

UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FT – FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS

DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO PROCESSO TIG POR
MEIO DE MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA POÇA DE
FUSÃO

MAÍRA BEZERRA DO RÊGO BARROS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho

COORIENTADOR: Prof Dr. Sadek Absi Alfaro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2018

UnB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FT – FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS

DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO PROCESSO TIG POR
MEIO DE MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA POÇA DE
FUSÃO

MAÍRA BEZERRA DO RÊGO BARROS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho
(Orientador)

Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos Quintero
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Alysson Martins Almeida Silva
(Examinador Externo)

**BRASÍLIA/DF, 28 DE FEVEREIRO DE 2018.
FICHA CATALOGRÁFICA**

MAÍRA BEZERRA DO RÊGO BARROS
DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO PROCESSO TIG POR MEIO DE
MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA POÇA DE FUSÃO, [Distrito Federal]
2018 .

No.p.102, 210 x 297 mm (FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2018).
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

1. TIG
2. *HUMPING*
3. TERMOGRAFIA
- I. FT / UnB.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARROS, M. B. R. (2018). DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO
PROCESSO TIG POR MEIO DE MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA
POÇA DE FUSÃO. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos,
Publicação 2018, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos,
Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, no.p. 102.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MAÍRA BEZERRA DO RÊGO BARROS.

TÍTULO: DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO PROCESSO TIG POR MEIO
DE MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA POÇA DE FUSÃO.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

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 a
autorização por escrito do autor.

2018

Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte
70.910-900 Brasília, DF – Brasil.

RESUMO

DETECÇÃO DO DEFEITO *HUMPING* NO PROCESSO TIG POR MEIO DE MONITORAMENTO TERMOGRÁFICO DA POÇA DE FUSÃO

Autor: Maíra Bezerra do Rêgo Barros

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Sadek Absi Alfaro

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, fevereiro de 2018.

Uma determinada solda torna-se mais competitiva no ambiente industrial à medida que se melhora a sua produtividade de trabalho. Por possuir uma velocidade de soldagem relativamente baixa, o processo TIG geralmente é preterido, sendo utilizado apenas quando a qualidade da solda é fator mais importante que a produtividade ou o custo da operação. Propõe-se, neste trabalho o desenvolvimento de um parâmetro de controle para a maximização da produtividade com o uso do processo TIG, evitando a formação do defeito tipo *humping*. Para se definir esse parâmetro, realizou-se uma metodologia experimental organizada em três etapas principais. A primeira visou à determinação de uma combinação de parâmetros de velocidade e de corrente de soldagem para a obtenção de *humping* em soldas realizadas na posição plana em placa de aço doce de 6,35 mm de espessura. A segunda, consistiu em realizar vários cordões de solda, com a combinação de parâmetros encontrada, de modo a possibilitar a gravação de imagens termográficas contendo o desenvolvimento do defeito ao longo dos cordões. A partir da observação das imagens termográficas, desenvolveu-se a estratégia de extração do parâmetro proposto por meio da aplicação de técnicas de processamento de imagens. A terceira e última etapa consistiu na realização de cordões de solda com uma variação na velocidade e na corrente, de modo a se verificar a eficácia de detecção de iminência do *humping* por meio do parâmetro proposto na segunda etapa e validar a estratégia de detecção. O teste de validação comprovou que o parâmetro desenvolvido estava adequado, atingindo-se, por conseguinte, todos os objetivos propostos. Dessa forma, os dados mostram que é possível detectar a iminência do *humping* com auxílio de imagens termográficas.

Palavras-chaves: TIG, *Humping* e Termografia.

ABSTRACT

DETECTION OF THE HUMPING DEFECT IN THE TIG PROCESS THROUGH THERMOGRAPHIC MONITORING OF THE FUSION PIT

Author: Maíra Bezerra do Rêgo Barros

Supervisor: Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho

Co-supervisor: Prof. Dr. Sadek Absi Alfaro

Post-Graduation Program in Mechatronic Systems Engineering

Brasília, march 2018.

A particular weld becomes more competitive in the industrial environment as its work productivity is improved. Having a relatively low welding speed, the TIG process is usually disregarded and used only when the quality of the weld is a more important factor than the productivity or the cost of the operation. This work aims at proposing the development of a control parameter in order to maximize the TIG process productivity avoiding the formation of the *humping* defect. With the objective of defining this parameter, an experimental methodology was organized in three main steps. The first one aimed at determining a combination of welding speed and welding current to obtain *humping* in welds carried out in the flat position in a 6.35mm-thick mild steel plate. The second one consisted of producing several weld beads, with the combination of parameters found, so as to enable the recording of thermographic images containing the development of the defect in the extension of the weld beads. Observing the thermographic images, the strategy of extraction of the proposed parameter was developed through the application of image processing techniques. The third and final step consisted of producing weld beads with a variation in speed and current, so as to verify the efficacy in detecting the imminence of *humping* by means of the parameter proposed in the second step and to validate the detection strategy. The validation test showed evidence that the developed parameter was adequate, reaching, therefore, all the proposed objectives. Through the data it is made clear the possibility of detecting the imminence of *humping* with the support of thermographic images.

Key-words: TIG, *Humping*, Thermography

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 DESCRIÇÃO DO ESTADO DA ARTE	13
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 SOLDAGEM	17
2.1.1 TIG - <i>TUNGSTEN INERT GAS</i>	18
2.1.2 EQUIPAMENTOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....	20
2.1.3 EFEITO <i>HUMPING</i>	23
2.2 TERMOGRAFIA.....	32
2.2.1 CÂMERA TERMOGRÁFICA.....	35
2.2.2 <i>HUMPING</i> NA IMAGEM TERMOGRÁFICA.....	36
2.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS	41
2.3.1 MORFOLOGIA.....	42
2.3.2 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS.....	42
2.3.3 RUÍDOS E SEUS FILTROS.....	44
3 METODOLOGIA.....	50
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	50
3.1.1 ROBÔ DE SOLDAGEM	50
3.1.2 MESA DE DESLOCAMENTO LINEAR.....	51
3.1.3 SISTEMA DE AQUISIÇÕES DE DADOS.....	52
3.1.4 FONTE DE SOLDAGEM.....	53
3.1.5 CÂMERA DE INFRAVERMELHO	55
3.1.6 MATERIAIS E CONSUMÍVEIS	56
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.2.1 ETAPA I.....	59
3.2.2 ETAPA II.....	60
3.2.3 ETAPA III.....	63
4 RESULTADOS.....	65
4.1 VISÃO GERAL	65
4.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO PARÂMETRO	66
4.2.1 ATIVIDADE I – REALIZAÇÃO DA SOLDA.....	66
4.2.2 ATIVIDADE II – OBTENÇÃO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS	67

4.2.3 ATIVIDADE III – TRATAMENTO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS.....	69
4.2.4 ATIVIDADE IV – CÁLCULO DO PARÂMETRO	71
4.3 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO PARÂMETRO	78
4.3.1 ATIVIDADE I – REALIZAÇÃO DA SOLDA.....	78
4.3.2 ATIVIDADE II – OBTENÇÃO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS.....	79
4.3.3 ATIVIDADE III – SELEÇÃO DO MOMENTO QUE SERÁ AVALIADO NA IMAGEM TERMOGRÁFICA	79
4.3.4 ATIVIDADE IV – TRATAMENTO DA IMAGEM TERMOGRÁFICA.....	79
4.3.5 ATIVIDADE V – APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PARÂMETRO DESENVOLVIDO NO PROCESSO I.....	79
5 CONCLUSÃO	88
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO I: IMAGENS TERMOGRÁFICAS SEM TRATAMENTO.....	95
ANEXO II: CÁLCULOS PARA OBTER AS DIAGONAIS NO PROCESSO II.....	97
CORDÃO DE SOLDA COM IMINÊNCIA DO <i>HUMPING</i>	97
CORDÃO DE SOLDA IDEAL	98
APÊNDICE I: ERROS COMETIDOS NOS TESTES DE HIPÓTESES.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eletrodos de tungstênios com algumas combinações químicas possíveis e o impacto que estas podem fazer. Fonte: Energyarc Industrial LTDA.	23
Tabela 2 – Descrição dos cinco tipos de ruídos mais conhecidos existentes segundo Bovik.....	45
Tabela 3 – Dados técnicos da fonte Migatronic BDH320.	54
Tabela 4 – Dados técnicos da fonte Migatronic BDH320.	54
Tabela 5 – Dados técnicos da fonte Migatronic BDH320.	55
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 1	57
Tabela 7 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 2	58
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 3	58
Tabela 9 – Combinações de velocidades e correntes.....	59
Tabela 10 – Resultados, em segundos, obtidos para as medições de tempo percorrido pela tocha em 75 milímetros	66
Tabela 11 – Resultados, em milímetros/segundos, obtidos para os cálculos de velocidade das medidas da Tabela 10.....	67
Tabela 12 – Valores das diagonais e das alturas, obtidos nas imagens tratadas.....	74
Tabela 13 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas	75
Tabela 14 – Estatística descritiva obtida com o software Excel	77
Tabela 15 – Estatística descritiva obtida com o software Excel	77
Tabela 16 – Coordenadas obtidas com o software Matlab.....	80
Tabela 17 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura	80
Tabela 18 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas	80
Tabela 19 – Estatística descritiva.....	81
Tabela 20 – Coordenadas obtidas com o software Matlab.....	84
Tabela 21 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura	84
Tabela 22 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas	84
Tabela 23 – Estatística descritiva.....	84
Tabela 24 – Coordenadas obtidas com o software Matlab.....	86
Tabela 25 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura	86
Tabela 26 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas	86
Tabela 23 – Estatística descritiva.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma soldagem TIG.	19
Figura 2 – Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos	22
Figura 3 – Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG. A e B são seções transversais dos locais indicados na figura do cordão.	25
Figura 4 – Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes. ...	25
Figura 5 – Comportamento da poça de fusão mediante algumas forças.	27
Figura 6 – Aspecto da vista superior da poça de fusão. (a) No formato elíptico. (b) No formato de gota.	27
Figura 7 – Círculo trigonométrico.	29
Figura 8 – Vista superior da poça de fusão. A primeira é a poça elíptica, a segunda a poça em forma de gota.	29
Figura 9 – Gradientes térmicos da poça de fusão em função do formato.	30
Figura 10 – Gradiente térmico da poça de fusão.	31
Figura 11 – Estrutura da solda de grãos colunares feitos com poça em formato de gota (A) e em formato elíptico (B).	31
Figura 12 – Espectro eletromagnético.	35
Figura 13 – Imagem termográfica das diferentes zonas isotermas para o cordão de solda ideal.	38
Figura 14 – Imagem termográfica das diferentes zonas isotermas para o cordão de solda com <i>humping</i>	39
Figura 15 – Fluxograma de processamento de imagens termográficas da poça TIG para detecção da ocorrência ou não do <i>humping</i>	40
Figura 16 – Representação digital de uma imagem	41
Figura 17 – Segmentação de corpos d’água em uma imagem de satélite de Brasília-DF. Figura (a) disponibilizada pelo programa LANDSAT 8 sob licença Creative Commons ...	43
Figura 18 – Imagem original e suas imagens corrompidas pelos cinco tipos de ruídos apresentados.	46
Figura 19 – Resultado da filtragem da imagem “moedas” pelo filtro mediana.	47
Figura 20 – Robô IRB2000 e seus eixos de movimentação.	50
Figura 21 – Exemplo do funcionamento do protocolo de controle do motor de passo.	52
Figura 22 – Computador com o LabView em funcionamento.	53
Figura 23 – Painel de controle da fonte Migatron BDH320	53
Figura 24 – Painel de controle da fonte Fronius TPS-5000.	54
Figura 25 – Camera ThermoVision A40 M.	55
Figura 26 – Esquema simplificado do seguimento das etapas experimentais.	59
Figura 27 – Imagem de alguns cordões de solda realizados com a combinação de velocidade de 9 mm/s e corrente de 190 A.	61
Figura 28 – Imagem termográfica de uma soldagem TIG.	61
Figura 29 – Processamento das imagens obtidas até chegar às imagens binárias para os cálculos do parâmetro.	62
Figura 30 – Fluxograma do desenvolvimento do parâmetro da iminência e do <i>humping</i>	63
Figura 31 – Fluxograma da validação do parâmetro desenvolvido.	64
Figura 32 – Fluxo principal do processo de desenvolvimento do parâmetro.	65

Figura 33 – Fluxo principal do processo de validação do parâmetro.	66
Figura 34 – Sistema de captação da imagem infravermelha para monitoramento da poça de fusão.	68
Figura 35 – Gráfico de aquisição de ruídos. Onde o eixo y refere-se à amplitude do ruído e o eixo x à dimensão.	69
Figura 36 – Imagem termográfica com a imagem real e seu reflexo.	70
Figura 37 – Combinações de ângulos, feitas para a detecção da imagem real e do seu reflexo.	70
Figura 38 – Eixo a partir do qual se ignora a imagem obtida.	71
Figura 39 – Ciclo de tratamentos que cada imagem irá receber.	71
Figura 40 – Layout do Software Matlab para a coleta dos valores da diagonal e da altura.	72
Figura 41 – Medidas das diagonais para a imagem com a iminência do <i>humping</i> e para a imagem com o defeito <i>humping</i>	72
Figura 42 – Medidas das alturas para a imagem com a iminência do <i>humping</i> e para a imagem com o defeito <i>humping</i>	73
Figura 43 – Valores das diagonais e alturas obtidos para os cordões de solda na iminência do <i>humping</i>	73
Figura 44 – Valores das diagonais e alturas obtidos para os cordões de solda com o defeito <i>humping</i>	74
Figura 45 – Gráfico da distribuição t-Student.	75
Figura 46 – Obtenção do valor t na tabela t-Student.	76
Figura 47 – Demonstração da área de rejeição.	81
Figura 48 – Obtenção do valor t na tabela t-Student.	82
Figura 49 – Gráfico da distribuição t-Student.	82
Figura 50 – Área de rejeição p_s para a distribuição t-Student.	83
Figura 51 – Obtenção do valor t na tabela t-Student.	85
Figura 51 – Obtenção do valor t na tabela t-Student.	87

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

A – Ampere

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AWS – American Welding Society

EWCe – Eletrodo de tungstênio com cério

EWLa – Eletrodo de tungstênio com lantânio

EWP – Eletrodo de tungstênio puro

EWS2 – Eletrodo de tungstênio especial Wolfram

EWTh – Eletrodo de tungstênio com tório

EWZr – Eletrodo de tungstênio com zircônio

Gap - Distância eletrodo-chapa

Graco - Grupo de Automação e Controle

Fps – frames por segundos

P_{arc} – Pressão do arco

P_c – Pressões capilares

P_h – Pressão hidrostática

TIG – Tungsten Inert Gas

V – tensão

v – velocidade

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é uma importante técnica de união metálica. Ela consiste no processo de junção de metais por fusão, visando unir duas ou mais peças, assegurando a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (Quites & Dutra, 1979). Trata-se de um método de junção utilizado na maior parte dos setores industriais (Chapuis, 2011).

Algumas pesquisas no contexto da produção industrial tem por finalidade melhorar os processos com vistas a otimizá-los, donde se pode tomar como exemplo a melhoria da produtividade, a qualidade de solda e a convivência saudável no ambiente de trabalho (Chapuis, 2011). Dessa forma, enquadra-se nos estudos referidos, a soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*). Por possuir uma boa concentração de calor, ela é capaz de soldar materiais de difícil soldabilidade. No entanto, uma das suas principais limitações é a formação de descontinuidade no cordão quando se utilizam altas velocidades e altas correntes de soldagem, gerando assim a formação do defeito conhecido como *humping*, o que limita a produtividade (Schwedersky et al, 2011).

Essa falha faz com que o cordão fique descontínuo e, conseqüentemente, mais fraco. A fim de evitar o seu surgimento, as indústrias acabam por ter uma produção de velocidade reduzida, o que impacta diretamente nos custos diminuindo, assim, a produtividade. É conhecida na literatura que uma característica importante na formação do *humping* é a solidificação da parte central da poça de fusão, dividindo-a em duas (Palacios, 2010).

O *humping* ocorre porque há um desbalanceamento entre as pressões hidrostáticas, pressões do arco e as pressões capilares. Esse desbalanceamento faz com que parte da poça de soldagem saia do local ideal e vá para um local não desejado. Isso gera vales e cristas no cordão de solda, além de ficar esteticamente ruim, pode afetar a resistência mecânica da união. Evitando que esse complexo balanço de pressões saia do ideal, evita-se o defeito *humping*.

Termograficamente, sabe-se que o cordão ideal possui apenas uma zona isoterma, enquanto o cordão com *humping* possui duas zonas isotermas.

Trabalhos anteriores, (Palacíos, 2010), demonstram que perto de ocorrer o defeito, há um alongamento na poça de soldagem. Entendendo o que causa o defeito e como o mesmo se comporta em uma imagem termográfica, é viável identificar o limiar entre a sua iminência e o seu surgimento, uma vez que a poça de soldagem precisa passar por uma transição para sair de uma para duas zonas isotermas.

1.1 DESCRIÇÃO DO ESTADO DA ARTE

Fez-se uma revisão bibliográfica englobando os últimos dez anos. Portanto, os artigos aqui abordados, não passaram de 2006.

