

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**USO DE TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA PARA
DETECÇÃO DE DISCONTINUIDADES NO PROCESSO
GTAW ATRAVÉS DO MONITORAMENTO
DA POÇA DE FUSÃO.**

ANA MARÍA GUZMÁN PALACÍOS

**ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 33 A/10

BRASÍLIA/DF: MAIO - 2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**USO DE TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA PARA
DETECÇÃO DE DISCONTINUIDADES NO PROCESSO
GTAW ATRAVÉS DO MONITORAMENTO
DA POÇA DE FUSÃO**

ANA MARÍA GUZMÁN PALACIOS

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS APROVADA POR:**

**Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, Ph. D. (ENM- UnB)
(Orientador)**

**Prof. José Mauricio Santos Torres da Motta Ph. D. (ENM- UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos, Ph. D. (UENF)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 27 DE MAIO DE 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA

PALACIOS, ANA MARÍA GUZMÁN

Uso de técnicas de termografia para detecção de discontinuidades no processo GTAW através do monitoramento da poça de fusão. [Distrito Federal] 2010.

IX, 137p, 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2010). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica

- | | |
|--|------------------|
| 1. TIG | 2. Poça de fusão |
| 3. Imagens de infravermelho | 4. Humping |
| 5. Metodologia de Superfície de Resposta | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PALACIOS, A. M. G. (2010). Uso de técnicas de termografia para detecção de discontinuidades no processo GTAW através do monitoramento da poça de fusão. Publicação ENM.DM – 33A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana María Guzmán Palacios

TÍTULO: Uso de técnicas de termografia para detecção de discontinuidades no processo GTAW através do monitoramento da poça de fusão.

GRAU: Mestre ANO: 2010.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana María Guzmán Palacios
SQN 406 BLOCO A Apt 106
70.870-010 Brasília – DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus princípio e fim da existência.

Aos meus pais e irmãos, pela confiança, apoio e incentivo.

À Tia Gabby pela solidariedade neste caminho.

À minha querida amiga Sonia pelo o apoio e confiança.

Às maravilhosas pessoas que aqui conheci e que serão lembradas sempre com muito carinho entre eles Alfonso, Alejo B., Alejo P., Alvarito, Ana Ross, Arbey, Carlos, Chuchito, Clau, Clau8A, Cristiane-Ari, Cristiane Vasquez, Dani, Daniel F., Dieguito Fe, Dieguito M., Dustin Ferchito, Dianita-Jorgete, Geovannie, Gerardo, Ivan – Aleja, Janier, Jimmy, Jhon, Jones, Joyce, Juancho, Lili, Luis, Marcelo, Maria Cris- Manolito, Mariangeles, Oscar, Paola, Patitas, Ronald, Suelen, Valdir, Yesid, vovozinha Yesilda.

Ao Grupo de Automação e Controle-GRACO pelos ensinamentos, em especial ao prof. Sadek e prof. Llanos.

Aos técnicos de Laboratório Marronquinhos e Lucas Edson.

A Capes pelo apoio financeiro.

*“... Cuando conseguí arreglar al hombre di vuelta la hoja y vi que había arreglado el mundo.”
- Gabriel García Márquez*

RESUMO

USO DE TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA PARA DETECÇÃO DE DISCONTINUIDADES NO PROCESSO GTAW ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DA POÇA DE FUSÃO.

Autor: Ana María Guzmán Palacios.

Programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Maio de 2010.

No presente trabalho foi feita a implementação de um sistema de monitoramento usando uma câmera de infravermelho com a finalidade de detectar discontinuidades no cordão de solda, tais como, o *Humping* durante o processo de soldagem GTAW. Em base a trabalhos anteriores, se planejaram desenhos fatoriais considerando como parâmetros de entrada a corrente e velocidade de soldagem, numa faixa de 150-250 A e 2-10 mm/s, respectivamente. Os resultados confirmam que a técnica pode detectar mudanças na geometria da poça de fusão tornando-se um suporte experimental para estudos teóricos e uma ferramenta em processos em soldagem onde a temperatura e os gradientes térmicos têm efeito sobre a estrutura e propriedades dos materiais. A verificação do efeito das variáveis corrente e velocidade de soldagem sobre a geometria do cordão de solda permitiu desenvolver modelos matemáticos mediante a Metodologia de Superfície de Resposta. Os resultados obtidos mostram a viabilidade da obtenção de modelos matemáticos para prever o comportamento do processo dentro da região de trabalho. Além disso, as equações obtidas garantem um melhor entendimento físico dos fenômenos envolvidos nas alterações da distribuição de temperatura na poça de fusão durante a soldagem, para posteriormente sugerir ajustes nos parâmetros do processo e prevenir discontinuidades tipo “*Humping*” nos cordões de solda.

Palavras chaves: *Humping*, Imagens Infravermelho, poça de fusão, superfície de resposta.

ABSTRACT

USE OF TERMOGRAPHY TECHNIQUES FOR DETECTION OF DISCONTINUED IN THE GTAW PROCESS THROUGH THE MONITORING OF THE WELD POOL.

Author: Ana María Guzmán Palacios.

Master degree in Mechatronics Systems

Brasília, May 2010.

In the present work a monitoring system was implemented in welds using an infrared camera to detect the discontinuities in the weld bead, such as Humping during the GTAW welding process. Based on previous works, factorial designs were planned taking into account the current and welding speed, a range 150-250 A and 2-10mm/s respectively, as input parameters. The results confirm that the technique can detect changes in the geometry of the weld pool, (becoming) an experimental support for theoretical studies, and a tool in welding processes where the temperature and the temperature gradients have an effect on the structure and properties of materials. The verification of the effect of the variables on the geometry of the weld bead in GTAW process, allowed for the development of mathematical models using Response Surface Methodology. The results show the feasibility of obtaining mathematical models to predict the behavior of the process within the region of work. Moreover, the equations provide a better understanding of the physical phenomena involved in the alterations of temperature distribution in the weld pool during welding, to advise further adjustments in process parameters and to prevent discontinuities such as "Humping" in welding beads.

Keywords: Humping, infrared images, weld pool, surface response.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2 - JUSTIFICATIVA	2
1.3 - OBJETIVOS	3
1.3.1 - Objetivo Geral.....	3
1.3.2 - Objetivos Específicos	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - SOLDAGEM TIG	5
2.1.1 - Características do Processo TIG	5
2.1.2 – Equipamento.....	5
2.1.3 - Variáveis do processo	6
2.1.4 - Critério de qualidade da solda.....	6
2.2 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO <i>HUMPING</i> EM CORDÕES DE SOLDA	7
2.3 - A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO	10
2.3.1 - Detecção da poça de fusão.....	12
2.3.2 - Geometria da Poça de fusão.....	13
2.3.2.1 Efeito dos parâmetros de soldagem na estrutura dos grãos.....	18
2.4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PROCESSOS NA SOLDAGEM	19
2.4.1 - Predição de geometria do cordão de solda	19
2.4.2 - Análises de Superfície de Resposta	20
2.4.2.1 - Os Modelos Polinomiais aproximados à Resposta Real	20
2.4.2.2 – Estimação das respostas lineares dos fatores	21
3 - EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1 – EQUIPAMENTOS.....	23
3.1.1 - Fonte de soldagem.....	23
3.1.2 - Mesa Linear.....	24
3.1.3 - Sistema aquisição de dados	25

3.1.3.1 - Sistema de medição da tensão do arco de soldagem.....	25
3.1.3.2 - Sistema de medição da corrente do arco de soldagem.	26
3.1.4 - Sistema de Monitoramento de Infravermelho	26
3.2 – MATERIAIS E CONSUMÍVEIS.....	27
3.2.1 – Material Base.....	27
3.2.2 - Gás de proteção.....	27
3.2.3 - Tipo de Eletrodo	27
3.3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
4.1 – INTRODUÇÃO.....	33
4.2 - AJUSTE DAS VARIÁVEIS – INSPEÇÃO VISUAL.....	33
4.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOMETRICA DOS CORDÕES DE SOLDA	38
4.4 - MODELAMENTO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	42
4.4.1 - Penetração	42
4.4.2 - Largura do Cordão (L)	46
4.4.3 - Largura da ZTA	49
4.4.4 - Verificação experimental	51
4.4.5 – Discussão	53
4.5 – ANÁLISE ELÉTRICA – TENSÃO E CORRENTE DO ARCO	55
4.6 - PÓS-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE INFRAVERMELHO DA POÇA DE FUSÃO	61
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	83
5.1 – CONCLUSÕES.....	83
5.2 - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
APÊNDICE A	120
APÊNDICE B	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Características geométricas de um cordão de solda p – penetração, r - reforço, L - largura, A_f - área fundida.....	7
Figura 2.2 - Aspecto de uma solda com <i>Humping</i>	8
Figura 2.3 - Aspecto do movimento do material fundido conforme o avanço do arco (Paris, 1986). 8	
Figura 2.4- Esquemático da formação do <i>Humping</i> em GTAW.	9
Figura 2.5 - Imagem típica de infravermelho para um cordão de solda feito mediante o processo GTAW.....	12
Figura 2.6 – Fatores influenciando o formato da poça de fusão sob um arco de tungstênio com proteção gasosa.	14
Figura 2.7 - Aspecto da vista superior da poça de fusão de um processo a arco, incidente se deslocando a uma velocidade constante.	15
Figura 2.8 - Solidificação do metal de solda.	16
Figura 2.9 - Vista superior dos formatos da poça de fusão: (A) elíptico e (B) de gota.	16
Figura 2.10 - Gradientes térmicos da poça de fusão em função do formato.	17
Figura 2.11 – Gradiente térmico na poça de fusão para os dois formatos que a poça pode apresentar.	17
Figura 2.12 – Macroestrutura da solda de grãos colunares feitos com poça em (A) gota e (B) elíptica.	18
Figura 2.13 – Superfície de resposta para um modelo (a) linear e (b) quadrático.....	21
Figura 3.1 - Esquema bancada experimental	23
Figura 3.2 - Diagrama montagem da mesa linear (Franco, 2008).	24
Figura 3.3 - Placa de condicionamento do sinal de tensão do arco de soldagem.	25
Figura 3.4 - Sistema de visão infravermelho câmera Flir A40M para monitoramento da poça de fusão.	26
Figura 3.5 - Mapeamento do aparecimento de <i>Humping</i> em GTAW (Mendez, 1999).	29
Figura 3.6 - Algoritmo de pós-processamento das imagens de infravermelho acento número imagem gráfico polígono área cálculo	31
Figura 4.1 - (A) Gráfico de residuais, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a penetração da solda - modelo II.	45

Figura 4.2 - (A) Gráfico de resíduos, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a largura da solda.....	48
Figura 4.3 - (A) Gráfico de resíduos, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a largura da ZTA	50
Figura 4.4 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 150 A e velocidade 10 mm/s.....	57
Figura 4.5 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 200 A e velocidade 6 mm/s.....	58
Figura 4.6- Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 250 A e velocidade 2 mm/s de soldagem.....	59
Figura 4.7 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 250 A e 10 mm/s de velocidade de soldagem.	60
Figura 4.8 - Sequência de imagens de infravermelho para um cordão feito com 250 A de corrente e 2 mm/s de velocidade de soldagem aos: (A) 0 s, (B) 20 s, (C) 60 s e (D) 71 s respectivamente.	61
Figura 4.9 - Sequência de imagens de infravermelho para um cordão feito com 150 A de corrente e 10 mm/s de velocidade de soldagem aos: (a) 0 s, (b) 5.8 s, (c) 6.9 s e (d) 13.9 s respectivamente..	62
Figura 4.10 - Superfícies 3D para os cordões feitos com A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s e (D) 150 A – 10 mm/s (E) 195 A – 4mm/s e (F) 250 A -10 mm/s.	64
Figura 4.11 - Isotermas da poça de fusão para os diferentes cordões com: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 195 A – 8 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s e (F) 250 A – 10 mm/s depois do pós-processamento	65
Figura 4.12 – (A) Sequência dos perfis térmicos para um cordão com uma corrente de 200 A e uma velocidade 6 mm/s e as respectivas isotermas a (B) isoterma 1400 °C e (C) isoterma 727 °C	67
Figura 4.13 - (A) Sequência dos perfis térmicos para um cordão com uma corrente de 250 A e uma velocidade 10 mm/s e as respectivas isotermas a (B) isoterma 1400 °C e (C) isoterma 727 °C	69
Figura 4.14 - Resultados obtidos do pós-processamento da isoterma de 1400°C onde (A), (C), (D) correspondem ao cordão com parâmetros 200 A-6 mm/s e (B), (D), (F) correspondem ao cordão com parâmetros 250 A-10 mm/s.	71
Figura 4.15 - Resultados obtidos do pós-processamento da isoterma de 727°C onde (A), (C), (D) correspondem ao cordão com parâmetros 200A-6mm/s e (B), (D), (F) correspondem ao cordão com parâmetros 250A-10mm/s.	73
Figura 4.16 - Número de polígonos detectados ao longo do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K)202 A – 8mm/s para a isoterma 1400°C.	75

Figura 4.17 - Número de polígonos detectados ao longo do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 727°C. 76

Figura 4.18 - Gráfica da área vs. teor do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C. 77

Figura 4.19 – Histograma da área para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C. 78

Figura 4.20 - Comprimento eixo X e eixo Y para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: ((A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C (vermelho-eixo X; azul –eixo Y) 80

Figura 4.21 – Histograma, média e moda para o comprimento do eixo X da solda com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C 81

Figura 4.22 – Histograma, média e moda para o comprimento do eixo Y da solda com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (a) 150 A – 2 mm/s, (b) 200 A – 6 mm/s, (c) 250 A – 2 mm/s, (d) 150 A – 10 mm/s, (e) 200 A – 6 mm/s, (f) 250 A – 10 mm/s, (g) 195 A – 4 mm/s, (h) 195 A – 8 mm/s, (i) 205 A – 4 mm/s, (j) 198 A – 4 mm/s e (k) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C. 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Primeiro Planejamento Fatorial 2^2 para os parâmetros de soldagem fase inicial.	29
Tabela 3.2 - Valores dos parâmetros utilizados para soldagem pelo processo TIG.....	30
Tabela 4.1 – Condições utilizadas nos testes preliminares e resultados obtidos.	34
Tabela 4.2 - Planejamento fatorial 3^2 para estudar os efeitos da corrente e da velocidade de soldagem na região 200-210 A e 6-10 mm/s.....	36
Tabela 4.3 - Planejamento fatorial 2^2 para estudar os efeitos da corrente e da velocidade de soldagem na região 195-205 A e 4-8 mm/s.....	37
Tabela 4.4 - Medições da penetração, largura e fator de formação para os cordões com corrente de soldagem entre 150-250 A e velocidade de soldagem 2 -10 A.	39
Tabela 4.5 - Medições da penetração, largura e fator de formação para os cordões com corrente de soldagem entre 200-210 A e velocidade de soldagem 6 -8 mm/s.	40
Tabela 4.6 - Medição de penetração, largura e fator de formação para planejamento fatorial para região limitada por 195- 205 A e 2-8 mm/s.	41
Tabela 4.7 – Análise de variância para a penetração do cordão de solda (P1).....	43
Tabela 4.8 - Corridas adicionais para o plano de superfície de resposta.....	44
Tabela 4.9 - Análise de variância para a penetração do cordão de solda (PII).....	44
Tabela 4.10 - Análise da variância para a largura do cordão de solda (L).	49
Tabela 4.11 – Análise da variância para a largura do cordão de solda (L)	51
Tabela 4.12 - Condições de soldagem e penetração, largura e ZTA obtida nos testes de verificação.	52
Tabela 4.13 – Análise da penetração da solda utilizando modelo expressão 4.18.	53
Tabela 4.14 – Análise da largura da solda utilizando modelo expressão 4.11	53
Tabela 4. 15 – Análise da largura da ZTA da solda utilizando modelo expressão 4.12	53

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Ad – área depositada

A_f - área fundida

DF - graus de liberdade

F - Fator da Distribuição de Fisher.

f - Fator de forma

FPA – Focal Plane Array.

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding (Solda a eletro de tungstênio com proteção a gás)

GMAW - Gas metal arc welding.

I - Corrente de soldagem.

IR – Infravermelho.

l – largura.

MS - média quadrática.

p – penetração

P-nível - representa um índice de significância de um resultado.

R - velocidade de solidificação.

r – reforço.

SS - soma quadrática.

T - Tensão no Arco (V)

TIG - Tungsten Inert Gás (Solda a eletrodo de Tungstênio)

v - Velocidade de soldagem (mm/s)

ZTA - largura da zona termicamente afetada

η - Eficiência térmica do processo de soldagem.

Φ – ângulo vetor velocidade de soldagem.

1 - INTRODUÇÃO

Um dos processos de manufatura mais utilizados na indústria é a soldagem. Ela participa da montagem de peças e conjuntos, além da recuperação de superfícies nos diversos segmentos industriais. Para se garantir a qualidade do processo, existem métodos como inspeções visuais, ensaios não-destrutivos (ultra-som, partículas magnéticas, líquido penetrante) e também ensaios destrutivos: tração, dureza, metalografia. As inspeções e os ensaios são feitos após o processo de soldagem, e, dependendo da aplicação do produto, são feitas em todas as peças ao longo de toda a superfície soldada.

A qualidade da solda produzida dependerá principalmente da posição e tamanho da poça de fusão. Um primeiro parâmetro de controle encontra-se relacionado na garantia correta do posicionamento da tocha que assegura a posição central da poça de fusão localizada na linha central da junta. Um segundo parâmetro, relaciona-se com a profundidade de penetração e a largura do cordão de solda, que finalmente determinam a resistência da solda produzida. É assim que o sistema de soldagem tem que incorporar um controle rigoroso destas características da poça de fusão para produzir soldas de alta qualidade.

Pesquisas feitas anteriormente (Bzymek A., 2008; Huang, 2007; Venkatraman, 2006; Al-Karaw, 2004; Camilleri, 2004; Plotnikov, 2004; Farson, 2001; Chin, 1992; Nagarajan, 1992; Sicard, 1988; Wikle, 1998), mostram como os sensores de infravermelho utilizados em processos de soldagem por fusão permitem a detecção de mudanças localizadas pela radiação na superfície, sem necessidade de serem correlacionados com a temperatura do metal. As diferenças entre a emissividade do metal líquido e o sólido, se observam nas imagens de infravermelho através das descontinuidades na intensidade, sendo esta sua principal característica considerando a natureza térmica do processo.

No presente estudo, foi implementado um sistema de visão de infravermelho tendo como objetivo determinar a influência da corrente e velocidade de soldagem na qualidade da solda. Uma seleção adequada destas variáveis de entrada e as análises das respostas, permitem uma modelagem dos parâmetros de qualidade como são a penetração, a largura do cordão e a largura da zona termicamente afetada.

1.1 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Em muitos casos, principalmente na fabricação de produtos em larga escala, a velocidade de soldagem acaba sendo mesmo o fator determinante de qualidade e produtividade. Nesse ponto, o processo TIG é considerado tradicionalmente de baixa velocidade de soldagem, devido aos problemas que ocorrem quando se tenta utilizar correntes e velocidades de soldagem elevadas.

Numa faixa inicial de intensidade de correntes, é possível aumentar a velocidade de soldagem de maneira quase proporcional ao aumento da corrente de soldagem.

Para produzir um cordão de solda com uma determinada área fundida, basta apenas ajustar a quantidade de energia por unidade de comprimento por meio do balanço entre intensidade de corrente e velocidade de soldagem. Porém, quando são utilizadas correntes de soldagem maiores, o comportamento da poça de fusão muda, gerando um cordão descontínuo. Essas descontinuidades, comumente são caracterizadas por uma série de regiões de crateras, e regiões de protuberâncias, de maneira alternada, é chamado por alguns autores de descontinuidades em forma de “costas de dragão”, e é denominado *Humping*.

Assim, a falta de continuidade do cordão é o principal problema que restringe o uso do processo TIG em situações de elevada velocidade de soldagem, fazendo com que o processo seja considerado também como de baixa produtividade.

No processo TIG autógeno, a concentração de energia na poça de fusão acaba sendo maior, modificando as características de tensão superficial e viscosidade, e tornando a poça de fusão mais suscetível aos fatores que contribuem para a formação dos descontinuidades, os quais serão abordados na seqüência deste texto.

1.2 - JUSTIFICATIVA

A inspeção de descontinuidades a partir do monitoramento da poça de fusão no GTAW mediante uma câmera de infravermelho, se espera que permita uma visão detalhada das

mudanças que acontecem na poça de fusão quando se produz o *Humping*, fenômeno investigado no presente estudo.

Outra justificativa do presente trabalho é estudar a viabilidade de implantar um sistema não-destrutivo de monitoração de descontinuidades de soldagem *on-line* com a localização das regiões com maior probabilidade de apresentar descontinuidades e desta forma diminuir os efeitos sobre a estrutura e propriedades dos materiais e os custos nos processos de fabricação que usam a soldagem como processo de junção.

1.3 - OBJETIVOS

1.3.1 - Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento infravermelho da poça de fusão no processo GTAW, com a finalidade de detectar e localizar as descontinuidades nos cordões elaborados.

1.3.2 - Objetivos Específicos

Desenvolver uma ferramenta software para o *pós*-processamento e posterior análise das imagens de infravermelho obtidas, visando a detecção e localização de mudanças na poça de fusão.

Estudo do processo de otimização da qualidade nos cordões soldados empregando ferramentas estatísticas.

Estudar as relações entre parâmetros de qualidade e variáveis quantificáveis, tais como a tensão, corrente e geometria da poça de fusão.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a fundamentação necessária para o desenvolvimento deste trabalho abordando três temas principais. O primeiro tema trata-se da soldagem, especialmente da soldagem GTAW e algumas considerações das variáveis envolvidas, assim como o

equipamento a ser utilizado. O segundo trata-se da termografia de infravermelho e enfoca-se nos fenômenos de fusão e solidificação na poça de fusão. O último tema mostra como o processo de soldagem pode ser modelado empregando a metodologia de Superfície de Resposta.

O capítulo 3 apresenta a metodologia usada para a elaboração do presente trabalho e descreve os diferentes equipamentos utilizados na soldagem.

O capítulo 4 mostra os resultados e as discussões obtidas no trabalho. Primeiro examinam-se os cordões obtidos a partir da inspeção visual dos cordões feitos, definindo a região de estudo. Depois mostram-se os resultados do pós-processamento feito as imagens de infravermelho destacando a informação que não é oferecida no monitoramento convencional e que permitem a detecção de mudanças na poça de fusão. Posteriormente a informação obtida da geometria do cordão é analisada para a implementação de modelos matemáticos da penetração, largura e largura da ZTA empregando a Metodologia de Superfície de Resposta. Por último apresentam-se as conclusões e os trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - SOLDAGEM TIG

A Soldagem TIG - *Tungsten Inert Gas*, é um processo de soldagem a arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de fusão com proteção gasosa. O processo também é conhecido como *Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW. Surgiu da necessidade de garantir um processo eficiente de soldagem para materiais de baixa soldabilidade, como o alumínio e magnésio, principalmente na indústria aeroespacial e de aviação. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo baixo custo, de uso em aplicações diversas (Levine, 1988).

2.1.1 - Características do Processo TIG

A soldagem TIG suplantou a soldagem oxi-combustível, brasagem e a soldagem com eletrodo revestido, por características tais como: não requer fundente, produzindo juntas resistentes com excelente resistência à corrosão, e boa aparência, o eletrodo de tungstênio fornece um arco que aquece o metal base a fim de formar uma poça de solda e, então o metal de adição pode ser adicionado ou não, conforme a necessidade (Jorge, 2008).

As densidades de corrente são muito menores do que as densidades de soldagem MIG e a eficiência do arco é mais baixa, entretanto o processo consegue produzir soldas perfeitas e limpas, com um bom controle sobre o perfil e altura do reforço do cordão (Figueiredo, 2005).

Às vezes o processo é automatizado, podendo utilizar ou não metal de adição. A Soldagem TIG é indicada para espessuras de metal menores que 9,5 mm de espessura, mas pode ser usado para espessuras maiores se for necessário.

2.1.2 – Equipamento

Os equipamentos para soldagem manual são basicamente:

- Tocha de soldagem com o eletrodo de tungstênio;
- Fonte de energia.
- Gás de proteção: Argônio ou Hélio ou a mistura dos dois.

2.1.3 - Variáveis do processo

Durante a soldagem, um soldador, ou operador, controla um determinado número de fatores que podem afetar o formato final do cordão, suas condições gerais de operação e outras características da solda. Por exemplo, na soldagem manual com eletrodos revestidos, o soldador pode alterar a velocidade de deslocamento ao longo da junta, o movimento transversal de tecimento, o comprimento do arco, e conseqüentemente, a tensão de operação, em menor escala, e a corrente de soldagem. Pode ainda, variar o ângulo do eletrodo com a peça. Todos estes fatores afetam o formato da poça de fusão, a sua penetração no metal de base, a posição da escória em relação à poça de fusão e a estabilidade do processo (Labotest, 2006).

Um soldador bem treinado procura, intuitivamente, ajustar estes fatores de forma a manter o processo operando corretamente. Adicionalmente, diversos outros fatores, como o tipo de eletrodo, o seu diâmetro, o tipo e nível de corrente, etc., precisam ser selecionados antes da soldagem (Modenesi, 2009). As principais variáveis operatórias da soldagem TIG são o comprimento do arco, a corrente e a velocidade de soldagem e a vazão de gás de proteção. Outras variáveis operatórias na soldagem TIG, com influência secundária, dentro de certos limites, são os ângulos da ponta do eletrodo, as distâncias do bocal à peça, os tempos de pré e pós-purga de gás (Franco, 2008). A determinação dos parâmetros de soldagem é feita em função do material a ser soldado, a espessura das peças, a posição de soldagem e os equipamentos disponíveis, bem como a decisão de uso ou não de metal de adição (Zeemann A., Almeida D., Domingues G. and Pereira da Costa U., 2005).

2.1.4 - Critério de qualidade da solda

A configuração do cordão final é crucial na definição de qualidade da solda. Os parâmetros básicos que determinam uma solda aceitável incluem penetração, largura do cordão, altura do cordão na área da secção transversal (Limma, 2005) (Figura 2.1). Dependendo do tipo de

junta estes parâmetros podem ser especificamente diferentes. A idéia é manter uma adequada fusão a expensas de variação da energia de entrada e da dissipação de calor.

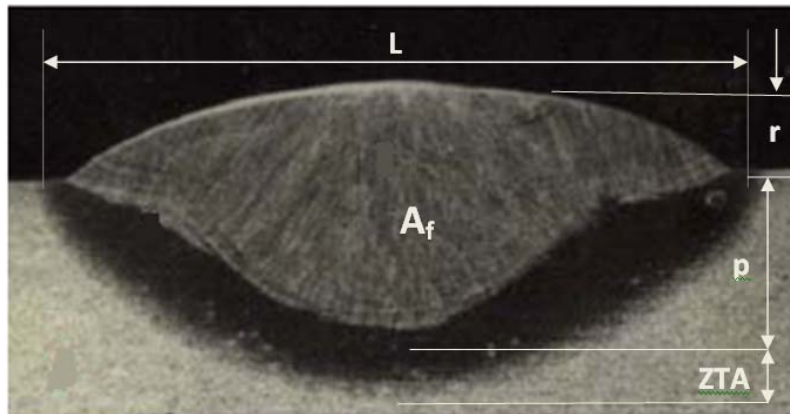


Figura 2.1 - Características geométricas de um cordão de solda p – penetração, r - reforço, L - largura, A_f - área fundida.

A qualidade da solda também depende das características metalúrgicas, incluindo parâmetros como dureza, resistência e tensões residuais. Estas características são dificilmente medidas on-line e também são resultados de um número de complexos fatores. Além disto, todas dependem da energia e do calor subministrado no processo de solda. É assim como para obter propriedades metalúrgicas satisfatórias se controlam os eventos térmicos que tomam lugar durante o processo (Machado, 2000).

Estes eventos térmicos podem ser quantificados usando critérios tais como: temperatura pico no metal, distribuição de temperatura e taxas de resfriamento do metal. A medição destes parâmetros on-line reflete o comportamento do processo. A temperatura pico indica o ponto no qual o material se funde e qual temperatura deve ser alcançada para garantir boa fusão. A distribuição de temperatura indica como o calor está sendo dissipado na peça de trabalho, é importante para manter a distribuição de temperatura uniforme centrada na junta. Finalmente, as taxas de resfriamento são responsáveis em grande parte pelas propriedades metalúrgicas do cordão de solda (Machado, 2000).

2.2 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO *HUMPING* EM CORDÕES DE SOLDA

A poça de fusão a altas correntes vira uma película fina líquida. Esta característica facilita a formação do *Humping* (Eagar, 2003). Este se encontra associado a uma série regular de

saliências (elevações) no cordão de solda, Figura 2.2, ocorre sob certas condições de corrente, tensão, tipo de gás de proteção usado e o ângulo da ponta do eletrodo (Paris, 1986; Eagar, 2003). Estas condições influenciam a velocidade de trabalho.



Figura 2.2 - Aspecto de uma solda com *Humping*.

Na soldagem a arco, é bem sabido que aumentando a velocidade de soldagem além de certo limite crítico, resulta em deterioração do cordão de solda na forma de mordeduras e corcovas. A ocorrência destas discontinuidades está intimamente associada ao modo com que o metal fundido flui atrás do arco para formar o cordão de solda. A principal razão para as discontinuidades é o intervalo de tempo entre a goivagem* de um canal sobre a chapa pelo arco e o enchimento deste canal com metal fundido (Mendez, 1999).

Sob as condições de soldagem que produzem discontinuidades na solda, o metal fundido debaixo do arco é forçado a mover-se em direção ao fundo da poça e uma superfície goivada sólida aparece sob o arco, conforme está esquematizado na Figura 2.3. Como o arco move-se na frente, as discontinuidades não ocorrem se o metal fundido no fundo da poça flui adiante e enche totalmente a região goivada.

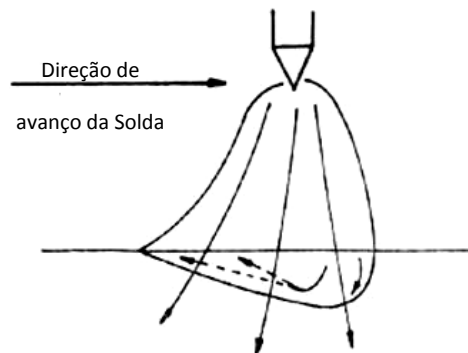


Figura 2.3 - Aspecto do movimento do material fundido conforme o avanço do arco (Paris, 1986).

Reciprocamente, a solidificação rápida do metal fundido no fundo da poça ou enchimento imperfeito do metal fundido resulta na formação de descontinuidades. As propriedades da superfície goivada são fatores importantes na formação de descontinuidades (Mendez, 1999).

Na Figura 2.4 ilustra-se as mudanças que acontecem na poça de fusão quando se produz o *Humping*. Na Figura 2.4 (A) ilustra-se a poça de fusão. Nesta cria-se uma fina capa de material fundido que alimenta a região que fica por detrás do arco. Esta região por detrás do arco é alimentada mediante dois canais de metal líquido cada um dos quais circundam a poça de fusão com uma borda de material fundido na medida em que se forma o cordão.

