2.0	2.0
Tempo de pós-gás	tposG(s)	2.0	2.0	2.0
Vazão de gás de purga	VGpg(l/min)	-	5.0	5.0
Diâmetro do bocal constritor	d(mm)	2.8	3.2	1.6
Distância tocha-peça	DTP(mm)	4.0	4.0	3.5

Tabela 44: Condições de soldagem para avaliar o efeito da variação na composição química dos aços.

VI

CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a influência das variáveis de soldagem na abertura e fechamento do *keyhole*. O desenvolvimento de equipamentos e “software”, por parte de LABSOLDA, permitiram realizar o controle das condições de soldagem na abertura e fechamento, do *keyhole*.

Através desta pesquisa conclui-se que, para a situação de regime, as variáveis principais do processo de soldagem plasma *keyhole* compreendem a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem, a vazão de gás de plasma, o tempo de deslocamento da tocha e a composição química do material de base.

Com relação à abertura do *keyhole*, os melhores resultados foram obtidos para a combinação envolvendo uma vazão inicial de gás de plasma no nível mínimo ($V_{pi} = 0.25$ l/min) e as variáveis rampa de subida da corrente (tsI), rampa de subida da vazão de gás de plasma ($tsGP$), tempo de início de deslocamento da tocha ($tiVs$) em fase no instante em que o processo entra em regime.

Conclui-se que a variável tempo de retardo do deslocamento da tocha se constitui num fator crítico e está ligada diretamente com a repetibilidade dos resultados. Caso este parâmetro não esteja em fase com a corrente e vazão de gás de plasma, criam-se condições para o surgimento de falta ou de excesso de penetração, além de mordeduras em toda a extensão do cordão.

No que se refere ao fechamento do *keyhole*, uma análise estatística baseada na análise fatorial em dois níveis, permitiu identificar que as variáveis corrente final (I_f) e vazão de gás plasma final (V_{fGP}) exercem influência significativa sobre o fechamento do *keyhole*. Esta influência se dá tanto de forma isolada como combinada.

Definidos o comportamento das variáveis na abertura e fechamento, pôde-se observar a influência da velocidade de soldagem, corrente e vazão de gás de plasma sobre as condições geométricas do cordão de solda na condição de regime. A velocidade de soldagem afeta significativamente a largura da solda. A medida que a velocidade de soldagem aumenta, a largura da solda L e a largura da raiz L_r diminuem.

A corrente de soldagem apresenta um efeito marcante no comportamento da largura da solda e na largura da raiz.

Em relação à vazão de gás de plasma, variações de 0.1 l/min apresentaram um efeito na largura da solda e na velocidade de soldagem.

A vazão de gás de proteção não afeta significativamente a geometria do cordão, no entanto, percebe-se um efeito significativo nas discontinuidades superficiais caracterizadas pela formação de uma depressão ao longo de toda sua extensão, quando foi utilizada uma vazão de gás de proteção no nível mínimo, de 7.5 l/min.

A distância tocha-peça não afeta significativamente no reforço da raiz, no entanto, percebe-se um efeito significativo na largura do cordão e na largura da raiz.

Quando ocorre o defeito de mordedura somente em um lado da solda, ele pode ser provocado por o desalinhamento da tocha em relação à superfície da peça ou descentralização do eletrodo em relação ao orifício constritor.

A utilização da corrente contínua pulsada é limitada principalmente pela dificuldade em se estabelecer uma faixa de trabalho das variáveis, para manter o *keyhole* e a estabilidade da poça

de fusão. Esta característica é uma das grandes diferenças entre a corrente contínua constante e a corrente contínua pulsada.

Verificou-se um maior desgaste da ponta do eletrodo durante as operações em corrente contínua pulsada, em comparação à utilização da corrente contínua constante.