No ano de 2006 apenas uma publicação foi encontrada. Esta foi feita pelos autores X. Leng, G. Zhang e L. Wu, seu título era “Experimental study on improving welding efficiency of twin electrode TIG welding method”. O estudo compara a soldagem T-TIG, realizada com dois eletrodos, com a soldagem TIG. Um dos parâmetros avaliados é a velocidade, chegando-se a conclusão que a soldagem TIG atinge o *humping* mais rápido que a soldagem T-TIG. Sendo então, a utilização de dois eletrodos uma maneira de evitar o defeito *humping*.

Em 2007, os autores R. Kaul , P. Ganesh , N. Singh , R. Jagdheesh , M. Bhagat , H. Kumar , P. Tiwari , H. Vora e A. Nath analisaram o efeito da adição de fluxo ativo na soldagem a laser de aço inoxidável austenítico. O propósito do estudo era verificar se a adição de fluxo ativo iria aumentar a profundidade da poça de fusão. A profundidade do cordão de solda de fato aumentou, no entanto, em determinadas combinações, ocorria o defeito *humping*. Desta forma, deve-se evitar tais combinações a fim de evitar tal defeito.

É possível perceber que os estudos anteriormente citados não possuíam o fenômeno do *humping* como objeto. O surgimento ou não do *humping* era apenas uma ocorrência de uma modificação estudada. Apenas em 2011 as pesquisas mudaram o foco e passaram a estudá-lo como o assunto principal.

Em junho de 2011 o autor Julien Chapuis (Chapuis, 2011) publicou a tese “Une approche pour l’optimisation des opérations de soudage à l’arc”. Nesta tese,

o autor evidencia o *humping* como um limitador de velocidade de soldagem e explica fisicamente o surgimento do defeito.

Julien Chapuis também explicou os problemas que o *humping* causa no cordão de solda. Além de definir o limite de velocidade máxima para a realização de solda sem defeito, a corrente máxima para a soldagem sem defeito.

No mesmo ano, 2011, os autores M. Schwedersky, J. Dutra, M. Okuyama e R. Silva publicaram o artigo “Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos”. Neste artigo, a utilização de misturas argônio-hidrogênio como gás de proteção, possibilitou velocidade semelhante ao processo MIG/MAG convencional, com a vantagem de ser realizada sem material de adição (Schwedersky, et al, 2011). Tratava-se da primeira proposta de maximização de velocidade voltada para o defeito *humping*.

Em 2014 os autores Xiangmeng Meng, Guoliang Qin, Yuqi Zhang, Banglong Fu e Zengda Zou publicaram o artigo “High speed TIG–MAG hybrid arc welding of mild steel plate”. Este artigo comparou as velocidades obtidas no processo MAG e no processo híbrido TIG-MAG, em que, em determinado ponto, encontrou-se o defeito *humping*. Neste caso, o *humping* volta a ser o assunto meio e não o assunto principal.

Em 2015, praticamente os mesmos autores anteriores, Guoliang Qin, Xiangmeng Meng e Banglong Fu, continuaram seus estudos relacionados à maximização de velocidade de soldagem. No entanto, desta vez, no artigo “High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate”, criou-se um processo de alta velocidade para a TIG utilizando além do arco convencional de solda um arco assistente de forma a combater a formação do defeito *humping*.

Ainda em 2015, os autores Sadek C. Absi Alfaro, José Alfredo Ruiz Vargas, Guilherme Caribé de Carvalho e Giuliano Gonçalves de Souza publicaram o artigo “Characterization of “Humping” in the GTA welding process using infrared images”. Este artigo propunha o monitoramento do defeito *humping* via imagem termográfica.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um parâmetro de controle para a maximização da produtividade do processo TIG, evitando a formação do defeito tipo *humping*. Para atingir o objetivo principal do presente trabalho, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Definição da velocidade e da corrente ideal onde o cordão de solda começa sem defeito e ao longo do processo passa a exibir o defeito estudado;
- Identificação de indicadores de tendência à formação do defeito tipo *humping*, no processo TIG, com base na geometria da poça de solda visualizada em imagens térmicas;
- Criação de um parâmetro, utilizando os dados das imagens térmicas processadas e transformadas em imagens binárias, isto é, preto e branco; e
- Validação do parâmetro criado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho possui cinco capítulos.

O Capítulo um apresenta a motivação, os objetivos e a organização do trabalho.

O Capítulo dois apresenta uma revisão sobre o assunto abordado nesta dissertação. Foca em expor toda a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do presente trabalho. Para isso, é abordada a parte técnica de soldagem, detalhando o processo utilizado. Também é abordada a parte técnica da termografia, explicitando sua origem e como ela influenciará no trabalho. Por fim, segue-se a explicação do processamento de imagem e todos os aparatos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho.

O Capítulo três apresenta a metodologia. Para o desenvolvimento desta dissertação, foi necessário implementar três etapas distintas, que serão posteriormente aclaradas no capítulo. O detalhamento das etapas conduzirá a uma explanação dos materiais utilizados, como foi desenvolvido o experimento e quais decisões foram tomadas para o resultado encontrado.

O Capítulo quatro traz os resultados obtidos, bem como a análise dos mesmos. Seu objetivo é deixar claro todo o processo realizado para o desenvolvimento do parâmetro de iminência do *humping*. Logo após, são detalhados os cálculos que foram realizados para a criação deste parâmetro. Outro objetivo fundamental deste capítulo é evidenciar todo o processo realizado para a validação do parâmetro desenvolvido. Nele é possível avaliar os frutos oriundos dos tratamentos das imagens obtidas por meio das filmagens termográficas.

O Capítulo cinco: retomam-se os objetivos específicos propostos ao longo da presente dissertação, concluindo-se pelo atingimento dos mesmos. Ao mesmo tempo, indicam-se as recomendações para futuros trabalhos a serem desenvolvidos a partir desta dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM

A Soldagem é um processo de fabricação que pode ser utilizado para revestimento, prototipagem e união de materiais (Sanches, 2010). O primeiro caso consiste em um processo em que uma camada de metal de adição é colocada sobre outro metal, de forma a obter propriedades e dimensões desejadas. No segundo caso, trata-se de um processo de soldagem utilizado para gerar sólidos metálicos por meio de camadas sobrepostas. O terceiro caso consiste em unir dois ou mais materiais de desejo. Todos esses processos podem ser realizados com diferentes pressões e diferentes níveis de calor, sendo possível unir materiais, similares ou não, de forma permanente.

Atualmente, existem dois grandes grupos de processos de soldagem. Sendo divididos por uso de calor ou pela deformação nas peças a serem unidas. O primeiro processo é denominado soldagem por fusão. O segundo é definido como soldagem por pressão ou processo de soldagem no estado sólido.

A soldagem por fusão necessita de uma fonte de calor para ser capaz de fundir os materiais metálicos envolvidos no processo. Para definir a fonte de calor ideal, deve-se levar em consideração uma série de fatores tais como: a soldabilidade dos materiais; a composição química dos mesmos; a concentração adequada de energia para fusão; a habilidade do soldador; os riscos a saúde do soldador e do meio ambiente; entre outras (Chapuis, 2011).

Atualmente, a união de peças pelo processo de fusão na soldagem a arco é realizada por intermédio de uma descarga elétrica sustentada por meio de um gás ionizado, geralmente hélio ou argônio. Esses gases devem estar em alta temperatura, o que gerará o plasma, que contém partículas carregadas de elétrons e íons positivos capazes de produzir energia térmica suficiente para a fusão, criando, assim, o arco elétrico (Oliveira, 2001).

O presente trabalho será focado no processo de soldagem conhecido como TIG - *Tungsten Inert Gas*. Ele se enquadra no primeiro grupo, o grupo de soldagem por fusão (Barros, 2013). No próximo item será feita uma explicação

detalhada deste tipo de processo, de forma a esclarecer suas vantagens e desvantagens.

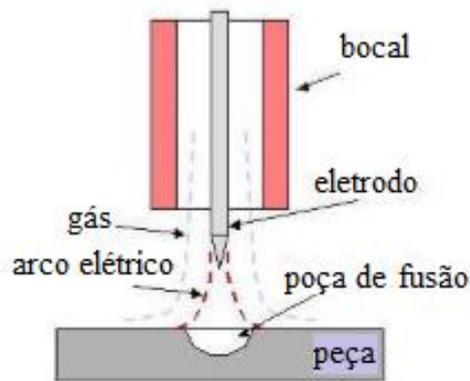
2.1.1 TIG - *TUNGSTEN INERT GAS*

A soldagem com eletrodo de tungstênio é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas. Isso ocorre por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem unidas.

Apesar de o eletrodo de tungstênio não ser consumível, a solda pode ser feita com adição de metal. Esse metal geralmente é apresentado na forma de vareta, com aproximadamente um metro de comprimento, no caso manual, ou na forma de um arame alimentado automaticamente a partir de uma bobina, no caso de soldagem robotizada. Os materiais e ligas utilizados na confecção das varetas são variados. Eles se classificam segundo sua composição química e de acordo com as propriedades do metal depositado. Para realizar a solda com adição de metal, a vareta deverá ser colocada diretamente na poça.

Para que não haja contaminação pela atmosfera, é feita uma proteção na poça de fusão. Essa proteção pode apresentar-se de duas formas. A primeira é por uma atmosfera de gás inerte em que, segundo Chapuis (2011), o gás mais utilizado é o argônio. Esse gás também pode ser misturado com hélio ou hidrogênio para aumentar a soldabilidade (Chapuis, 2011), o que seria a segunda forma de proteção, ou seja, uma mistura de gases inertes. A Figura 1 mostra um esquema de uma soldagem TIG.

Figura 1 – Esquema de uma soldagem TIG.



Fonte: Chapuis (2011)

Devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de material, é possível ter um excelente domínio do calor cedido à peça. A tocha de soldagem, composta pelo eletrodo de tungstênio, uma entrada de gás e um bocal cerâmico responsável por canalizar o fluxo de gás, também é outro fator importante para o controle do calor. Essas características tornam o processo capaz de soldar materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados.

Para isso, na soldagem TIG, a escolha do eletrodo depende tanto do material soldado como da sua espessura, pois esta implica diretamente no cálculo da intensidade de corrente e, portanto, o diâmetro do eletrodo (Chapuis, 2011).

Segundo Chapuis (2011):

Os eletrodos utilizados são principalmente feitos de tungstênio com mais de 99% de massa do que os óxidos metálicos adicionados para aumentar a emissão eletrônica do eletrodo e assim o rendimento. Estes óxidos são os do tório (ThO_2), do cério (CeO_2), do lantânio (La_2O_3), do zircônio (ZrO_2) ou do ítrio (Y_2O_3). Para a soldagem em alumínio, também existem eletrodos de tungstênio puro. O diâmetro do eletrodo varia entre 1 e 8 mm. A escolha do gás de proteção terá uma influência não negligenciável na forma do arco e, portanto, na solda.

Os custos elevados com os equipamentos e a produtividade relativamente baixa limitam a utilização desse processo, fazendo com que o mesmo só seja aplicado em situações em que a qualidade da solda produzida seja mais importante que a produtividade ou o custo da operação. Portanto, trata-se de um

processo usado prioritariamente em metais não ferrosos e aços inoxidáveis, sendo muito utilizado na indústria aeroespacial e de aviação, devido a sua alta qualidade.

2.1.2 EQUIPAMENTOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

Existem alguns equipamentos que são fixos para o procedimento experimental e alguns materiais que serão consumidos ao longo do mesmo. É importante definir claramente esses consumíveis, pois a alteração de um deles pode modificar os resultados obtidos. O presente item, foca-se nos materiais utilizados no trabalho aqui explicitado.

MATERIAL BASE

A classificação dos aços ocorre de acordo com a ABNT. A nomenclatura se baseia na composição química do aço e no teor médio de carbono. Os dois primeiros números representam essa composição química e os dois finais esse teor. No caso do aço 1020, significa que se trata de um aço carbono simples¹ com 0,20% de percentual médio de carbono².

O mesmo trata-se de um aço comumente utilizado dada sua excelente relação custo-benefício quando comparado com outros aços. É um material que possui excelente conformabilidade e soldabilidade, o que faz com que sua aplicação seja abrangente, desde pequenos itens como engrenagens, até grandes itens como tubos.

GÁS DE PROTEÇÃO

Para a soldagem TIG é preciso utilizar gases inertes. São denominados inertes os gases que não são reativos. Dessa forma, sua principal característica é a não reação com o eletrodo nem com a poça de fusão.

Os gases inertes mais conhecidos são os gases nobres. Eles são encontrados na natureza na forma de átomos isolados, pois possuem oito elétrons na camada de valência. A principal propriedade química desses gases é

¹ Referente ao número 10.

² Referente ao número 20.

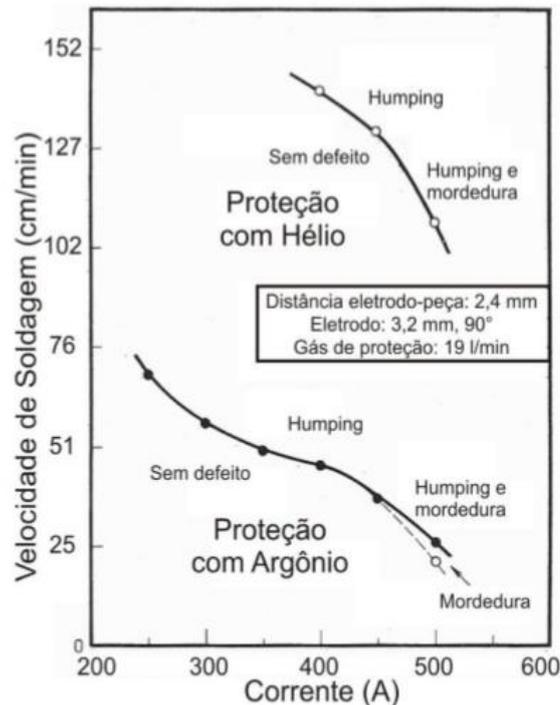
a alta estabilidade, ou seja, pouca tendência de se unir, em outras palavras reagir, entre si ou com outros elementos químicos.

O Argônio tem como suas principais características: (a) possibilidade do arco mais suave, (b) penetração reduzida, (c) baixo custo, (d) alta disponibilidade e (e) boa proteção com baixos fluxos. Uma menor penetração possibilita melhor qualidade na soldagem de materiais finos e soldagens verticais ou sobre cabeça (Bracarense, 2000).

Com relação à formação do *humping*, na literatura encontram-se informações sobre a influência do gás de proteção utilizado. Por exemplo, em sua tese de doutorado, Schwedersky explica que:

O mecanismo de formação desses defeitos, o *humping*, tem sido tema de diferentes publicações já a partir da década de 1960. O trabalho de Savage et al, 1979, apresenta uma grande quantidade de experimentos realizados, como por exemplo, a Figura 2, mostrando que ocorre diminuição na velocidade máxima que é possível soldar sem o surgimento de *humping*, à medida que a corrente de soldagem é aumentada. Além disso, o trabalho mostra que a utilização de He possibilita obtenção de maiores velocidades de soldagem, sem o surgimento de *humping*, em comparação ao Ar.

Figura 2 – Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos



Fonte: Savage, et al (1979)

Pela Figura 2, percebe-se que o gás Argônio gera o defeito *humping* com menores velocidades e menores correntes.

TIPO DE ELETRODO

O nome da soldagem TIG tem por origem o seu eletrodo de tungstênio. Sua principal característica é que o mesmo não é consumível. É possível encontrá-lo na forma pura, isto é, apenas com tungstênio na composição, ou com combinação com outros elementos químicos.

A união do tungstênio com os outros desses elementos químicos é capaz de modificar algumas características tais como ignição, estabilidade do arco, durabilidade, entre outras. A Tabela 1 foi retirada de um fornecedor de eletrodos. Nela encontram-se algumas das características que cada combinação química pode obter. Quanto maior a quantidade do símbolo “+” significa que a combinação é melhor naquele quesito. A tabela apresentada tem como menor medidor o “+” e como maior medidor o “+ + + +”.

Tabela 1 – Eletrodos de tungstênios com algumas combinações químicas possíveis e o impacto que estas podem fazer. Fonte: Energyarc Industrial LTDA.

Tipo	Classe ANSI/AWS	Ignição	Estabilidade do arco	Durabilidade	Corrente CC
Puro	EWP	+	+	+	+
Tório 2%	EWTh-2	++	++	+++	+++
Zircônio 0,3%	EWZr-0,3	+	++	++	+
Zircônio 0,8%	EWZr-0,8	+	++	++	+
Cério 2%	EWCe-2	+++	+	+++	+++
Lantânio 1,5%	EWLa-1,5	+++	+++	+++	+++
Lantânio 2%	EWLa-2	+++	+++	+++	+++
Especial Wolfram	EWS2	++++	++++	++++	++++

Considerando os materiais expostos, fica claro que o eletrodo EWTh melhora a ignição, a estabilidade do arco, a durabilidade e o comportamento em corrente contínua em comparação com o eletrodo puro.