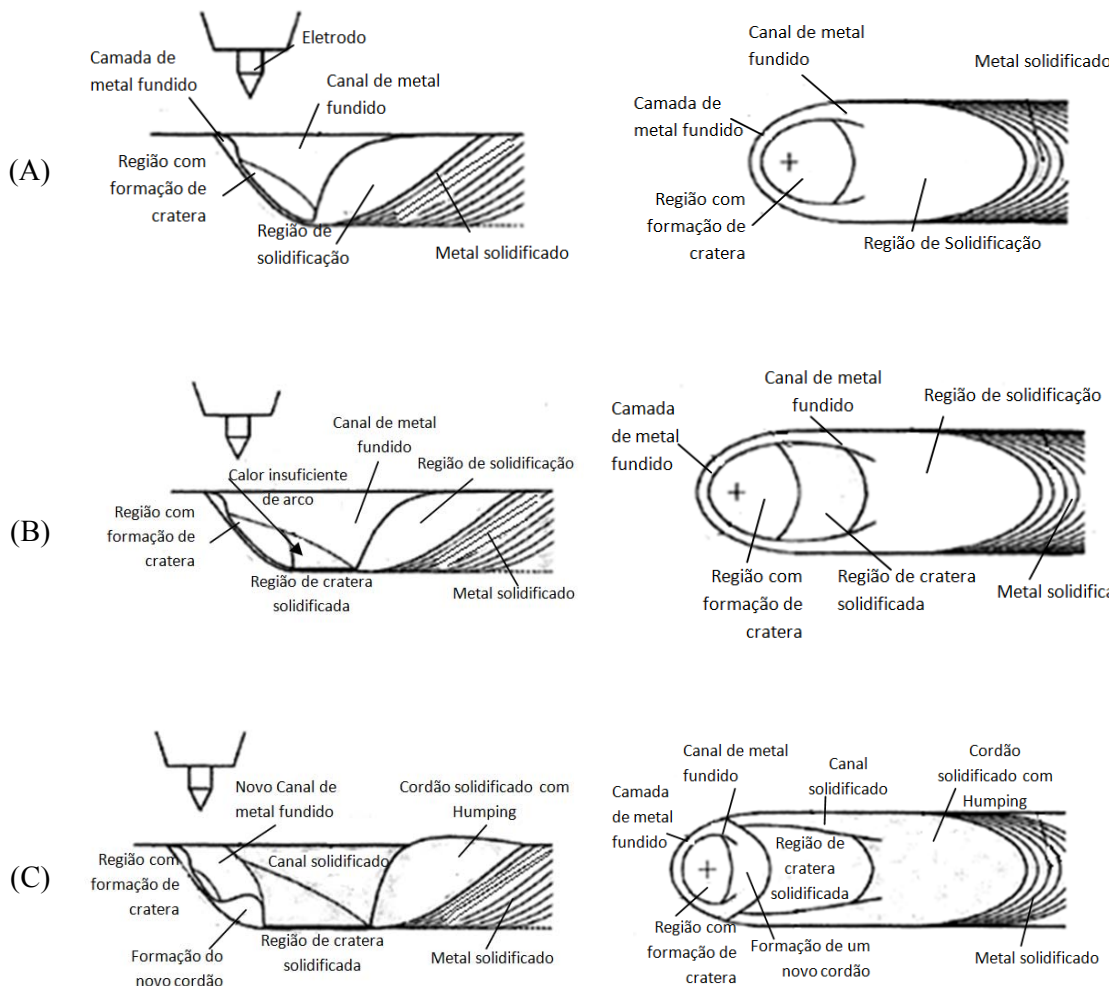


Figura 2.4- Esquemático da formação do *Humping* em GTAW.

Na Figura 2.4(B) a fina capa de material fundido começa a ficar longe do cordão previamente formado. Esta zona mais distante do arco não recebe calor suficiente e esfria-se instantaneamente. A Figura 2.4(C) mostra a evolução da poça, os canais começam a se fechar produzindo uma descontinuidade no cordão (Mendez, 1999).

A literatura cita dois fatores como sendo os principais causadores do movimento do metal fundido e o aparecimento de superfícies goivadas. Primeiramente, a corcova é mantida pela criação de pressões internas distintas em partes diferentes da zona fundida devido à tensão superficial (Cho, 2006). Esta tensão superficial tem uma influência sobre o formato do cordão, devido o fato dos metais líquidos terem uma energia superficial mais alta do que qualquer líquido conhecido e controlam o “molhamento” na borda externa da poça (Mendez, 1999) (Cho, 2006). A outra razão para o aparecimento das superfícies goivadas é a pressão do arco, a qual atua sobre o metal fundido na frente da poça (Modenesi, 2009). Em geral, isto é considerado ser o maior fator responsável para o movimento do metal fundido. Um fluxo supercrítico foi proposto como um fator adicional que pode afetar o movimento do metal fundido (Paris, 1986).

Quando a espessura do metal fundido na frente da poça é reduzida a um valor crítico pela pressão do arco, a taxa de fluxo do metal fundido é acelerada pelo fenômeno do fluxo super crítico e o líquido tende a acumular-se em algum ponto sobre o caminho do fluxo (Choi, 2006). É de interessante notar que aumentando a velocidade de soldagem diminui-se o tempo de soldagem e aumenta-se a eficiência de fusão. A maior parte do calor é usada para formar a gota fundida e uma proporção menor é usada para elevar a temperatura nos arredores do metal-base. Com isto produz-se uma solda de secção transversal maior e o aumento da penetração quando comparada a uma solda mais lenta feita com a mesma energia de soldagem imposta (Paris, 1986).

2.3 - A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO

A Termografia de Infravermelho é a técnica de produzir uma imagem visível através da luz infravermelho invisível (para o olho humano) emitida por objetos de acordo com sua condição térmica. Sua origem surge nos princípios do século XIX pelos experimentos de W. Herschel (1738-1822), porém foi originada depois da década dos anos 60 - século XX, quando W. Herschel tentou aplicar a medida da transferência de calor (Gonzales, 2006).

Os mecanismos de transferência de calor de condução, radiação e convecção são afetados pelas características dos materiais (tais como o calor específico, densidade, condutividade térmica, coeficiente de convecção, emissividade) e a inspeção térmica depende das variações locais das mencionadas características para estabelecer uma diferença de temperatura de fácil medição (Plotnikov, 2004). Por esta razão é preciso conhecer o máximo possível dos mecanismos de transferência de calor para poder obter maior sensibilidade na análise de imagens térmicas.

Nos anos 30, o Rosenthal difundiu as bases para o tratamento analítico da distribuição de calor durante a soldagem. Através de suas soluções analíticas do fluxo de calor, foi possível pela primeira vez, analisar o processo a partir de considerações dos parâmetros de soldagem tais como a corrente, tensão, velocidade de soldagem, e a geometria da solda. Rosenthal assume um estado quase estacionário justificado experimentalmente quando o comprimento da solda é longo comparado com a extensão do calor (Kou, 2003).

A partir do trabalho pioneiro do Rosenthal, o interesse nos aspectos térmicos de soldagem expressos por pesquisadores, evidenciaram numerosas publicações. Estas podem ser classificadas em três categorias. A primeira aborda o trabalho analítico e experimental; a segunda está relacionada com os métodos numéricos tais como métodos finitos diferenciais e métodos de elementos finitos e a terceira baseia-se no efeito das propriedades térmicas as variações de temperaturas sobre a distribuição da temperatura na chapa soldada (Komanduri et al, 2000) (Al-Karaw, 2004).

Baseado na análise da distribuição da temperatura durante soldagem, Rosenthal chega a importantes conclusões (1) o aumento da temperatura na frente da fonte de calor é maior na frente de fusão do que na superfície de solidificação (2) o ciclo de aquecimento é mais rápido que o ciclo de esfriamento em um dado intervalo de tempo, (3) os incrementos da intensidade de corrente aumentam a largura da zona termicamente afetada sem mudanças na forma das isotermas (4) a velocidade de soldagem afeta a formação geométrica das isotermas, (5) uma alta velocidade de soldagem alonga as isotermas e finalmente (6) para uma maior difusividade térmica do material base, mais circular é a forma das isotermas (Komanduri et al, 2000).

2.3.1 - Detecção da poça de fusão

Pesquisas em métodos de sensoriamento de soldagem robótica a arco foram dirigidas à detecção da geometria da junta, geometria e localização da poça de fusão mediante imagens de infravermelho (Bicknell, 1994; Choi, 2006; Plotnikov, 2004; Levine, 1988), um exemplo deste tipo de imagens apresenta-se na Figura 2.5.

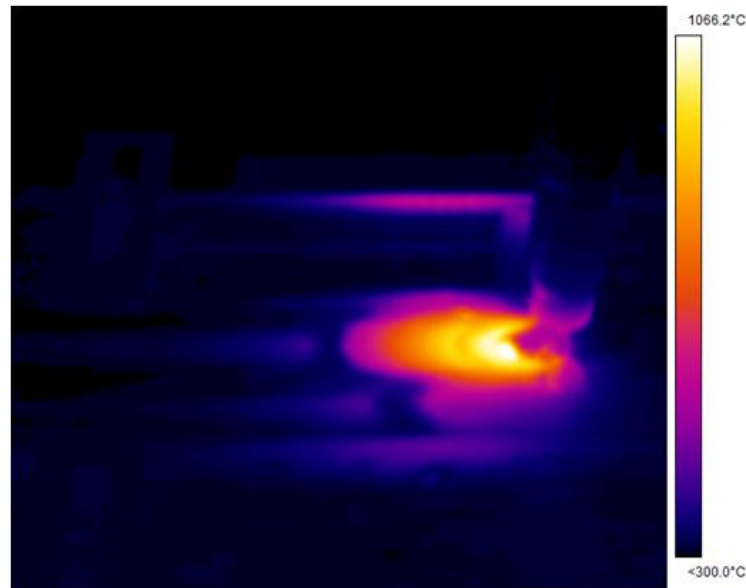


Figura 2.5 - Imagem típica de infravermelho para um cordão de solda feito mediante o processo GTAW.

A forma tridimensional da poça determina as dimensões do cordão. Características geométricas como a penetração não podem ser medidas diretamente, mas a largura, geometria e a área da poça de fusão podem ser detectadas para estimar as dimensões do cordão final. Uma apropriada localização da posição da tocha garante a localização da poça de fusão na linha central da junta.

Para efeitos de detecção da poça de fusão, esta é monitorada mediante sensores óticos, tais como fotodiodos ou arranjo de dispositivos de carga acoplada (CCD) com resposta no infravermelho próximo. Porém a intensa radiação emitida pelo arco causa interferência nas observações da poça, mas utilizando a visão infravermelha constitui-se uma ferramenta para os estudos da poça de fusão nos processo de soldagem por fusão sem interferência (Levine, 1988).

O detector de infravermelho, monitora mudanças na radiação da superfície sem necessariamente correlacionar com a temperatura do metal, existindo uma diferença entre a emissividade do metal líquido e do sólido, manifestado nas discontinuidades na intensidade (Al-Karaw, 2004). A vantagem principal de usar sensores de infravermelho no lugar de arranjos CCD é eliminar a interferência do arco.

A análise da emissão de radiação infravermelha pela poça de fusão foi estudada, usando termografia de infravermelho, detectando variações na geometria da junta e na penetração (Venkatraman, 2006; Camilleri, 2004). Assimetrias na distribuição de temperatura das imagens obtidas indicam que a poça de fusão não está apropriadamente centrada. Usando esta informação pode se controlar a posição lateral da tocha.

Um completo conhecimento da distribuição da temperatura pode ser usado como referência na aplicação de modelos matemáticos para o controle dos processos de soldagem (Al-Karaw, 2004).

2.3.2 - Geometria da Poça de fusão

Durante a soldagem por fusão, a interação entre o metal base e a fonte de calor gera rápidas mudanças na fusão e uma vigorosa circulação do metal fundido. Na poça de fusão esta circulação de material fundido está controlada pela tensão superficial e por forças eletromagnéticas. A transferência de calor e o fluxo de fluido têm efeito na distribuição de temperatura no metal base, na forma, no tamanho da poça de fusão, no processo de solidificação, na velocidade de esfriamento, nas cinéticas de transformação no material base e na zona termicamente afetada (Vedia, 2004).

A figura 2.6, mostra alguns fatores básicos para a formação da poça de fusão sob um arco de tungstênio com proteção gasosa (processo de soldagem GTAW), assim como a intensidade e distribuição da energia imposta pelo arco, fluxo de metal dentro da poça fundida, fluxo de calor, fenômeno de capilaridade e o ângulo da ponta do eletrodo entre outros fatores, precisam ser considerados (Paris, 1986).

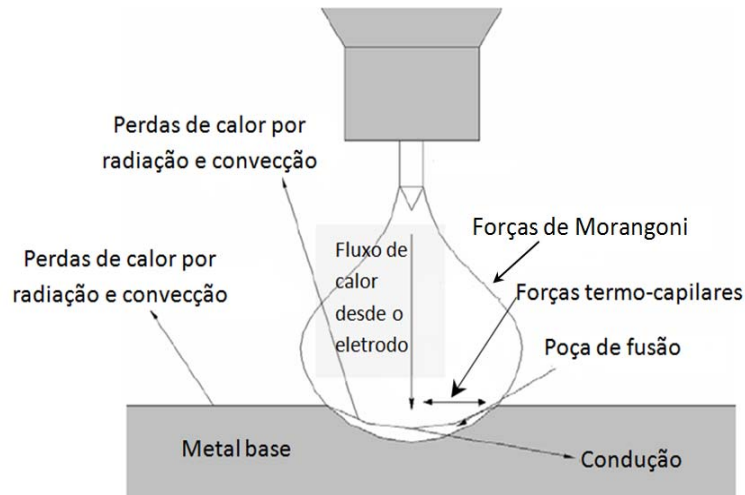


Figura 2.6 – Fatores influenciando o formato da poça de fusão sob um arco de tungstênio com proteção gasosa.

A solidificação no metal base está influenciada pela composição química do sistema, pela geometria da poça de fusão e pelas condições térmicas. Adicionalmente existem outros fatores que afetam a solidificação como a presença de impurezas na poça de fusão, a existência de turbulência na poça, o volume de metal líquido pequeno em comparação ao metal base e a existência de gradientes de térmicos no material base-fase sólida G_S , na poça de fusão-fase líquida G_L , na interfase sólido/líquido de grande importância na subestrutura da zona de fusão. Dos gradientes mencionados, G_L está relacionado com os fenômenos de convecção na poça de fusão. Em condições normais $G_L > 0$, mas para líquidos termicamente sobre esfriados $G_L < 0$.

As variações na velocidade de solidificação ao movimentar da linha de fusão até a linha central do cordão, provocam mudanças progressivas na subestrutura de solidificação ao cruzar o cordão de solda.

A figura 2.7 mostra o aspecto da vista superior da poça de fusão. Se os parâmetros de soldagem permanecem constantes, esta forma da poça permanece invariável durante a duração da operação. As diferentes curvas em torno da poça de fusão representam as isotermais. A fusão ocorre segundo a frente ABC e a solidificação segundo a superfície CDEA. Para que esta ocorra, é necessário que o calor fornecido pelo arco seja dissipado.

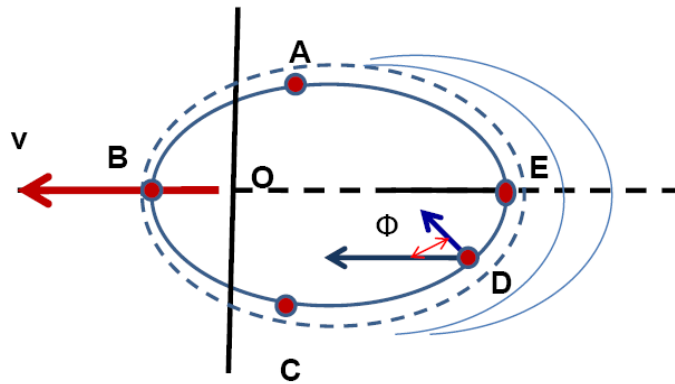


Figura 2.7 - Aspecto da vista superior da poça de fusão de um processo a arco, incidente se deslocando a uma velocidade constante.

A extração de calor da poça será facilitada nos locais onde o gradiente térmico for elevado. Nos pontos A e C, pela proximidade ao arco, o gradiente térmico é mais elevado sendo mínimo no ponto E, pela distância maior à fonte de calor. Assim, a dissipação de calor é mais lenta no ponto E.

A velocidade de solidificação R é máxima na direção perpendicular às curvas isotermas de dissipação de calor, ou seja, na direção paralela ao gradiente máximo de temperatura (Figura 2.8). Representando a velocidade de solidificação pelo vetor R Normal às isotermas da figura, tem-se que

$$R = v \cdot \cos\phi \quad (2.1)$$

Sendo v o vetor velocidade de soldagem e ϕ o ângulo, a cada ponto da isoterma, entre a direção de soldagem e a normal à isoterma. Assim, o vetor R será máximo $R=v$ para $\phi = 0$, ponto E, eixo do cordão e o vetor R será nulo para $\phi=90^\circ$, ou seja, nos pontos A e C. Infelizmente, no ponto de máxima velocidade de solidificação (ponto E) a taxa de dissipação de calor não é elevada.

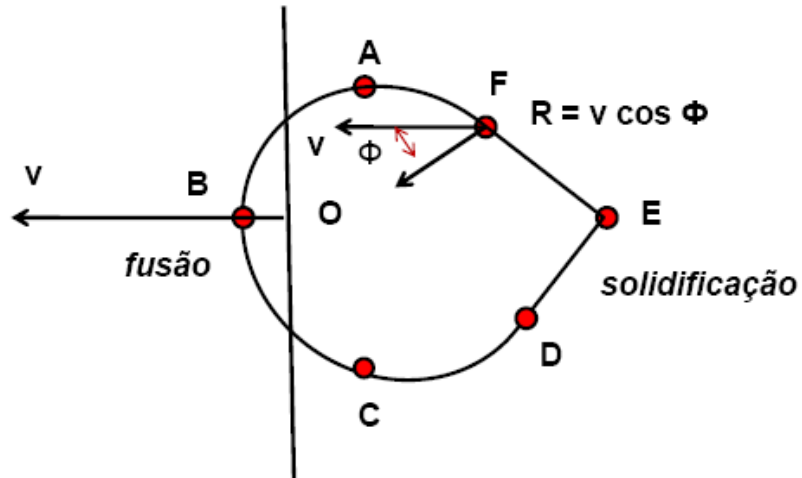
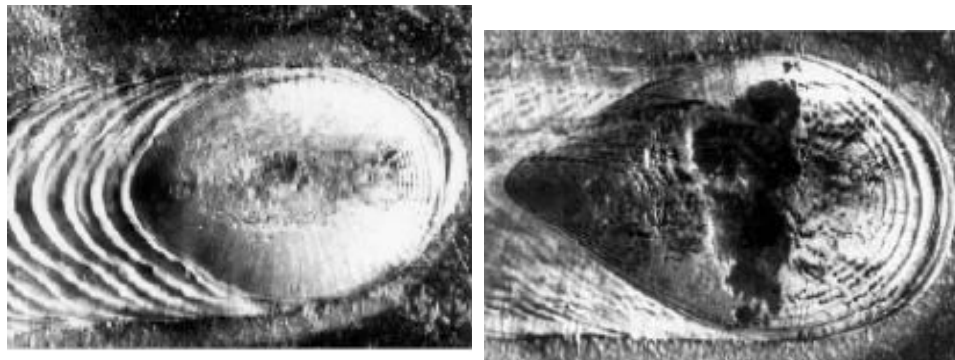


Figura 2.8 - Solidificação do metal de solda.

A forma da poça de fusão pode ter duas geometrias: uma no formato elíptico e outra em forma de gota como indicada na Figura 2.9(A) e 2.9(B). Essa geometria é determinada pela velocidade de soldagem e pelo balanço térmico entre energia de soldagem e as condições de transferência de calor no metal de base. O formato elíptico (Figura 2.9(A)) é determinado quando a velocidade de solidificação é igual à velocidade de soldagem, enquanto que o formato de gota (Figura 2.9(B)) ocorre quando a velocidade de solidificação é menor que a velocidade de soldagem.



(A)

(B)

Figura 2.9 - Vista superior dos formatos da poça de fusão: (A) elíptico e (B) de gota.

A velocidade de solidificação é proporcional ao gradiente térmico. A Figura 2.10 mostra o gradiente térmico máximo decomposto nas componentes x e y. Analisando estas componentes para os dois tipos de formato de poça de fusão, percebe-se a predominância

do gradiente em x, para a poça de fusão em forma de gota, e em y para a forma elíptica. No primeiro caso, o crescimento ocorre preferencialmente na direção x gerando uma estrutura mostrada na Figura 2.10(A). No segundo caso, a componente em y é um pouco maior, ocasionando o crescimento mostrado na Figura 2.10(B).

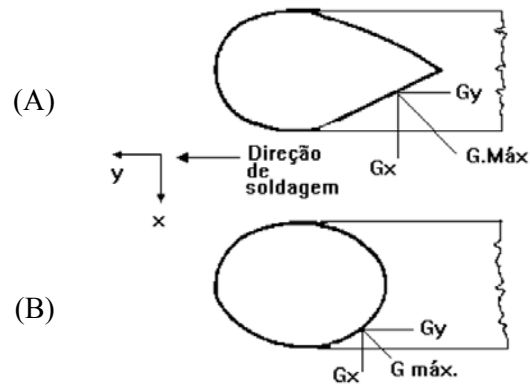


Figura 2.10 - Gradientes térmicos da poça de fusão em função do formato.

Em uma aproximação bastante simplificada, o gradiente térmico da poça de fusão pode ser expresso pela diferença entre a temperatura média do arco nesta poça e a temperatura *liquidus* do material, dividida pela distância do centro do arco elétrico até a interface sólido/líquido. A poça de fusão no formato de gota possui no centro do cordão um gradiente menor que nas bordas.

A Figura 2.11 esquematiza esse efeito e por ela percebe-se que o super-resfriamento constitucional é sempre máximo no centro do cordão de solda

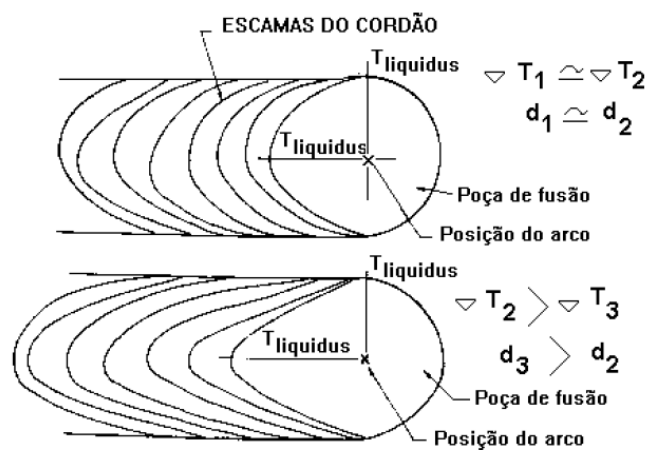


Figura 2.11 – Gradiente térmico na poça de fusão para os dois formatos que a poça pode apresentar.

2.3.2.1 Efeito dos parâmetros de soldagem na estrutura dos grãos

Na poça de fusão tipo gota o formato é essencialmente uma linha reta, os grãos também possuem uma tendência ao crescimento perpendicular à borda da poça, evidenciando uma linha de segregação central, como mostra a Figura 2.12.

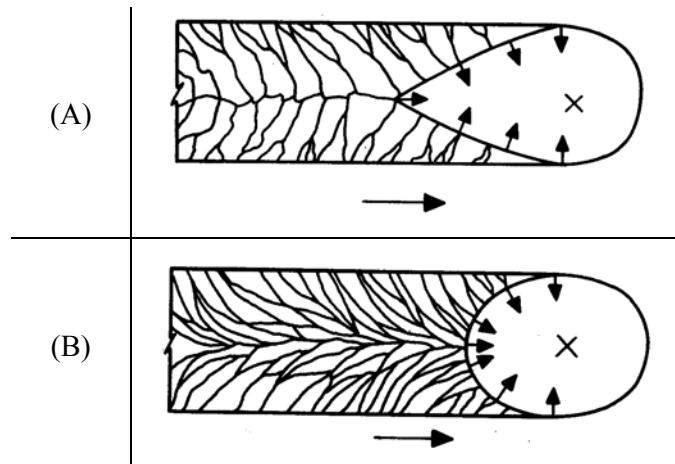


Figura 2.12 – Macroestrutura da solda de grãos colunares feitos com poça em (A) gota e (B) elíptica.

Ainda na poça tipo gota, o crescimento dos grãos também são curvados com o intuito de crescer perpendicularmente a face da poça de fusão, como mostrado na Figura 2.12(A), portanto para metais de solda livre de núcleos heterogêneos, pode-se esperar que em altas velocidades de soldagem, os grãos colunares irão crescer na direção da linha de centro da solda e, com baixas velocidades de soldagem, estes irão se curvar e crescerão na direção do gradiente máximo de temperatura, devendo ser sua forma pontiaguda.

Para o tipo elíptico (Figura 2.12(B)), a frente de solidificação muda constantemente em função do perfil elíptico da superfície da poça de fusão, os grãos não encontraram a direção ideal de crescimento favorecendo a formação de maior número de grãos com menor tamanho e aspecto menos colunar dando origem a uma estrutura mais favorável à qualidade da junta soldada (Dong, 2009).

A predição e o controle da temperatura, das velocidades de circulação do material fundição na poça de fusão e as velocidades de esfriamento asseguram a qualidade da solda com a geometria da zona de fusão desejada, composição química e microestrutura, além de tensões residuais e distorções (Fonseca, 2006).

2.4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PROCESSOS NA SOLDAGEM

O objetivo do planejamento dos procedimentos de soldagem é prover em detalhe as variáveis requeridas para determinadas aplicações garantindo repetitividade e incrementando a produtividade, qualidade e economia.

Não existe uma metodologia específica para escolher o procedimento de soldagem. O conhecimento e experiência do engenheiro de soldagem são os fatores mais importantes que determinam o sucesso do procedimento.

2.4.1 - Predição de geometria do cordão de solda

Existem diferentes trabalhos que predizem os efeitos das entradas e variáveis de controle (i.e., procedimentos de soldagem) na saída (i.e., geometria do cordão de solda). Estes trabalhos podem ser classificados em três categorias:

- Modelos Teóricos: a geometria mediante a solução da equação do fluxo de calor tomando como ponto de partida o trabalho feito por Rosenthal. Este tipo de aproximação teórica não é aplicada amplamente devido às complexas interações entre as variáveis acopladas e as excessivas suposições.
- Modelos Qualitativos: estes tipos de estudos avaliam os efeitos dos parâmetros de soldagem na geometria. Usualmente nos experimentos que mudam o valor um parâmetro de entrada no sistema estudado, mantendo as outras constantes. Então o efeito da geometria do cordão é avaliado qualitativamente. Este tipo de enfoque não permite uma predição das dimensões do cordão. Embora seja usado para ganhar experiência no processo de soldagem de forma rápida e barata.
- Modelos Empíricos: são construídos mediante a determinação de expressões matemáticas que fixam uma programação sistemática experimental. Sendo mais usados nas últimas décadas, os modelos de múltipla regressão os quais são restritos a situações específicas (Paranhos, et al, 1992).

2.4.2 - Análises de Superfície de Resposta

O objetivo de todos os experimentos inclui descrever a resposta dos fatores de tratamento. Uma das maiores vantagens da curva de resposta é que com ela pode-se visualizar as respostas para todos os níveis dos fatores no experimento (Kuehl, 2001).

A equação da resposta mostra-se como uma superfície quando se estuda o efeito dos fatores quantitativos, por exemplo, a corrente e velocidade em processos GTAW (Modenesi, 2009).

A superfície de resposta permite que o pesquisador inspecione visualmente a resposta para certa região dos níveis dos fatores de interesse e avaliar sua sensibilidade aos fatores de tratamento. Ao nível industrial as superfícies de resposta se exploram para determinar a combinação de níveis dos fatores que proporcionam uma condição operativa ótima.

2.4.2.1 - Os Modelos Polinomiais aproximados à Resposta Real

A formação do desenho de superfícies de resposta e a estratégia de análise, supõem a média da variável de resposta μ_y na função dos níveis de fatores quantitativos representados pelas variáveis x_1, x_2, \dots, x_k . Os modelos polinomiais são usados como aproximações da função de resposta real (Melcón, 2004).

Os modelos polinomiais empregados para o análises de superfície de resposta são o modelo linear ou de primeira ordem e o modelo quadrático ou de segundo ordem. O modelo de primeira ordem para dois fatores é:

$$\mu_y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (2.3)$$

E o modelo de segundo ordem é:

$$\mu_y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.4)$$

Os gráficos das curvas de nível para os modelos de primeira ordem têm uma série de linhas paralelas que representam as coordenadas dos níveis dos fatores que produzem os mesmos valores de resposta; para os modelos quadráticos são mais complexas e tem vários padrões de curvas possíveis, um deles mostrado na Figura 2.13.

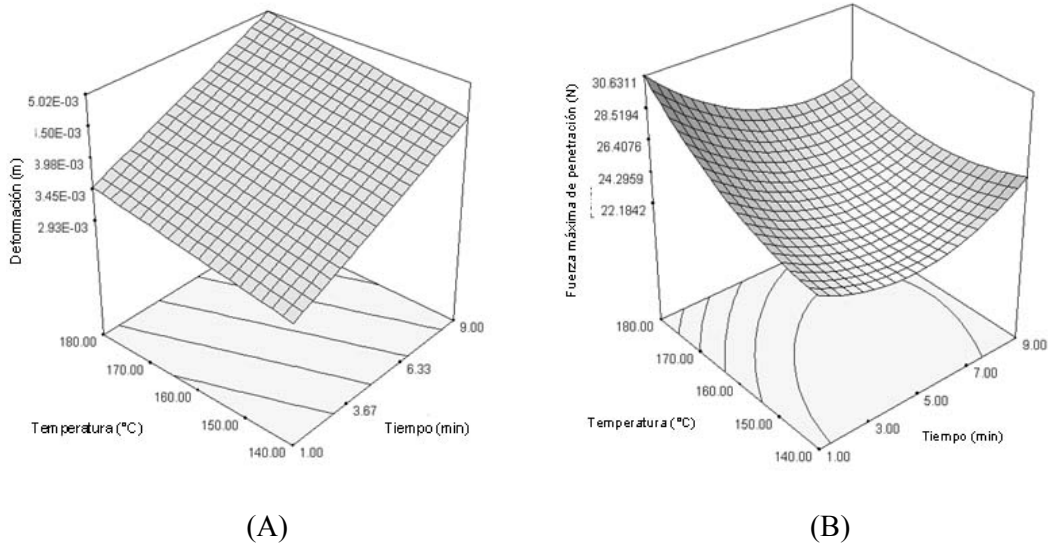


Figura 2.13 – Superfície de resposta para um modelo (a) linear e (b) quadrático.

2.4.2.2 – Estimação das respostas lineares dos fatores

Os fatoriais 2^n são desenhos adequados para estimar as respostas médias para o modelo linear ou de primeira ordem (Equação 2.4). A inclusão de duas ou mais observações de todos os fatores é um procedimento aconselhável para estimar o erro experimental e proporcionar um mecanismo para avaliar se o modelo linear de superfície de resposta é apropriado.

Os níveis de fatores codificados proporcionam um marco de trabalho uniforme para pesquisar os efeitos dos fatores em qualquer contexto experimental, já que os valores reais dos níveis dependem dos fatores específicos no estudo. Os níveis codificados dos fatores num desenho fatorial 2^n são codificados mediante a seguinte expressão:

$$x_i = \frac{(A_i - \bar{A})}{D} \quad (2.5)$$

Onde A_i é o i -ésimo nível do fator A; \bar{A} é o nível por meio do fator A e D é $\frac{1}{2}(A_2 - A_1)$.

3 - EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – EQUIPAMENTOS

A Figura 3.1 mostra a bancada experimental utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Nesta Figura, é mostrado: a fonte de soldagem (1), cilindro de gás de proteção (2), Câmera de Infravermelho (3), tocha de soldagem (4), mesa de coordenadas XY (5) e sistema de aquisição de dados (6).