VII

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propiciu o esclarecimento relacionado com a abertura e fechamento do *keyhole*, permitindo, através de equipamentos e *software* desenvolvidos no LABSOLDA/UFSC estabelecer procedimentos que permitem produzir soldas isentas de descontinuidades. Desta forma, torna-se possível implementar, a nível industrial, o processo plasma pela técnica *keyhole*, não estando mais o mesmo limitado a uma pesquisa de laboratório. No entanto, há ainda muitos tópicos que necessitam de aprofundamento nas pesquisas, das quais podem ser citadas:

- a) Execução de soldas pela técnica *keyhole* com adição de arame;
- b) Aplicação da técnica *keyhole* em soldagens de tubos empregando-se corrente contínua pulsada;
- c) Realização de soldas analisando-se o efeito proporcionado pela utilização de diferentes gases de plasma e de proteção. A literatura cita que misturas de argônio e hidrogênio, como gás de plasma, produzem efeitos significativos na penetração da solda proporcionando também, maiores velocidades de soldagem;
- d) Implementar o programa PLASMACP para operar em corrente alternada para estabelecer procedimentos de soldagem de alumínio e suas ligas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Welding Handbook. AWS, v.2- Welding process, eighth edition, 1991.
- [2] - 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.
- [3] - PAULA JR. O.S. DE. Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica *keyhole*, Dissertação de mestrado, UFSC, Brasil 1997. 111p.
- [4] - MILLER, H. R. AND FILIPSKI, S. P. Automated Plasma Arc Welding for Aerospace and Cryogenic Fabrications. Welding Journal, v., n , p. 493s-501s. 1966.
- [5] - HOLKO, K. H. Plasma arc welding 21/4Cr-1Mo tubing. Welding Journal, v.57, n.5, p. 23s-31s, May 1973.
- [6] - PRIVOZNIK, L. J. AND MILLER, H. R. Evaluation of plasma arc welding for 120 in diameter rocket motor cases. Welding Journal, 717s-725s, 1966.
- [7] - RICHETTI, ANDRE. Aplicação do processo de soldagem por plasma pela técnica *keyhole* no passe de raiz de uma junta chanfrada, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 1998. 105p.
- [8] - CRAIG, E. The plasma arc process- a review. Welding Journal, v.68, n.2, p. 19-25, february 1988.
- [9] - KOU, S. Welding metallurgy. EUA: Wiley – Interscience Publication, 1987. Cap 1: Fusion welding processes. p. 3-21.
- [10] - Thermal Dynamics Corporation, West Lebanon. N. 0-2031: Instruction manual. Estados Unidos, 1994. 24p.

- [11] - LUCAS, W. TIG and Plasma welding. England: Abington Publishing, 1990. 112p
- [12] - LUNDIN, C. D., RUPRECH, W.J.(1974). Pulsed current plasma arc welding. Welding Journal, jan, p. 11-19, january 1974.
- [13] - DUTRA, J. C., MARQUEZE, C. M. Estudo do processo micro-plasma concernente à influência das variáveis sobre a geometria da solda. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 469-478, Águas de São Pedro – SP, 1993.
- [14] - ORLOWSKI DE GARCIA, J.A., LEITÃO Jr, A. C., BOCALLÃO, W. D. Soldagem do aço AISI 304_L para aplicações especiais. In: VII CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE SAE BRASIL, São Paulo, 1988.
- [15] - METCALFE, QUIGLEY. Keyhole stability in plasma arc welding. Welding Journal, p. 401s-404s, novembro 1975
- [16] - Manual de soldagem da Fonte INVERSAL 300. Laboratório de soldagem e Mecatrônica da UFSC. Primeira edição. Setembro 1995.
- [17] - DOUGLAS C. MONTGOMERY. Design and analysis of experiments. Arizona State University. Fourth edition, 1997.703p.
- [18] - TOMSIC, M. J. AND JACKSON, C. E. Energy distribution in Keyhole mode plasma arc welds. Welding Journal, p. 109s-115s, 1974.
- [19] – QUINTINO, L., GONÇALVES, V., ANTUNES, F. Automatização de soldadura de tubos pelo processo plasma-“Keyhole”. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 473-492, Rio de Janeiro-RJ, 1992.