Segundo Palacíos, 2010:

Estes eletrodos oferecem melhor ignição 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 tungstênio puro. Normalmente tem uma vida mais longa. Estes eletrodos foram desenvolvidos para as aplicações com corrente contínua de eletrodo negativo. Mantém uma configuração de ponta afiada durante a soldagem.

Outro fator importante no eletrodo é que o ângulo de afiação do eletrodo de tungstênio influencia diretamente o formato do arco de soldagem.

2.1.3 EFEITO HUMPING

O processo TIG é tradicionalmente aplicado com baixa velocidade de soldagem, e também por isso, classificado popularmente como um processo de baixa produtividade (Schwedersky, et al, 2011). Essa classificação ocorre em virtude dos problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, pois, nesse contexto, é necessário que a corrente de soldagem também seja elevada para manter o cordão com qualidade satisfatória (Schwedersky, et al, 2011).

Estudos precedentes, realizados por Mendez (1999), calcularam que um aumento de apenas 10% na velocidade de soldagem já seria capaz de proporcionar uma economia cujo montante estaria entre 0,35 bilhões de dólares e 1,35 bilhões de dólares. Considerando a inflação que ocorreu entre a data da análise demonstrada e a presente data, pode-se estimar que esse valor tenha aumentado para uma variação entre 1,05 bilhões de dólares e 4,05 bilhões de dólares. A equação (1) mostra a origem dos cálculos realizados por Mendez para desenvolver essa afirmação.

$$\text{Economia} = (\text{custo de trabalhos} + \text{custos indiretos}) \left(\frac{V_{\text{nova}} - V_{\text{original}}}{V_{\text{original}}} \right) \quad (1)$$

Onde V_{nova} é a nova velocidade a ser considerada e V_{original} é velocidade original da análise.

Trabalhos anteriores, (Schwedersky, 2011), determinam que o processo TIG é prontamente aplicável, proporcionando arco com boa estabilidade e sem ocorrência de problemas em uma faixa inicial de intensidade de correntes que na prática vai até cerca de 250 A.

Segundo Schwedersky, et al, (2011):

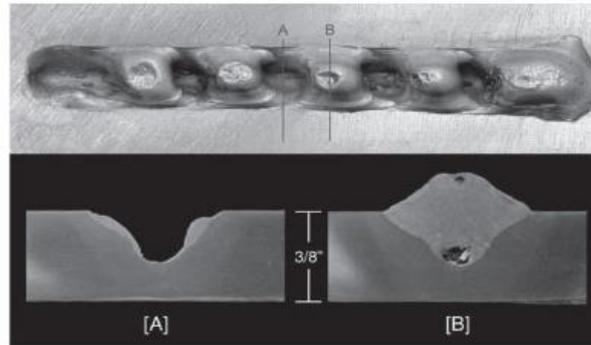
Dentro dessa faixa de correntes, que por sinal é onde está situada a maior parte das aplicações do processo dentro das indústrias, é possível aumentar a velocidade de soldagem de maneira quase proporcional ao aumento da corrente de soldagem. Quando se busca velocidades de soldagem mais elevadas, na ordem de 1 m/min, torna-se necessário o aumento da corrente de soldagem, porém, o comportamento da poça de fusão muda, e o resultado na maioria das vezes é um cordão descontínuo.

Portanto, para velocidades de soldagem mais elevadas, é preciso o aumento da corrente de soldagem. No entanto, esse aumento altera o comportamento da poça de fusão e o resultado, na maioria das vezes, é um cordão descontínuo (Schwedersky, et al, 2011).

Essa descontinuidade comumente é composta de regiões de crateras e regiões de protuberâncias, de maneira alternada. Esse tipo de falta de

continuidade do cordão de solda, que ocorre quando se utilizam correntes e velocidades de soldagem elevadas, é denominado *humping*. A Figura 3 visa mostrar o que foi elucidado anteriormente, nela é possível avaliar a vista de cima do cordão de solda com o defeito *humping*, bem como contemplar a vista lateral feita das seções transversais dos locais indicados na figura do cordão.

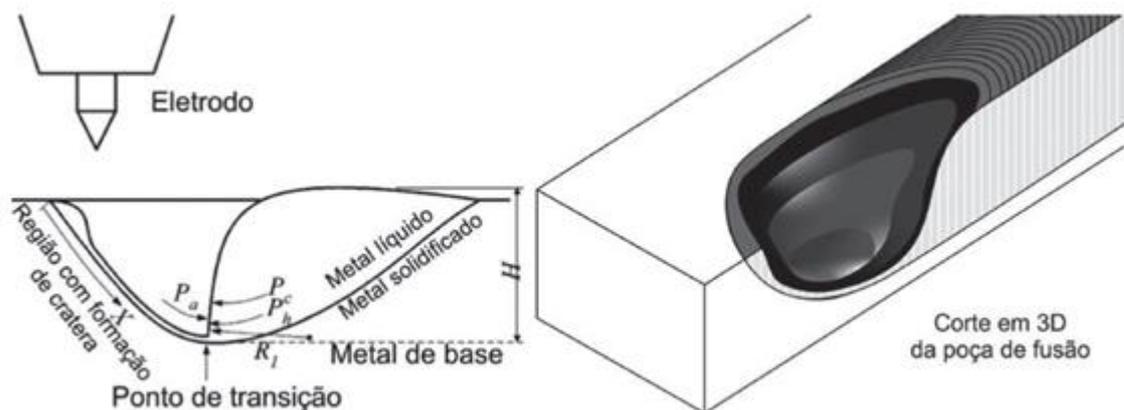
Figura 3 – Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG. A e B são seções transversais dos locais indicados na figura do cordão.



Fonte: Schwedersky, et al (2011)

A poça de fusão da soldagem TIG em baixas correntes adquire uma forma de poça metálica líquida sob o arco. À medida que a corrente de soldagem é aumentada, a pressão do arco também aumenta. Com elevadas correntes a pressão do arco se torna suficientemente grande para empurrar o metal líquido para região posterior da poça de fusão, formando uma cratera sob o arco. A Figura 4 representa a poça em alta corrente.

Figura 4 – Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes.



Fonte: Schwedersky, et al (2011)

O que irá determinar o aparecimento da cratera com posterior surgimento do *humping* será o resultado de um complexo balanço entre as pressões que agem sobre a poça de fusão, sendo consideradas as mais importantes:

- Pressão do arco (P_{arc}): Pressão produzida pela ação do plasma contra a superfície da poça metálica;
- Pressão hidrostática: (P_h): Originada devido à coluna de metal líquido; e
- Pressões capilares (P_c): Devido ao ângulo de curvatura do metal líquido.

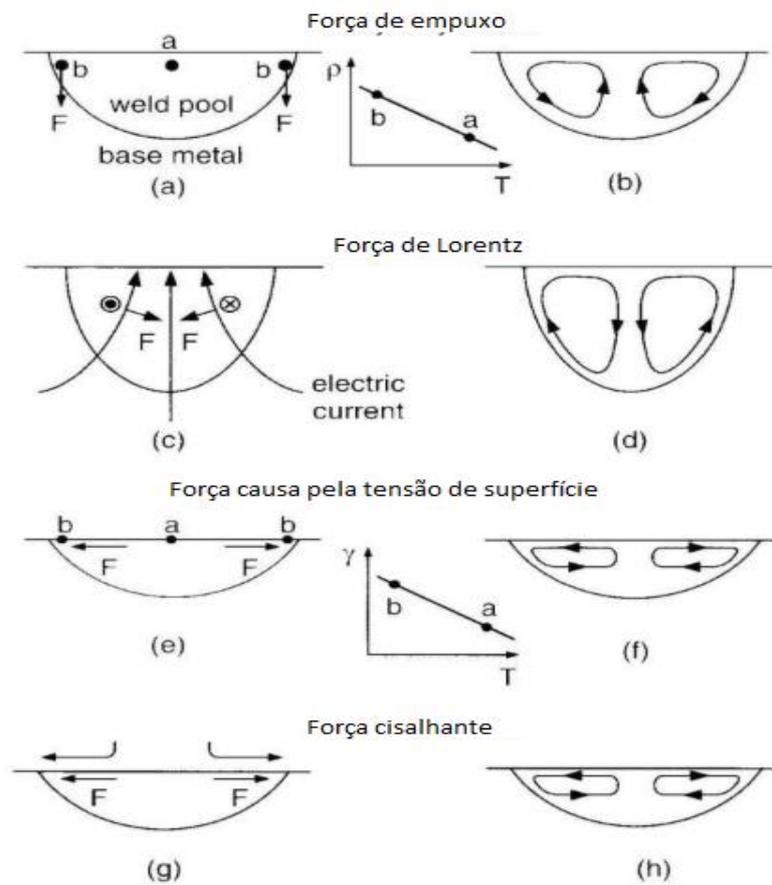
De acordo com a combinação entre os parâmetros de soldagem, principalmente corrente de soldagem e velocidade de deslocamento da tocha, apresentar-se-ão diferentes medições de pressões. Para situações de correntes mais baixas, existe a tendência de que as pressões P_h e P_c sejam maiores do que P_{arc} , e não ocorra o aparecimento da cratera. À medida que a corrente vai aumentando, P_{arc} começa a se tornar maior do que as outras pressões, iniciando-se, por consequência, a formação de cratera (Schwedersky, et al, 2011).

Além da combinação das pressões, outro fator que modifica a poça é o efeito de diferentes forças no movimento de convecção da poça de fusão. A variação da densidade depende dos gradientes de temperatura e da concentração química da poça fundida (Chapuis, 2011). O movimento devido a forças gravitacionais geralmente tem um papel secundário (Kou, 2003).

A passagem da corrente elétrica na poça induz um campo magnético (B), que gera as forças de Lorentz, elas atuam sobre as partículas do líquido, criando um fluxo móvel (Chapuis, 2011). Os movimentos resultantes dessas forças eletromagnéticas são muito influentes na forma como o cordão irá se solidificar. Em uma configuração onde a soldagem seja estática, sem movimento da fonte de calor, as forças eletromagnéticas induzem uma superfície direcionada para o eixo central da mesma (Chapuis, 2011). O calor é direcionado para baixo, dessa maneira, a fusão tende a se alargar.

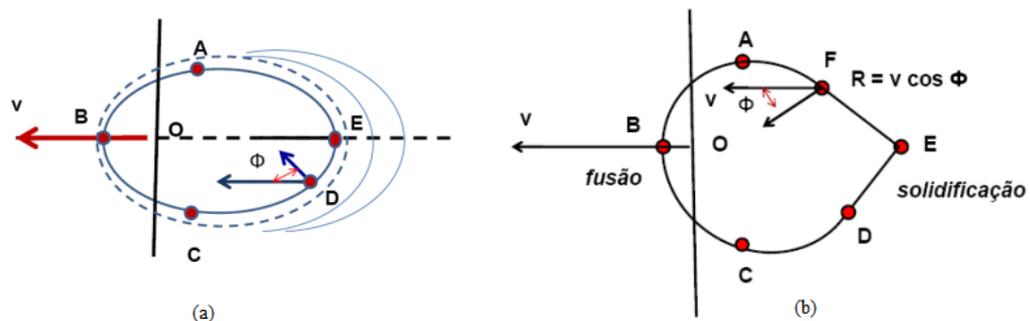
A Figura 5 demonstra o efeito de algumas forças sobre a poça de fusão.

Figura 5 – Comportamento da poça de fusão mediante algumas forças



Verificou-se que a poça de soldagem no estado do *humping* era mais longa. Essa discrepância de geometria foi atribuída à diferença de velocidade de soldagem e ao balanço térmico entre energia de soldagem e as condições de transferência de calor no metal de base. A Figura 6 mostra a forma geométrica das poças de fusão (Palacios, 2010).

Figura 6 – Aspecto da vista superior da poça de fusão. (a) No formato elíptico. (b) No formato de gota.



Fonte: Palacios (2010)

Mantendo os parâmetros constantes, a poça de fusão permanecerá inalterada. A fusão ocorre segundo a frente ABC (Figura 6 – a) e a solidificação segundo a superfície CDEA. Para que esta ocorra, é necessário que o calor fornecido pelo arco seja dissipado (Palacíos, 2010).

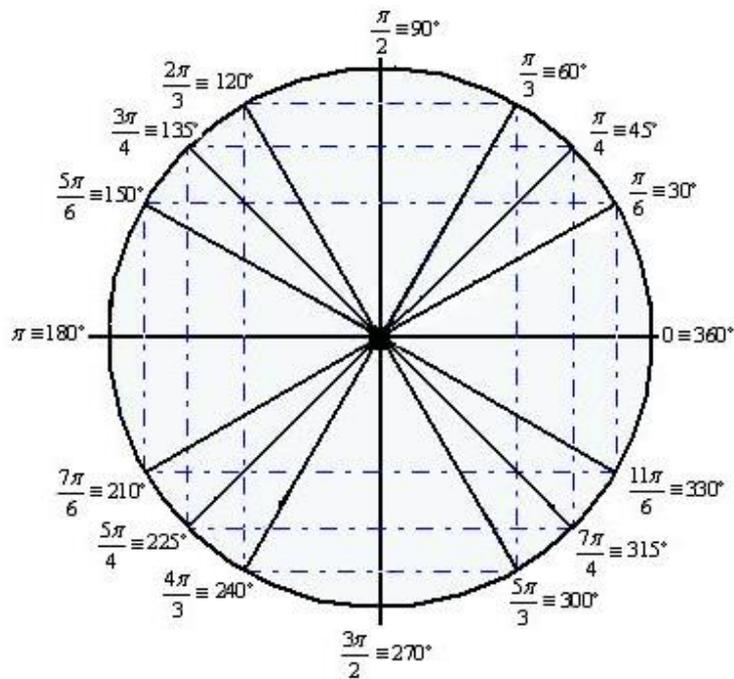
Quanto maior for o gradiente térmico, maior será a dispersão de calor. Por conseguinte, como os pontos A e C estão próximos do arco, eles possuem um gradiente de temperatura mais elevado, gerando uma difusão de calor mais rápida. O ponto E, no entanto, possui uma distância maior da fonte de calor, logo, sua dissipação será mais lenta.

A velocidade de solidificação é maior na direção paralela ao gradiente máximo de temperatura. Em seu trabalho, Palacíos (2010) afirma que essa velocidade máxima ocorre na direção perpendicular às curvas isotermas de dissipação de calor. Desta maneira, ao representar a velocidade de solidificação pelo vetor R Normal às isotermas da Figura 6 – b, tem-se que:

$$R = v \cdot \cos \varnothing \quad (2)$$

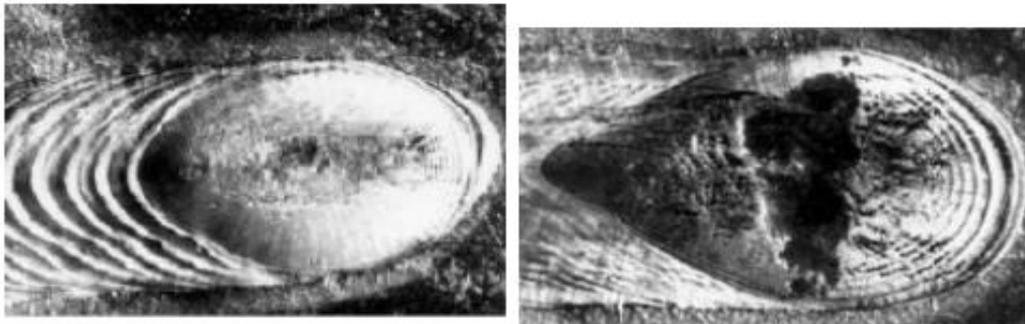
Onde v é a velocidade de soldagem e \varnothing é o ângulo, a cada ponto da isoterma, entre a direção de soldagem e a normal à isoterma (Palacíos, 2010). Considerando o círculo trigonométrico apresentado na Figura 7 e sabendo que o eixo X representa o cosseno, percebe-se que o maior cosseno ocorre para o ângulo $\varnothing = 0$. Este ângulo refere-se ao ponto E da Figura 6 – b. Analogamente, analisando o círculo trigonométrico no eixo X, observa-se que no ângulo de 90 graus obtém-se o cosseno de $\varnothing = 0$. Esse ângulo refere-se aos pontos A e C, na mesma figura.

Figura 7 – Círculo trigonométrico.



Considerando a diferença entre a velocidade de soldagem e a velocidade de solidificação, pode-se afirmar que a poça de fusão configurará-se em duas geometrias. Uma seria no formato elíptico e a outra seria no formato de uma gota, conforme mostra a Figura 8. Essa geometria, como já esclarecido, é determinada pela velocidade de soldagem e pelo balanço térmico entre energia de soldagem e as condições de transferência de calor do metal de base (Palacios, 2010).

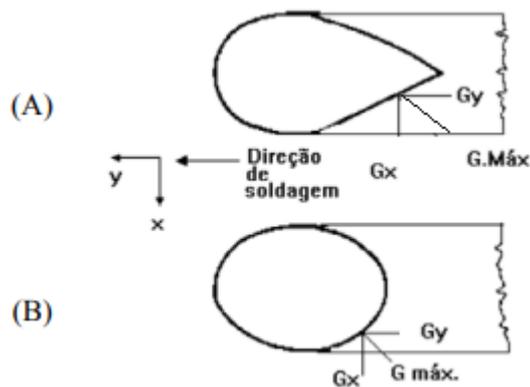
Figura 8 – Vista superior da poça de fusão. A primeira é a poça elíptica, a segunda a poça em forma de gota.