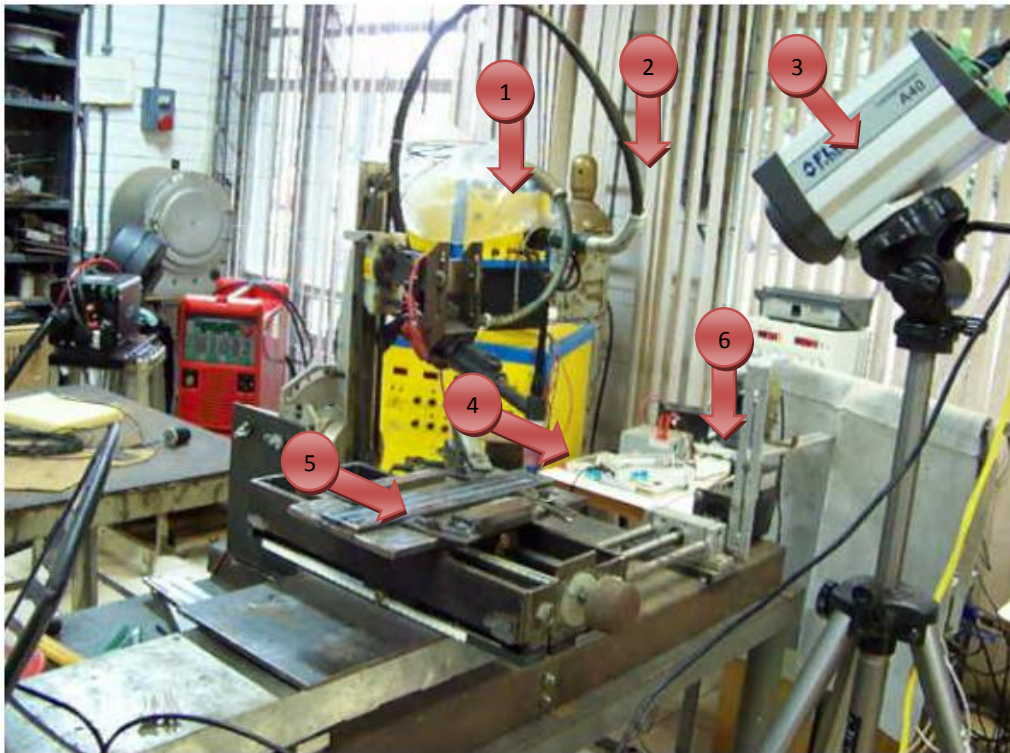


Figura 3.1 - Esquema bancada experimental

3.1.1 - Fonte de soldagem

Para a execução das soldas pelo processo GTAW foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocessal, denominada INVERSAL 450, em corrente contínua, com polaridade direta. A corrente foi ajustada para diferentes valores.

Esta corrente e a tensão no arco voltaico foi medida mediante um sistema de aquisição que visualiza estes sinais em função do tempo durante o processo de soldagem. O software foi desenvolvido no ambiente de programação *LabVIEW*®, da *National Instruments* (National Instruments, 2006), fornecido pelo Laboratório de Soldagem do Grupo de Automação e Controle (GRACO) da Universidade de Brasília. Este sistema de aquisição também permite o controle de uma mesa linear que apresenta um movimento em uma dimensão, para o deslocamento da peça a soldar.

Para garantir estabilidade do arco e formar a poça de fusão, o deslocamento da tocha foi realizado somente após de 500 ms de arco aberto. Estes cuidados permitiram a produção de cordões de solda de largura mais uniforme de uma extremidade à outra.

3.1.2 - Mesa Linear

A mesa linear usada para as experiências apresenta um movimento em uma dimensão (Figura 3.2), dado que o sensor deve estar localizado em uma única posição para a aquisição das imagens de infravermelho. A tocha está fixa e a peça se movimenta durante cada uma das experiências. Dessa forma, consegue-se que a posição do arco não mude durante o processo e assim são minimizadas as influências variáveis durante a medição.

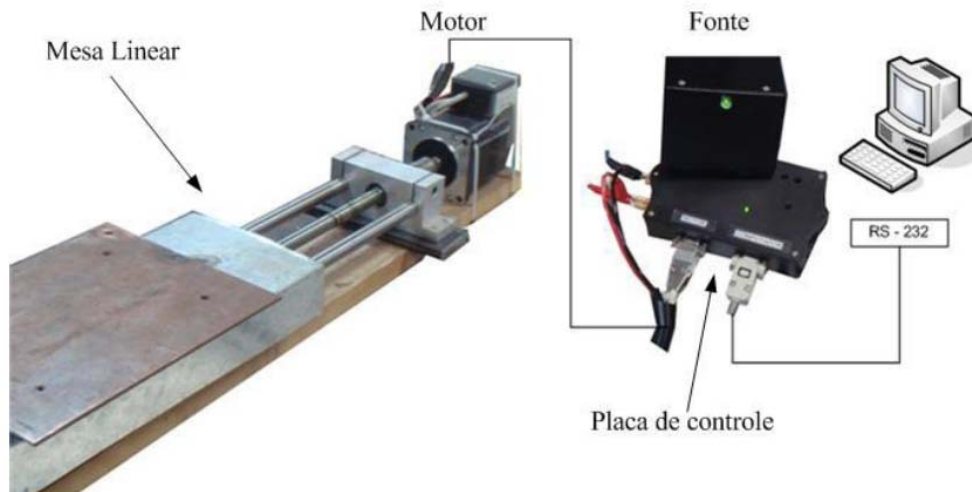


Figura 3.2 - Diagrama montagem da mesa linear (Franco, 2008).

Para controlar a velocidade, o sentido do giro do motor e o tempo do processo, usa-se um micro-controlador (PIC16C63A). O sistema permite a utilização da velocidade em uma faixa de 1 a 15 mm/s, que atende as velocidades requeridas no processo TIG. A mesa linear é capaz de deslocar-se em dois sentidos (Ver Figura 3.2).

A placa de controle da mesa linear foi desenvolvida para ser utilizada em conjunto com um computador, o qual envia comandos como o sentido, a velocidade de soldagem e tempo de execução ou distância (comprimento do cordão a realizar-se). A comunicação é feita via porta serial a uma taxa de 4800 bps. O micro controlador responde confirmando a recepção dos comandos e aguarda a ordem de execução (Franco, 2008).

3.1.3 - Sistema aquisição de dados

3.1.3.1 - Sistema de medição da tensão do arco de soldagem.

O sistema está composto por um redutor de tensão na escala 10 para 1 mV e um filtro passa-baixa ativo de segunda ordem para reduzir a alta frequência produzida por algumas máquinas de soldagem. A segunda parte da placa de aquisição de tensão, Figura 3.3, possui um sistema de isolamento com o objetivo de desacoplar o circuito de soldagem do sistema de aquisição, utilizando uma série de amplificadores operacionais e um amplificador isolador (ISO122) (Franco, 2008).

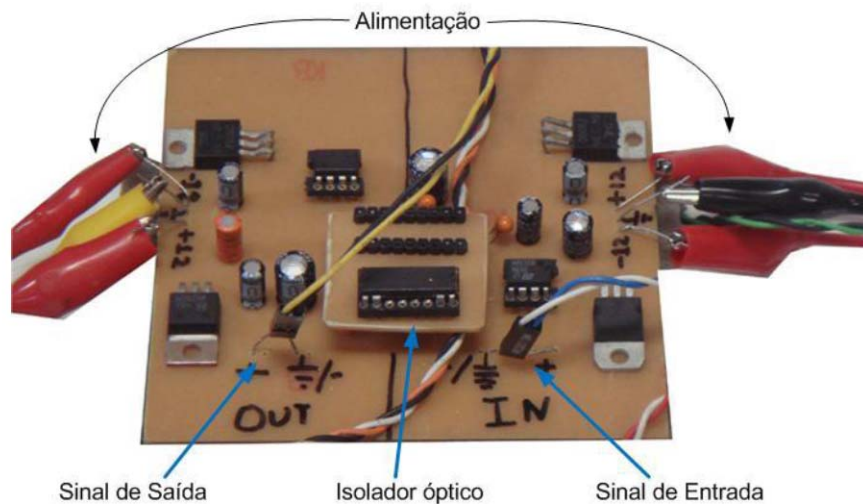


Figura 3.3 - Placa de condicionamento do sinal de tensão do arco de soldagem.

3.1.3.2 - Sistema de medição da corrente do arco de soldagem.

Para adquirir a corrente durante o processo da soldagem utilizou-se um grampo de corrente de referência i1010 (FLUKE, 2008). Este dispositivo mede a corrente que circula no cabo através de um sensor de efeito *Hall*. A saída do sensor apresenta uma sensibilidade de 1mV/A. Este sinal é ligado diretamente na placa de aquisição.

3.1.4 - Sistema de Monitoramento de Infravermelho

O sistema de monitoramento de infravermelho esta composto principalmente por uma câmera FLIR A 40M (Figura 3.4).

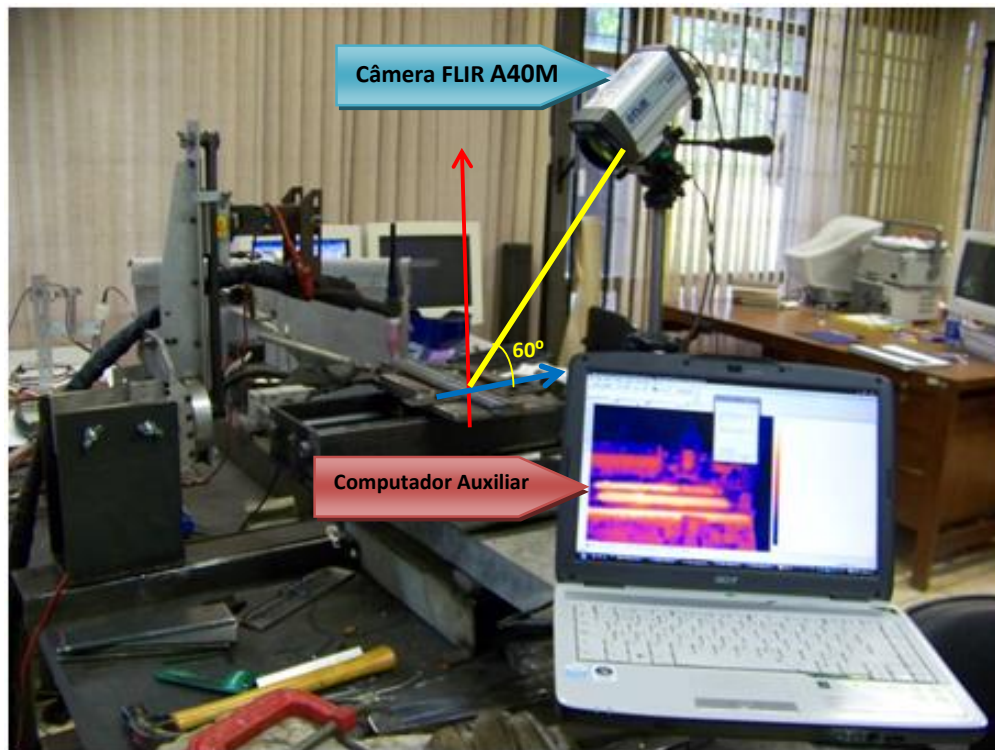


Figura 3.4 - Sistema de visão infravermelho câmera Flir A40M para monitoramento da poça de fusão.

O tipo de detector é uma matriz de plano focal (FPA), micro bolômetro refrigerado (320 x 240 pixels). Para conseguir uma transferência rápida das imagens em tempo real escolheu-se a saída digital IEEE-1394 *Fire Wire*, com uma máxima taxa de amostragem de 60 fps, uma sensibilidade térmica de 0.08° a 30°C, um campo de visão e distância mínima focal de 24°x 18°/0.3 m, a sensibilidade espectral na faixa 7.5 e 13 μm no espectro eletromagnético;

a câmera foi posicionada de modo a focalizar o arco elétrico no ângulo de 60° do plano da peça.

Os vídeos obtidos depois de cada teste foram analisados em um computador auxiliar, para posterior pós-processamento.

3.2 – MATERIAIS E CONSUMÍVEIS

3.2.1 – Material Base

O metal de base utilizado neste trabalho foi o aço 1020 em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura, e 300 mm x 200 mm de comprimento e largura respectivamente, previamente limpados e esmerilados para garantir uniformidade da solda. Este material é comumente aplicado para eixos de secções grandes, ligeiramente esforçados. Outros usos incluem engrenagens com endurecimento superficial, pinhões, cadeias, parafusos, componentes de maquinaria, prensas e levas (Sumiteccr, 2010).

3.2.2 - Gás de proteção

O gás utilizado nos testes de soldagem foi um gás inerte, neste caso o argônio, devido a características tais como: possibilidade do arco mais suave, penetração reduzida, baixo custo, alta disponibilidade, boa proteção com baixos fluxos. A menor penetração é particularmente útil na soldagem de materiais finos ou soldagens verticais ou sobre cabeça (Bracarense, 2000).

3.2.3 - Tipo de Eletrodo

Tipo EW Th: Estes eletrodos oferecem melhor iniciação do arco, pois o óxido de tório melhora a qualidade de emissão de elétrons e tem a capacidade de condução de corrente mais elevada, cerca de 20% em relação ao de tungstênio puro. Normalmente tem uma vida mais longa. Estes eletrodos foram desenvolvidos para as aplicações com corrente contínua eletrodo negativo - CCEN. Mantém uma configuração de ponta afiada durante a soldagem.

Raramente são usados em corrente alternada pela dificuldade de manter a ponta arredondada.

3.3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na Figura 3.5 apresenta-se um diagrama de fluxo do procedimento experimental seguido para o presente estudo.

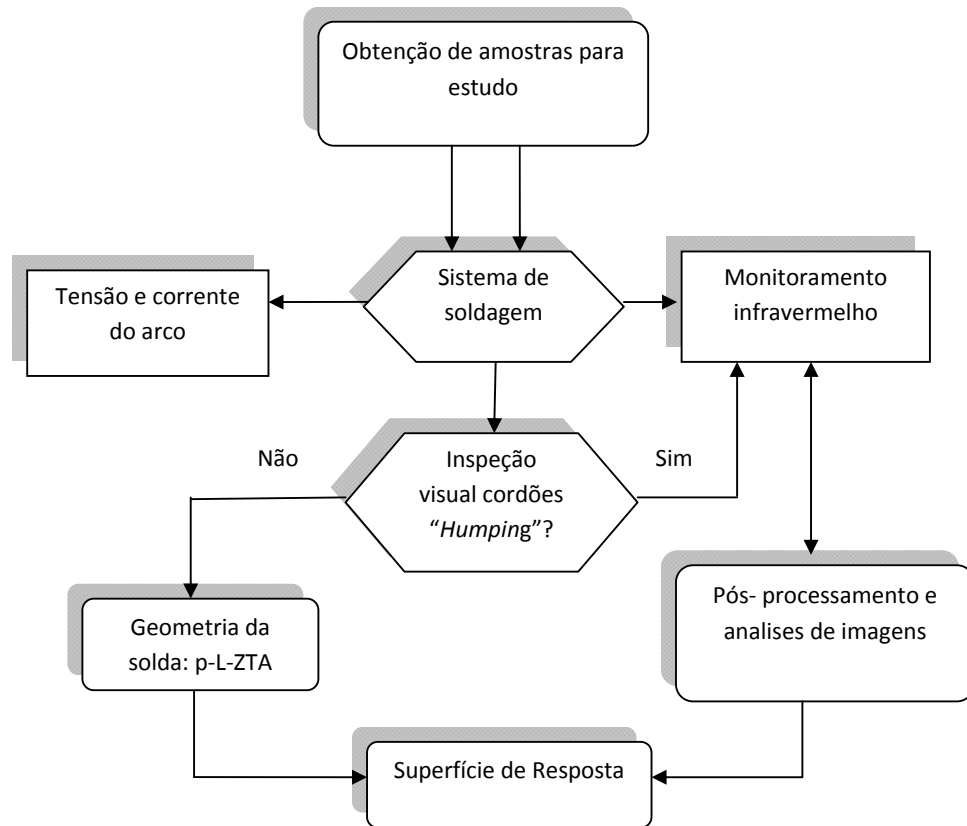


Figura 3.5 - Diagrama de fluxo do procedimento experimental seguido.

Cada uma das fases será detalhada logo mais adiante, à medida que ocorre o procedimento.

3.3.1 - Obtenção de amostras para estudo

A presença de descontinuidades do tipo *Humping* nas soldas são estudados com o mapeamento do processo GTAW (Mendez, 1999; Gratzke, 1992; Kou, 2003) (Figura 3.5). Tomando como referência estes trabalhos, optou-se pela obtenção de diferentes formatos

de poça de fusão considerando como parâmetros variáveis do processo, a corrente e a velocidade de soldagem, tomando como região de estudo a faixa entre 150-250 A para a corrente e de 2 -10 mm/s para a velocidade, Figura 3.5. Os testes feitos foram planejados considerando a metodologia de superfície de resposta como ponto central.

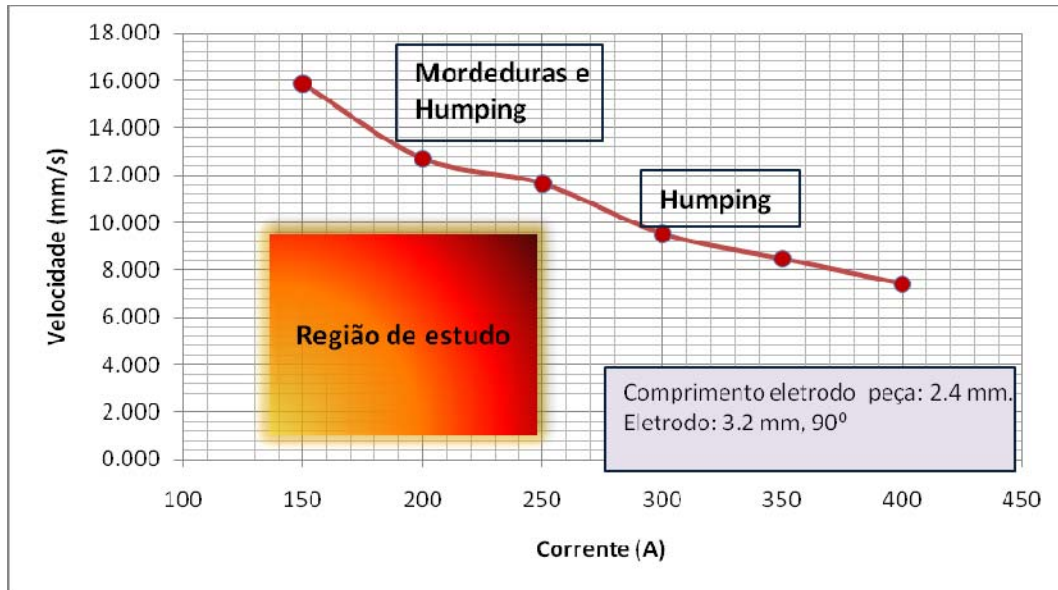


Figura 3.5 - Mapeamento do aparecimento de *Humping* em GTAW (Mendez, 1999).

Escolhida a região de estudo foi planejado um projeto fatorial de 2^2 com ponto central nas coordenadas 200 A e 10 mm/s, com a finalidade de estudar a tendência do sistema. A Tabela 3.1 mostra os valores codificados.

Tabela 3.1 – Primeiro Planejamento Fatorial 2^2 para os parâmetros de soldagem fase inicial.

Corrente de soldagem (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Níveis codificados corrente de soldagem	Níveis codificados velocidade de soldagem
150	2	-1	-1
250	2	+1	-1
150	10	-1	+1
250	10	+1	+1
200	6	0	0

A partir dos resultados obtidos no primeiro projeto, são planejados fatoriais com a finalidade de modelar a geometria da solda mediante superfície de resposta.

Os parâmetros de soldagem mantidos constantes durante a soldagem de cada um dos cordões são apresentados na Tabela 3.2. Avaliando as condições de visibilidade da poça de fusão da solda, o comprimento do arco manteve-se em 3 mm. Um maior comprimento de arco resulta em um cordão mais largo e de menor penetração (Modenesi, 2000).

Tabela 3.2 - Valores dos parâmetros utilizados para soldagem pelo processo TIG

Material base	Aço 1020 (espessura = 6 mm)
Tipo de gás	Ar (100%)
Vazão de gás (L/mm)	13
Velocidade da câmera (fps)	60
Eletrodo	Negativo EWTh-2; 1,6mm
Comprimento eletrodo peça (mm)	3

3.3.2. - Caracterizações dos cordões de solda

3.3.2.1 - Inspeção Visual

Utilizando a câmera digital foram obtidas imagens de cada um dos cordões para posteriormente serem correlacionados com as imagens térmicas.

Mediante inspeção visual em cada um dos cordões feitos, foram classificados considerando a presença ou não do *Humping*. Os testes que não apresentaram descontinuidades posteriormente foram analisados medindo a penetração e a largura.

3.3.2.2 – Processamento de Imagens de Infravermelho

O pós-processamento das imagens de infravermelho permitiu obter a geometria das isotermas da poça de fusão, as quais se vêm modificadas junto com a mudança dos parâmetros de soldagem (velocidade – corrente de soldagem).

Posteriormente foi desenvolvido um algoritmo para o processamento das imagens térmicas utilizando ferramentas de processamento de imagens que dispõe *Matlab*. Este algoritmo permite quantificar as variações a partir das dimensões e a área para cada uma das isotermas. Na Figura 3.6 se apresenta o diagrama de fluxo que descreve o funcionamento deste.

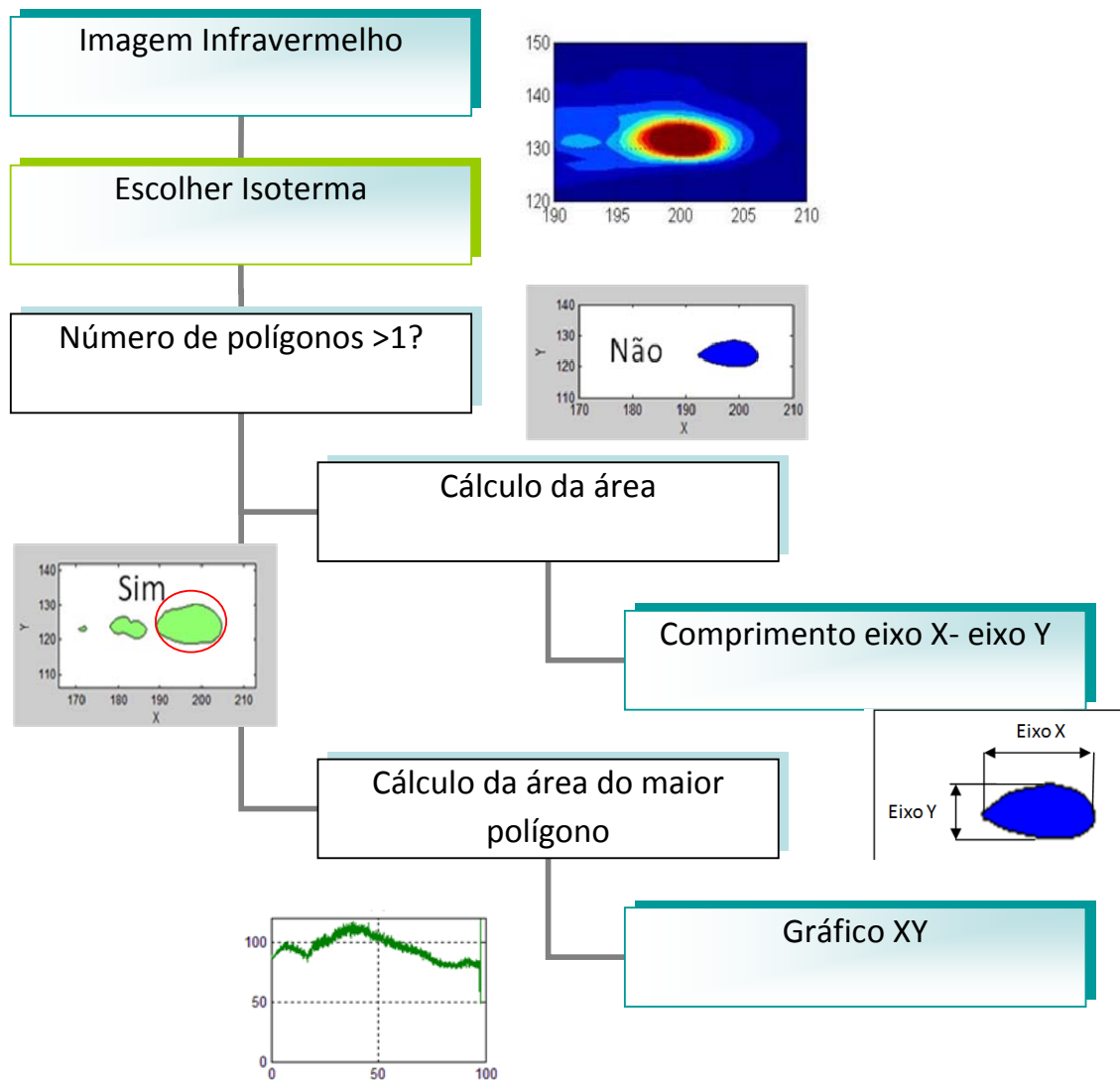


Figura 3.6 - Algoritmo de pós-processamento das imagens de infravermelho acento número imagem gráfico polígono área cálculo

O algoritmo a partir das imagens de infravermelho previamente obtidas, permite ao usuário escolher a isoterma a estudar, para posteriormente determinar o número de polígonos (chama-se polígonos as curvas fechadas encontradas dentro da imagem). No caso da

imagem ter mais de dois polígonos, o algoritmo escolhe o maior polígono para um posterior cálculo das dimensões da poça de fusão.

O cálculo das dimensões da poça se faz mediante a determinação do cálculo da área e comprimento do eixo horizontal e vertical.

3.3.2.3 - Medição parâmetros geométricos do cordão Penetração – Largura

A medição da largura dos cordões foi feita empregando-se um paquímetro digital com precisão 0.01 mm na região mais próxima do regime térmico estacionário (50% do comprimento total da solda).

Para verificar a penetração, cada corpo de prova foi cortado perpendicular ao cordão de solda para em seguida ser desbastado, lixado e atacado quimicamente. As três primeiras etapas têm como objetivo obter uma superfície plana e lixada com o acabamento especular e por último, o ataque químico (com uma solução de 1 molar de ácido nítrico (HNO_3)), que possibilita a diferenciação das diversas regiões que compõem uma solda, como são as penetrações, ZTA e material base. Finalmente é medida a penetração das soldas utilizando um projetor de perfis.

3.3.3 – Análise mediante metodologia de superfície de resposta.

Os resultados obtidos para a geometria das soldas feitas posteriormente são levados a análise de regressão múltipla empregando a função *regress* do software *Matlab*. Neste sentido a função *regress* tem duas variáveis de entrada obrigatória um vetor coluna Y de dados da variável dependente da dimensão $n \times 1$ e uma matriz X, da dimensão $n \times p$, contendo (por colunas) p variáveis independentes. Se não houver nenhuma variável de entrada em seguida, a função *regress* faz o cálculo dos coeficientes do modelo de regressão com um nível de 95%.

Em relação às variáveis de saída, obtém-se um conjunto de variáveis de saída que coletam a análise estatística, incluindo o intervalo de confiança para os parâmetros estimados, erros de regressão, entre outros resultados. Para usar essas funções com eficiência o auxílio do *Matlab* fornece informações sobre estas funções, variáveis de entrada e variáveis de saída.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – INTRODUÇÃO

Resultados experimentais confirmam uma relação direta entre a corrente e velocidade, que afeta a forma e o tamanho da poça de fusão e conseqüentemente as dimensões da penetração e largura dos cordões de solda (Komanduri, 2001; Limma, 2005; Levine, 1988). Incrementando-se a velocidade e a corrente de soldagem surge o *Humping* (Mendez, 2003).

4.2 - AJUSTE DAS VARIÁVEIS – INSPEÇÃO VISUAL

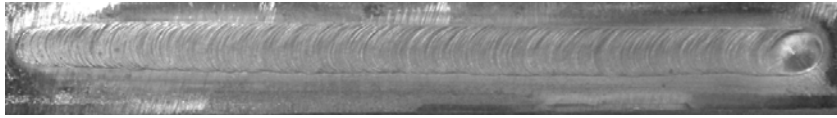
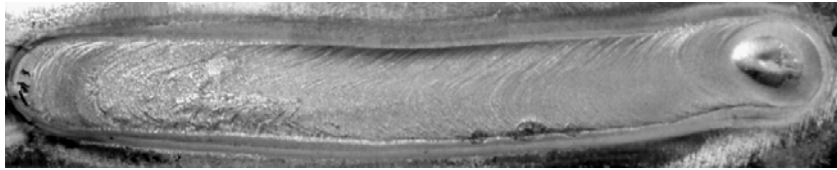
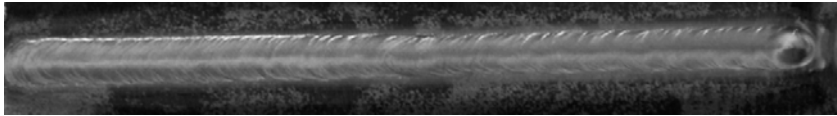
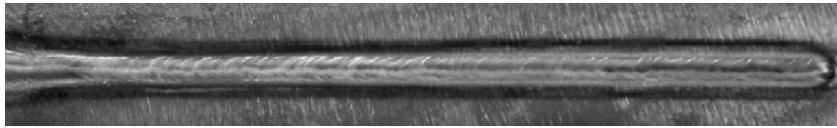
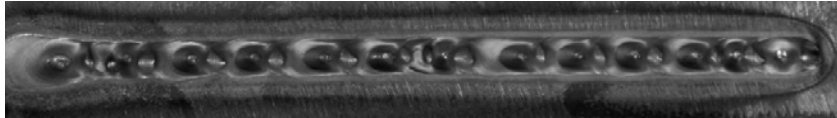
Definida a região de estudo e com a finalidade de obter diferentes padrões de infravermelho da poça de fusão, foram feitos uma série de testes preliminares alterando os valores das variáveis de estudo, a corrente e a velocidade de soldagem. Na tabela 4.17, mostram-se as fotografias e os parâmetros de soldagem empregados para cada um dos cordões feitos. Os critérios utilizados para a avaliação dos cordões obtidos nestes ensaios foram baseados exclusivamente no aparecimento do *Humping*.

Os resultados confirmam que dependendo das especificações de corrente e de velocidade se observam mudanças no formato do cordão de solda. Aumentando a velocidade, afeta-se a largura da solda, tal como pode ser visto, ao comparar um cordão feito com baixa corrente 150 A e uma velocidade de 2 mm/s que difere significativamente do cordão feito com a mesma corrente e uma velocidade de 10 mm/s (Ver tabela 4.17).

No ponto com coordenadas 200 A para a corrente de soldagem e 6 mm/s para a velocidade de soldagem, os cordões apresentam uniformidade na sua geometria. Tal como observar-se na Tabela 4.17.

No limite superior, com alta corrente e alta velocidade, a solda feita apresenta protuberâncias separadas por crateras, relacionado com o aparecimento do *Humping* (ver Tabela 4.17).

Tabela 4.1 – Condições utilizadas nos testes preliminares e resultados obtidos.

Testes	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)
	150	2
	250	2
	200	6
	150	10
	250	10

Definida a tendência do sistema, na seguinte fase foi feito um planejamento fatorial 3^2 para definir a região que permite estudar até que ponto é possível aumentar a velocidade sem afetar a qualidade do cordão. Para estes testes, a corrente e a velocidade de soldagem, encontram-se numa faixa de 200-210 A e 6-10 mm/s respectivamente. As variáveis qualitativas de resposta S e N indicam a presença ou ausência de discontinuidades, respectivamente (ver Tabela 4.18).

Resultados obtidos indicam à medida que a velocidade aumenta os cordões não são uniformes e tendem a apresentar descontinuidades, sendo a velocidade de 10 mm/s descartada para os testes seguintes.

Na terceira e última etapa foi planejado uma fatorial de 2^2 procurando definir alguns parâmetros que permitam conseguir ótimos resultados a expensas de economia no processo diminuindo corrente e maximizando velocidade. Na tabela 4.11 se apresentam os resultados.

Neste ponto os resultados obtidos permitem dividir esta pesquisa em duas partes. A primeira o estudo da formação do *Humping*, mediante o pós-processamento das imagens de infravermelho da poça de fusão - seção 4.11 e a segunda relacionada com a obtenção de um modelo empírico de otimização mediante metodologia de superfície de resposta seção 4.12.

Tabela 4.2 - Planejamento fatorial 3^2 para estudar os efeitos da corrente e da velocidade de soldagem na região 200-210 A e 6-10 mm/s.

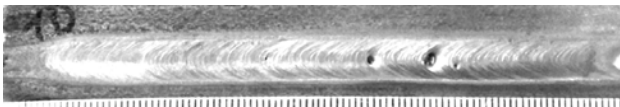
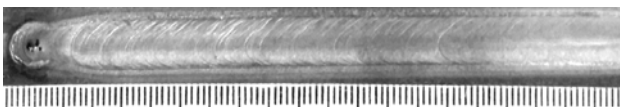
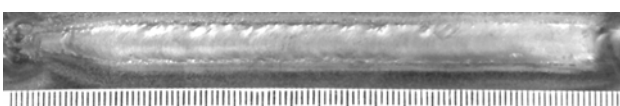
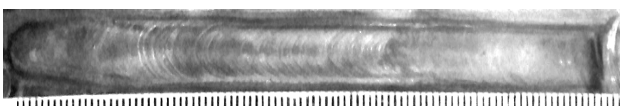
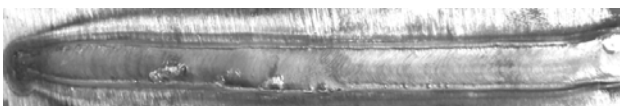
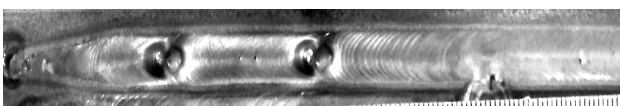
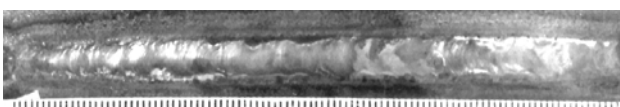
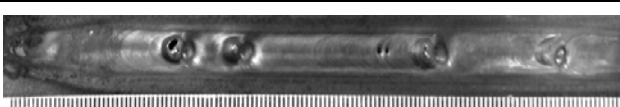
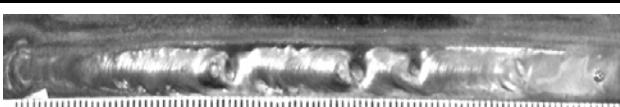




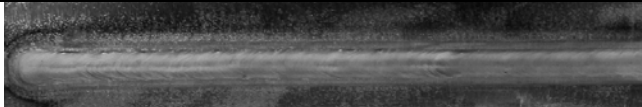
Teste	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Presença de discontinuidades
	200	6	N
	205	6	N
	210	6	N
	200	8	N
	205	8	N
	210	8	S
	200	10	S
	205	10	S
	210	10	S

Tabela 4.3 - Planejamento fatorial 2^2 para estudar os efeitos da corrente e da velocidade de soldagem na região 195-205 A e 4-8 mm/s.

Teste	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Presença de descontinuidades
	195	4	N
	205	4	N
	200	6	N
	195	8	N
	200	8	N

4.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOMETRICA DOS CORDÕES DE SOLDA

Após determinar os diferentes formatos de poça de fusão efetuou-se a análise da geometria do cordão para os diferentes formatos de poça. Esta análise foi realizada com o objetivo de verificar qual a penetração e largura dos cordões para cada formato de poça estabelecido. A análise também foi realizada com o intuito de contribuir posteriormente no desenvolvimento de um modelo teórico do comportamento do sistema.

Para efeitos de quantificar as análises visuais mediram-se a penetração - p , a largura - L e a largura da zona termicamente afetada - ZTA como indicativos da geometria. Outro indicativo da geometria relevante foi o fator de forma - f , definido mediante a razão entre a penetração e a largura, o valor deste fator fornece informação da proporcionalidade no formato do cordão. Na Tabela 4.4, se apresentam as macrografias dos perfis e as medições para os cordões feitos com uma corrente de 150, 200 e 250 A e uma velocidade de 2, 6 e 10 mm/s.

Resultados preliminares indicam que um cordão com boa geometria tem um fator de forma em torno de 0.26. No caso de um cordão de dimensões exageradas o fator \approx 0.36. Outro aspecto relevante é a largura da ZTA que decresce a medida que aumenta a velocidade de soldagem, refletindo em menores distorções do material soldado.

Os resultados obtidos, mostram a região ao redor do ponto 200 A e 6 mm/s como a zona onde se focalizará o estudo a procura do modelo da geometria da solda.

Posteriormente, as medições de penetração e de largura foram feitas nos cordões com as velocidades 6 e 8 mm/s, os resultados apresentam-se na Tabela 4.5. A princípio assume-se a penetração como um critério para qualificar o cordão de solda, mas não suficiente ao considerar que a largura do cordão e da ZTA está sendo modificada também à medida em que altera-se a corrente a velocidade de soldagem. Considerando a tendência do sistema e para fins de criar um modelo mediante a Metodologia de Superfície de Resposta, considerado um planejamento fatorial para os dois fatores de estudo na faixa de 195 - 205 A, para a corrente e 4 - 8 mm/s para a velocidade de soldagem. Considerando como ponto central 200 A e 6 mm/s (ver tabela 4.6).

Tabela 4.4 - Medições da penetração, largura e fator de formação para os cordões com corrente de soldagem entre 150-250 A e velocidade de soldagem 2 -10 A.




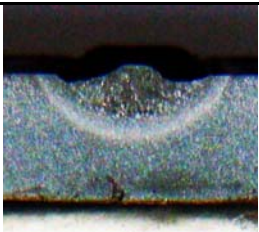

Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração [P] (mm)	Largura [L] (mm)	Fator de forma [P/L]	ZTA	Fotografia do Perfil
150	2	1.859	6.706	0.277	3.977	
150	10	0.842	3.385	0.249	0.931	
250	2	3.941	11.059	0.356	4.1238	
250	10	1.620	6.120	0.27	1.620	
200	6	1.415	5.358	0.264	1.678	

Tabela 4.5 - Medições da penetração, largura e fator de formação para os cordões com corrente de soldagem entre 200-210 A e velocidade de soldagem 6 -8 mm/s.

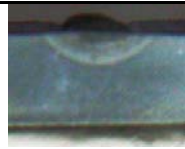
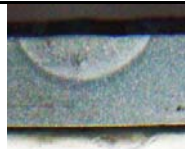



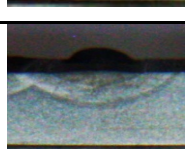






Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração [P] (mm)	Largura [L] (mm)	Fator de forma [P/L]	ZTA	Fotografia do Perfil
200	6	1.016	5.520	0.180	1.535	
205	6	1.523	5.380	0.280	1.430	
210	6	1.872	5.660	0.330	1.320	
200	8	0.771	4.116	0.180	1.446	
205	8	1.032	3.940	0.260	1.392	
210	8	1.258	4.137	0.280	1.684	

Tabela 4.6 - Medição de penetração, largura e fator de formação para planeamento fatorial para região limitada por 195- 205 A e 2-8 mm/s.

Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração [P] (mm)	Largura [L] (mm)	Fator de forma [P/L]	ZTA	Fotografia do Perfil
195	4	1.324	6.934	0.209	1.307	
205	4	1.296	6.353	0.309	2.526	
195	8	1.354	4.544	0.273	0.834	
205	8	1.064	3.936	0.262	1.392	
200	6	1.785	5.664	0.315	1.320	
200	6	1.067	5.388	0.198	1.459	
200	6	1.139	6.024	0.189	1.762	

4.4 - MODELAMENTO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A caracterização geométrica dos cordões permitiu fazer o modelamento da penetração, largura e largura de ZTA, os resultados apresentam-se nesta seção.

As respostas para cada uma das dimensões analisadas podem ser expressas como uma função da corrente (I) e velocidade de soldagem (v). As equações foram obtidas a partir dos resultados experimentais por regressão linear múltipla e compreendem os termos principais e termos de interação.

O parâmetro utilizado para avaliar a qualidade do ajuste da equação com os dados experimentais foi o coeficiente de correlação. O parâmetro R^2 varia de 0 a 1 e indica o grau de ajuste aos dados obtidos. Quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo.

4.4.1 - Penetração

A Equação 4.1 é a expressão obtida para a penetração da solda considerando os resultados apresentados na tabela 4.6.

Os coeficientes foram obtidos empregando a função *regress* do Toolbox de Estatística que tem o Software *Matlab*. Esta equação apresentou um coeficiente de correlação (R^2) de 0.14 indicando um inadequado ajuste entre a superfície de resposta e os resultados experimentais.

$$P_1 = -3.239 + 0.023 * I + 1.285 * v - 0.007 * I * v \quad (4.1)$$

Além da avaliação do coeficiente de correlação, para verificação estatística dos modelos obtidos, foram realizados dois testes: análise de variância (com significância de 95%) e análise de resíduos.

A Tabela 4.7 mostra a análises de variância feita com o modelo obtido para a penetração. Nesta tabela, SS é soma quadrática, DF representa graus de liberdade e MS média quadrática. O valor P-nível representa um índice de significância de um resultado.

Esta equação apresentou um coeficiente de correlação (R^2) de aproximadamente 0.14 indicando um inadequado ajuste entre a superfície de resposta e os resultados experimentais.

Tabela 4.7 – Análise de variância para a penetração do cordão de solda (P1).

	DF	SS	MS	F	P - nível
Regressão	3.000	0.053	0.018	0.164	0.914
Resíduo	3.000	0.321	0.107		
Total	6.000	0.374			

Neste sentido, quanto maior o valor do P-nível, acredita-se menos que a relação observada entre as variáveis da amostra é um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis na população. O valor de F (F de Fisher) é a razão entre a média quadrática da regressão e a média quadrática do resíduo, a partir da qual se obtém o valor do P-nível. Quanto maior for o valor de F, mais adequado é o modelo para explicar a variação dos dados. Todas as análises estatísticas foram feitas utilizando-se um nível de confiança de 95%.

Analisando os resultados apresentados nesta tabela, pode-se verificar que o nível de significância (P-nível) é maior que 5% (0.05), ou seja, a equação obtida não é válida para explicar a variação dos dados.

Posteriormente optou-se por fazer corridas adicionais dentro da região de estudo e replicas de alguns pontos. A informação encontra-se tabulada na tabela 4.16. As corridas adicionais são destacadas em negrito.

A Equação 4.2 é a expressão obtida para a penetração da solda considerando as corridas adicionais apresentadas na tabela 4.8. Esta equação apresentou um $R^2 \approx 0.60$ indicando um melhor ajuste entre a superfície de resposta e os resultados experimentais.

$$P_{II} = -11.994 + 0.069 * I - 2.046 * v - 0.011 * I * v \quad (4.2)$$

Tabela 4.8 - Corridas adicionais para o plano de superfície de resposta.

	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração (mm)
1	195	4	1.448
2	195	8	1.243
3	205	4	1.630
4	205	8	1.124
5	200	6	1.365
6	200	6	1.048
7	200	6	0.961
8	200	2	1.523
9	200	8	1.110
10	207	6	1.210
11	193	6	1.032
12	205	8	0.837

A tabela 4.9 mostra a análise de variância feita com o modelo II obtido para a penetração. Nesta, pode-se verificar que o nível de significância (P-nível) é menor que 0.05, ou seja, a equação obtida é válida para explicar a variação dos dados.

Tabela 4.9 - Análise de variância para a penetração do cordão de solda (PII)

	DF	SS	MS	F	P - nível
Regressão	3.00	0.38	0.13	4.09	0.05
Resíduo	8.00	0.25	0.03		
Total	11.00	0.63			

Outro teste utilizado para avaliar o modelo de regressão é a análise de resíduos. Nesta análise os valores estimados pelo modelo são apresentados em um gráfico, colocados em relação a uma linha de referencia (zero) e que corresponde aos próprios valores preditos pelo modelo. Este tipo de análise permite verificar a distribuição dos resíduos com relação à linha de referência (Figura 4.1 (A)).

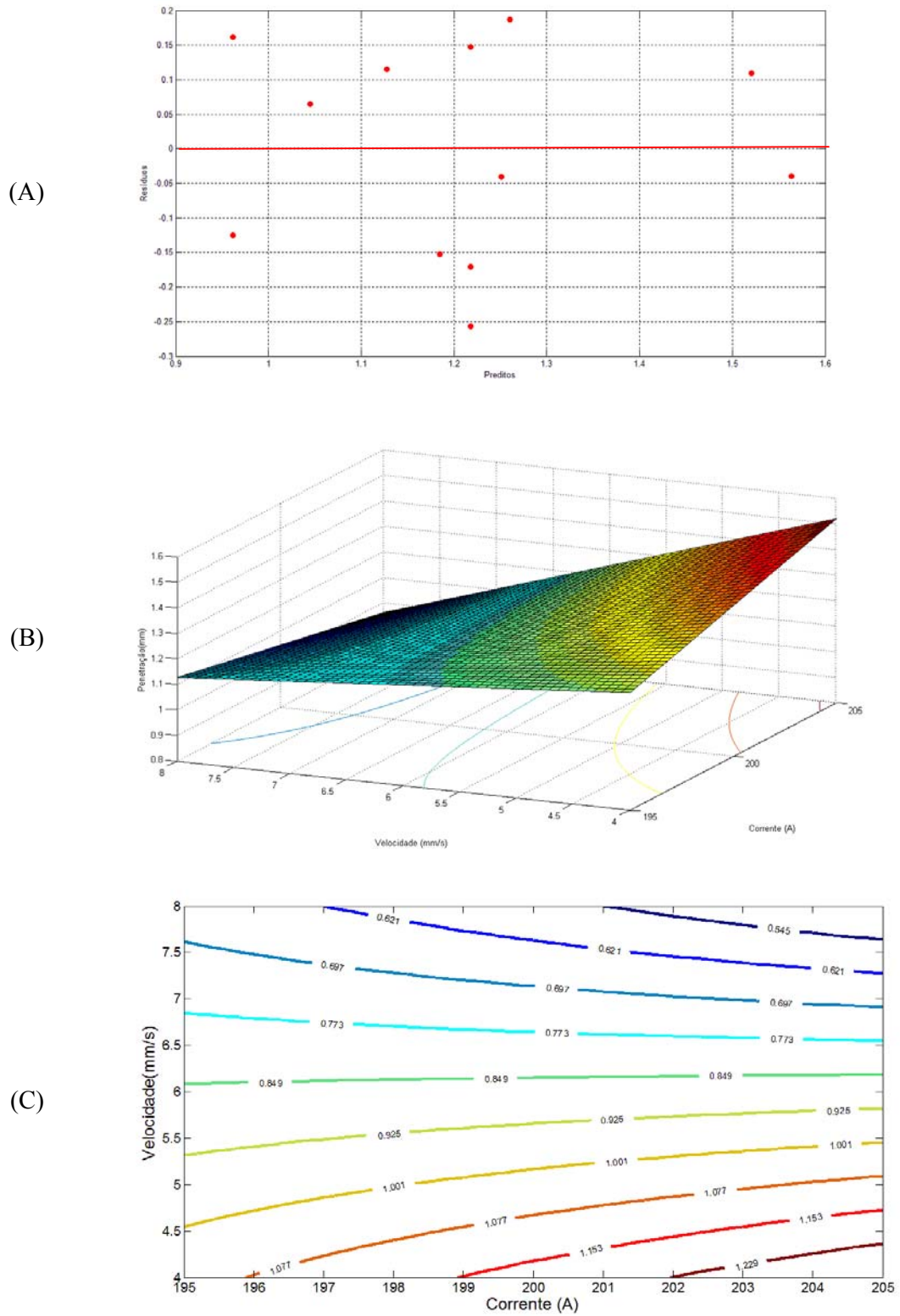


Figura 4.1 - (A) Gráfico de residuais, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a penetração da solda - modelo II.

Considerando a Figura 4.1(A), pode-se dizer que os resíduos provêm de uma distribuição normal, uma das suposições básicas para a validade da análise de variância. Outro aspecto do gráfico de resíduos é que na faixa de 1-1.3mm se encontra uma maior densidade de pontos, indicando um valor médio da penetração da solda na região de estudo.

A Figura 4.1(B) e 4.1(C) representa a superfície de resposta e suas respectivas curvas nível. Pode-se constatar que a corrente apresentou um efeito direto sobre a penetração da solda relacionado com o aumento da pressão do arco. Verificou-se também que a penetração da solda depende dos níveis da velocidade de soldagem. Sugerindo a existência dos efeitos interativos destas variáveis.

A velocidade de soldagem apresentou um efeito inverso em relação à penetração da solda. O aumento de velocidade reduz a entrega energética à peça, reduzindo capacidade de penetração do arco e, conseqüentemente da penetração da solda.

4.4.2 - Largura do Cordão (L)

A equação 4.3 é a expressão matemática obtida para a largura do cordão, a qual apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0.95$, ou seja, esta expressão consegue explicar cerca de 95% da variação dos dados experimentais.

$$L = 20.234 - 0.055*I - 0.466*v - 0.001*I.* v \quad (4.3)$$

A largura do cordão da solda é influenciada pelo diâmetro da coluna do arco que incide sobre a peça e pela velocidade de soldagem. O diâmetro do arco na região de incidência, por sua vez, está relacionado com a diferença na tensão superficial da poça de fusão que gera um fluxo de convecção (também chamado de fluxo de Morangoni), do centro para as extremidades, o qual fornece transporte de calor para as extremidades laterais desta, tornando-a mais larga e rasa, constrição em pequena escala de distância da tocha peça. Nos ensaios realizados, a distância da tocha peça foi mantida constante, sendo a largura da face da solda influenciada apenas pelo do fluxo de Morangoni.

Segundo Richardson (1991), o aumento da corrente causa um aumento da densidade de energia e da temperatura, embora seja verificado também um rápido aumento no diâmetro da coluna do arco. O aumento da temperatura do arco, que é função da corrente de soldagem, pode produzir também uma ionização parcial no gás de proteção. Desta forma o arco passa abranger esta parcela de gás ionizado, tornando-se mais largo.

A análise de residuais indica que há linearidade nos resíduos e cumpre com princípio de homoscedasticidade, a maioria dos dados encontram-se numa linha, com uma largura constante com respeito a eixo zero (Figura 4.2(A)).

As Figuras 4.2(B) e 4.2(C) mostram as superfícies de resposta e as curvas de nível obtidas para a largura do cordão através da Equação 4.3. Observando-se as Equações 4.2 e 4.3, pode-se notar que não existe uma interação entre a corrente e velocidade de soldagem.

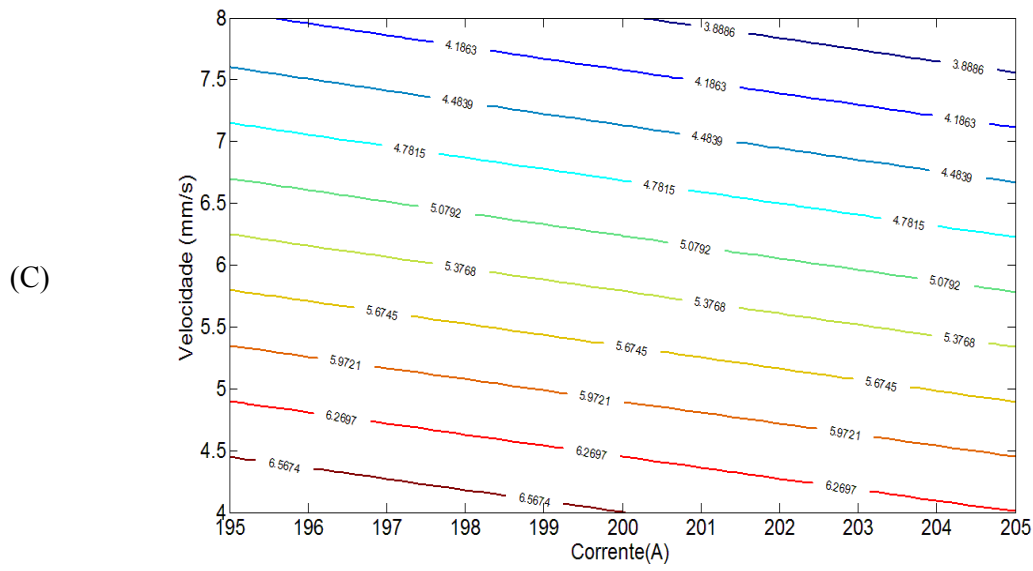
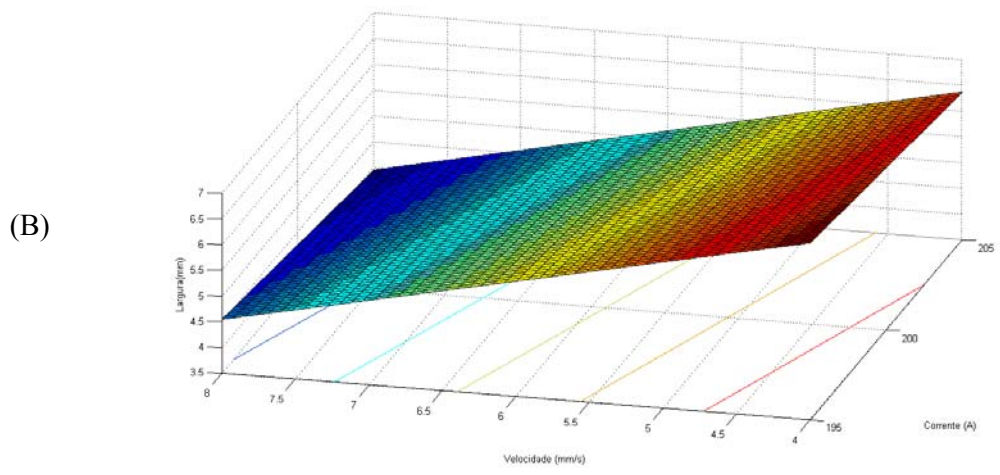
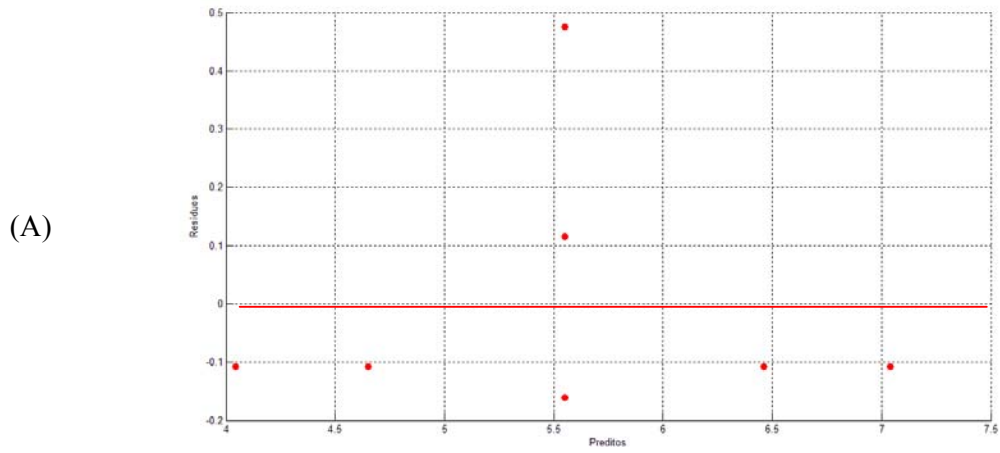


Figura 4.2 - (A) Gráfico de resíduos, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a largura da solda.

A largura do cordão variou de forma inversa em relação à velocidade de soldagem. Este efeito está relacionado com a redução da energia transferida à peça por unidade de comprimento, diminuindo a extensão da região fundida.

A Tabela 4.10 mostra a análise da variância feita para o modelo da largura do cordão da solda. Nesta tabela, o valor P-nível apresenta um índice de significância de 0.018, o que significa que se pode acreditar no modelo obtido, no sentido que a expressão obtida representa uma confiável relação entre as respectivas variáveis na população. O valor de $F \approx 19.742$ indica que o modelo é adequado para explicar a variação dos dados. As análises estatísticas foram feitas utilizando-se um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.10 - Análise da variância para a largura do cordão de solda (L).

	DF	SS	MS	F	P – nível
Regressão	3.000	6.130	2.043	19.726	0.018
Resíduo	3.000	0.311	0.104		
Total	6.000	6.441			

4.4.3 - Largura da ZTA

A equação 4.3 é um modelo obtido para a largura da ZTA da solda. Este apresentou um $R^2 = 0.94$, explicando cerca de 94% da variação dos dados obtidos. A Figura 4.3(A) mostra a superfície de resposta obtida.

$$ZTA = -34.1680 + 0.188 * I + 3.104 * v - 0.0165 * I * v \quad (4.3)$$

Os resultados indicam que a largura da ZTA da solda é influenciada pela velocidade de soldagem. Uma diminuição da energia transferida à peça por unidade de comprimento está relacionado com um aumento de velocidade e uma diminuição da extensão da região termica afetada (Figura 4.3(B) e 4.3(C)).

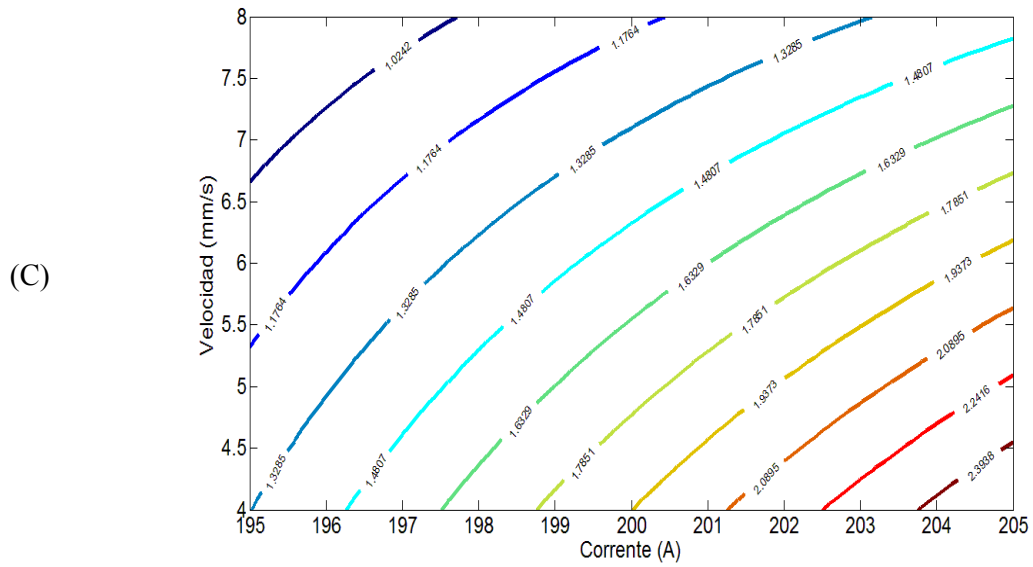
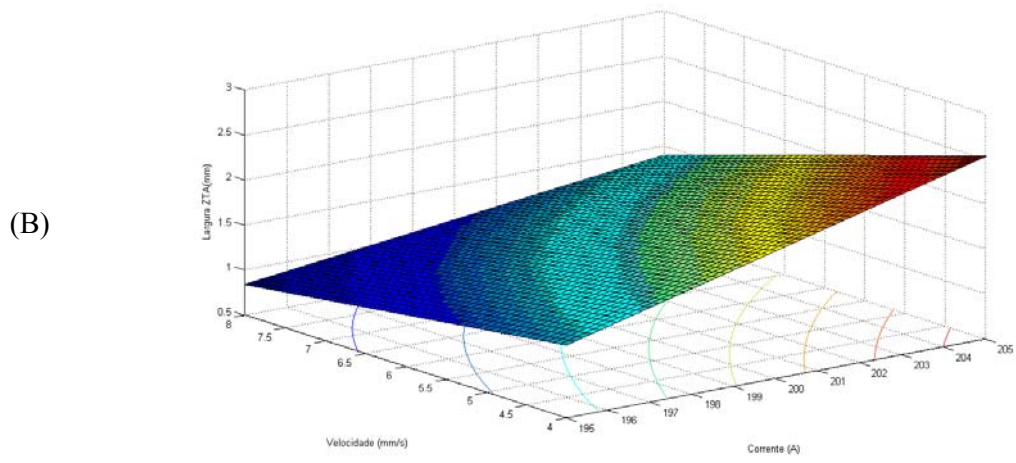
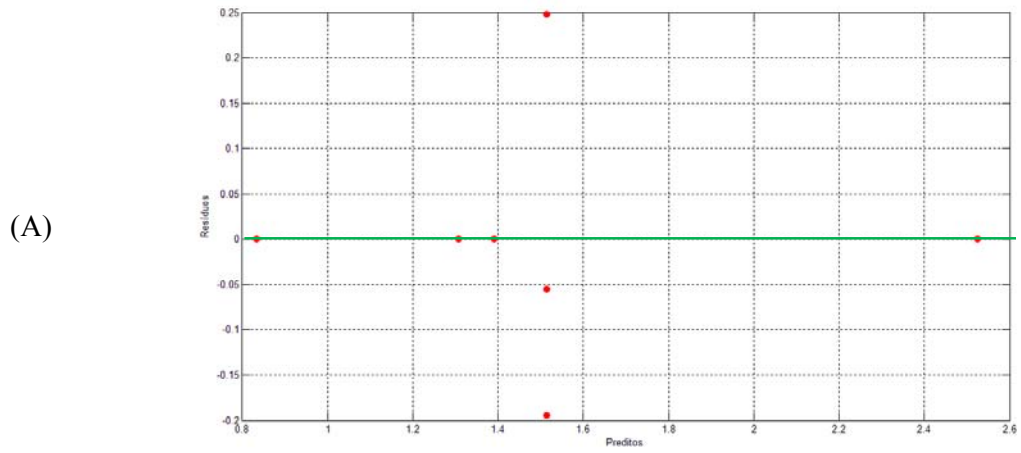


Figura 4.3 - (A) Gráfico de resíduos, (B)-Superfície de resposta e (C) curvas de nível para a largura da ZTA

A análise de resíduos (Figura 4.3(A)) indica que há linearidade nos residuais e cumpre com princípio de homoscedasticidade, a maioria dos dados se encontram numa linha, com uma largura constante com respeito a eixo zero.

A tabela 4.11 mostra a análise de variância feita para o modelo da largura do cordão da solda. Nesta tabela, o valor P-nível apresenta um índice de significância de 0.026, o que significa que se pode acreditar no modelo obtido, no sentido que a expressão 4.11 representa uma confiável relação entre as respectivas variáveis na população. O valor de $F \approx 15.119$ indica que o modelo é adequado para explicar a variação dos dados. As análises estatísticas foram feitas utilizando-se um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.11 – Análise da variância para a largura do cordão de solda (L)

	DF	SS	MS	F	P - nível
Regressão	3.000	1.544	0.515	15.119	0.026
Resíduo	3.000	0.102	0.034		
Total	6.000	1.646			

4.4.4 - Verificação experimental

Para testar os modelos matemáticos desenvolvidos, quatro testes foram realizados seguindo o procedimento adotado anteriormente, porém utilizando níveis intermediários aos usados na matriz de planejamento experimental. Nestes testes, a geometria de solda foi comparada com a geometria prevista através das equações, sendo o erro percentual entre estas medidas, calculado através da Equação 4.4, o parâmetro utilizado para a avaliação e validação experimental dos modelos propostos.

$$\text{Erro}(\%) = \frac{\text{Valor medido} - \text{valor predito}}{\text{valor medido}} * 100 \quad (4.4)$$

As equações obtidas para a geometria de cordão são validas somente dentro das faixas analisadas das variáveis (195-205A para a corrente de soldagem e 4-8 mm/s para a velocidade de soldagem). A tabela 4.12 mostra as condições de soldagem utilizadas.

Tabela 4.12 - Condições de soldagem e penetração, largura e ZTA obtida nos testes de verificação.

Testes	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração [P] (mm)	Largura [L] (mm)	ZTA (mm)
1	198	4	1.220	6.727	1.453
2	205	6	1.523	5.367	1.830
3	200	8	1.210	4.1161	1.446
4	202	8	0.817	4.1283	1.237

As tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 mostram os resultados obtidos nos testes de verificação e os valores preditos através dos modelos reduzidos. O erro percentual calculado entre as medidas indica o quanto os valores preditos pelos modelos se desviaram dos valores medidos.