Fonte: Palacios (2010)

Novamente segundo Palacios (2010), “a velocidade de solidificação é dependente do gradiente térmico”. A Figura 9 mostra as geometrias típicas da parte posterior da poça nos casos de alta (a) e de baixa (b) velocidades, assim como se explicitam os respectivos gradientes térmicos, decompostos nos eixos X e Y. Ao analisar esses componentes nas duas formas geométricas possíveis, percebe-se a predominância do gradiente na direção x no caso da poça de fusão em gota, e na direção y, no caso da poça de fusão de forma elíptica. Observa-se ainda que no formato em gota, a direção do gradiente (perpendicular às linhas isotermas) permanece aproximadamente constante nas laterais da parte posterior da poça, enquanto que no formato elíptico a direção varia continuamente.

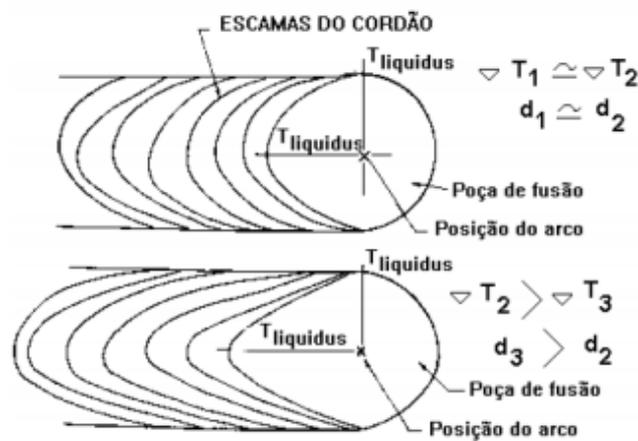
Figura 9 – Gradientes térmicos da poça de fusão em função do formato.



Fonte: Palacios (2010)

Ainda segundo Palacios (2010), “em uma aproximação simplificada, o gradiente térmico da poça de fusão pode ser expresso pela diferença entre a temperatura média do arco e a temperatura *liquidus* do material”. A poça de fusão na forma de gota possui ao centro do cordão um gradiente menor que nas bordas (Palacios, 2010). A Figura 10 mostra esse efeito, onde T_2 refere-se ao eixo y e T_1 e T_3 referem-se ao eixo x.

Figura 10 – Gradiente térmico da poça de fusão.

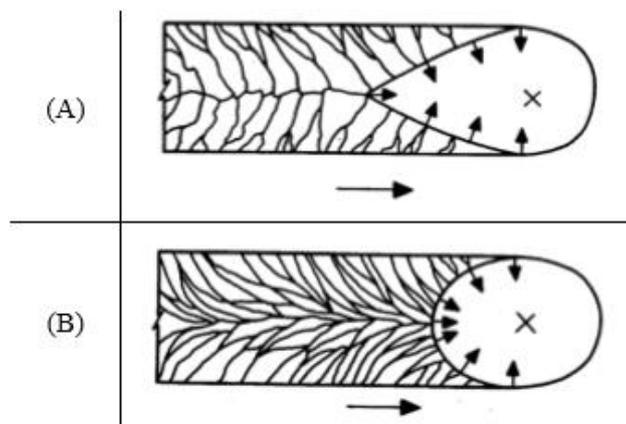


Fonte: Palacios (2010)

Por fim, estudos por volta dos anos 60, Savage et al (1965), verificaram que a velocidade de soldagem e a corrente de soldagem são os principais fatores influenciadores na solidificação da poça de fusão. Percebeu-se, então, que a modificação dos parâmetros de soldagem também modificava a solidificação da microestrutura (Chapuis, 2011).

Os grãos da poça de fusão com o formato de gota crescem em uma linha. Eles possuem a tendência de um crescimento perpendicular à borda da poça, isso gera um eixo de segregação central. O crescimento dos grãos também são curvados com o intuito de crescer perpendicularmente à face da poça de fusão. A Figura 11 a mostra isso (Palacios, 2010; Chapuis, 2011)

Figura 11 – Estrutura da solda de grãos colunares feitos com poça em formato de gota (A) e em formato elíptico (B).



Fonte: Palacios, 2010

No caso da poça de fusão em formato elíptico a frente de solidificação muda constantemente, Figura 11 – b. Os grãos não encontram uma direção ideal de crescimento. Isso favorece a formação de maior número de grãos com menor tamanho e de aspectos menos colunares (Palacíós, 2010). Essa estrutura favorece a qualidade da junta soldada (Dong, 2009).

No presente trabalho, o efeito *humping* será estudado com o auxílio de uma câmera termográfica. Para um melhor entendimento de como a máquina será utilizada, o próximo item explicará o que é a termografia, seus conceitos e sua utilização. Nele também será aclarada a fundamentação da câmera e seu funcionamento.

2.2 TERMOGRAFIA

A termografia é uma técnica que possibilita distinguir áreas de diferentes temperaturas, onde esta medição é realizada pela detecção da radiação térmica ou infravermelha emitida por qualquer corpo, equipamento ou objeto, com uma temperatura superior ao zero (0) absoluto, que equivale aproximadamente a -273°C . Isso permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho, tornando-se uma extensão da visão humana. Rocha (2012)

Antes de explicar como funciona a captação de imagens pela câmera é preciso entender, primeiramente, alguns princípios básicos da termografia. São eles: o corpo negro, a emissividade e a radiação.

O corpo negro consiste em um objeto capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele em qualquer comprimento de onda. A radiação emitida pelo corpo negro é isotrópica, isto é, não depende da direção. Outra característica importante, é que nenhuma outra superfície emite mais radiação que a de um corpo negro à mesma temperatura. A lei que governa a intensidade da radiação emitida por unidade de área e por comprimento de onda, devido a temperatura absoluta T , é a lei de Planck (3).

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{(C_2/\lambda T)} - 1)} \quad (3)$$

Onde W_λ é a radiação emitida pelo corpo negro no comprimento de onda λ , $C_1 = 37,413 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{cm}^2$, $C_2 = 14388 \mu\text{mK}$ e T é a temperatura absoluta do corpo negro.

Este corpo é um conceito puramente teórico. O corpo real é capaz de emitir uma determinada quantidade de energia e o parâmetro que define essa emissão é a emissividade (ϵ).

A emissividade é a capacidade de um corpo emitir energia. Para defini-la, utiliza-se o corpo negro como referência, tomando-se como base para sua emissividade o valor de 1. As outras, emitidas pelos outros corpos serão calculadas em relação ao percentual que equivalem ao corpo negro. Podendo chegar ao mínimo de zero. Portanto a emissividade obrigatoriamente estará entre o valor de 0 e 1. As equações (4) e (5) mostram como calculá-la.

$$\epsilon_{\lambda,T} \equiv \frac{W_{\lambda a}}{W_\lambda} \quad (4)$$

$$W_{\lambda a} = \frac{C_1 \epsilon_{\lambda,T}}{\lambda^5 (e^{(C_2/\lambda T)} - 1)} \quad (5)$$

Dessa forma, fica evidente que quando mais próximo o valor da emissividade for de 1, mais o corpo se comporta de maneira semelhante ao corpo negro, ou seja, maior a sua capacidade de emissão de energia.

Em 1860, um físico alemão chamado Robert Kirchhoff comprovou que a capacidade de um corpo obter energia é igual ao de emití-la. Assim, se uma superfície está recebendo radiação, ela a absorve com igual coeficiente de emissividade. A partir da comprovação de Kirchhoff tem-se o novo conceito da propriedade de absorvidade. Ou seja, aquele material que irradia energia também absorve radiação com o mesmo comprimento de onda. Por conseguinte, o emissor ideal é o corpo negro.

Apesar de a ideia de um corpo negro ser do físico Kirchhoff, foram os físicos austríacos Joseph Stefan e Ludwig Eduard Boltzmann que descobriram e desenvolveram a relação de dependência entre a energia radiante de um corpo negro e a temperatura absoluta. Pode-se, então, afirmar que um corpo real a uma

dada temperatura absoluta, T , tem uma emissão dada pela lei de Stefan-Boltzmann, explicitada na equação (6):

$$W = \sigma.T^4 \quad (6)$$

Onde, W é a potência radiante [W/m^2], σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$5,7 \times 10^{-8} W/K^4m^2$], T é a temperatura absoluta [K].

A radiação térmica é a taxa de emissão de energia de um material relacionada à sua temperatura. Sabe-se que o calor é energia em trânsito. Essa energia é transportada na forma de ondas eletromagnéticas com comprimento de onda situado na região do infravermelho. A radiação térmica está relacionada com a energia libertada devido às oscilações ou transições dos elétrons, átomos, íons ou moléculas mantidas pela energia interna do material.

Todos os corpos emitem radiação. Quando estes absorvem mais do que emitem, eles se aquecem. Dessa forma, pode-se afirmar que todo material com temperatura acima do zero absoluto emite energia térmica.

A partir desses três conceitos – corpo negro, emissividade e radiação – é possível entender o funcionamento da câmera termográfica. Esta máquina capta a radiação infravermelha emitida pelo corpo filmado e decodifica a imagem em cores distintas para diferentes temperaturas. Esta radiação está em um comprimento de onda não decodificado pelos olhos humanos.

Rocha, 2012, define:

A intensidade desta radiação é proporcional à sua temperatura. São, portanto, emissões de infravermelho que produzem imagens térmicas chamadas de termogramas que, em resumo, permitem a visualização da distribuição de calor na região focalizada. Assim, através do termovisor fica fácil a localização de regiões quentes (cores com maior brilho) ou frias (cores mais opacas), através da interpretação dos termogramas que fornecem imagens, em faixas de temperatura que podem cobrir de $-40^\circ C$ ($\approx 233 K$) a $2.500^\circ C$ ($\approx 2.773 K$). As imagens do termovisor podem ser gravadas em meio magnético para posterior estudo e processamento.

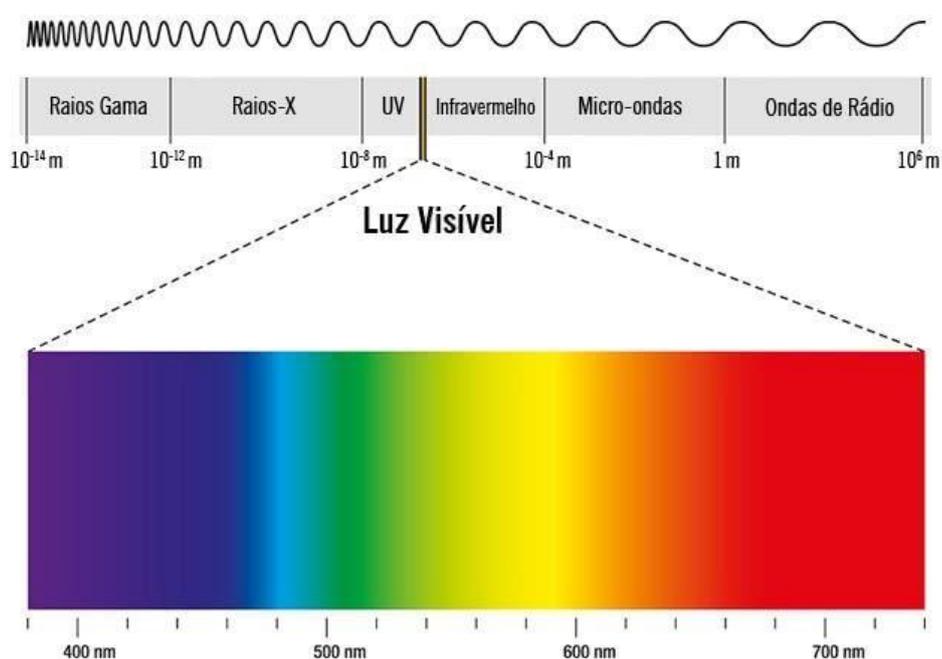
Com o entendimento das radiações e das suas relações com a temperatura, é possível compreender a forma de captação da câmera termográfica. O próximo item irá explicar sobre ela e o seu funcionamento.

2.2.1 CÂMERA TERMOGRÁFICA

Todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto emitem e absorvem radiação infravermelha. Esta se desloca à velocidade da luz sob a forma de onda senoidal e é um tipo de energia eletromagnética com características semelhantes à radiação visível, às ondas de rádio e aos raios-X. Ela está localizada no espectro eletromagnético entre a luz visível e as micro-ondas (Rocha, 2012).

O espectro eletromagnético abrange uma enorme gama de comprimentos de onda, conforme mostra a Figura 12. O olho humano só é capaz de detectar a parte que consta como “luz visível”.

Figura 12 – Espectro eletromagnético.



Após os raios visíveis, encontram-se os raios infravermelhos, cujos comprimentos de ondas são longos. Eles correspondem à emissão de energia por parte da matéria para as temperaturas que se encontram geralmente à superfície da Terra (Barreira, 2004).

Em seu trabalho de Dissertação, Rocha (2012) explica que:

O espectro eletromagnético é dividido arbitrariamente em diversas regiões de comprimento de onda, designadas por bandas, distinguidas pelos métodos utilizados para produzir e detectar a radiação. Não existe nenhuma diferença fundamental entre a radiação nas diferentes bandas do espectro eletromagnético. Gerem-se todas pelas mesmas leis e as únicas diferenças devem-se às diferenças no comprimento de onda (Manual do utilizador FLIR). Essas bandas são os raios gama, raios-X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, micro-ondas e ondas de rádio.

A câmera termográfica, instrumento a ser utilizado neste estudo, capta os comprimentos de ondas relacionados ao espectro eletromagnético infravermelho. A intensidade da radiação captada é traduzida em diferentes cores, de modo que uma estrutura com uma temperatura maior terá uma cor diferente de um corpo com uma temperatura menor. Essa informação é a responsável por definir geometricamente a poça de fusão. O próximo capítulo explicará essa definição.

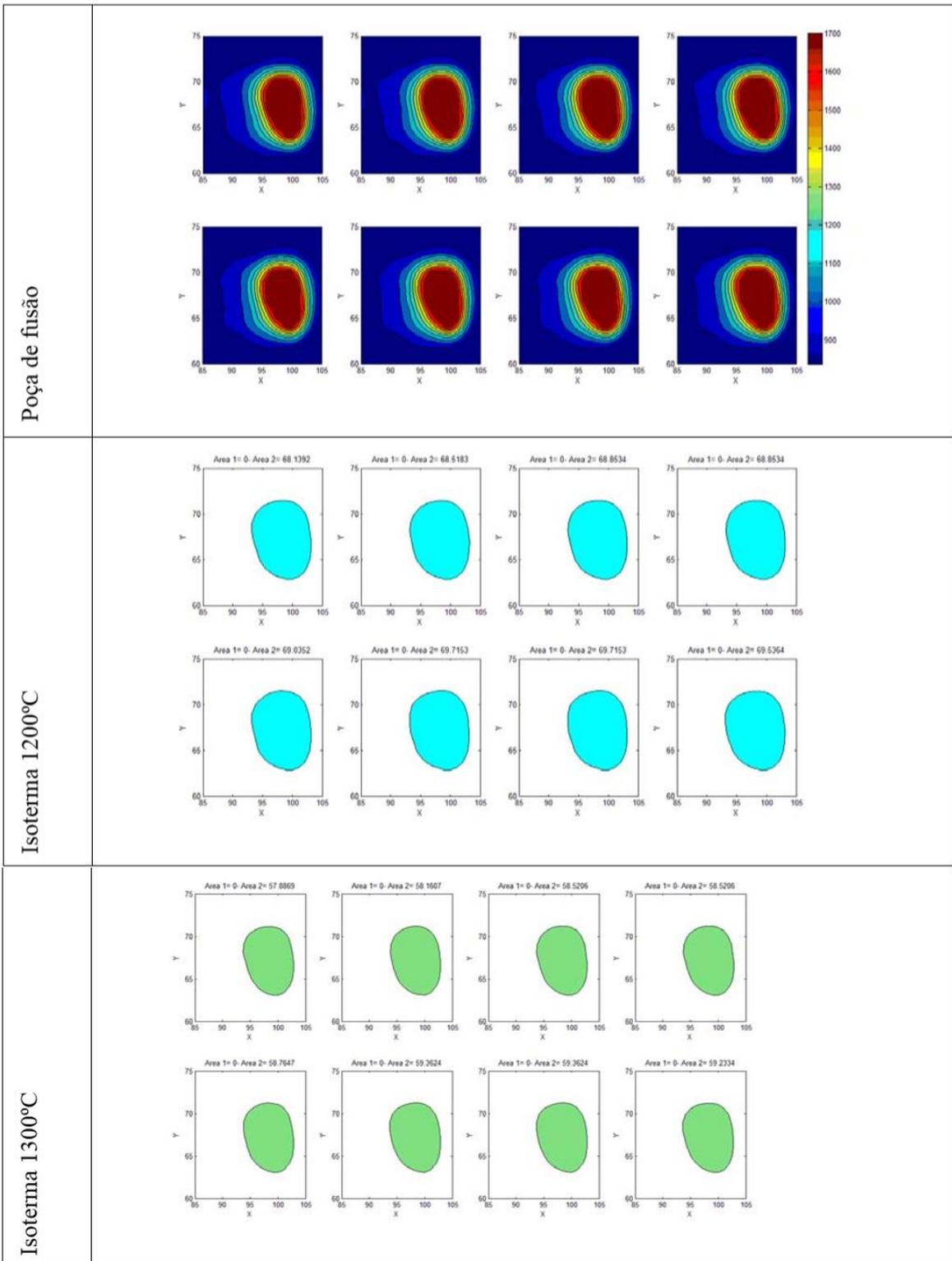
2.2.2 HUMPING NA IMAGEM TERMOGRÁFICA

Em sua dissertação, Palacios (2010) utilizou-se de técnicas de termografia para detectar a descontinuidade em cordões de solda através do monitoramento da poça de fusão. Sua metodologia consistia em filmar o processo com uma câmera termográfica e processar as imagens obtidas.