De uma forma geral, os resultados obtidos para as dimensões da penetração da solda e da largura de ZTA não são satisfatórias. Os valores preditos apresentaram desvios acentuados em relação aos valores medidos, provavelmente em função de erros na execução relacionados com a calibração da fonte de soldagem utilizada. Outro fator a considerar é pouca digitalização das imagens dos perfis das soldas e que impede-se em certos casos diferenciar entre a solda da ZTA.

No caso da predição dos valores da largura da solda foi adequada, considerando que as medições deste parâmetro foram obtidas com um paquímetro. O problema observado em relação com a calibração da fonte parece também afetar este parâmetro.

Tabela 4.13 – Análise da penetração da solda utilizando modelo expressão 4.18.

Teste	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração Real (mm)	Penetração predita (mm)	% Erro
1	198	4	1.220	1.338	-9.70
2	205	6	1.523	1.241	18.52
3	200	8	1.210	1.045	13.64
4	202	8	0.817	1.012	-23.82

Tabela 4.14 – Análise da largura da solda utilizando modelo expressão 4.11

Teste	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração Real (mm)	Penetração predita (mm)	% Erro
1	198	4	6.73	6.69	0.6
2	205	6	5.37	4.173	8.1
3	200	8	4.116	3.91	10.4
4	202	8	4.128	3.78	15.7

Tabela 4.15 – Análise da largura da ZTA da solda utilizando modelo expressão 4.12

Teste	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Penetração Real (mm)	Penetração predita (mm)	% Erro
1	198	4	1.453	1.672	-15.1
2	205	6	1.830	1.959	-7.0
3	200	8	1.446	1.113	23.1
4	202	8	1.237	1.224	1.1

4.4.5 – Discussão

Por intermédio de medições realizadas da morfologia dos cordões obtidos constatou-se que a largura apresentou uma maior variação nas dimensões. Como pode ser observado, que o

aumento na penetração foi muito mais significativo à medida que o formato da poça se altera, em relação ao constatado na largura do cordão.

Tomando o ponto 200A - 8 mm/s e 198 A - 4 mm/s, observa-se como apresentam comportamentos semelhantes. Para fins de otimização podem ser escolhidos, considerando a resposta em quanto a penetração, largura e fator de forma.

Baixas velocidades e correntes o comportamento da penetração e da largura seguiram a mesma tendência apresentando o mínimo para uma corrente de 198 A. O aumento na penetração acompanha a diminuição da largura. Segundo Modenesi (2009); isto pode ser explicado mediante a temperatura da poça de fusão, a qual é maior próximo de seu centro afetando a tensão superficial que tenderia a ser menor nesta região e maior próximo das suas bordas e o fluxo do metal líquido ocorreria do centro para as bordas da poça de fusão, direcionando para esta região o metal superaquecido do centro da poça e resultando em um cordão largo e de baixa penetração.

As velocidades médias 6 mm/s o comportamento da penetração e da corrente decresce suavemente quando se aumenta a corrente, a poça de fusão vira uma película fina com superfície livre imediatamente adjacente ao metal sólido. Neste caso o arco age diretamente fundindo o metal sólido. O calor absorvido e transportado pelo metal fundido é pequeno, o calor transferido é eficiente e a penetração acrescentada neste sistema garante um controle adequado do aporte de calor objetivando obter relação penetração/largura na ordem de 1:1 segundo trabalhos feitos anteriormente (Barra, 1999).

Para uma velocidade de 8 mm/s a largura tende a aumentar diminuindo a penetração o qual pode estar relacionada com a diferença na tensão superficial da poça de fusão. Desta forma, a tendência natural do fluxo espalhar para fora é iniciada por coeficientes negativos de gradiente de tensão superficial com a temperatura ($d\gamma/dT < 0$) (Perry et al., 1998) (Richeti, 2003).

Com os resultados da análise da morfologia do cordão, demonstrou-se novamente a velocidade prevalece sobre a diferenciação tanto da largura, como da penetração nos cordões. Segundo Sunarf, em altas velocidades e fracas correntes a ZTA e região de fusão são pequenas o que evita o aquecimento do metal base, a velocidades de soldagem

elevadas aparecem escória nas bordas do cordão devido a potência do arco, efeito que depende da corrente de soldagem.

4.5 – ANÁLISE ELÉTRICA – TENSÃO E CORRENTE DO ARCO

A presente seção compara os dados de corrente, tensão e temperatura obtidos de diversas experiências, mostrando as vantagens oferecidas pela monitoração infravermelha da poça arco.

O arco é um eficiente transdutor de energia onde a energia elétrica é convertida quase que totalmente em calor. A análise dos parâmetros elétricos (tensão e corrente) do arco é uma caracterização relativamente simples e comumente utilizada em operações de produção para controle de qualidade. Uma análise da variação dinâmica dos sinais elétricos pode fornecer dados importantes sobre os processos no arco elétrico.

A soldagem é um processo que gera alta interferência nos componentes eletrônicos motivo pelo qual as placas e software de aquisição devem ser projetados para suportar e minimizar as interferências. Desta maneira os sinais de corrente e tensão apresentam uma grande variação a respeito do seu valor médio. Razão pela qual este estudo faz uma filtragem do ruído nos sinais, utilizando a software *Wavelet Toolbox*TM do *Matlab*, pela capacidade da Transformada *Wavelet* para decompor os sinais tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, em uma determinada região, revelando tendências e discontinuidades em altas derivadas.

Para o cálculo do aporte de calor entregue para a peça, bem como para as análises comparativas de estabilidade do arco elétrico considerado a tensão, corrente e aporte térmico em função do comprimento do cordão foram escolhidos três cordões considerando as características observadas previamente (Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7).

A corrente de soldagem (I) tem uma relação direta com a quantidade de calor transferido para a peça, sendo, portanto uma variável fundamental para determinar a quantidade de fusão no metal de base e a penetração da solda (Modenesi, 2009). Por outro lado, a tensão tem um menor efeito na penetração, pois as variações desta causam maiores efeitos na coluna do arco cujo calor gerado é transmitido principalmente na direção radial. Neste

sentido podem ser correlacionados os formatos obtidos da poça de fusão com as variações na tensão.

Na medida em que se incrementa a corrente e a velocidade o aporte térmico decresce diminuindo a penetração e largura, o sinal de tensão se mantém estável no tempo (Figura 4.5).

Um cordão com baixa corrente e alta velocidade - 150A -10 mm/s (Figura 4.4) apresentam um menor aporte térmico o que permite que a taxa de resfriamento seja mais rápida, contribuindo diretamente para uma menor ocorrência de discontinuidades. Isto se torna factível pelas menores penetrações do arco voltaico (Novicki, 2008). Por outro lado um maior aporte térmico (Figura 4.6) implica na ampliação da distância medida a partir do centro do cordão sujeitas a elevadas temperaturas implica-se também uma maior extensão da ZTA (Dong, 2009), e maior profundidade de penetração do cordão de solda.

No cordão com *Humping* (Figura 4.7) o sinal de tensão apresenta maiores variações, mantendo a corrente estável, um indicativo de que pode-se relacionar com o aparecimento de discontinuidades. Ainda que o aporte térmico seja baixo.

Em geral os resultados obtidos podem inferir que as variações da tensão e corrente no arco não oferecem a suficiente informação que permite a detecção de discontinuidades associados a discontinuidades no cordão.

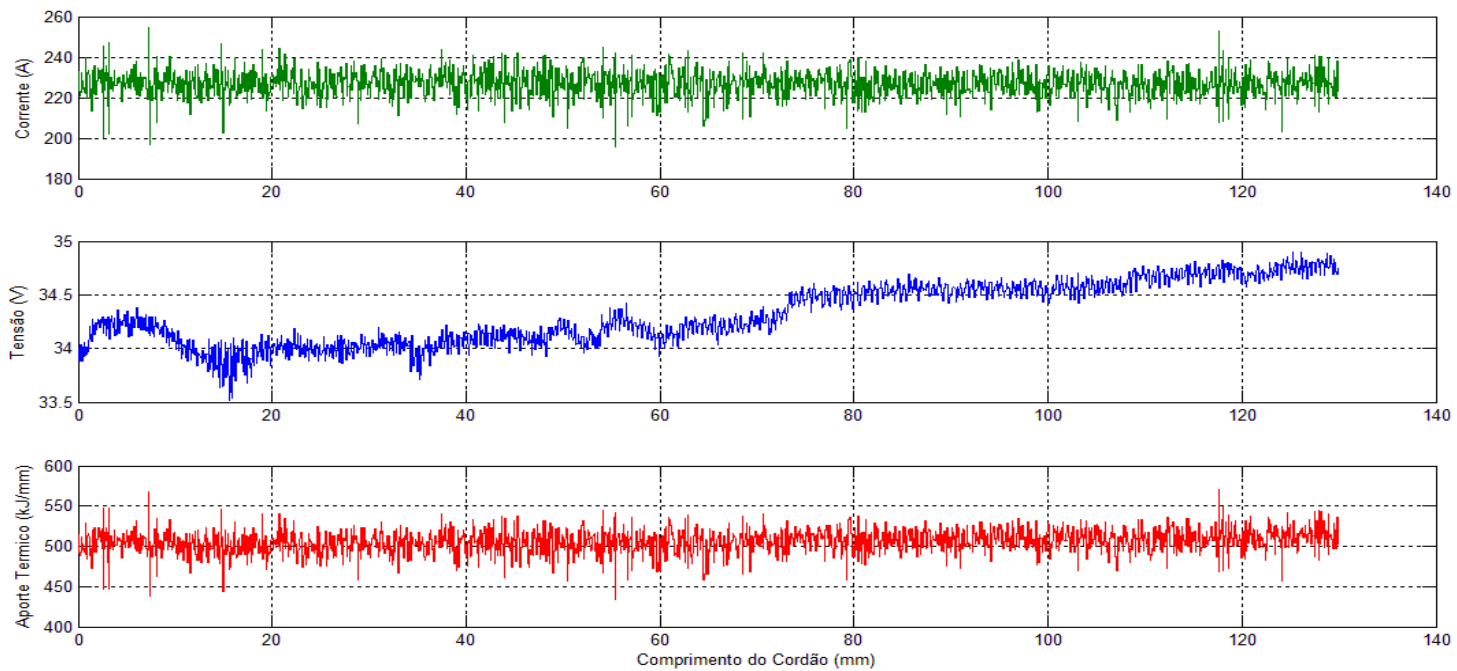
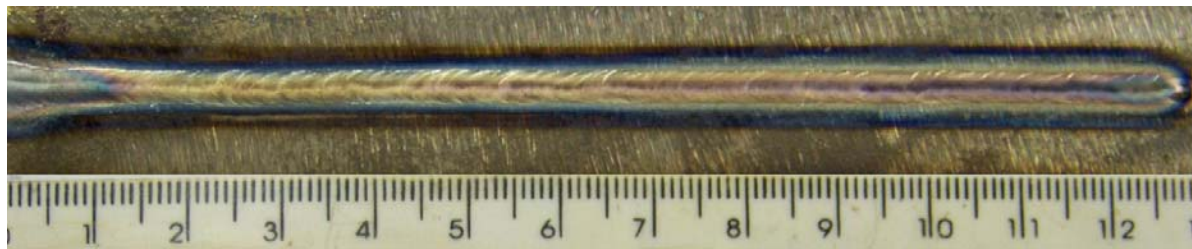


Figura 4.4 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 150 A e velocidade 10 mm/s

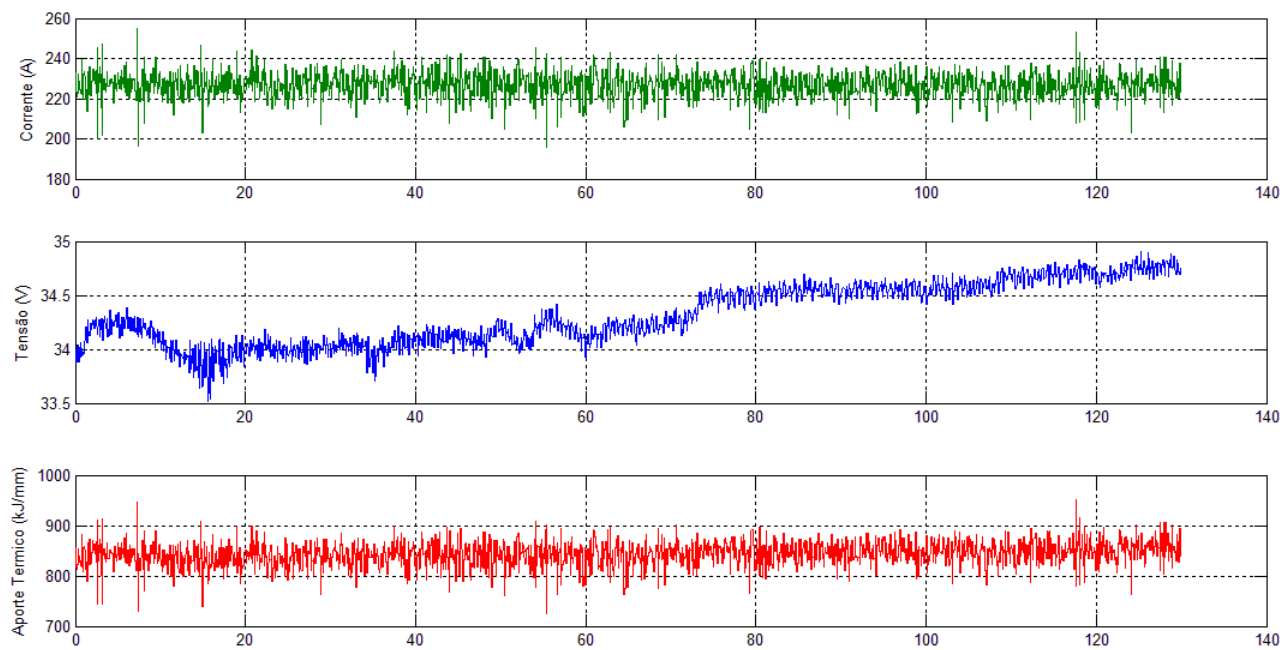
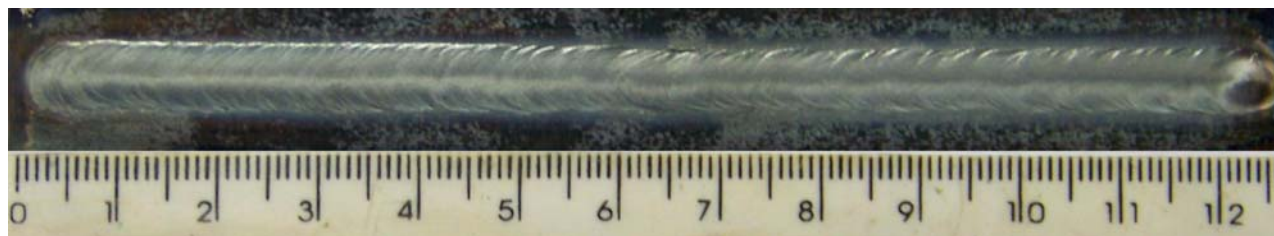


Figura 4.5 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 200 A e velocidade 6 mm/s

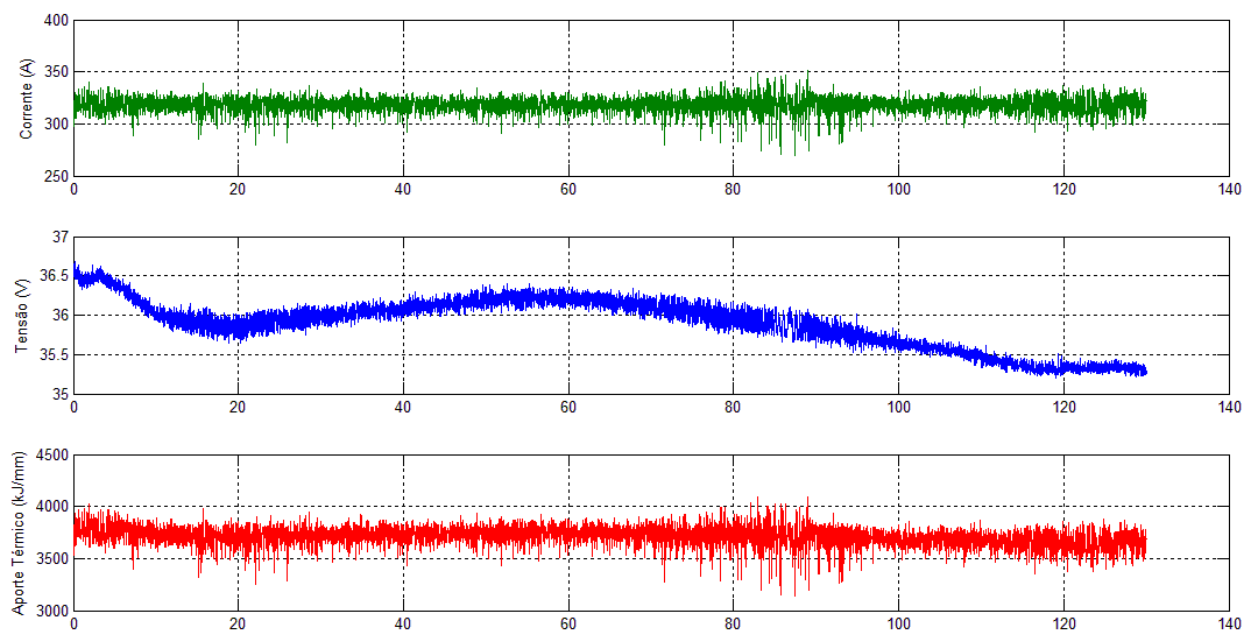
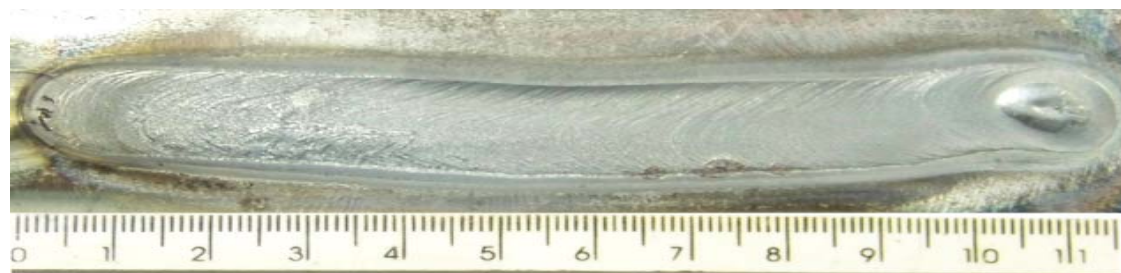


Figura 4.6- Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 250 A e velocidade 2 mm/s de soldagem

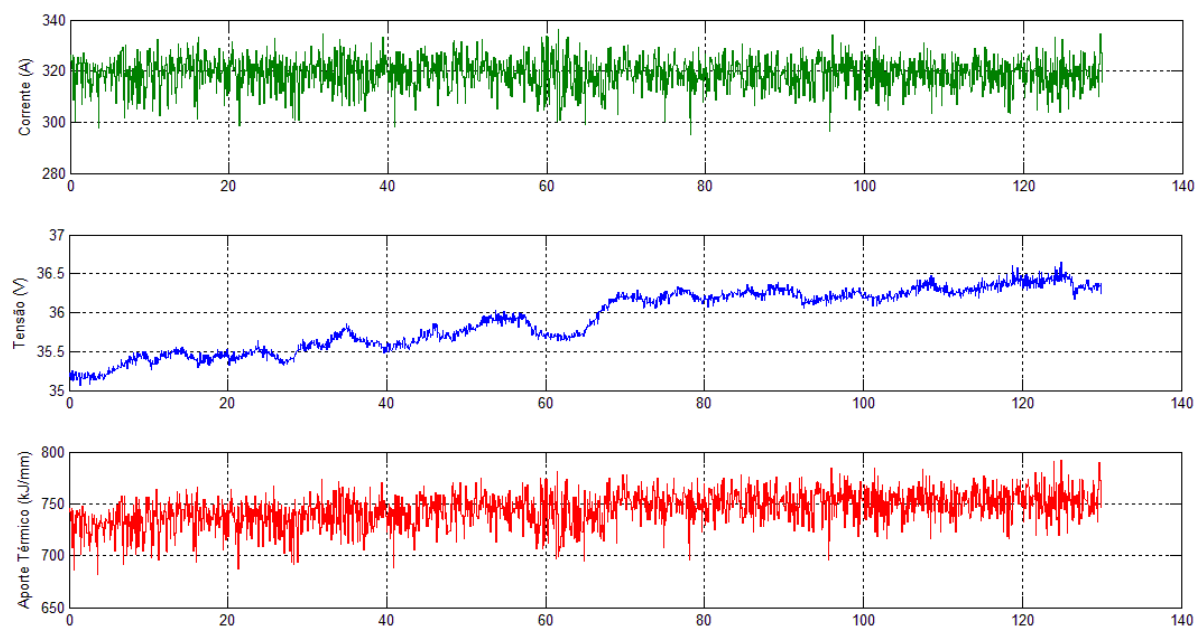
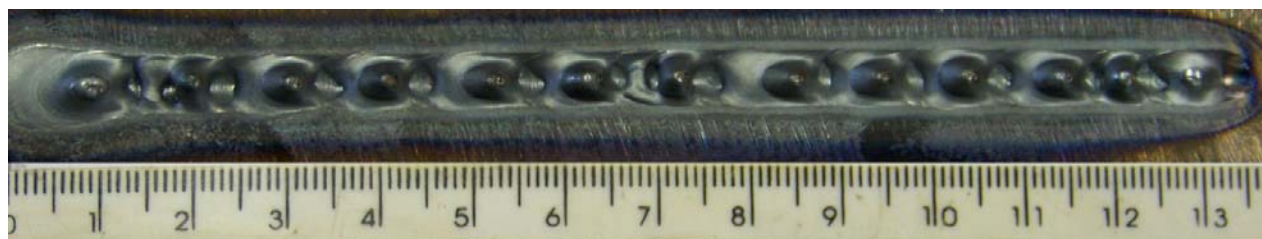
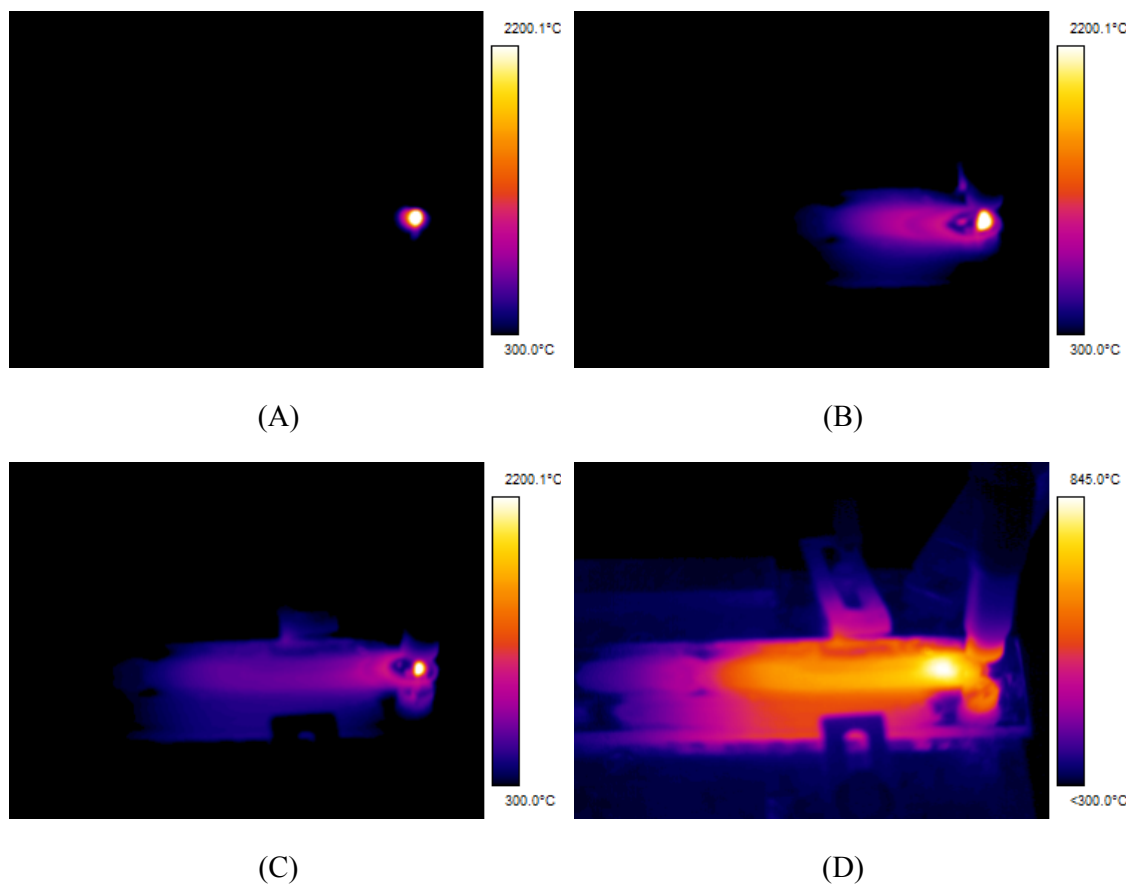


Figura 4.7 - Sinais de tensão, corrente e aporte térmico para o cordão feito com uma corrente de 250 A e 10 mm/s de velocidade de soldagem.

4.6 - PÓS-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE INFRAVERMELHO DA POÇA DE FUSÃO

Ao mudar parâmetros como a corrente e velocidade da soldagem, fenômenos térmicos que acontecem na poça de fusão estão sendo modificados, ocasionando mudanças na geometria da poça de fusão. É uma forma de estudar estes fenômenos mediante as imagens de infravermelho. Estas contribuem com informações de modo que se encontra distribuído o calor no material que está sendo soldado. Nesta parte, trata-se do pós-processamento feito com imagens obtidas em diferentes soldas focalizando-se na caracterização do *Humping*.

As imagens típicas de infravermelho mostram-se na Figura 4.8, para um cordão soldado com uma corrente de 250 A e uma velocidade de 2 mm/s em diferentes instantes do tempo.



Na Figura 4.8(A) apresenta uma visão da poça de fusão no começo do cordão quando o arco é aberto. A Figura 4.8(B) corresponde à imagem obtida após 20 segundos após iniciar o processo de soldagem. A Figura 4.8(C) é a imagem no final do cordão, quando o arco está se fechando e a Figura 4.8(D) corresponde ao cordão resfriando-se após 11 segundos de finalizado o processo.

A Figura 4.9 apresenta uma seqüência de imagens de infravermelho para um cordão feito com uma corrente 150 A e uma velocidade de 10 mm/s em diferentes instantes do tempo. Na Figura 4.9(A) mostra uma visão da poça de fusão no começo do cordão quando o arco é aberto. A Figura 4.9(B) corresponde à imagem obtida 5.8 segundos após começar o processo de soldagem. A Figura 4.9(C) é a imagem no final do cordão, quando o arco está se fechando e a Figura 4.9(D) corresponde ao cordão resfriando-se após 13.9 segundos de finalizado o processo.

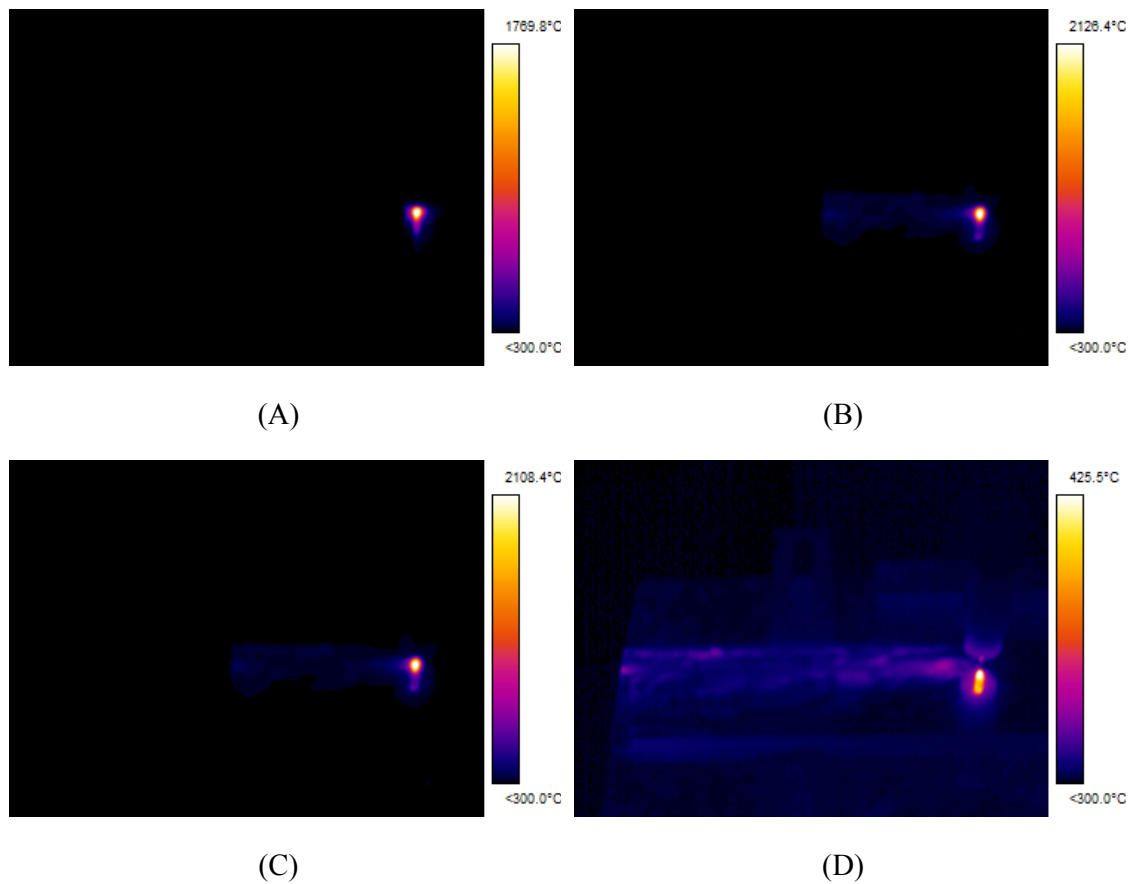


Figura 4.9 - Seqüência de imagens de infravermelho para um cordão feito com 150 A de corrente e 10 mm/s de velocidade de soldagem aos: (a) 0 s, (b) 5.8 s, (c) 6.9 s e (d) 13.9 s respectivamente.

Comparado a Figura 4.8 com a Figura 4.9, o esfriamento foi mais rápido na última figura, o cordão (150 A – 10 mm/s), considerando os parâmetros empregados para a execução da solda.

O efeito do calor subministrado pelo arco no material base pode ser visualizado mediante a representação da superfície dos perfis térmicos. Razão pela qual foi escolhida uma imagem térmica na metade do processo (50% do comprimento total do cordão) para cada uma das soldas feitas e posteriormente foi representada mediante superfície, na Figura 4.10 apresentam-se os resultados.

Conforme aumenta a velocidade de soldagem o aporte térmico é menor o qual se vê refletido na deformação que apresenta a superfície na medida em que fica mais longe do arco (Figura 4.10(A) e 4.10(B)). Esta característica também mostra de forma menos evidente no cordão que apresenta *Humping* (Figura 4.11(D)).

Outro aspecto a considerar na Figura 4.10 referente à superfície que fica na poça de fusão é que a medida que aumenta a corrente a poça tende a engrossar-se (como exemplo comparar Figura 4.10(E) com Figura 4.10(F)). Esta representação 3-D da superfície do material submetido à soldagem permite obter indicações de possíveis mudanças a serem feitas nos parâmetros de soldagem tais como velocidade de soldagem e corrente, e a partir destas mudanças minimizarem os efeitos térmicos que são resultados do processo. Para que o aporte térmico diminua, a velocidade de soldagem deve aumentar e a corrente diminuir (Felizardo, et al, 2006).