A imagem termográfica de uma poça de fusão estável é constituída de curvas fechadas, aproximadamente concêntricas e com geometria semelhante a elipses, sendo as curvas mais internas representativas de campos de temperaturas maiores e as curvas mais externas, de temperaturas menores. A Figura 13 mostra um exemplo de imagem termográfica de uma poça de fusão TIG estável. Palacios (2010) observou que a geometria das isothermas é alterada quando da ocorrência do defeito *humping*, cujas curvas isotérmicas apresentam-se disformes em relação ao observado no caso de poça estável. Em algumas temperaturas, é possível identificar curvas fechadas com variação intensa na curvatura formando superfícies que se assemelham ao contorno da intersecção entre duas elipses, sendo uma maior que a outra (vide Figura 14 – Isoterma 1200 °C). Em outras temperaturas, observam-se mais de uma (duas ou mais) curvas isothermas

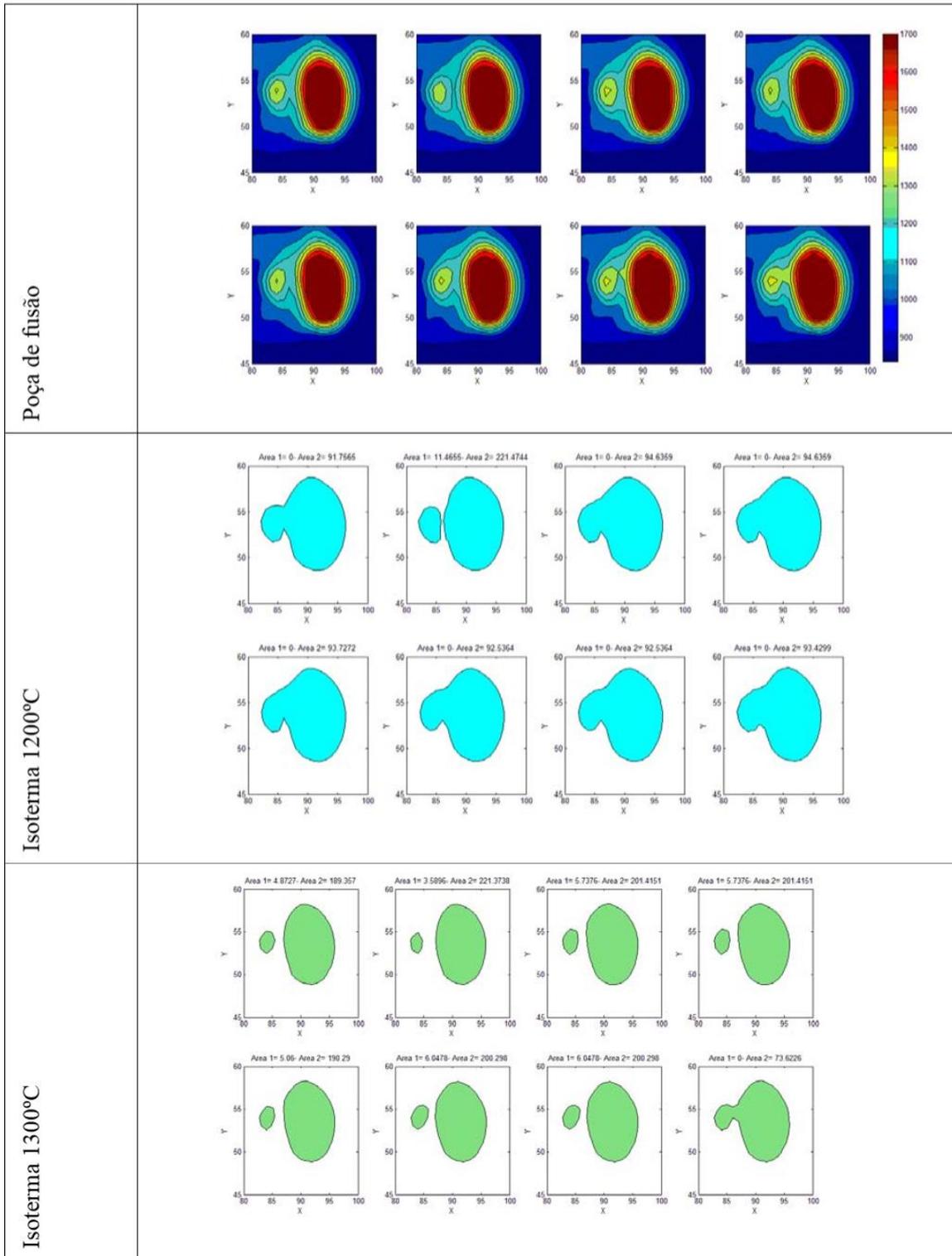
fechadas, isto é, curvas aproximadamente elípticas, porém não inseridas uma dentro da outra (vide Figura 14 – Isoterma 1300 °C). Com base nessa observação, Palacios (2010) criou um método de identificação da ocorrência do *humping*, via processamento de imagens termográficas. A Figura 15 mostra o fluxograma utilizado para essa detecção. Seu método, entretanto, era limitado à detecção da ocorrência do fenômeno, ou seja, o *humping* já estaria instalado quando de sua detecção. O desejável seria conseguir detectar a tendência à formação do defeito antes de sua efetiva ocorrência, de modo a se desenvolver um método de controle que antecipe o defeito e impeça sua instalação.

Figura 13 – Imagem termográfica das diferentes zonas isotermas para o cordão de solda ideal.



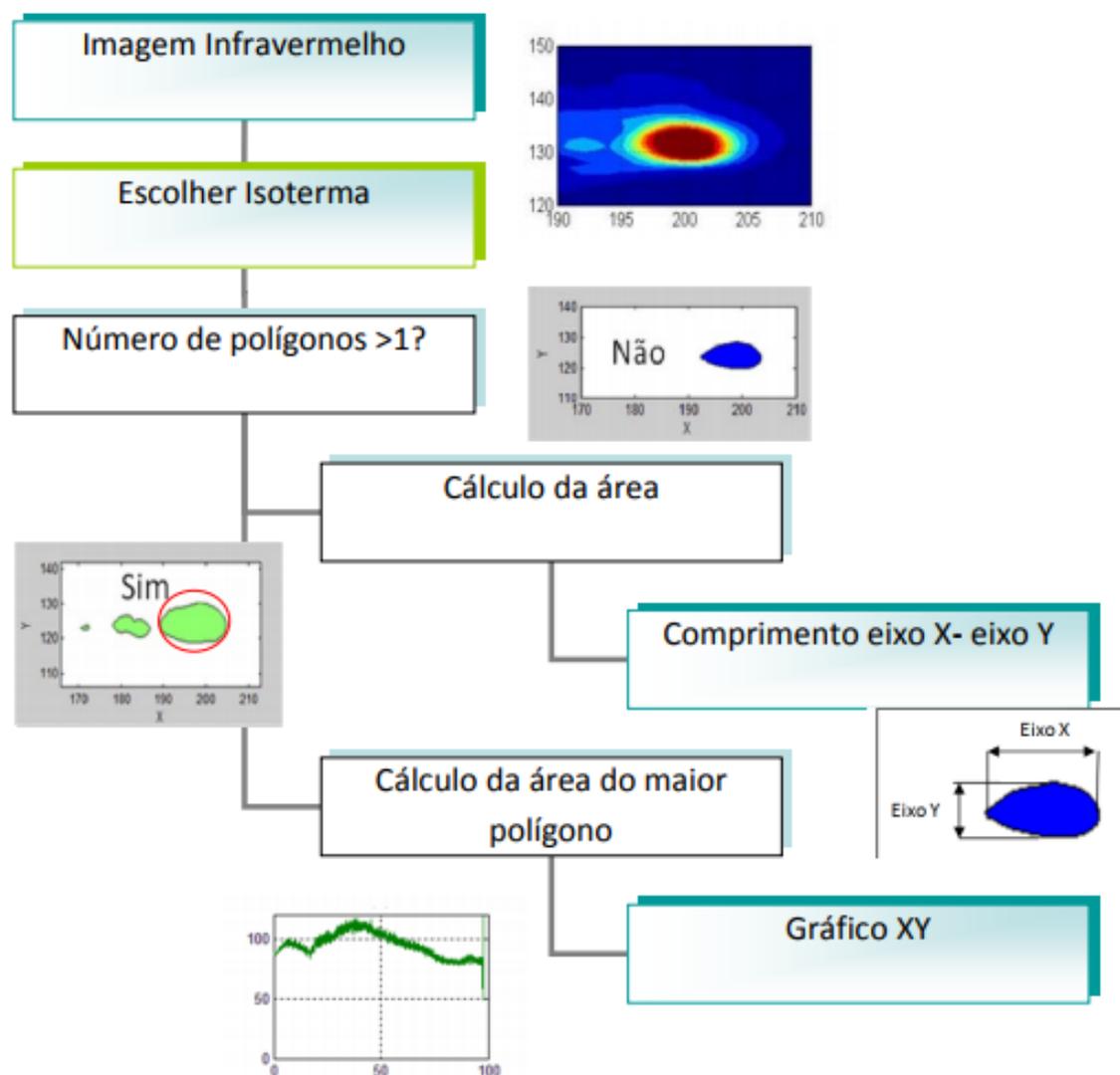
Fonte: Palacios (2010)

Figura 14 – Imagem termográfica das diferentes zonas isotermas para o cordão de solda com *humping*.



Fonte: Palacios (2010)

Figura 15 – Fluxograma de processamento de imagens termográficas da poça TIG para detecção da ocorrência ou não do *humping*.



Fonte: Palacios (2010)

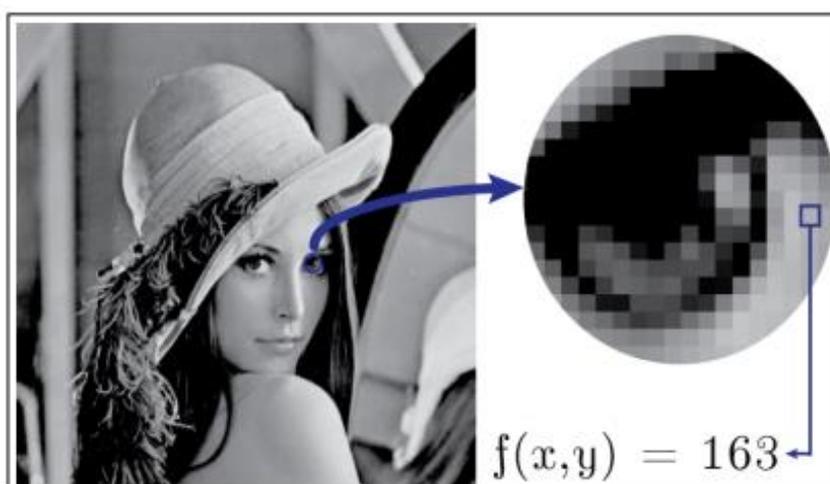
Com todos os conceitos expostos anteriormente, foi possível desenvolver a técnica para identificar as isotermas. Nesse contexto, ficou evidenciada a necessidade do processamento de imagem para realizar essa identificação. O próximo item ilustra as principais características para o processamento de imagem bem como conceitos correlatos.

2.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Processamento Digital de Imagens é uma especialização do Processamento Digital de Sinais cujo sinal processado é uma imagem digital (SANDOVAL, 2014). Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, na qual x e y são coordenadas espaciais (formando um plano) e a amplitude de f em qualquer coordenada (x, y) é a intensidade ou nível de cinza da imagem naquele ponto (GONZALEZ, 2002). Quando se considera que existem valores finitos e discretos para x , y e f , tem-se a definição de uma imagem digital (SANDOVAL, 2014).

Ao se ampliar uma imagem digital, é possível visualizar perfeitamente seus pontos formadores, que se apresentam geralmente como quadrados de mesmo nível de intensidade centrados nas coordenadas x e y (vide Figura 16). Todo valor de $f(x, y)$ é equivalente a um nível de cinza. O intervalo de níveis a ser considerado depende da resolução utilizada na digitalização da intensidade da luz capturada em cada elemento existente na matriz, cujos elementos sensíveis à luz se distribuem nas coordenadas espaciais x e y . No caso de 8 bits, a intensidade capturada pelos elementos da matriz é quantizado em 256 níveis, desde o valor 0, que é a cor preta, até 255, referente à cor branca (Sandoval, 2014). A esses pontos cujas coordenadas são (x,y) , atribui-se o nome *pixel*.

Figura 16 – Representação digital de uma imagem



Fonte: Sandoval (2014)

A palavra *pixel* é a junção de duas outras palavras inglesas, *picture* e *element*. Em uma tradução literal e simples, tem-se seu significado como elemento de imagem. Quando eles são dispostos em uma área pequena, uma imagem digital se forma. Por estarem nessa área reduzida, passa-se a impressão de continuidade, não sendo possível detectar as fronteiras entre cada ponto.

2.3.1 MORFOLOGIA

A morfologia é uma técnica que surgiu nos anos 60 na França (Winkler, 2016; Farias, 2016). Ela só passou a ser estudada no Brasil, no entanto, na década de 80 (Winkler, 2016). Sua lógica consiste em utilizar ferramentas matemáticas para a análise de estruturas geométricas em imagens (Winkler, 2016).

Ela foi desenvolvida, inicialmente, para manipular imagens binárias, isto é, imagens que possuíam apenas as cores pretas e brancas. Posteriormente, foi otimizada para imagens em tons de cinza (Farias, 2016).

Seus fundamentos estão baseados na teoria dos conjuntos para representar os objetos em uma imagem. A ideia por trás da morfologia matemática é considerar que as imagens são constituídas por um conjunto de elementos, os *pixels*, que se agrupam numa estrutura bidimensional (forma).

A ideia básica em morfologia matemática é investigar uma imagem utilizando um elemento estruturante, verificando como ele se ajusta à imagem à medida que ele se desloca pela mesma. Elementos estruturantes são conjuntos de *pixels* ativos com origem e forma bem definidas, sendo um subconjunto da imagem original. O elemento estruturante se ajusta à região da imagem que ele está explorando, quando a sequência de *pixels* que o compõem é idêntica à sequência de *pixels* presentes em uma dada região da imagem. (Farias, 2016)

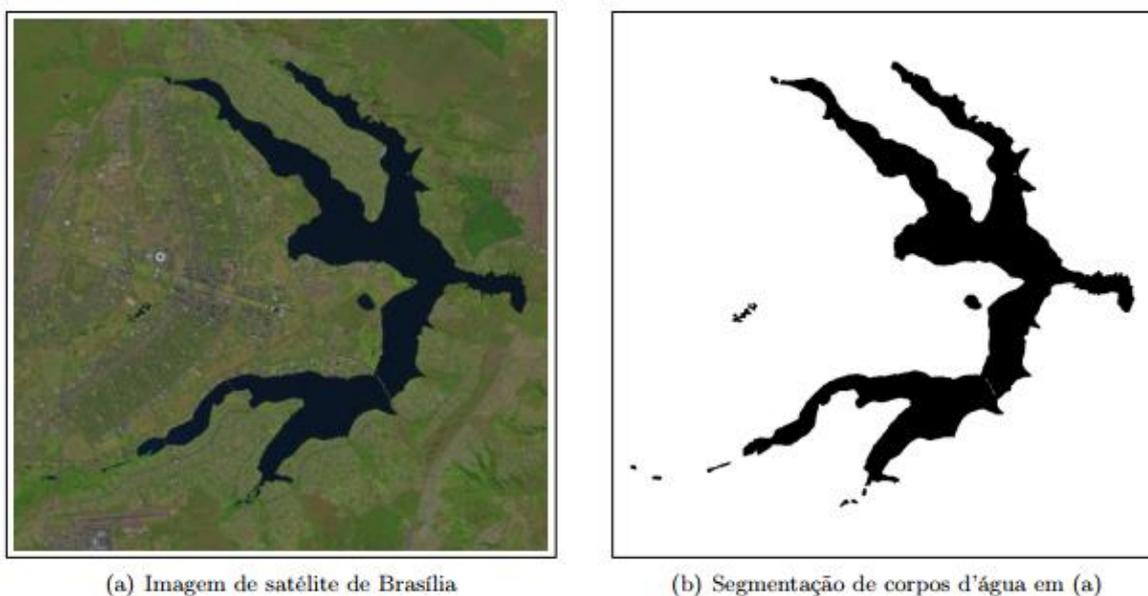
Dentro desses conjuntos citados por Farias (2016), existem alguns ajustes que são mais conhecidos e utilizados na morfologia. Um deles é a segmentação.