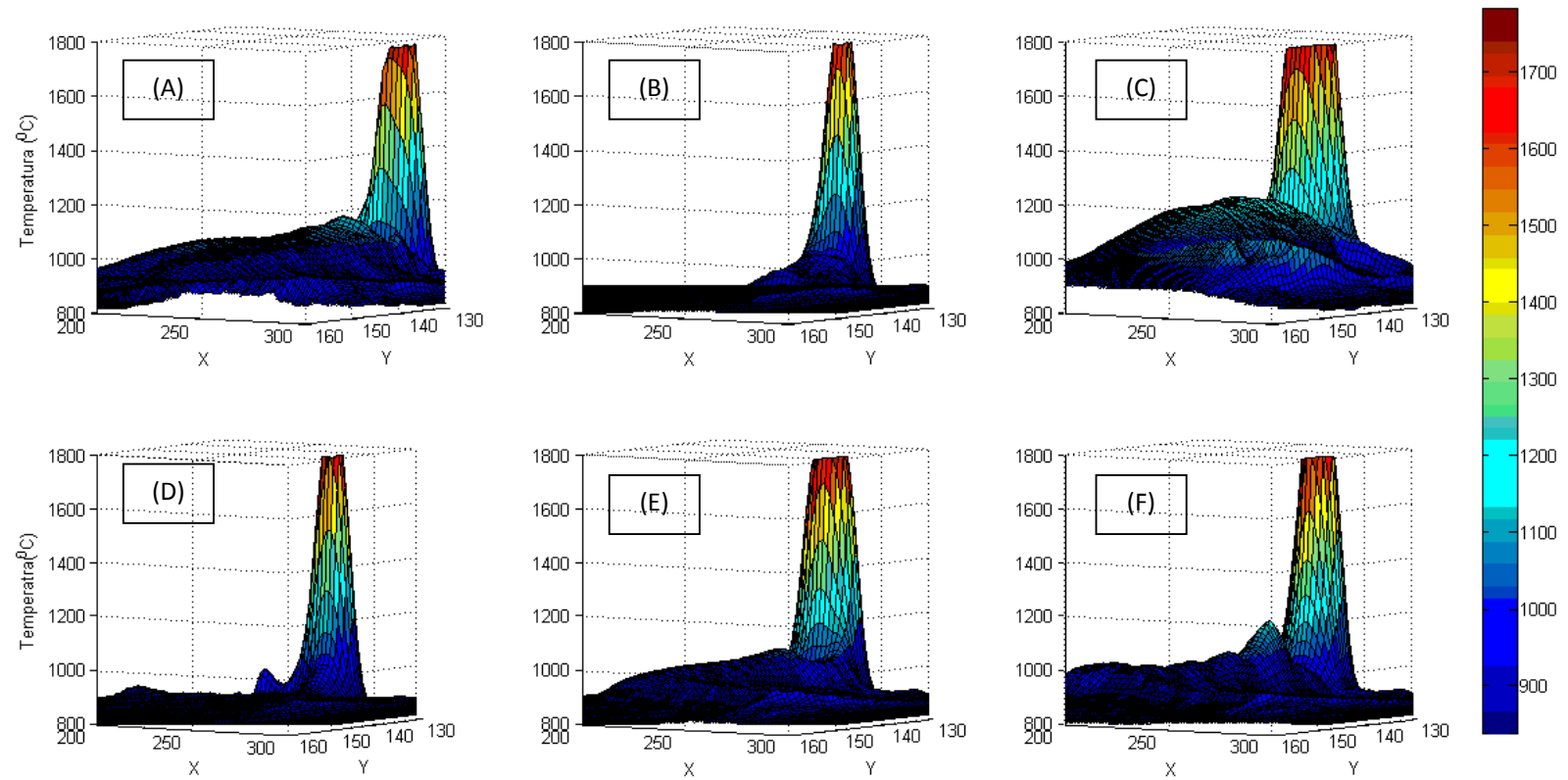


Figura 4.10 - Superfícies 3D para os cordões feitos com A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s e (D) 150 A – 10 mm/s (E) 195 A – 4mm/s e (F) 250 A -10 mm/s.

A partir das imagens obtidas com a câmera de infravermelho para cada um dos cordões fabricados e depois de um pós-processamento foram abstraídas as isotermas que demarcam a poça de fusão. Na Figura 4.11, apresentam-se os diferentes formatos das isotermas da poça de fusão para cada um dos cordões feitos.

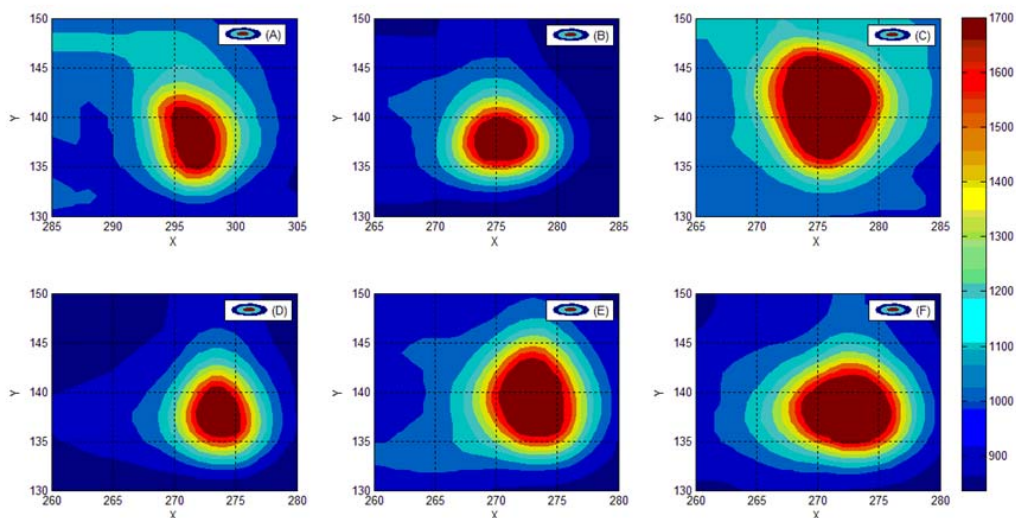


Figura 4.11 - Isotermas da poça de fusão para os diferentes cordões com: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 195 A – 8 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s e (F) 250 A – 10 mm/s depois do pós-processamento

Dependendo dos parâmetros de soldagem os formatos da poça de fusão vêm-se modificados. A poça produzida com as condições de soldagem no nível baixo, Figura 4.11(A), apresenta um formato elíptico com alongação no eixo vertical. Já a poça de fusão, formado com parâmetros de soldagem do nível médio, mostrada pela Figura 4.11(B), apresenta um formato elíptico com alongação no eixo horizontal. Neste tipo de formato a frente de solidificação muda constantemente em função do perfil elíptico da superfície da poça de fusão, os grãos não encontraram a direção ideal de crescimento favorecendo a formação de maior número de grãos com menor tamanho e aspecto menos colunar dando origem a uma estrutura mais favorável à qualidade da junta soldada (Dong, 2009).

A Figura 4.11(C) forma parte da operação em baixas velocidades resultando um excesso de calor transferido para a peça e conseqüente formação de poças de fusão de grandes

dimensões (Reis, 2005). Na Figura 4.11(D) ilustra a poça obtida com os parâmetros de soldagem do nível superior, esta poça apresenta um formato de gota condição propicia para o aparecimento do *Humping*.

Na maior parte dos casos, segundo (Jorge, 2008) afirma que a poça com o formato elíptico Figura 4.11(B) é característica da utilização de uma velocidade de soldagem igual à de solidificação. Da mesma forma, a poça em formato de gota é decorrente da utilização de uma velocidade de soldagem maior que a velocidade de solidificação.

Para analisar as variações no tempo para cada um dos formatos da poça de fusão, foram escolhidas oito imagens consecutivas no meio do processo de soldagem. A Figura 4.12 mostra as isotermas de um cordão sem descontinuidades. Não se observam variações importantes na geometria. O formato no tempo permanece constante. As Figuras 4.12(B) e Figuras 4.12(C) mostram a geometria das isotermas para duas temperaturas de interesse, a temperatura de fusão para o aço (1400°C) e a temperatura relacionada com a zona termicamente afetada (ZTA) a 727°C (Komanduri, et al, 2000).

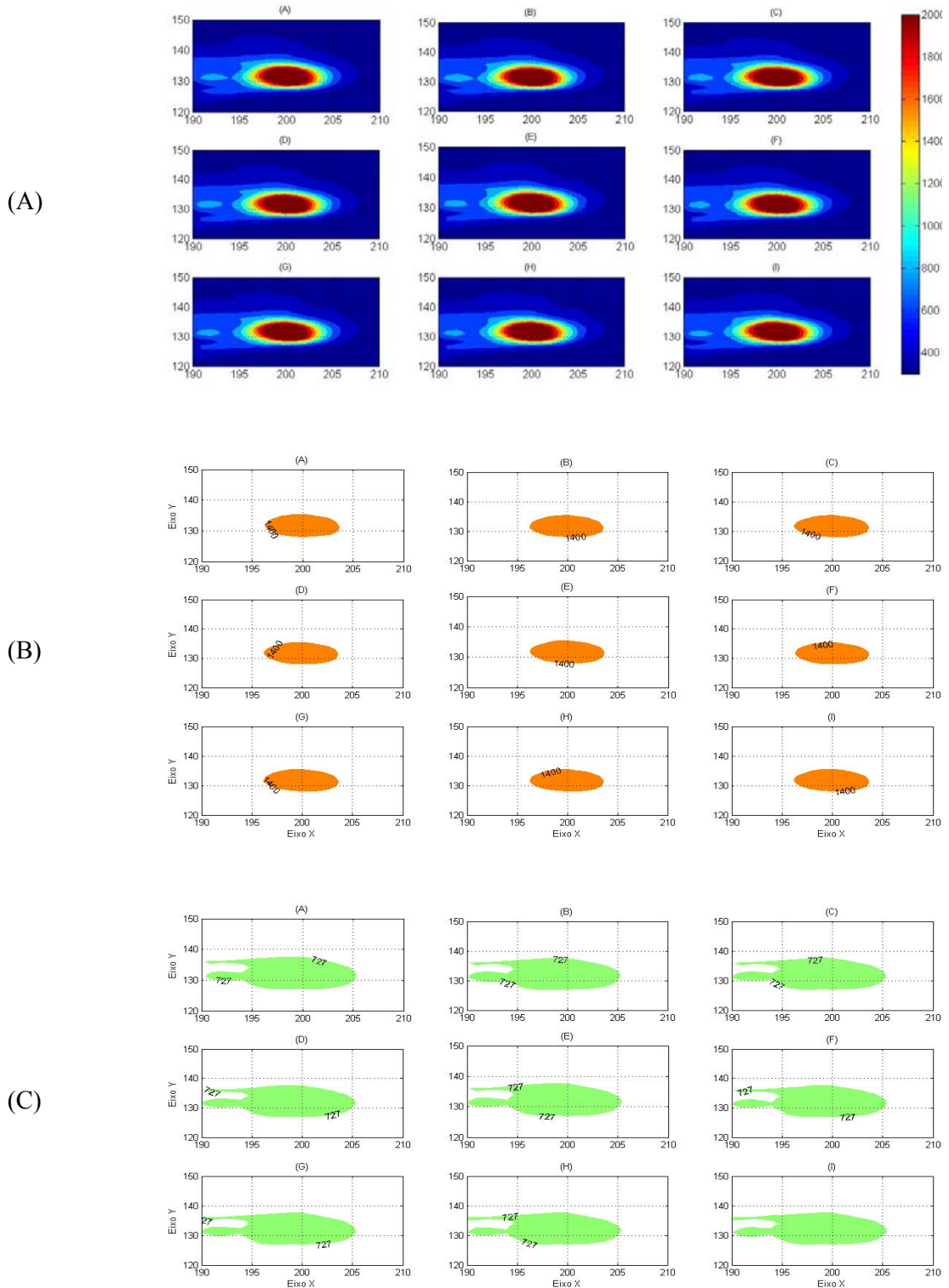


Figura 4.12 – (A) Sequência dos perfis térmicos para um cordão com uma corrente de 200 A e uma velocidade 6 mm/s e as respectivas isothermas a (B) isoterma 1400 °C e (C) isoterma 727 °C

No caso de um cordão que apresenta descontinuidades tipo *Humping*, Figura 4.13, observa-se uma geometria tipo gota nas isoterma, as quais se tendem a alongar no eixo X, ao não receber o calor do arco, esta se desmembra da poça de fusão. Estas variações são a origem das descontinuidades na solda, como se pode observar na Figura 4.13(B), sendo mais evidente na Figura 4.13(C).

Resultados experimentais confirmam uma relação quadrática entre a corrente e a força do arco agindo sobre a poça de fusão no arco TIG, desta forma a alta corrente e a pressão do arco pode ajudar na formação da poça de fusão promovendo a sua penetração no metal de base (Modenesi, 2009). Porém pressão excessiva pode levar a formação de irregularidades de forma no cordão de solda TIG ("*Humps*").

A poça de fusão tipo gota favorece a formação colunar dos grãos em decorrência da frente de troca de calor permanecer praticamente inalterada, dando a frente de solidificação uma orientação relativamente constante em relação à direção de soldagem, o que favorece o crescimento desde a linha de fusão até o centro da solda (Dong, 2009).

No apêndice A mostram-se a os resultados obtidos para outras soldas fabricadas.

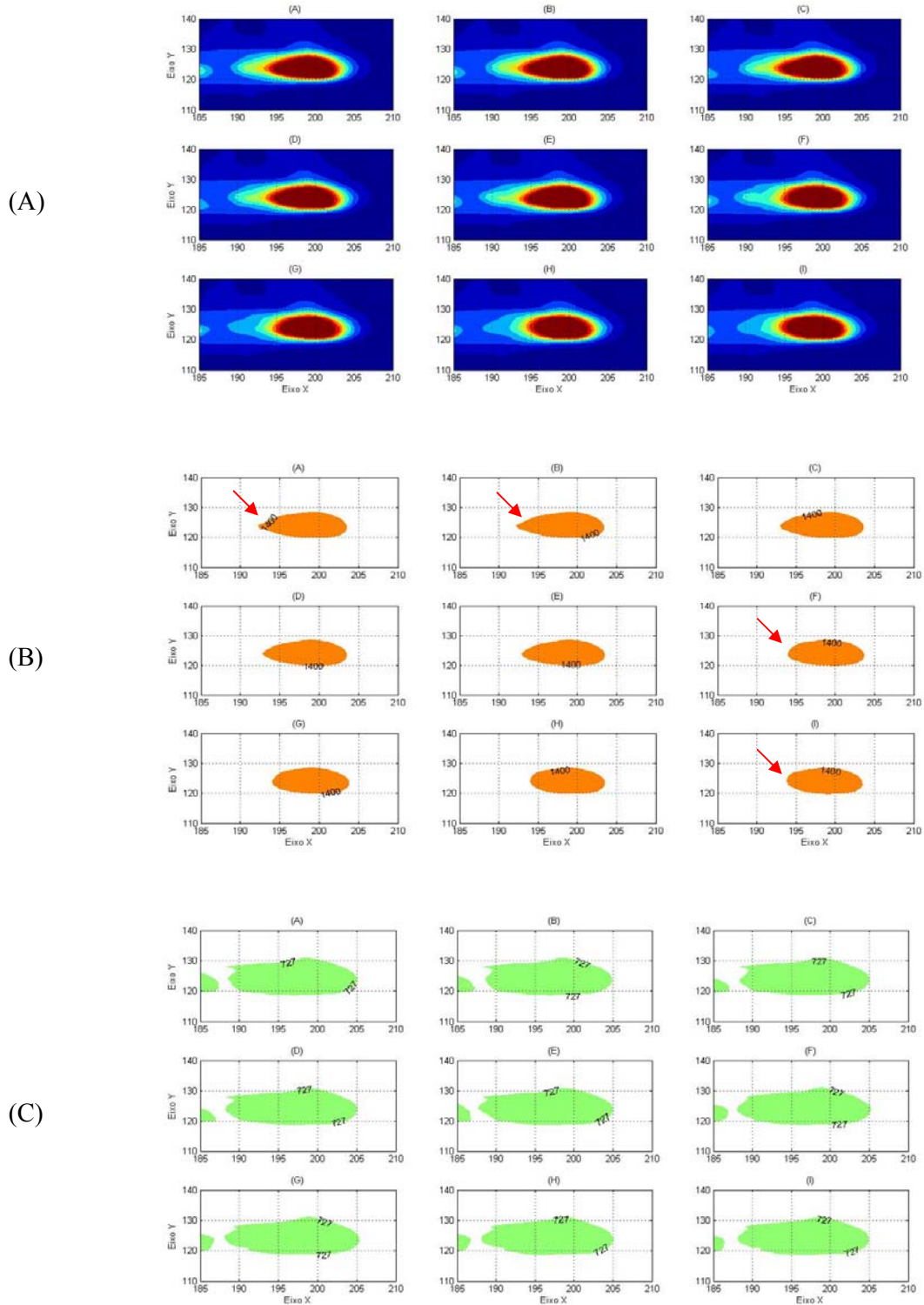


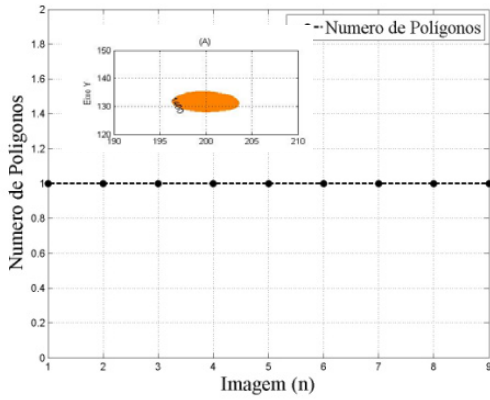
Figura 4.13 - (A) Sequência dos perfis térmicos para um cordão com uma corrente de 250 A e uma velocidade 10 mm/s e as respectivas isotermas a (B) isoterma 1400 °C e (C) isoterma 727 °C

Os resultados obtidos pelo algoritmo de processamento se apresentam nas Figuras 4.14 e 4.15. Os parâmetros morfológicos obtidos das imagens de infravermelho calculados permitem caracterizar a geometria da poça de fusão em função dos parâmetros de entrada (corrente e velocidade de soldagem), além de determinar a formação de descontinuidades tipo *Humping* na solda.

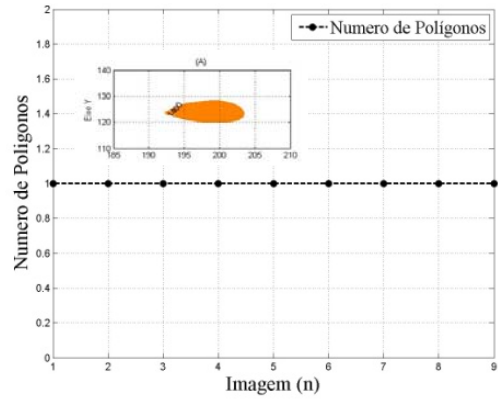
Para análise foram escolhidas as isotermas a 1400 e 727°, relacionadas com a temperatura de fusão e temperatura da zona termicamente respectivamente. Na figura 4.14 mostram os resultados da isoterma 1400° para o cordão de solda sem descontinuidades (Figura 4.14(A), 4.14(C) e 4.14(E)) e para o cordão de solda com presença de *Humping* (Figura 4.14(B), 4.14(D) e 4.14(F)). Na fase inicial de detecção de números de polígonos os resultados são os mesmos para as duas soldas. Na determinação da área, o cordão com alta corrente apresenta uma maior área relacionado com um maior aporte térmico e conseqüentemente um aumento do volume de material fundido. Embora esta área no caso do cordão com *Humping* não se mantenha constante comparada com o cordão sem descontinuidades (ver Figura 4.14(C) e 4.14(D)).

As dimensões da poça relacionadas com o comprimento do eixo vertical e horizontal, o cordão com *Humping* apresenta um decréscimo desproporcional no comprimento do eixo X, correspondente ao alongamento da poça de fusão, posterior ao desmembramento e formação do *Humping*. Quando a velocidade de soldagem difere da velocidade de solidificação a poça de fusão desloca-se e não consegue acompanhar a velocidade do arco, a superfície de solidificação se atrasa em relação à frente de fusão e a poça de fusão toma o aspecto de uma gota alongada, o calor do arco passa a ser insuficiente na região posterior da poça de fusão.

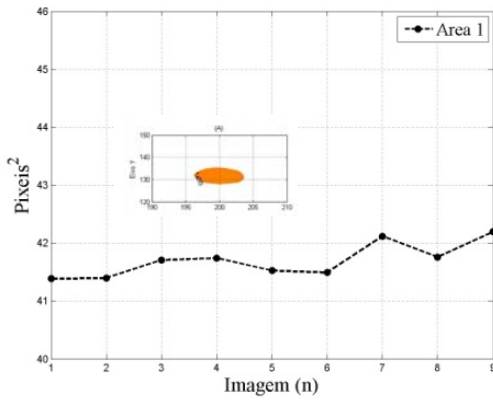
No caso do cordão sem descontinuidades os comprimentos dos eixos – horizontal e vertical permanecem constantes, conservando uma pequena diferença indício de uma poça de fusão com geometria elíptica, que pode estar relacionada com a proximidade entre a velocidade que a avança a frente de solidificação e a velocidade de soldagem (Jorge, 2008).



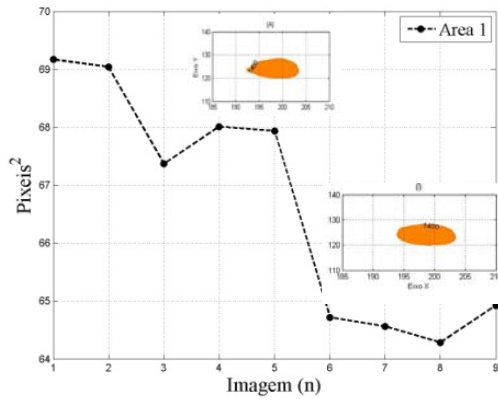
(A)



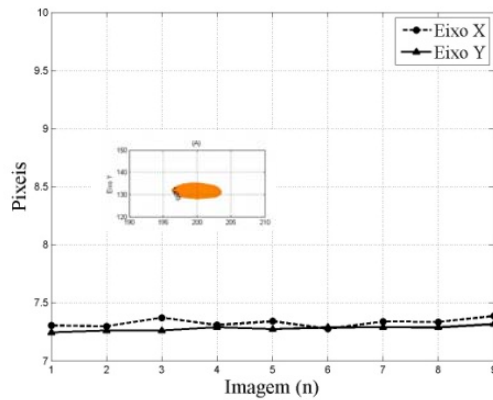
(B)



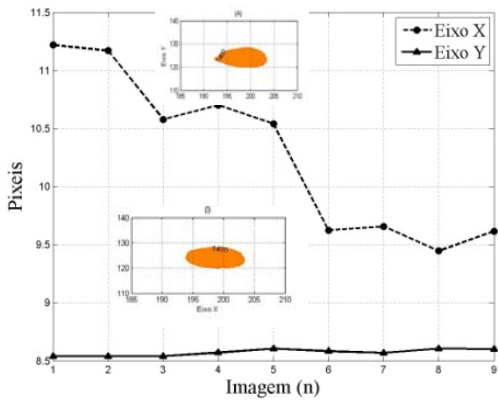
(C)



(D)



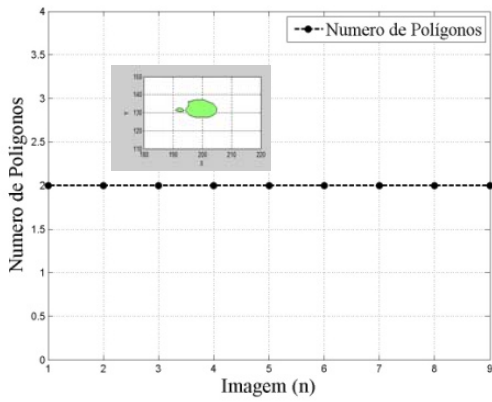
(E)



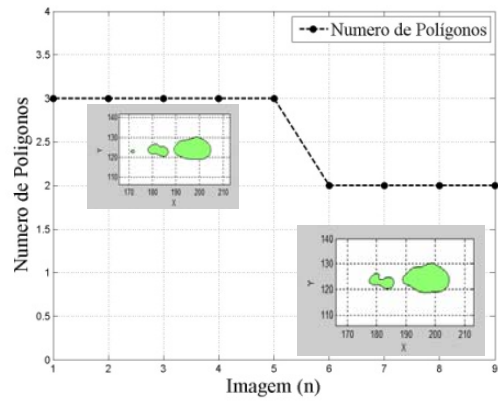
(F)

Figura 4.14 - Resultados obtidos do pós-processamento da isoterma de 1400°C onde (A), (C), (D) correspondem ao cordão com parâmetros 200 A-6 mm/s e (B), (D), (F) correspondem ao cordão com parâmetros 250 A-10 mm/s.

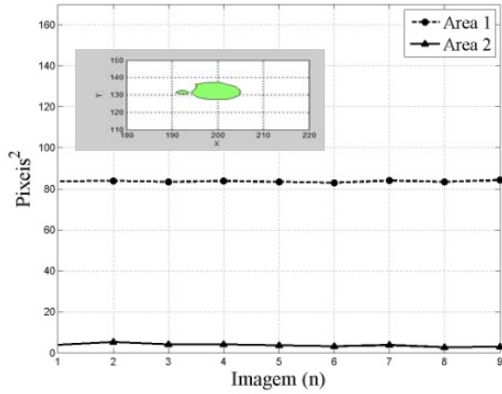
Considerando a isoterma 727°C a solda com presença de *Humping*, apresenta mais de dois polígonos, como consequência da formação de um cordão com descontinuidades (Figura 4.15(B)). A área maior correspondente a poça de fusão é comparada com a área da poça de fusão de um cordão sem descontinuidades (Figura 4.15 (C) – 4.15(D)). As dimensões da poça de fusão caracterizadas pelos comprimentos dos eixos mostram uma diferença marcada entre o comprimento do eixo horizontal e vertical.



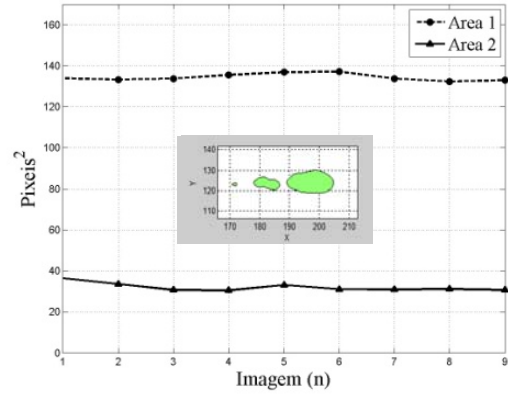
(A)



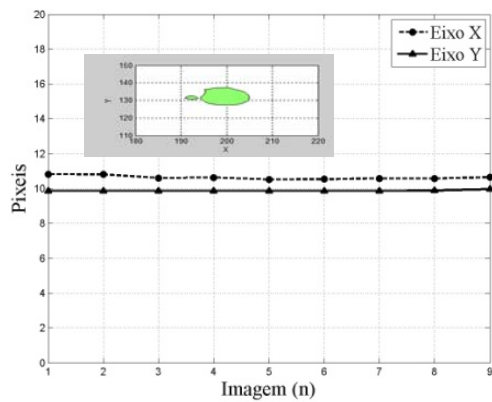
(B)



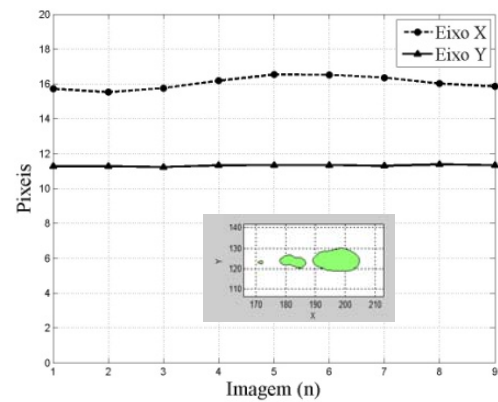
(C)



(D)



(E)



(F)

Figura 4.15 - Resultados obtidos do pós-processamento da isoterma de 727°C onde (A), (C), (D) correspondem ao cordão com parâmetros 200A-6mm/s e (B), (D), (F) correspondem ao cordão com parâmetros 250A-10mm/s.

Na Figura 4.16, mostram os resultados para diferentes cordões considerando a isoterma 1400°C. Independente dos parâmetros utilizados para fabricar a solda, o algoritmo detecta só um polígono. No caso da isoterma a 727°C (Figura 4.17), o algoritmo dependendo dos parâmetros de entrada (corrente - velocidade de soldagem) identifica mais de três polígonos, relacionados com o esfriamento da solda.

A Figura 4.18 mostra a variação da área da isoterma a 1400°C ao longo do processo, conforme muda a corrente e velocidade de soldagem. Em primeira instância observa-se independente dos parâmetros de entrada um regime transitório no início do processo, indício da estática do equipamento usado, e que pode afetar a homogeneidade da geometria no cordão. Cada combinação de corrente e velocidade determina uma área característica para cada solda.

No caso de uma solda com alto aporte térmico (energia fornecida por unidade de comprimento de metal de base) Figura 4.19(C), tal como se viu na inspeção visual apresenta uma área maior. Neste sentido a determinação da área das isotermas mostra a tendência do sistema, quanto maior é a velocidade de soldagem, mantendo-se constante a corrente, menor é o aporte térmico e, portanto, menor área da poça de fusão. No caso de um cordão que apresenta *Humping* (Figura 4.19(F)), a área da poça de fusão não consegue manter-se constante apresentando uma série de picos.

A Figura 4.20 mostra os histogramas da área para cada um dos cordões. Devido à alta variabilidade nos histogramas optou-se por calcular a moda como medida característica da área para cada cordão.

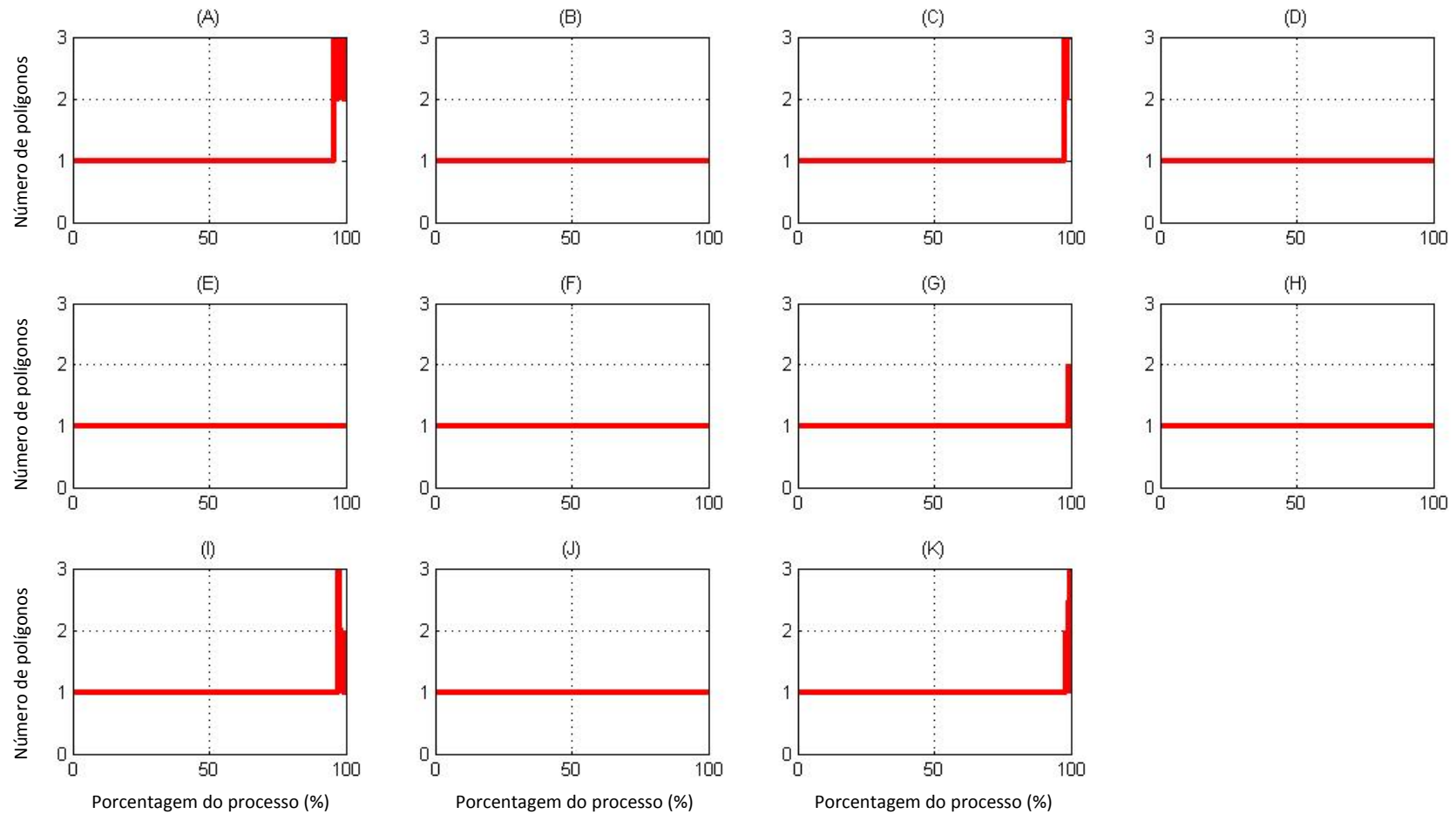


Figura 4.16 - Número de polígonos detectados ao longo do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C.