2.3.2 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

A segmentação divide uma imagem em suas partes constituintes ou objetos (Gonzalez, 2002). A principal característica da segmentação é simplificar a imagem que será analisada, pois a imagem original entra com uma matriz com

uma combinação complexa de cores vermelhas, verdes e azuis, no caso de imagem colorida. A imagem que sai, no entanto, é uma combinação de apenas dois extremos, o preto e o branco. A Figura 17 mostra uma imagem original e a imagem segmentada.

Figura 17 – Segmentação de corpos d’água em uma imagem de satélite de Brasília-DF. Figura (a) disponibilizada pelo programa LANDSAT 8 sob licença Creative Commons



Fonte: Sandoval (2014)

A realização da segmentação vem se tornando cada vez mais difícil devido ao amplo campo de atuação da mesma (imagens com alta resolução, imagens geradas por computador, frames de vídeos, entre outros). Além de precisar administrar qual tipo de imagem está sendo trabalhada, é preciso atender ao contraste entre a área que se deseja segmentar e o restante da imagem, pois quando há pouco contraste, a realização da segmentação fica ainda mais difícil (Sandoval, 2014).

No entanto, a correta segmentação de imagens tem grande impacto no resultado final da aplicação, uma vez que os processamentos subsequentes assumem que as partes em que a imagem foi dividida ou os objetos que foram encontrados estão corretos (Sandoval, 2014).

2.3.3 RUÍDOS E SEUS FILTROS

O ruído é um processo aleatório (Costa, 2009). Há várias fontes de imperfeições e ruído que influenciam no processamento de imagens (COSTA, 2013). Mesmo se a câmera capturasse uma cena com iluminação totalmente homogênea, a imagem resultante ainda apresentaria irregularidades na intensidade dos *pixels* (Lukas, et al, 2006).

Pode-se definir uma imagem ruidosa como sendo a combinação de uma imagem sem ruído com a parte ruidosa. Considerando R como o ruído, I como a imagem sem ruído e X como a imagem ruidosa, obtém-se uma relação como mostra a equação (7).

$$X = f(I, R), \quad (7)$$

Existem diversas formas de combinação de ruídos, sendo os mais conhecidos os ruídos aditivos, os ruídos multiplicativos e os ruídos estatisticamente independentes da imagem. O ruído aditivo trata-se de uma combinação direta entre a soma da imagem sem ruído I e o ruído R (Costa, 2009), conforme mostra a equação (8).

$$X = I + R \quad (8)$$

O ruído multiplicativo trata-se da multiplicação entre a imagem sem ruído I e o ruído R (Costa, 2009). Vide equação (9).

$$X = I \times R \quad (9)$$

Diz-se que o ruído é estatisticamente independente da imagem quando a função densidade de probabilidade conjunta de I e R for igual ao produto de suas respectivas funções densidade de probabilidade marginais (Costa, 2009). A equação (10) exemplifica o exemplo citado.

$$\begin{aligned} & f_{I,R}(r_I, r_R; (d_1, d_2), (d_1, d_2)) \\ & = f_I(r_I; (d_1, d_2)) \times f_R(r_R; (d_1, d_2)), \forall (d_1, d_2) \in D_1 \times D_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Onde $f_{I,R}$ é a função de probabilidade conjunta, f_I e f_R são as funções de probabilidade marginais.

Em seu livro, Bovik, afirma existirem seis tipos de ruídos. São eles: o ruído térmico (Gaussiano); o ruído tipo “sal e pimenta” (Impulsivo); o ruído de quantização (Uniforme); o ruído relativo à contagem de fótons (Poisson); o ruído relativo à granulação em fotografias (Binomial); e o ruído *heavy-tailed*. No entanto, os cinco primeiros são os mais conhecidos e utilizados.

A Tabela 2 traz uma descrição de como o ruído é comumente modelado, bem como uma breve explicação do mesmo.

Tabela 2 – Descrição dos cinco tipos de ruídos mais conhecidos existentes segundo Bovik

Nome	Classificação	Dependência do sinal	Descrição
Ruído térmico	Aditivo	Independente do sinal	Composto de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.
Ruído do tipo “sal e pimenta”	Aditivo	Independente do sinal	Composto de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.
Ruído de quantização	Aditivo	Independente do sinal	Composto de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.
Ruído relativo à contagem de fótons	Aditivo	Dependente do sinal	Quanto maior o número de fótons contado em uma região, maior será o valor do pixel.
Ruído relativo à granulação do sinal em fotografias	Aditivo	Dependente do sinal	Sua função densidade de probabilidade é do tipo binomial.

Após o sucinto esclarecimento dos ruídos principais, segue-se a Figura 18, onde se mostra uma imagem original e a mesma imagem com os ruídos previamente mencionados.

Figura 18 – Imagem original e suas imagens corrompidas pelos cinco tipos de ruídos apresentados.



Fonte: Costa (2009)

Geralmente, o ruído na imagem é algo que passa despercebido. No entanto, quando se tratam de imagens pequenas ou escuras, ele causa um impacto considerável na aparência da mesma (Costa, 2013). Para vencer esse desafio utilizam-se os filtros.

O filtro mediana consiste na ideia de que o *pixel* avaliado é o *pixel* central de uma determinada janela, logo ele deveria possuir o valor central (a mediana) dessa janela. Em sua dissertação de mestrado, Costa (2013) explica que esse raciocínio é válido se a região avaliada for homogênea ou se a região avaliada possuir um gradiente de tons de cinzas. Contudo, se a faixa analisada for um ponto de extremidade superior ou de extremidade inferior, o mesmo falharia, já que neste caso o valor do *pixel* provavelmente deveria ser o valor extremo de uma janela.

A Figura 19 mostra os resultados da filtragem da imagem "moedas" pelo filtro mediana, com diferentes tamanhos de janela. Esta filtragem foi retirada do trabalho de dissertação de Costa, 2009.

Figura 19 – Resultado da filtragem da imagem “moedas” pelo filtro mediana.



(a) Imagem original



(b) Imagem filtrada (janela 3 × 3)



(c) Imagem filtrada (janela 5 × 5)



(d) Imagem filtrada (janela 7 × 7)

Fonte: Costa (2009)

Como se pode observar, o filtro mediana tende a embaçar a imagem. Isso pode ser explicado pelo fato de que os pontos mais altos ou mais baixos de uma aresta são substituídos pela mediana da janela o que faz com que as arestas sejam suavizadas. Além disso, percebe-se que quanto maior é a janela, mais embaçada fica a imagem, já que quanto maior é a janela, menos parecidos os pixels nela contidos tendem a ser, e conseqüentemente menos precisa tende a ser a estimativa do valor do pixel central com relação ao valor original pela mediana. (Costa, 2009)

Outro filtro que também é muito utilizado é o filtro média. Sua lógica é semelhante ao filtro mediana. Aquele, no entanto, não faz a substituição do pixel central pelo valor da mediana e sim, pela média aritmética dos valores dos *pixels* contidos na janela (Costa, 2009).

Assim como o filtro mediana, o filtro média também embaça a imagem. Esse embaçamento pode ser explicado pelo fato de que o filtro média é um filtro passa-baixas (Costa, 2009). Isto é, permite a passagem apenas de baixas frequências.

Existe ainda o filtro sigma aditivo. Ele foi desenvolvido para filtrar ruídos aditivos e pode ser considerado como uma evolução do filtro média (Costa, 2009). Ele possui um critério para selecionar quais *pixels* serão utilizados para efetuar o cálculo da média. Apenas *pixels* com valores suficientemente próximos do pixel central de uma janela entram no cálculo da média.

O filtro sigma aditivo embaça menos a imagem do que os filtros média e mediana. Isso pode ser explicado pelo fato de que somente *pixels* com valores próximos do valor de *pixel* central são utilizados para se fazer a média. (Costa, 2009)

O filtro sigma aditivo explicado até aqui parece ser um tanto quanto eficiente na filtragem de imagens ruidosas. Contudo, o seu cálculo se baseia no valor do pixel central. Assim, caso o *pixel* central de uma janela tenha sido bastante corrompido por ruído, ele será bem diferente dos demais, e existirão muito poucos *pixels* contidos na janela que possuam valores próximos ao dele. (Costa, 2009)

O filtro sigma adaptativo é uma evolução do filtro sigma aditivo. Sua lógica é semelhante ao primeiro, no entanto, há um parâmetro que é ajustado conforme as variâncias locais. Segundo Costa (2009), tem o seu valor diminuído em regiões homogêneas e tem o seu valor aumentado em arestas.

Mais uma vez há uma evolução com relação ao embaçamento na imagem.

Isso pode ser explicado pela inclusão da filtragem condicional, que fez com que de fato houvesse uma redução da distorção do sinal. Graças a ela, um número menor de *pixels* teve os seus valores substituídos pela média ponderada dos valores dos pixels contidos em suas respectivas janelas. O ponto negativo dessa filtragem condicional é que a redução de ruído ocasionada pelo atual filtro se torna claramente menor do que a do filtro sigma aditivo. Isso leva a crer que, embora o filtro sigma adaptativo seja teoricamente uma evolução do filtro sigma aditivo, em se tratando de redução de ruído em imagens, o atual filtro é menos eficiente do que o seu predecessor. (Costa, 2009)

O último filtro que será apresentado nesse trabalho é o filtro sigma multiplicativo. Ele foi desenvolvido para filtrar imagens que tenham sido corrompidas por ruídos multiplicativos. Ele se assemelha em praticamente tudo ao filtro sigma aditivo. Para um aprofundamento do mesmo, sugere-se a referência de Bovik, 2005.

3 METODOLOGIA

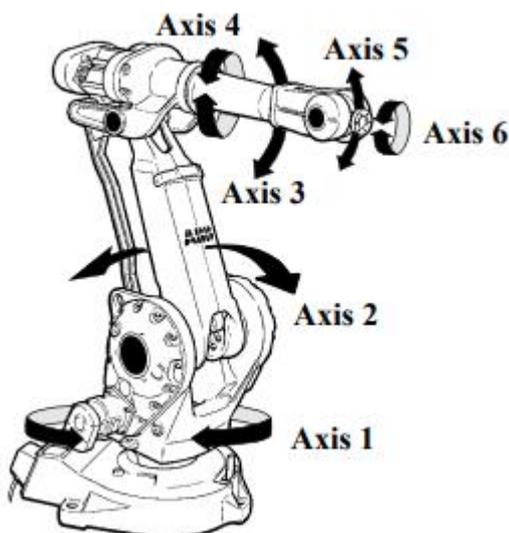
Este capítulo fornece uma descrição dos equipamentos e materiais utilizados nos procedimentos experimentais. A metodologia e as atividades dos processos também são apresentadas aqui.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 ROBÔ DE SOLDAGEM

O robô IRB2000 foi o responsável pela movimentação da tocha de soldagem. Ele possui 6 eixos de movimentação, conforme mostra a Figura 20. Ele tem uma estrutura aberta que é especialmente adaptado para uso flexível, e pode se comunicar com sistemas externos.

Figura 20 – Robô IRB2000 e seus eixos de movimentação.



Fonte: Manual de instruções de uso do IRB 2000

O robô está equipado com um sistema operacional chamado sistema operacional BaseWare. Ele controla todos os aspectos do robô, como controle de movimento e desenvolvimento e execução de comunicação de programas de aplicação.

3.1.2 MESA DE DESLOCAMENTO LINEAR

Trata-se de uma plataforma com deslocamento linear onde se posiciona a peça a ser soldada. A mesa linear é responsável pelo movimento enquanto a tocha de soldagem fica fixa no topo da mesma.

Ela foi desenvolvida no laboratório GRACO e é capaz de suportar até 15 quilogramas (Franco, 2007).

Seu desenvolvedor, Franco (2007), esclareceu alguns aspectos:

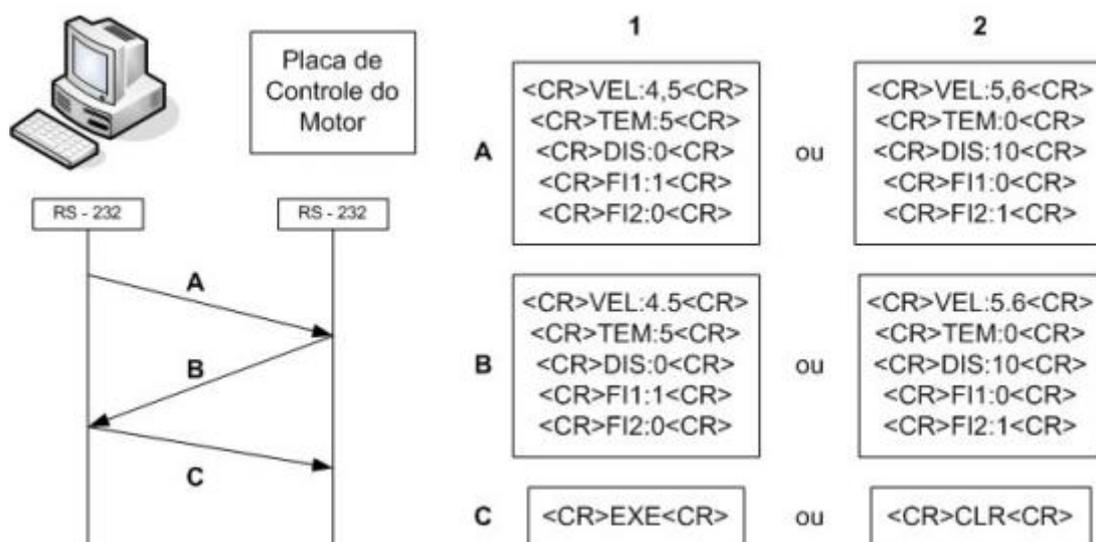
O motor de passo utilizado nessa mesa é do fabricante BERGER LAHR modelo ICIA IDS91 capaz de controlar diretamente por meio de um trem de pulsos podendo ser configurada de 200 pulsos por volta até 10000 com um torque de 2 Nm. O microcontrolador utilizado para controlar o motor de passo é do fabricante MICROCHIP modelo PIC16C63A.

Para controlar o motor, Franco (2007), desenvolveu uma placa de controle. Ela é utilizada em conjunto com um computador pois recebe comandos como sentido, velocidade e tempo de execução ou distância via porta serial a uma taxa de 4800 bps e responde confirmando a recepção desses comandos e aguarda a ordem de execução.

A

Figura 21 é um esboço do protocolo de comunicação entre a placa de controle e o computador simulando dois tipos de comandos diferentes. No comando 1, tem-se uma velocidade de 4,5 mm/s por um tempo de 5 segundos em um determinado sentido. No comando 2, tem-se uma velocidade de 5,6 mm/s que deve ser executada por uma distância de 10 mm no sentido oposto ao do primeiro comando. O computador envia os dados em A, recebe uma confirmação desses dados enviados pelo microcontrolador em B e o computador pode enviar o comando para executar, no caso da figura o (EXE), ou pode enviar o comando para cancelar, no caso da figura o (CLR) (C) (Franco, 2007).

Figura 21 – Exemplo do funcionamento do protocolo de controle do motor de passo.



Fonte: Franco (2007)

3.1.3 SISTEMA DE AQUISIÇÕES DE DADOS

A corrente e a velocidade foram medidas por meio de sensores conectados a um sistema de aquisição, que visualiza estas duas variáveis em função do tempo, ao longo do processo de soldagem.

O software de controle da aquisição 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 (UnB). Esse sistema de aquisição é essencial para o controle da mesa linear que apresenta um movimento em uma dimensão, para o deslocamento da peça a ser soldada (PALACÍOS, 2010).

A Figura 22 apresenta o computador com o LabView em funcionamento. Demonstrando as curvas de controle para o aumento da velocidade e para o aumento da corrente.

Figura 22 – Computador com o LabView em funcionamento.

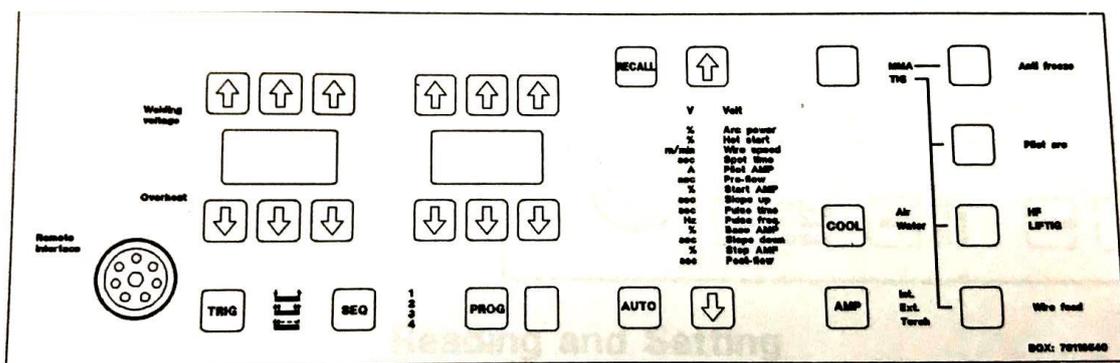


3.1.4 FONTE DE SOLDAGEM

Utilizaram-se duas fontes de soldagem diferentes. A fonte Migatronic BDH 320 e a fonte Fronius TPS-5000.