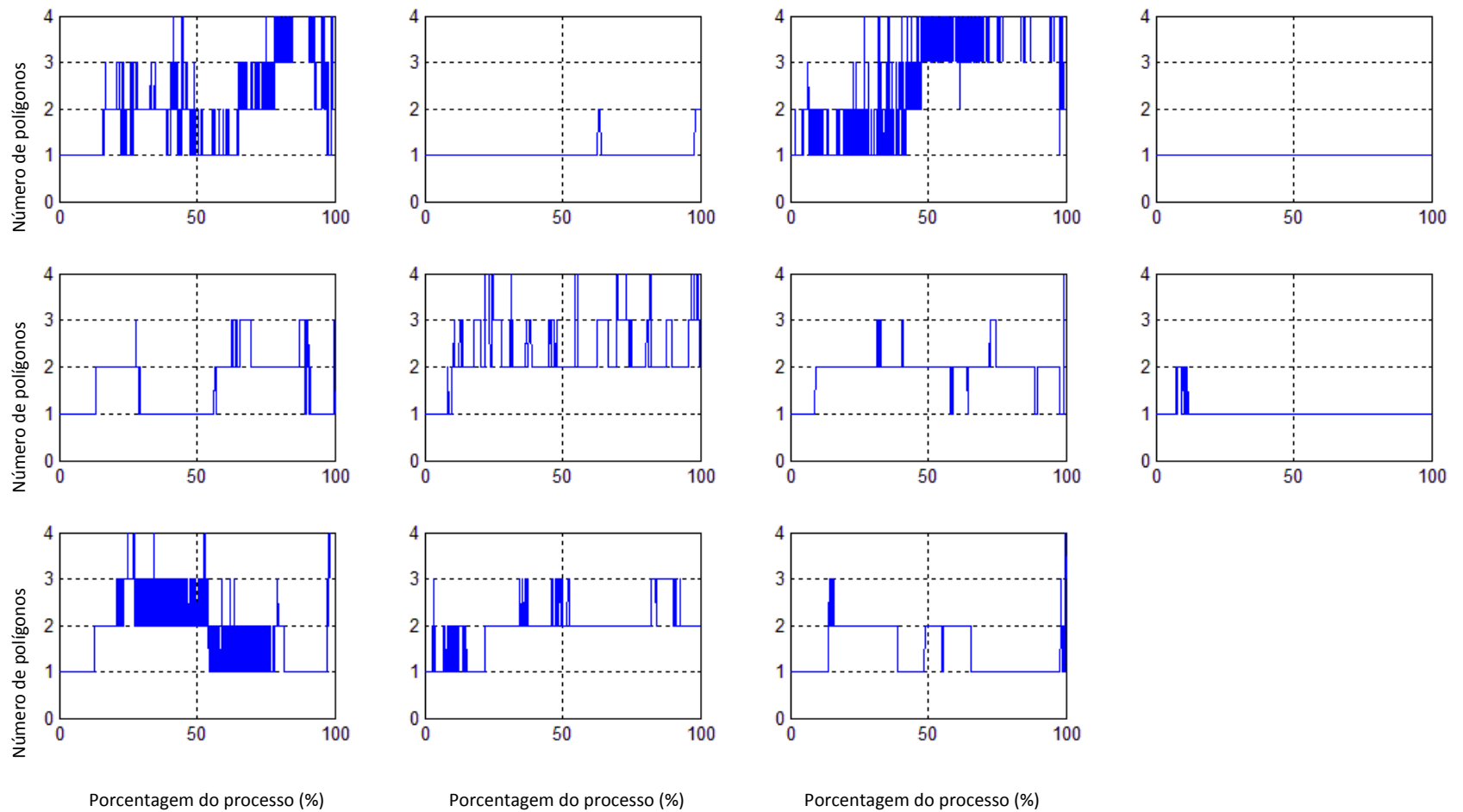


Figura 4.17 - Número de polígonos detectados ao longo do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 727°C.

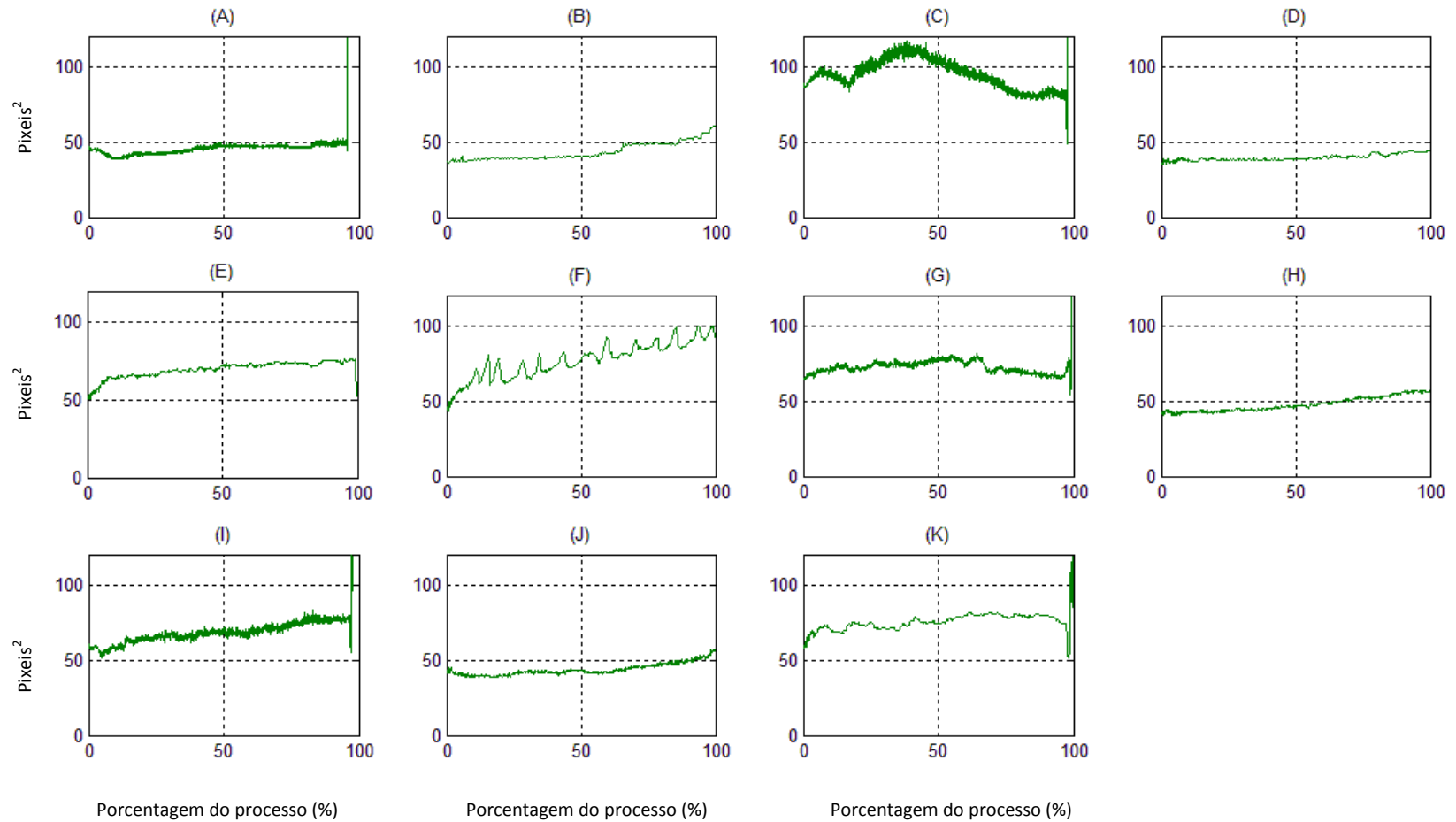


Figura 4.18 - Gráfica da área vs. teor do processo para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C.

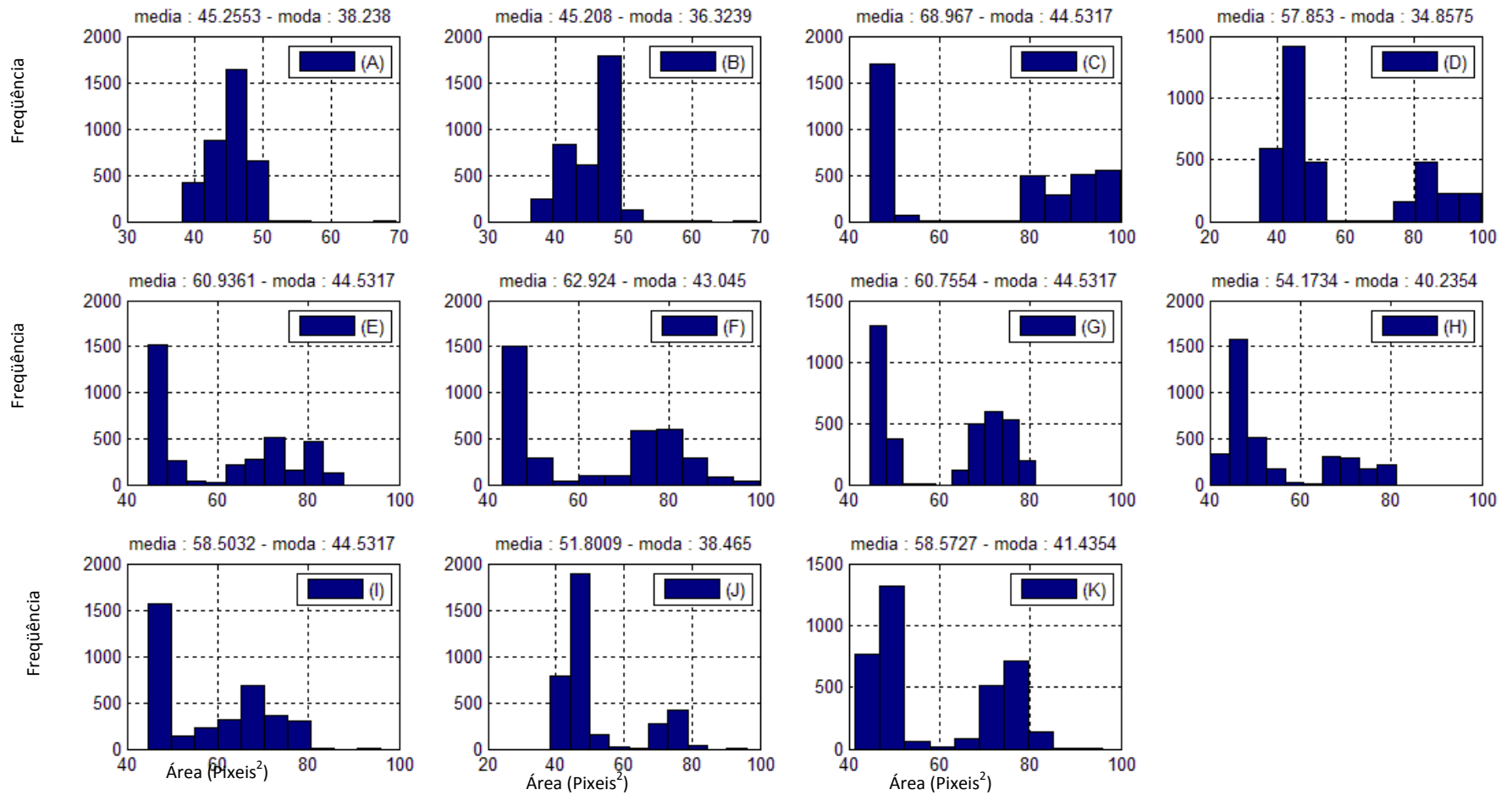


Figura 4.19 – Histograma da área para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C.

Na Figura 4.20 ilustram os gráficos os comprimentos dos eixos principais X e Y da poça de fusão, para diferentes cordões considerando a isoterma a 1400°C. Tal como mostra a área, observa-se independência dos parâmetros de entrada um regime transitório início da estática do equipamento usado. Estas variações da distribuição da temperatura superficial poderiam implicar nas perturbações na penetração da solda (Franco, 2008).

Para um cordão livre de descontinuidades o comprimento dos eixos se estabiliza no tempo (Figura 4.20(D), 4.20(F) e 4.20(G)), sendo maior o eixo vertical. No caso de um cordão com descontinuidades mudanças o regime estacionário apresenta sobressaltos no eixo horizontal, relacionado com as descontinuidades no cordão (ver Figura 4.20(E)). Esta característica permite identificar diretamente o *Humping* durante o processo. O comportamento destes gráficos podem ser aproveitados para a implementação de um sistema online que quantifique as mudanças da poça de fusão ao longo de um processo tomando como referência as condições estudadas no presente estudo.

Posteriormente foram feitos os histogramas dos comprimentos para cada um dos eixos (Ver Figura 4.21 e Figura 4.22). Comparando a Figura 4.21 com a Figura 4.22, apresenta maior variabilidade no comprimento do eixo X.

Em geral observa-se como a partir das imagens obtidas pela câmera de infravermelho podem se abstrair características geométricas dos perfis isotérmicos da poça de fusão que caracterizam cada um dos cordões fabricados.

Para uma solda sem descontinuidades, em condições estáveis, o formato das isothermas na poça de fusão apresenta padrões repetíveis e regulares tanto em área como em comprimento dos eixos vertical e horizontal.

A partir das imagens obtidas foi possível o desenvolvimento de um laboratório virtual do ciclo térmico, como suporte as aulas experimentais da Metalurgia da Soldagem. No apêndice B.

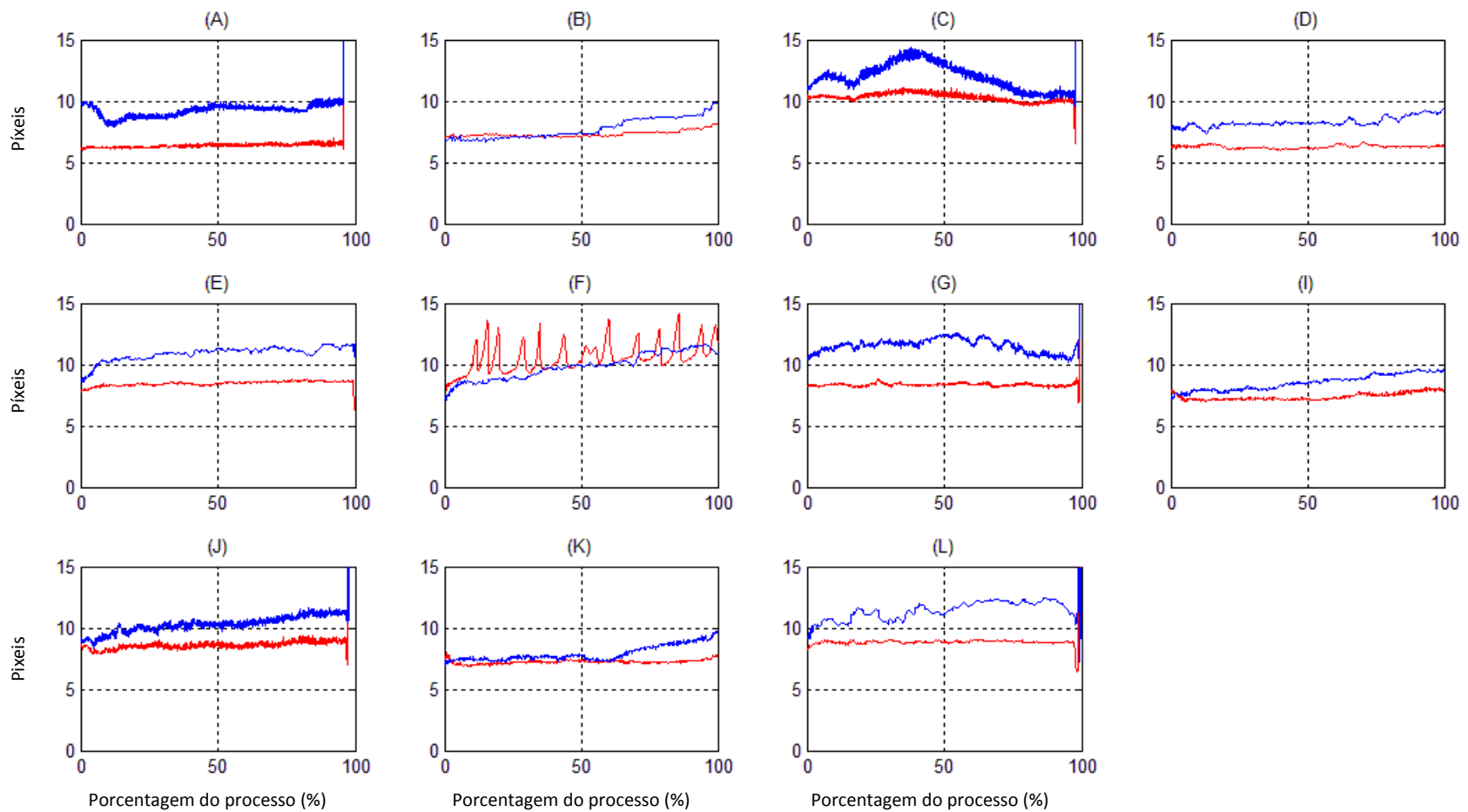


Figura 4.20 - Comprimento eixo X e eixo Y para um cordão com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: ((A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8mm/s para a isoterma 1400°C (vermelho-eixo X; azul –eixo Y)

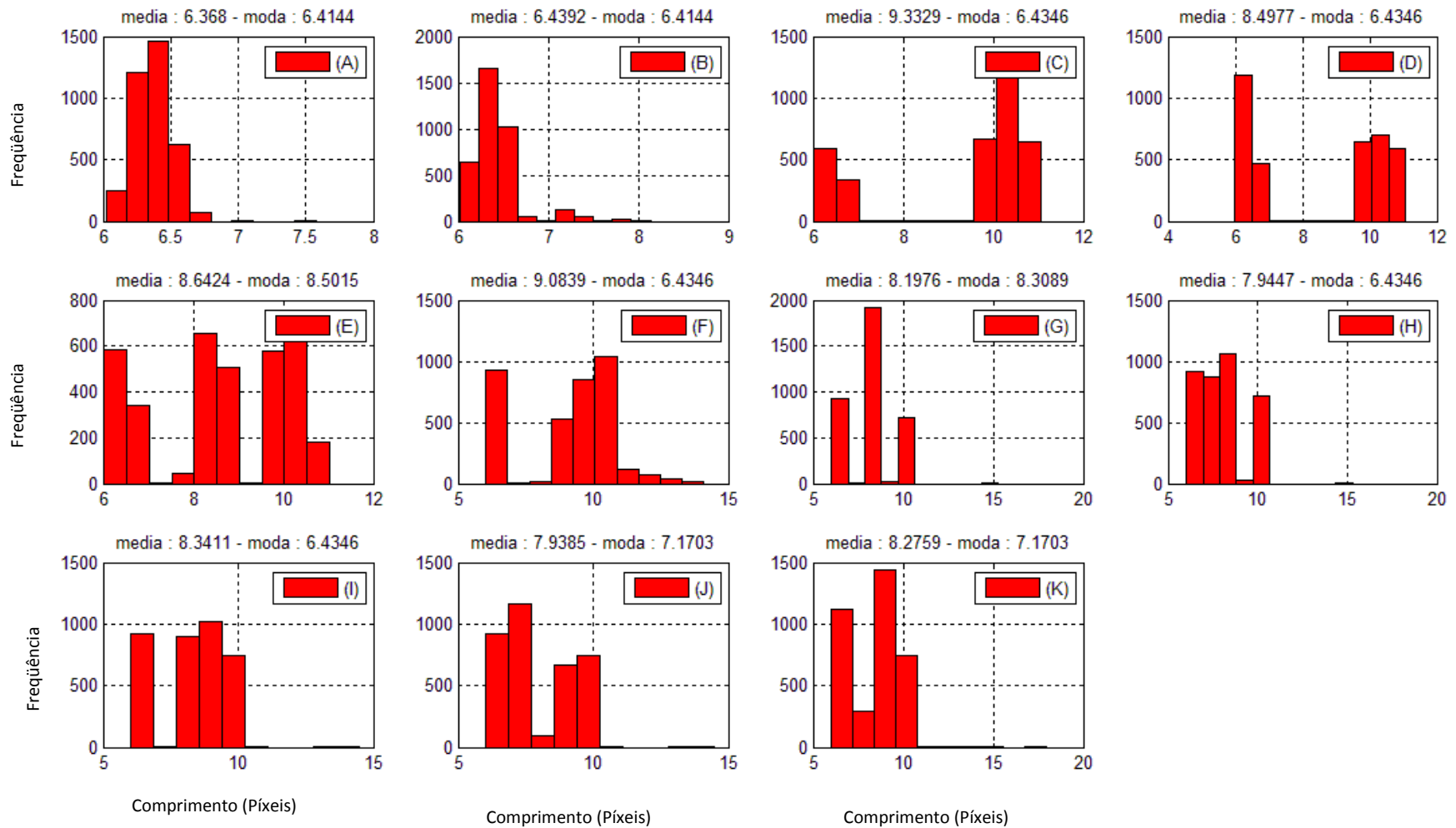


Figura 4.21 – Histograma, média e moda para o comprimento do eixo X da solda com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (A) 150 A – 2 mm/s, (B) 200 A – 6 mm/s, (C) 250 A – 2 mm/s, (D) 150 A – 10 mm/s, (E) 200 A – 6 mm/s, (F) 250 A – 10 mm/s, (G) 195 A – 4 mm/s, (H) 195 A – 8 mm/s, (I) 205 A – 4 mm/s, (J) 198 A – 4 mm/s e (K) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C

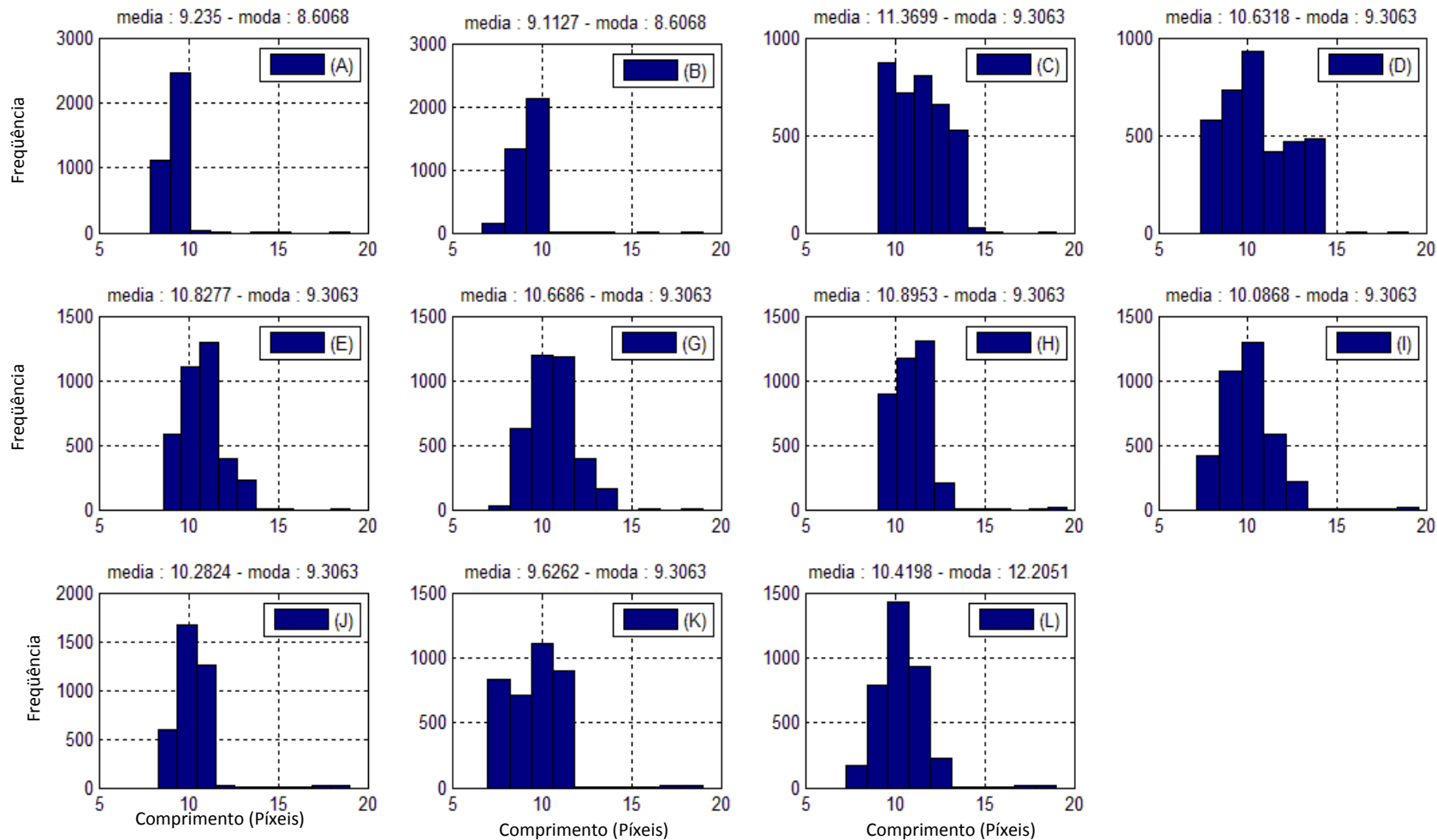


Figura 4.22 – Histograma, média e moda para o comprimento do eixo Y da solda com parâmetros de corrente e velocidade de soldagem de: (a) 150 A – 2 mm/s, (b) 200 A – 6 mm/s, (c) 250 A – 2 mm/s, (d) 150 A – 10 mm/s, (e) 250 A – 10 mm/s, (f) 195 A – 4 mm/s, (g) 195 A – 8 mm/s, (h) 205 A – 4 mm/s, (i) 198 A – 4 mm/s e (j) 202 A – 8 mm/s para a isoterma 1400°C.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 – CONCLUSÕES

O sistema de monitoramento utilizando imagens de infravermelho detecta descontinuidades no cordão de solda relacionadas com a formação do *Humping* durante o processo de soldagem GTAW. Os resultados confirmam que a técnica pode detectar mudanças na geometria da poça de fusão tornando-se um suporte experimental para estudos teóricos e uma ferramenta em processos em soldagem onde a temperatura e os gradientes térmicos têm efeito sobre a estrutura e propriedades dos materiais.

Os resultados obtidos mediante planejamento de desenhos fatoriais considerando como parâmetros de entrada, a corrente e velocidade de soldagem, numa faixa de 150-250 A e 2-10 mm/s, permitiram a verificação dos efeitos das mencionadas variáveis sobre a geometria do cordão de solda, permitindo um melhor entendimento dos fenômenos de fusão e solidificação na poça de fusão e como estes influenciam a qualidade dos cordões fabricados.

O conhecimento das alterações da distribuição de temperatura na poça de fusão durante a soldagem para cordões fabricados com diferentes parâmetros de entrada permite o planejamento de um sistema de controle com retroalimentação capaz de sugerir ajustes nos parâmetros do processo e prevenir descontinuidades tipo *Humping* nos cordões de solda.

Mudanças importantes na geometria de cordões feitos observam-se ao modificar parâmetros como velocidade ou corrente de soldagem. Os resultados obtidos mostram a uma relação estreita entre estas duas variáveis, marcando uma clara tendência a medida em que se acrescenta a velocidade e a corrente, os cordões tendem a ser não homogêneos e apresentam descontinuidades. Além de ter uma influência na quantidade de fusão do metal de base e também da penetração da solda.

Uma das possibilidades de utilização das equações obtidas, além da previsão geométrica do cordão dentro da região da superfície de resposta, reside na possibilidade de obter uma

condição de soldagem otimizada, buscando a máxima velocidade de soldagem dentro da faixa de trabalho que forneça esta geometria procurando uma maior produtividade.

Na medida em que acrescenta-se aporte térmico ao material base existe uma degradação nas considerações geométricas que influencia na qualidade da solda. Razão pela qual é importante ter um controle na operação de soldagem procurando otimizar recursos e assim obter uma maior produtividade.

O presente estudo permite projetar um modelo dinâmico para o processo GTWA, onde a partir de mudanças nos parâmetros de soldagem, tais como velocidade de soldagem e corrente, podem minimizar-se os efeitos térmicos resultantes do processo.

Medições da tensão e Corrente no arco, não estão mostrando os fenômenos que acontecem quando a geometria da poça de fusão é alterada. Razão pela qual a detecção do *Humping* online monitorando variáveis elétricas está sendo insuficiente comparada com a visão de infravermelho.

5.2 - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando o anteriormente mencionado e para dar continuidade ao trabalho feito sugere-se:

- Sínteses e caracterização de materiais tenso-ativos que contribuam para melhorar a "soldabilidade" do material base e a aumentar a penetração e diminuição da largura.
- Estudo dos campos de temperatura em soldas com elementos tenso-ativos mediante termografia de infravermelho.
- Implementação de planejamentos fatoriais considerando como variáveis de entrada o fluxo de gás, comprimento eletrodo-peça, ponta do eletrodo que junto com a adequada medida de eventos térmicos e a detecção de ambientes variantes durante o processo sejam a chave para um soldador robótico de sucesso.
- Estudo metalográfico e caracterização mecânica dos cordões de solda ao variar o aporte térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Karawi J., Schmidt J. (2004) Application of Infrared Thermography to the Analysis of Welding Processes, Institute of Fluid Dynamic and Thermodynamics Otto-Von Guericke University.
- Barra S. R., Santos A. (1999) Descontinuidades em Soldagem- Florianópolis -SC. Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, Outubro.
- Bicknell A., Smith J. S and Lucas J. (1994) "Infrared Sensor for top face monitoring of Weld Pool." In: Meas. Sci. Technol.- Vol. 5.- pp. 371-378.
- Bracarense A. Q. (2000) Processo de Soldagem TIG-GTAW. - Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais- Escola de Engenharia. Pós-Graduação Engenharia Mecânica.
- Camilleri D. Gray T. and Comlekci T. (2004) "Use of Thermography to Calibrate Fusion Welding procedures in Virtual Fabrication Applications." In: Infra Mation 2004 Proceedings.
- Cho M. H. (2006) Numerical Simulation of Arc Welding Process and Its Application. - The Ohio State University
- Choi H. W., Farson D. F., Cho M. H. (2006) "Using Hybrid Laser+ GMAW process for Controlling of the Bead Humping Defect" In: Welding Research. pp. 174s-179s.
- Cirino L. M. (2009). Estudo dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e alternada pelos Processo TIG e MIG/MAG - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Clara M. S. (2002) Soldagem de revestimentos. - São Paulo/SP : Nucleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, 2002.
- Departamento de Engenharia Mecânica (2009) - Universidade de Brasília. - 10 de abril de 2009.- <http://vsites.unb.br/ft/enm/vortex/ftp/TecMec2/SoldaTIG.pdf>.
- Dong T. L. (2009) "Solidificação no Metal de Solda." - Universidade Federal de São Carlos Departamento de Engenharia de Materiais.
- Eagar T.W. , Mendez P. F. (2003) Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding In: Welding Journal. - pp. 296-306.
- Felizardo, I., Bracarense A.Q. (2006) Estudo da viabilidade da automação de processos de soldagem. - 17 de marzo de 2010. - <http://www.infosolda.com.br/download/15dbp.pdf>.
- Figueiredo K. M. D. (2005) "Tecnologia da Soldagem." - São Luís: Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão - Departamento de Mecânica e Materiais.