A fonte Migatronic BDH 320 possui o painel de controle como o demonstrado na Figura 23. Nele é possível definir o valor da corrente e dos parâmetros secundários como tensão, tempo de pulso, entre outros. No caso da soldagem TIG, os valores dos parâmetros secundários permanecem inalterados e a corrente utilizada é constante.

Figura 23 – Painel de controle da fonte Migatronic BDH320



Fonte: Manual de instruções de uso da Migatronic BDH320

A

Tabela 3 possui alguns dados técnicos da fonte Migatronic BDH 320, ela foi retirada do manual da mesma.

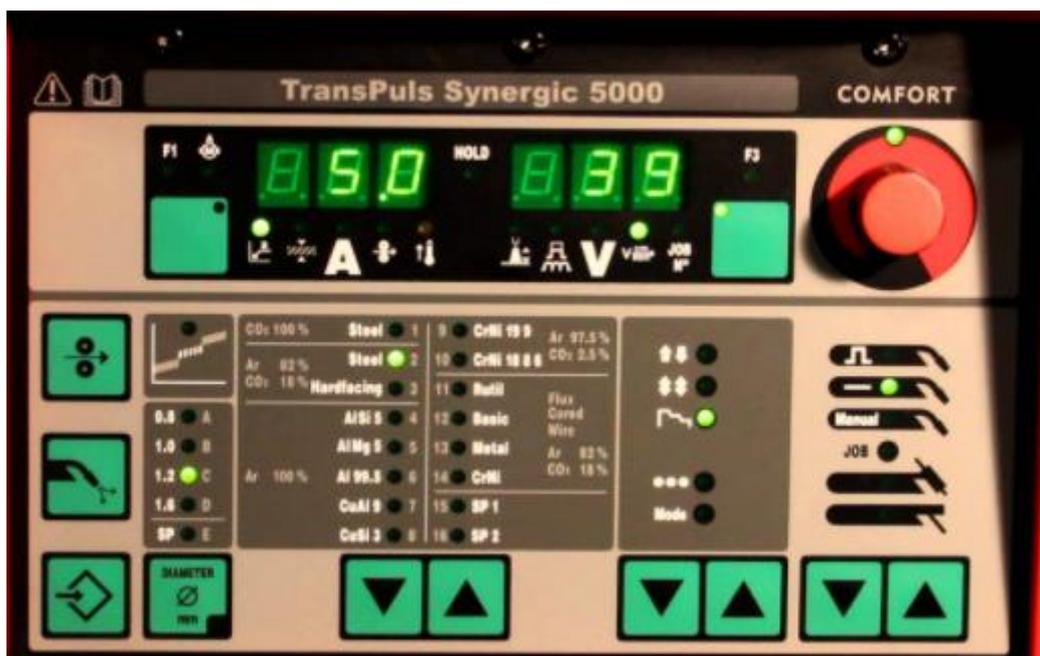
Tabela 3 – Dados técnicos da fonte Migatronik BDH320.

Eficiência	0,85
Carga permitida: - 35% do ciclo de trabalho - 60% do ciclo de trabalho - 100% do ciclo de trabalho	320 A / 32,8 V 260 A / 30,4 V 220 A / 28,8 V
Tensão em circuito aberto MMA, MIG / MAG, TIG	80 V
Intervalo de corrente	5 – 320 A

Fonte: Manual de instruções de uso da Migatronik BDH320

A fonte Fronius TPS-5000, cujo painel se encontra na Figura 24, permite uma programação onde há uma variação linear da corrente de soldagem. Essa variação é feita com auxílio de um software.

Figura 24 – Painel de controle da fonte Fronius TPS-5000



A Tabela 4 possui alguns dados técnicos da fonte Fronius TPS-5000, ela foi retirada do manual da mesma.

Tabela 4 – Dados técnicos da fonte Fronius TPS-5000.

Eficiência	0,9
Carga permitida: - 40% do ciclo de trabalho - 60% do ciclo de trabalho - 100% do ciclo de trabalho	500 A 450 A 360 A

Voltagem de circuito aberto MMA, MIG / MAG, TIG	70 V
Intervalo de corrente	3 – 500 A

Fonte: Manual de instruções de uso da Fronius TPS-5000

3.1.5 CÂMERA DE INFRAVERMELHO

O sistema de monitoramento de infravermelho é composto por uma câmera FLIR A 40M. 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 taxa máxima de amostragem de 60 fps, um campo de visão e distância mínima focal de 24° x 18°/0.3 m, uma sensibilidade espectral na faixa 7.5 e 13 μm no espectro eletromagnético (PALACÍOS, 2010).

Para um melhor funcionamento da câmera, devem-se definir parâmetros como emissividade, distância focal, temperatura atmosférica, umidade do ar, valor do intervalo de temperatura, entre outras. A câmera ThermoVision A40 M é mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Camera ThermoVision A40 M.



A

Tabela 5 possui alguns dados técnicos da câmera ThermoVision A40 M, que foram retirados do manual da mesma.

Tabela 5 – Dados técnicos da camera ThermoVision A40M.

Intervalo espectral	7,5 – 13 μm
Intervalo de temperatura: - padrão	- 40 - + 120 °C

- opção extra - precisão	Acima de + 1500 °C ± 2 °C
Especificações ambientais: - temperatura de operação - umidade do ar	- 15 - + 55 °C 20 – 95 %

Fonte: Manual de instruções de uso da ThermoVision A40 M

3.1.6 MATERIAIS E CONSUMÍVEIS

Os materiais e consumíveis utilizados foram:

- Eletrodo: EWTh, com 2% de Tório em sua composição. Sabe-se que o ângulo de afiação do eletrodo de tungstênio afeta diretamente o formato do arco de soldagem. Para a definição do mesmo, baseou-se em trabalhos anteriores, Schwedersky (2010), e utilizou-se o ângulo de afiação entre 30 graus e 45 graus.
- Material de base: Aço AISI 1020, empregado em formato de chapa plana. Suas dimensões eram 6,35 mm (1/4") de espessura e 300 mm de comprimento e largura. Também havia chapas de dimensões de 6,35 mm de espessura, 50 mm de largura e 200 mm de comprimento. Todas as chapas foram previamente limpas e esmerilhadas. Com isso, garantiu-se a uniformidade da solda.
- Gás de proteção: Argônio.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O projeto aqui apresentado foi dividido em três etapas.

Na primeira, a caracterização do *humping* utilizando termografia por infravermelho realizou-se a partir de uma série de experimentos, que inicialmente tiveram como finalidade a definição dos limites inferiores de velocidade e corrente de soldagem para o sistema TIG a ser utilizado. Sempre objetivando que haja a formação do *humping*.

Para isso, foram produzidos cordões de soldas com diversas combinações de velocidade e de corrente. Os ajustes foram feitos utilizando velocidades entre 8 mm/s até 12 mm/s. Essas velocidades foram selecionadas após o estudo de trabalhos anteriores (Schwedersky, et al, 2011; Palacios, 2010). A corrente variou

de 170 A até 300 A. Essa limitação de corrente ocorrera devido à restrição da fonte de soldagem cujo limite superior é igual a 320 A.

Após esses experimentos, foi possível definir a velocidade e a corrente mínima com as quais o *humping* começava a acontecer. Uma vez identificada a zona onde ocorre o *humping*, passou-se à realização de soldas apenas com aqueles parâmetros. Caracterizando, então, a segunda etapa.

Na terceira etapa, de posse dos dados obtidos e analisados da segunda, voltou-se a realizar cordões de solda com diferentes velocidades e correntes. Aqui, o objetivo foi validar o parâmetro encontrado na etapa anterior.

Além dos padrões definidos no procedimento precedente, na realização dos ensaios foi necessário definir previamente alguns parâmetros do processo TIG, tais como o diâmetro, o ângulo da ponta e o tipo de eletrodo, a pressão e o tipo de gás e a distância entre a ponta do eletrodo e a chapa a ser soldada (gap).

Os principais parâmetros de soldagem descritos a seguir na Tabela 6 foram definidos com base em estudos anteriormente realizados (Palacíos, 2010) e testados experimentalmente, com a finalidade de se encontrarem os melhores valores para a produção de um cordão contínuo de alta produtividade.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 1

PARÂMETROS FIXOS	
Material	Aço 1020
Geometria do corpo de prova	Placa de 6,35 mm (1/4") de espessura com dimensões de 300 x 300 mm
Tipo de gás	100% Argônio
Vazão de gás	13 l/min
Eletrodo	Negativo EWTh-2; 1/8"
Taxa de aquisição da câmera (<i>frames</i> por segundo -fps)	60 fps
Distância eletrodo-chapa (gap)	3 mm
Tensão de Soldagem (V)	17,1 V
Velocidade de Soldagem (v)	8,0 a 12 mm/s
Corrente de Soldagem (A)	170 a 300 A

Na segunda etapa, de posse dos valores obtidos na primeira, novamente com a técnica de termografia por infravermelho, realizou-se uma série de experimentos com a velocidade constante e a corrente de soldagem do sistema TIG constante. O objetivo foi criar vários cordões que façam a transição do *humping*, de modo a possibilitar a coleta das imagens termográficas da região da poça durante a execução do processo e, posteriormente, realizar sua análise, com a finalidade de identificação de possíveis características indicativas da transição entre formação estável do cordão e instabilidade caracterizada pelo *humping*. A partir das observações, definiu-se o parâmetro indicativo da iminência do defeito.

Os parâmetros de soldagem dessa etapa, que se diferem da primeira, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 2

PARÂMETROS FIXOS	
Velocidade de Soldagem (v)	9 mm/s
Corrente de Soldagem (A)	190 A

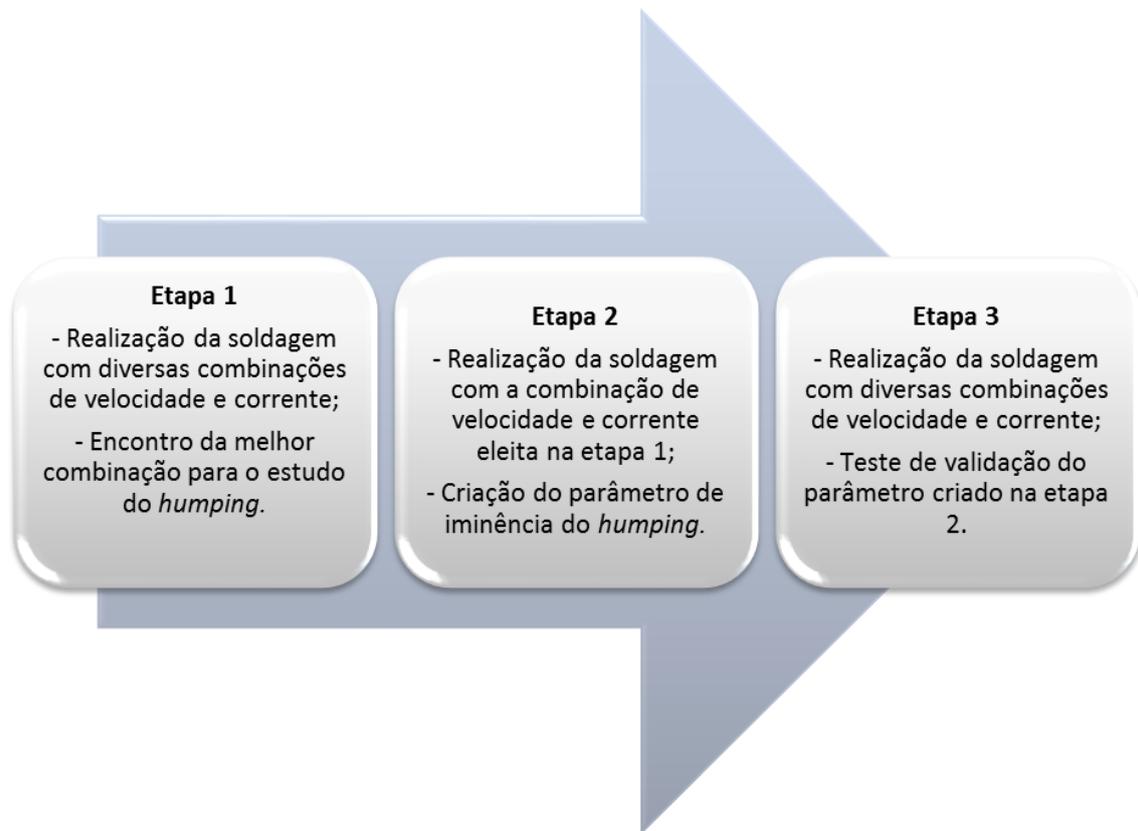
Na terceira e última etapa, realizaram-se cordões de soldam que variavam simultaneamente sua velocidade e sua corrente. Os parâmetros de soldagem dessa etapa, que se diferem das anteriores, encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG na Etapa 3

PARÂMETROS FIXOS	
Geometria do corpo de prova	Placa de 6,35 mm (1/4") de espessura com dimensões de 300 x 20 mm
PARÂMETROS VARIÁVEIS	
Velocidade de Soldagem (v)	De 4 a 16,3 mm/s com aceleração de 0, 5 mm/s ²
Corrente de Soldagem (A)	De 40 a 286 A com aceleração de 10 A/s ²

A Figura 26 é uma simplificação das etapas que foram realizadas ao longo do presente estudo.

Figura 26 – Esquema simplificado do seguimento das etapas experimentais.



3.2.1 ETAPA I

Na primeira etapa produziram-se vários cordões de solda com velocidades variando de 8 mm/s até 12 mm/s. Nessa fase do experimento também foram feitas diversas combinações de correntes, variando de 170 A até 300 A. O experimento foi feito em uma parte da bancada, cujo corpo de prova ficava fixado entre colunas de uma grade. Com uma dissipação de calor maior, obteve-se o efeito *humping*. A Tabela 9 demonstra algumas das combinações de velocidade e corrente que foram feitas nessa situação.

Tabela 9 – Combinações de velocidades e correntes

Velocidade	Corrente	Resultado obtido
8 mm/s	170 A	Cordão com pouco ou nenhum <i>humping</i>
8 mm/s	190 A	Cordão com pouco ou nenhum <i>humping</i>
8 mm/s	200 A	Cordão com pouco ou nenhum <i>humping</i>
9 mm/s	170 A	Cordão com pouca profundidade
9 mm/s	190 A	Cordão com início sem defeito e <i>humping</i> no decorrer
9 mm/s	200 A	Cordão com início sem defeito e <i>humping</i> no

		decorrer
10 mm/s	170 A	Cordão com pouca profundidade
10 mm/s	190 A	Cordão com início sem defeito e <i>humping</i> no decorrer
10 mm/s	200 A	Cordão com <i>humping</i> desde o início
11 mm/s	170 A	Cordão com pouca profundidade
11 mm/s	200 A	Cordão com <i>humping</i> desde o início
12 mm/s	170 A	Cordão com pouca profundidade
12 mm/s	200 A	Cordão com <i>humping</i> desde o início

Percebeu-se que em velocidades mais baixas, como 8 mm/s, mesmo com correntes mais elevadas, como 200 A, não se encontrava o defeito estudado no presente trabalho. Diversamente, identificou-se que em velocidades demasiadamente elevadas o defeito já ocorria desde o início e não era possível estudar a transição entre o cordão de solda sem defeito e a iminência do *humping*.

Após diversas combinações, chegou-se àquela considerada ideal. A Tabela 9 mostra algumas que tiveram o início sem defeito e o *humping* no decorrer do cordão. A combinação escolhida foi a que melhor proporcionava o estudo da iminência do defeito *humping*. Velocidade igual a 9 mm/s e corrente igual a 190 A. Configurados esses dados, foi possível partir para a etapa seguinte.

3.2.2 ETAPA II

Na segunda etapa, realizaram-se vários cordões de solda com velocidade de 9 mm/s e corrente de 190A. A

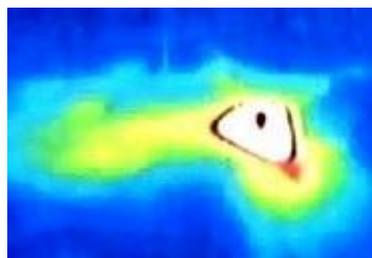
Figura 27 mostra alguns dos cordões realizados.

Figura 27 – Imagem de alguns cordões de solda realizados com a combinação de velocidade de 9 mm/s e corrente de 190 A.



Durante o procedimento de soldagem, realizava-se a filmagem com a câmera termográfica, obtendo imagens com gradientes de cores diferentes para temperaturas diferentes. A Figura 28 é um exemplo de imagem termográfica de soldagem.

Figura 28 – Imagem termográfica de uma soldagem TIG.



De posse das imagens termográficas e com o auxílio do trabalho de Mestrado da Palacios (2010), definiram-se que imagens com uma zona isoterma eram correspondentes a iminência de *humping* e que imagens com duas ou mais zonas isotermas eram correspondentes à ocorrência do defeito. Com essa informação, é possível separar as imagens como iminência do defeito ou como o defeito propriamente dito.