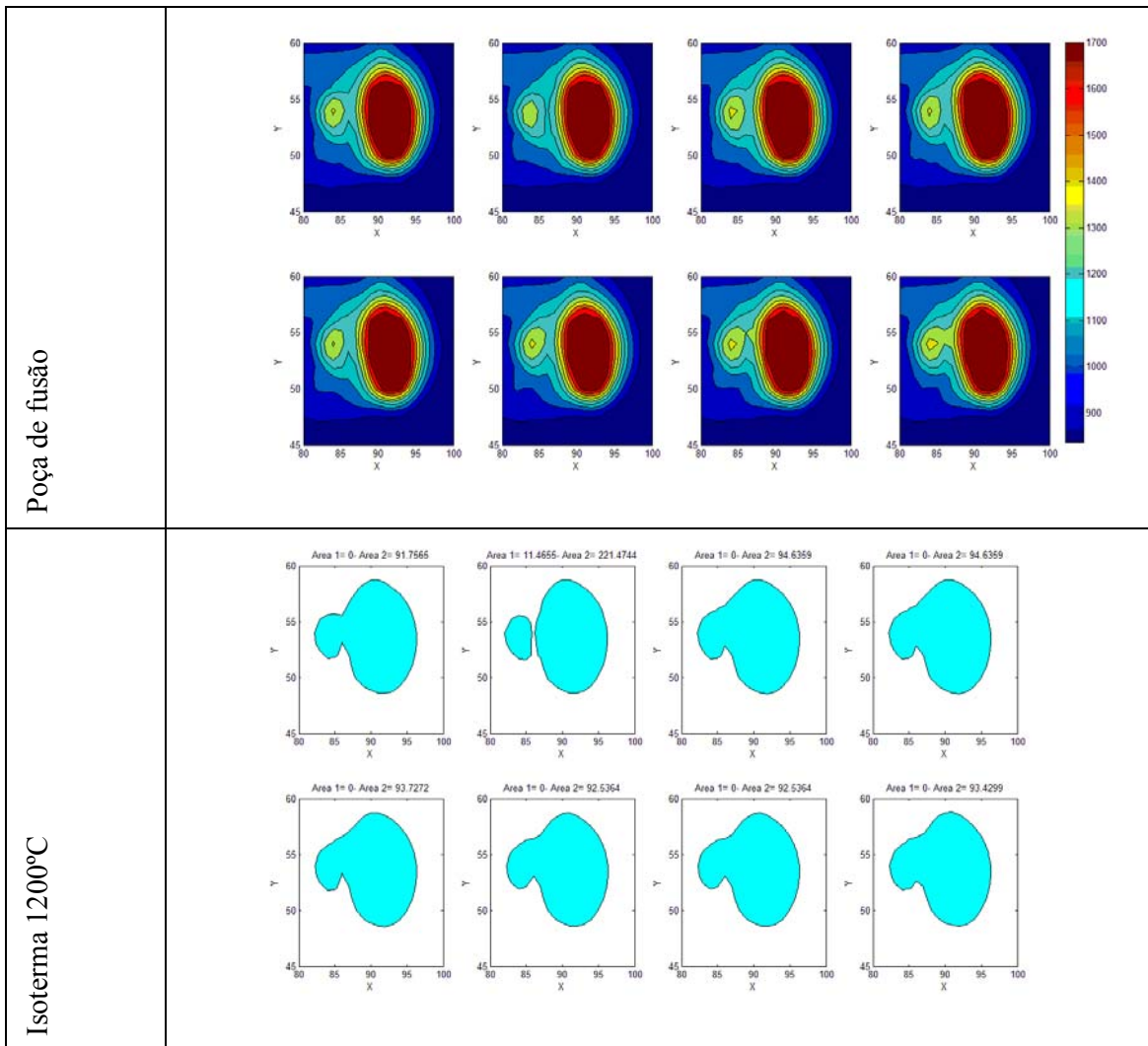
- Fonseca M. A., Lacerda J. C., Medeiros C. S., Assis L. G. D., Vilela T. S., Ceglias R. B. "Efeito do Insumo de Calor na microestrutura da Solda do Aço NTU-SAR50 pelo Processo a Arco Submerso". - Minas Gerais : Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2006.
- Fortes C. (2004) "Metalurgia da Soldagem." ESAB. HYPERLINK "<http://www.ebah.com.br/apostila-metalurgia-da-soldagem-esab-pdf-pdf-a7218.html>" <http://www.ebah.com.br/apostila-metalurgia-da-soldagem-esab-pdf-pdf-a7218.html> Online 2 de maio de 2010.
- Franco F. D. (2008) "Monitorização e Localização de Descontinuidades na Soldagem Tig através do Sensoriamento Infravermelho". - Dissertação de Mestrado. Brasília. : Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica.
- González D. A. F. (2006) "Contribuciones a las Técnicas no Destructivas para Evaluación y Prueba de Procesos y Materiales basada en Radiaciones Infrarrojas." Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria, 2006.
- Gratzke U., Kapadia P. D., Dowd J., Kroos J. and Simon G. (1992) "Theoretical approach to the Humping Phenomenon in Welding processes." In: J. Phys. D: Appl. Phys.- pp. 1640-1647.
- Guerra I. M. (2000) "Condução do Calor na Soldagem: Fundamento & Aplicações." - Porto Alegre: Imprensa Livre.
- Jorge G. D. O. (2008) "Estudo da resistência mecânica e da microestrutura em solda de alumínio depositadas pelo processo MIG com arames ER4043 e ER1100." - Belém: Universidade Federal do Pará Instituto de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Komanduri R. and Hou Z. B (2000) "Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part I. General Solutions." In: METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B. - December . - Vol. 31B. - pp. 1352-1370.
- Komanduri R. and Z. B. (2001). "Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of the Thermophysical Properties with Temperature." In: METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B. - June. - pp. 483-500.
- Kou S. (2003). "Welding Metallurgy." - New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Publication.

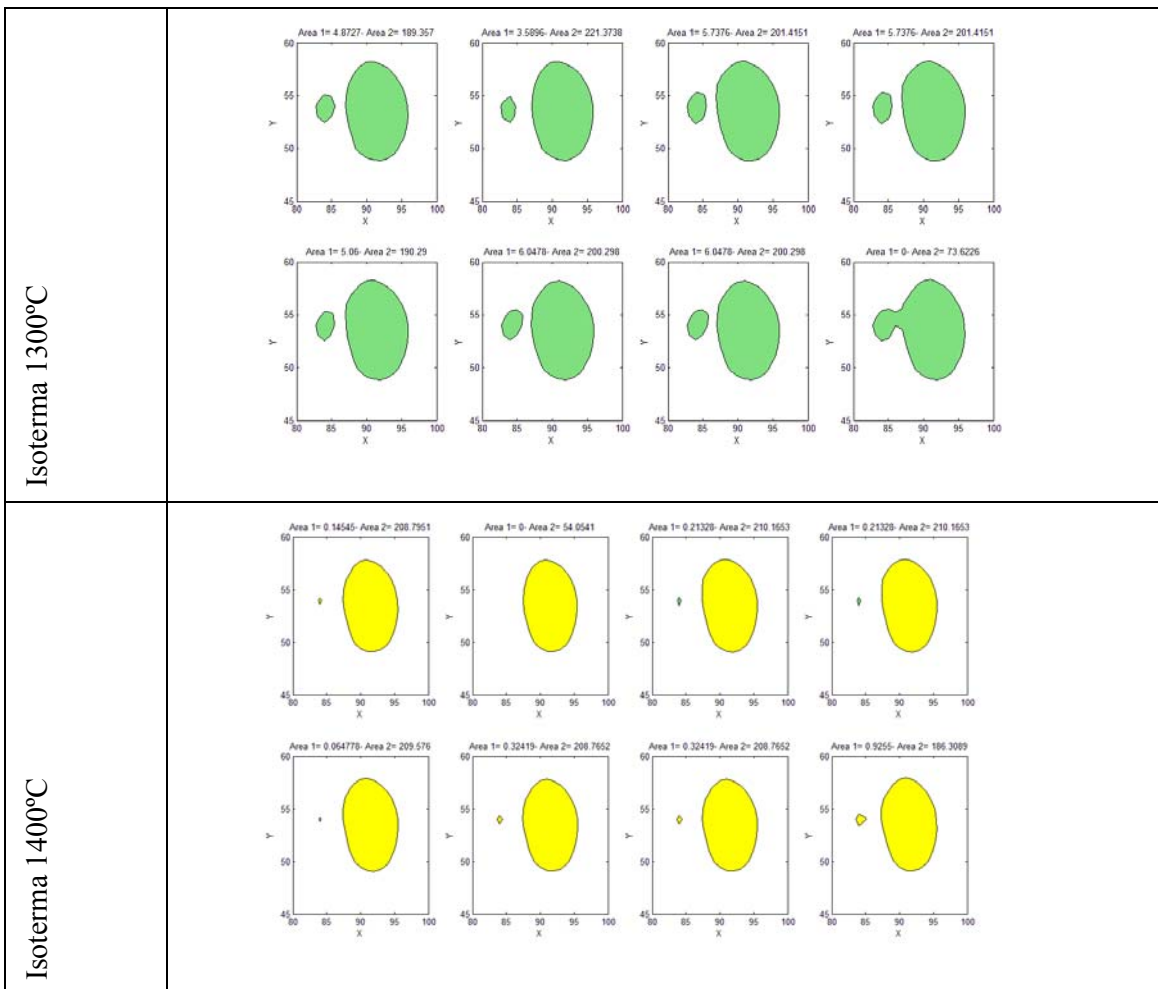
- Kuehl R. O. (2001). *Diseño de experimentos - Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. - Mexico: International Thomsom Editors S. A.
- Labotest (2009). *Acos Inoxidáveis para Equipamentos e instalações farmacêuticas- 2 parte* [Online]. - 2006. - 2 de Abril de 2009. - www.labotest.com.br.
- Limma E. J., Castro C. A. C., Bracarense A. Q., Campos M. F. M. (2005) "Determinação da Relação entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspector do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade." In: *Soldagem Insp. Vol. 10- Out/Dez* . - pp. 182-189.
- Melcón C. D. F., Barcia M. P. (2004) "Superfícies de Respuesta Métodos y Diseños." http://bellman.ciencias.uniovi.es/d_experimentos/d_experimentos_archivos/sr.pdf ultimo acceso 2 Maio -2010
- Mendez P. F. (1999). "Order if Nagnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding." - Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- Modenesi P. J. (2000) "Técnica Operatoria da Soldagem GTAW." Trabalho Prático. Online HYPERLINK
["http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/pratica_gtaw.pdf"](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/pratica_gtaw.pdf)
http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/pratica_gtaw.pdf . Ultimo acceso 2 de maio 2010.
- Modenesi P. J. Bracaresne A. Q. (2009) *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte. Fevereiro.
- Nagarajan S., Banerjee P., Chen W. and Chin B. A. (1992) "Control of the Welding Process Using Infrared Sensors." In: *IEEE transactions on Robotics and Automation*. - february - Vol. 8.
- Novicki N. (2008). "Aplicação da aspersão térmica na soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente." *Teses de Doutorado - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Março*.
- Paranhos R., Norrish J. (1992) "Prediction and Optimization of Welding Procedures a State of Arte Review."- pp. 983-796.
- Paris A. A. F. D (1986) "Relação entre o Ângulo do Eletrodo e a Geometria do Cordão de solda no Processo de Soddagem TIG." - *Dissertação de Mestrado: Porto Alegre*:

- Universidade de Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia Metalúrgica- Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais.
- Plotnikov Y.A. Winfree W. P. (2004) "Advanced Image Processing for Defect Visualization in Infrared Thermography." NASA Langley Research.
- Polido R. S., Carvalho Jr A. D., Vioto Jr L., Araújo M. R. V. D e Gallego J. (2005) "Caracterização da Zona Termicamente Afetada em Aço Estrutural Submetido à Soldagem por Arco Submerso." XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica.
- Reis R. P. (2005) "Soldagem Plasma Melt-In de Aço Comum ao Carbono." Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia- Faculdade Engenharia Mecânica.
- Richeti A., Silva H. R. D. (2003) "Soldagem A-TIG: Efeito da Composição do Fluxo e Desenvolvimento de uma Nova Metodologia para a Aplicação da Camada de Fluxo Ativo." 13 POSMEC - Simpósio do Programa de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica-UFU.
- Sumiteccr Sumiteccr [Online]. - Data ultimo acceso: 29 de Abril de 2010. - <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201020.pdf>.
- Sunarc (2010) "Soldadura TIG" Ultimo acceso 2 de maio de 2010. Sunarc Tecnologia en Soldadura. - HYPERLINK "<http://www.sunarc.com/>" <http://www.sunarc.com/>
- Vasconcelos R. C., Maciel T. M., Gurgel J. M. A. M (2009) "Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso." In: Revista Eletrônica de Materiais e Processos.- No.1 Vol. 4.
- Venkatraman B., Menaka M., Vasudevan M. and Raj B. (2006) "Thermography for Online Detection of incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation." 12 th A-PCNDT 2006 - Asia Pacific Conference on NDT. - Auckland, New Zealand.
- Vieira L.C., Bezerra A. C., Rade D. A. (2005) Modelagem Térmica do Processo de Soldagem TIG Via Elementos Finitos. XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica . - Ilha Solteira : , 22-26 de agosto de 2005.
- Zeemann A., Almeida D., Domingues G. and Pereira da Costa U. (2005) "A soldagem GTAW." In: Ensino ABC-ABS / pp. 10-13. - [http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/A%20soldagem%20GTAW%20\(ou%20TIG\).pdf](http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/A%20soldagem%20GTAW%20(ou%20TIG).pdf).

APÊNDICE A

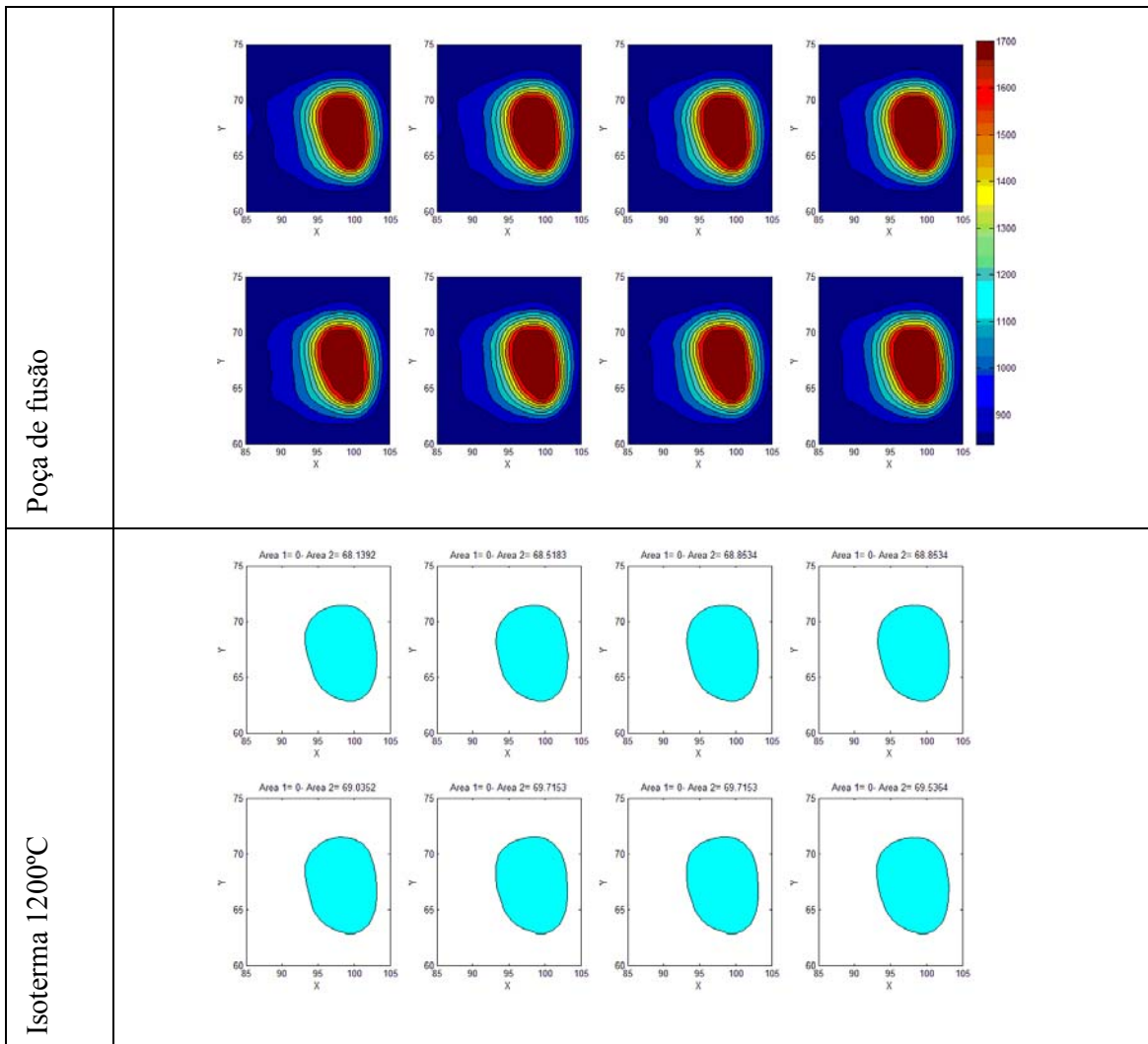
Cordão corrente 210 A - velocidade 6mm/s

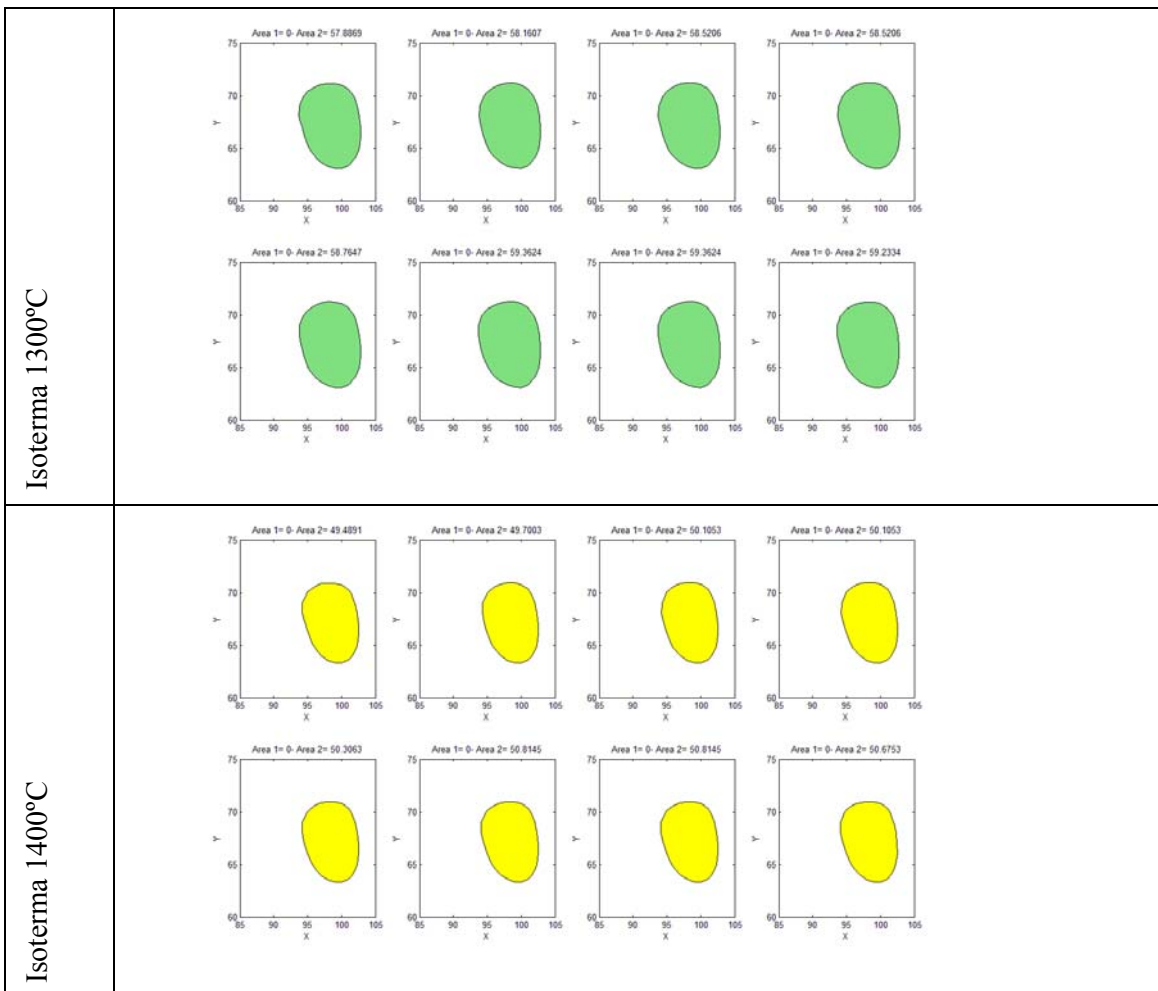




1200.00				1300.00				1400.00			
y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x
10.18	14.24	0.00	0.00	9.41	9.41	2.61	2.69	8.74	8.74	0.56	0.52
10.14	10.14	3.97	3.79	9.39	9.39	2.46	2.46	8.73	7.96	0.00	0.00
10.17	14.23	0.00	0.00	9.45	9.45	2.90	2.90	8.80	8.80	0.78	0.55
10.17	14.23	0.00	0.00	9.45	9.45	2.90	2.90	8.80	8.80	0.78	0.55
10.17	14.22	0.00	0.00	9.45	9.45	2.73	2.73	8.80	8.80	0.41	0.32
10.13	14.22	0.00	0.00	9.38	9.38	2.92	2.92	8.73	8.73	0.80	0.81
10.13	14.22	0.00	0.00	9.38	9.38	2.92	2.92	8.73	8.73	0.80	0.81
10.18	14.09	0.00	0.00	9.47	13.10	0.00	0.00	8.81	8.81	1.13	1.44

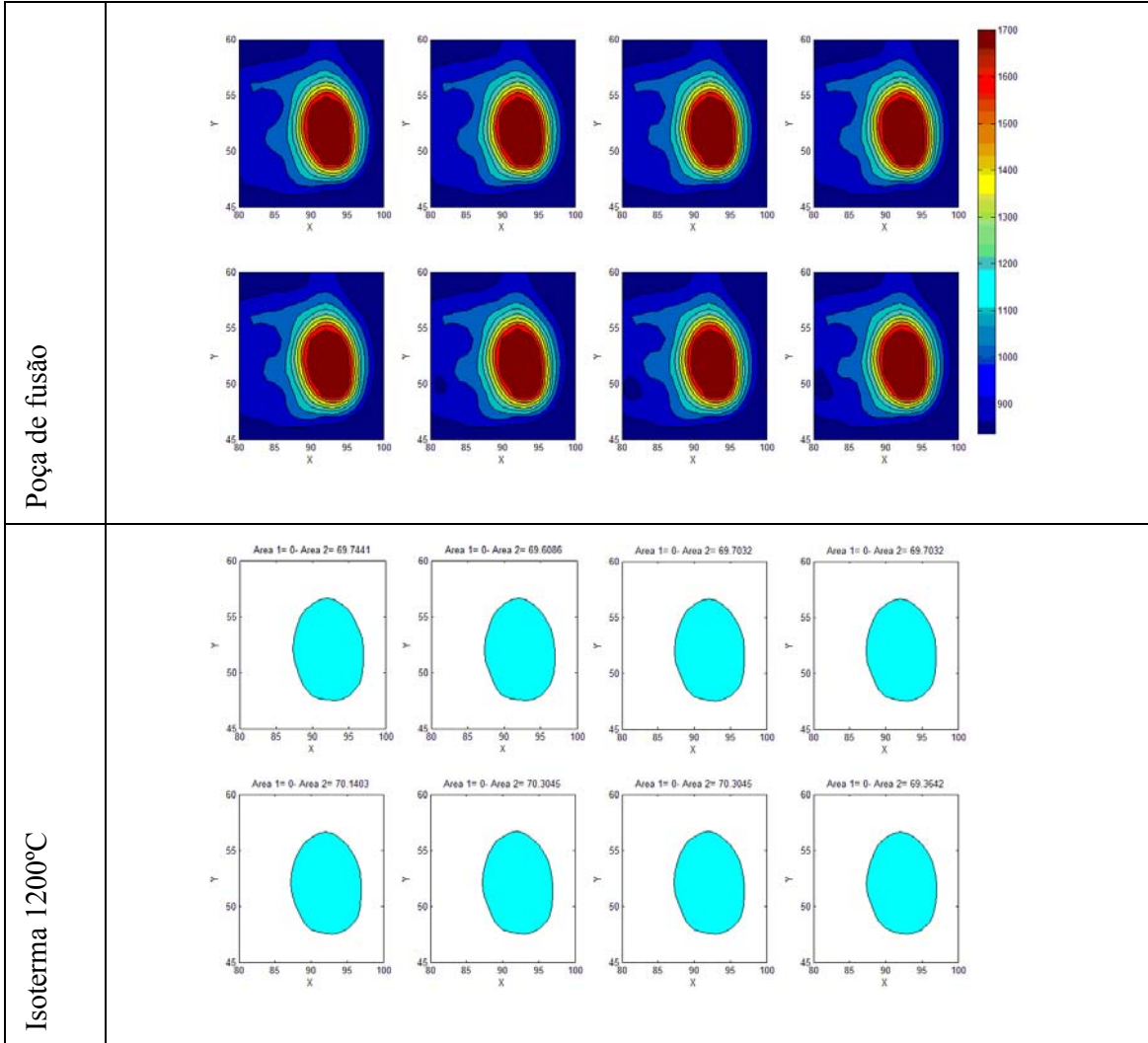
Cordão corrente 200 A - velocidade 8 mm/s

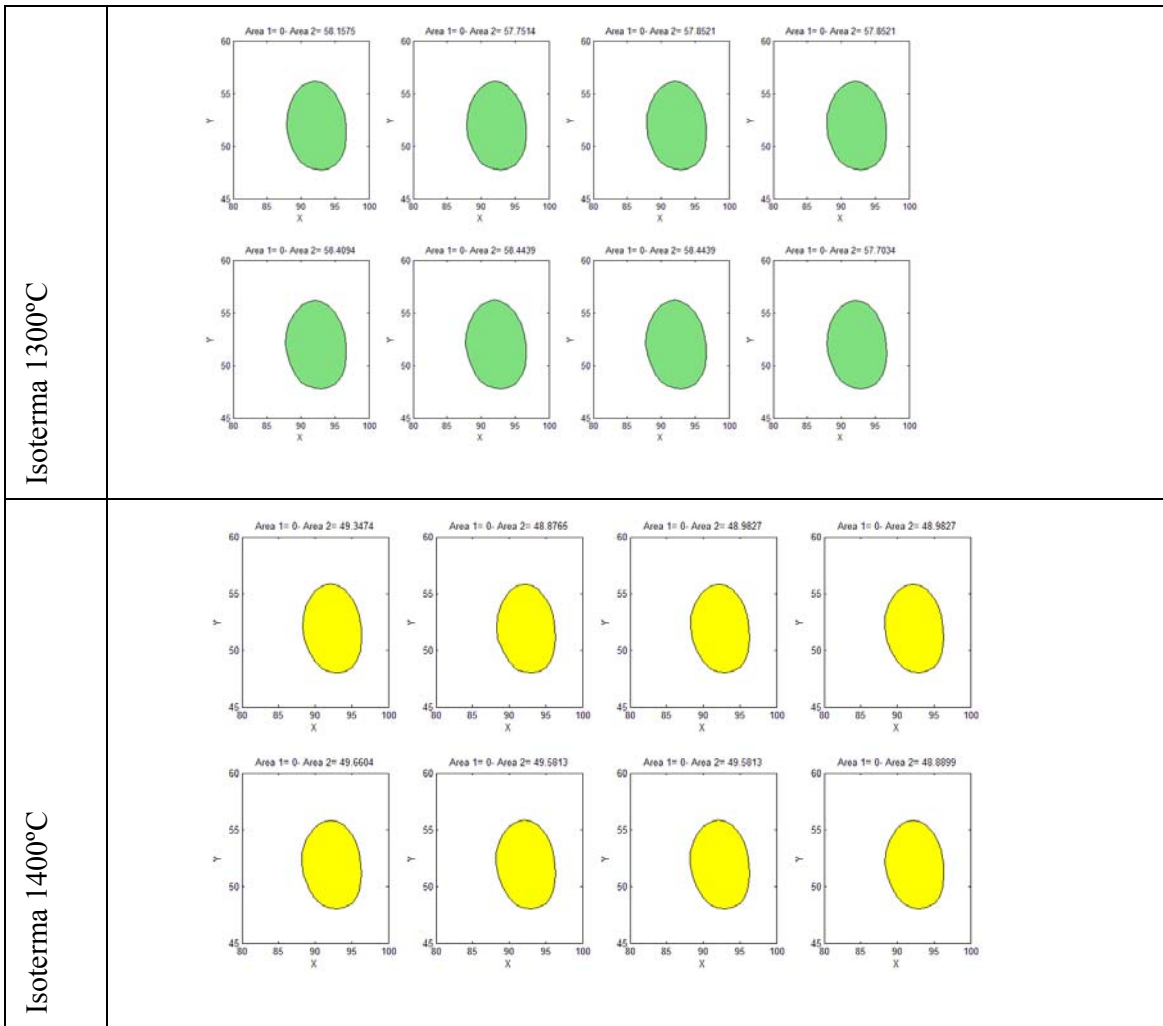




1200.00				1300.00				1400.00			
y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x
8.61	10.01	0.00	0.00	8.07	9.11	0.00	0.00	7.59	8.32	0.00	0.00
8.62	10.00	0.00	0.00	8.09	9.09	0.00	0.00	7.61	8.30	0.00	0.00
8.65	10.01	0.00	0.00	8.12	9.08	0.00	0.00	7.64	8.30	0.00	0.00
8.65	10.01	0.00	0.00	8.12	9.08	0.00	0.00	7.64	8.30	0.00	0.00
8.66	9.97	0.00	0.00	8.14	9.07	0.00	0.00	7.66	8.31	0.00	0.00
8.67	10.03	0.00	0.00	8.14	9.18	0.00	0.00	7.66	8.43	0.00	0.00
8.67	10.03	0.00	0.00	8.14	9.18	0.00	0.00	7.66	8.43	0.00	0.00
8.65	10.03	0.00	0.00	8.12	9.18	0.00	0.00	7.64	8.42	0.00	0.00

Cordão corrente 205 A - velocidade 8 mm/s





1200.00				1300.00				1400.00			
y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x
9.17	9.66	0.00	0.00	8.49	8.83	0.00	0.00	7.87	8.09	0.00	0.00
9.13	9.66	0.00	0.00	8.44	8.80	0.00	0.00	7.83	8.04	0.00	0.00
9.17	9.67	0.00	0.00	8.45	8.74	0.00	0.00	7.83	8.03	0.00	0.00
9.17	9.67	0.00	0.00	8.45	8.74	0.00	0.00	7.83	8.03	0.00	0.00
9.17	9.75	0.00	0.00	8.45	8.92	0.00	0.00	7.83	8.15	0.00	0.00
9.18	9.75	0.00	0.00	8.48	8.91	0.00	0.00	7.85	8.13	0.00	0.00
9.18	9.75	0.00	0.00	8.48	8.91	0.00	0.00	7.85	8.13	0.00	0.00
9.16	9.68	0.00	0.00	8.44	8.81	0.00	0.00	7.81	8.06	0.00	0.00