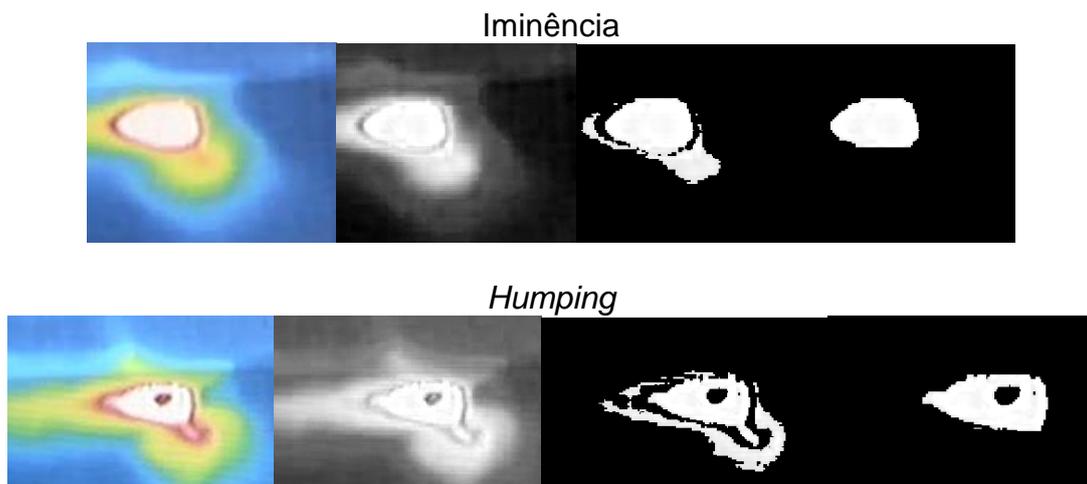
Logo após a separação, utilizando o software Matlab, realizou-se o processamento de imagens de forma a torná-las binárias. Para isso é preciso

transformar a imagem colorida para uma imagem de tons de cinzas, para só depois transformá-la em preta e branca, a chamada imagem binária.

Outro pormenor importante de ressaltar é a observação da existência de um reflexo na imagem. Portanto, tratou-se a imagem para retirar esse reflexo e não deixar que o mesmo influenciasse erroneamente o cálculo dos parâmetros.

Já com a imagem preta e branca, foram feitas medições dos comprimentos dos diâmetros longitudinal (aqui tratada como “diagonal”) e transversal (aqui tratada como “altura”) da geometria observada para a isoterma selecionada da poça de fusão. A Figura 29 mostra a transição entre a imagem original e a imagem totalmente corrigida, pronta para a realização da medição. Com esses dados consolidados, criaram-se os parâmetros de iminência e de *humping*.

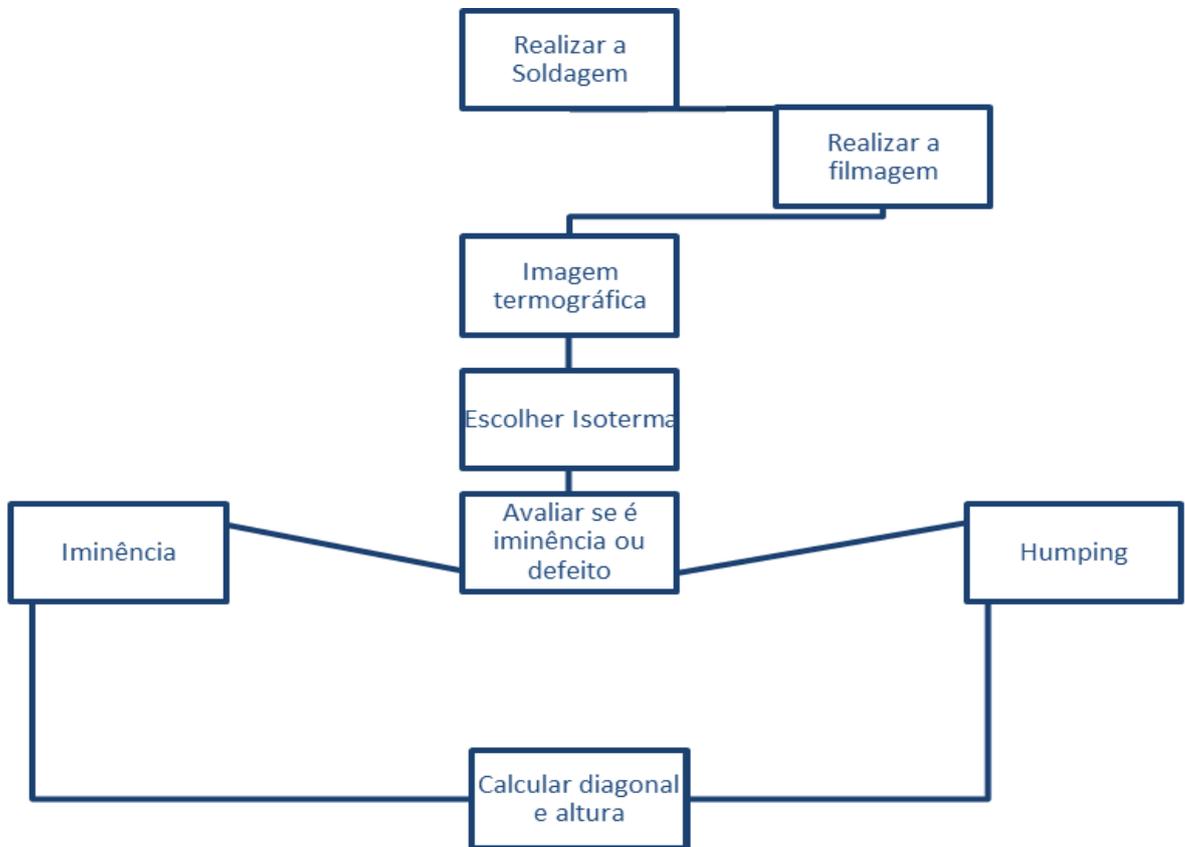
Figura 29 – Processamento das imagens obtidas até chegar às imagens binárias para os cálculos do parâmetro.



Dessa forma, fica evidente a existência de um padrão de procedimento a ser realizado, sendo possível o desenvolvimento de um passo-a-passo. A

Figura 30 mostra o fluxograma desse procedimento.

Figura 30 – Fluxograma do desenvolvimento do parâmetro da iminência e do *humping*.

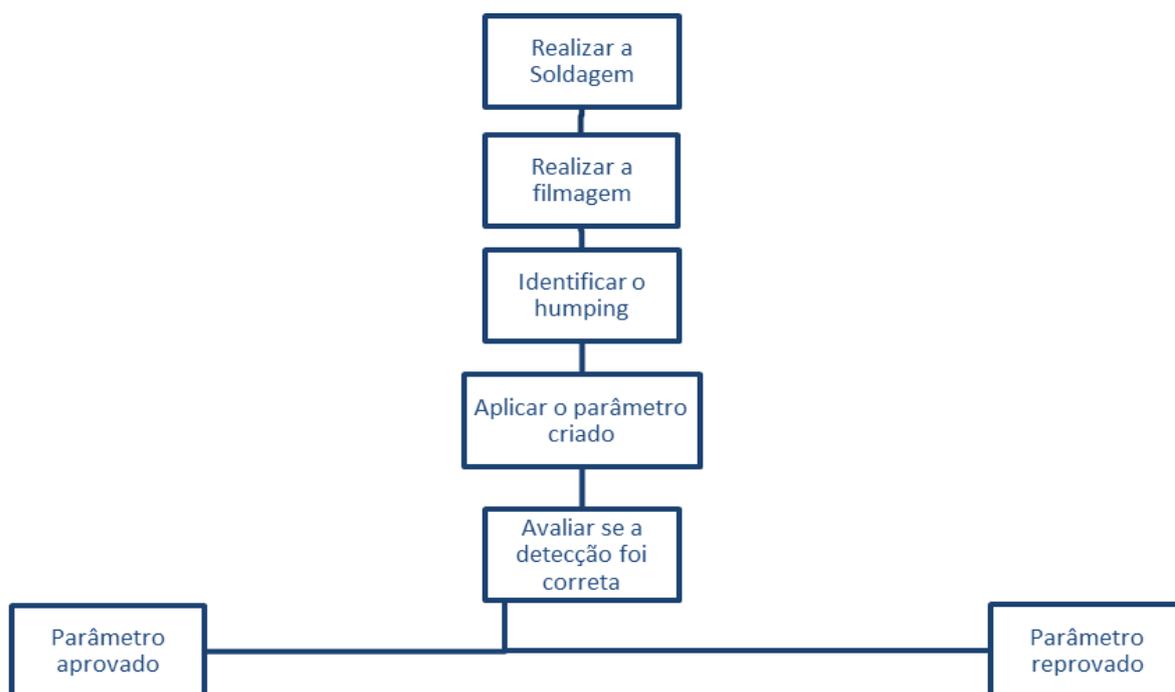


3.2.3 ETAPA III

Após o desenvolvimento dos parâmetros de iminência e de *humping*, realizou-se a terceira e última etapa. Foram produzidos cordões de solda, variando a velocidade e a corrente. O objetivo era validar o indicador de tendência ao *humping*. Para isso, novamente, utilizou-se o software Matlab para processamento das imagens obtidas.

A lógica utilizada foi semelhante à da segunda etapa, no entanto, nesse caso, fez-se uma inversão do procedimento. Primeiramente, encontraram-se as zonas com *humping* para posteriormente, verificar na imagem tratada, com o parâmetro definido, se era possível detectar a iminência do mesmo. Caso positivo, o parâmetro desenvolvido seria aprovado, caso negativo, o parâmetro desenvolvido seria escoimado. A Figura 31 mostra o fluxograma utilizado para essa fase.

Figura 31 – Fluxograma da validação do parâmetro desenvolvido.



Conclui-se, portanto, todas as etapas propostas no presente trabalho. O próximo capítulo visa mostrar os cálculos realizados e as correções que foram necessárias para a obtenção dos parâmetros e da validação.

4 RESULTADOS

O presente capítulo visa apresentar as imagens obtidas ao longo dos estudos e suas análises matemáticas. Para isso, será feita uma breve contextualização da visão geral e, logo após, o detalhamento matemático do desenvolvimento do parâmetro de iminência de *humping* e da sua validação.

4.1 VISÃO GERAL

O processo proposto é composto da realização de soldagens com iminência de *humping* e *humping* propriamente dito e de análises das imagens termográficas obtidas ao longo do experimento. As atividades do processo do desenvolvimento do parâmetro de iminência do *humping* são organizadas em quatro etapas, quais sejam: (i) Realização da solda; (ii) Obtenção das imagens termográficas; (iii) Tratamento das imagens termográficas; e (iv) Cálculo do parâmetro. Já para o processo de validação do parâmetro são cinco etapas: (i) Realização da solda; (ii) Obtenção das imagens termográficas; (iii) Seleção do momento a ser avaliado na imagem; (iv) Tratamento da imagem termográfica; e (v) Aplicação e validação do parâmetro anteriormente desenvolvido. A Figura 32 e a Figura 33 ilustram, respectivamente, o processo de desenvolvimento do parâmetro e de validação do parâmetro.

Figura 32 – Fluxo principal do processo de desenvolvimento do parâmetro.

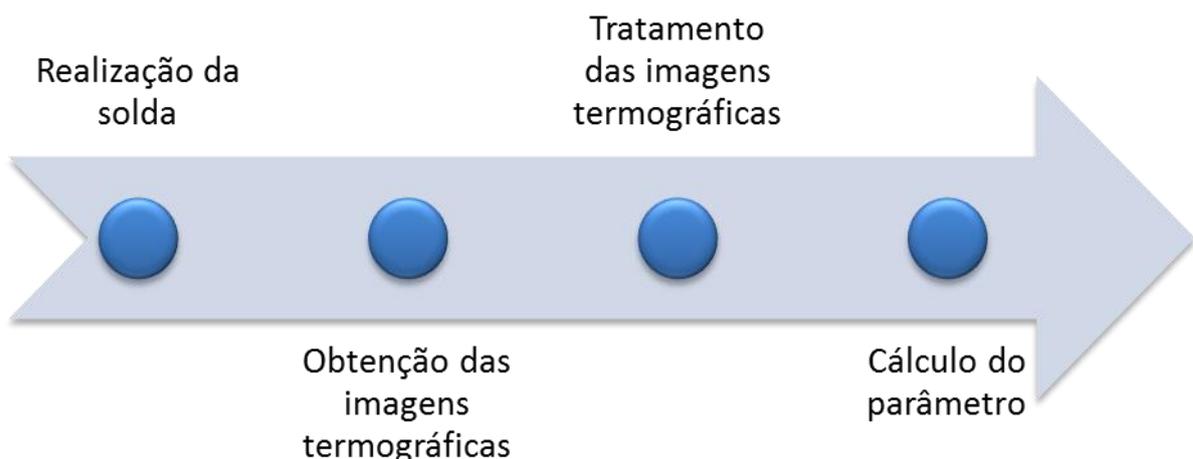


Figura 33 – Fluxo principal do processo de validação do parâmetro.



4.2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO PARÂMETRO

O presente capítulo passa por cada atividade necessária para o desenvolvimento do parâmetro de iminência do *humping*. O objetivo é explicar as considerações que foram feitas e analisar os resultados obtidos.

4.2.1 ATIVIDADE I – REALIZAÇÃO DA SOLDA

A combinação selecionada no primeiro procedimento experimental foi a que possuía velocidade igual a 9 mm/s e corrente igual 190 A.

Para verificar quão precisa estava a saída da velocidade do robô para a tocha de soldagem, foram tomadas 30 amostras de tempo, em segundos, para uma distância igual a 75 milímetros, obtendo-se como resultados os valores presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados, em segundos, obtidos para as medições de tempo percorrido pela tocha em 75 milímetros

8,62	8,62	8,65	8,35	8,66	8,55
8,64	8,72	8,71	8,33	8,66	8,50
8,65	8,73	8,48	8,61	8,76	8,59
8,57	8,59	8,66	8,67	8,68	8,57
8,66	8,57	8,60	8,70	8,64	8,43

De posse dos resultados da Tabela 10, desenvolveu-se a velocidade média de cada amostra colhida. Obtendo-se os resultados consignados na Tabela 11.

Nela, cada célula representa a velocidade média relacionada ao tempo introduzido naquela célula na Tabela 10.

Tabela 11 – Resultados, em milímetros/segundos, obtidos para os cálculos de velocidade das medidas da Tabela 10

8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	9,0 $\varepsilon = 0,3$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,8 $\varepsilon = 0,1$
8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,6 $\varepsilon = -0,1$	8,6 $\varepsilon = -0,1$	9,0 $\varepsilon = 0,3$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,8 $\varepsilon = 0,1$
8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,8 $\varepsilon = 0,1$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,6 $\varepsilon = -0,1$	8,7 $\varepsilon = 0,0$
8,8 $\varepsilon = 0,1$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,6 $\varepsilon = -0,1$	8,8 $\varepsilon = 0,1$
8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,8 $\varepsilon = 0,1$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,6 $\varepsilon = -0,1$	8,7 $\varepsilon = 0,0$	8,9 $\varepsilon = 0,2$

Ficando evidente que estava ocorrendo um desbalanceamento entre a velocidade de entrada, posta no robô, e a velocidade de saída, executada pela tocha. Para descobrir a velocidade que de fato era produzida pela tocha, tomou-se a média aritmética simples com os valores da Tabela 11, obtendo-se o valor de 8,7 mm/s.

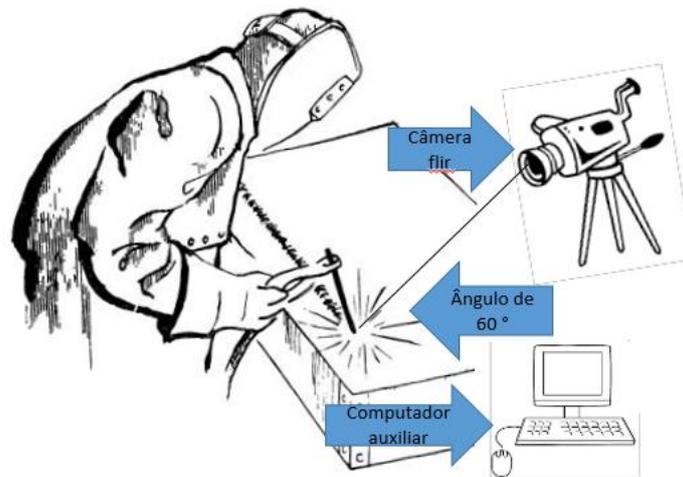
Essa variação nos valores, no entanto, não afetou o resultado adquirido, pois o importante, neste trabalho, é a imagem que foi obtida ao longo da soldagem. Entretanto, sabe-se que a velocidade real de trabalho em vez de ser 9 mm/s foi efetivamente 8,72 mm/s. A definição da velocidade com essa precisão é importante para que outros pesquisadores possam reproduzir novamente o experimento descrito no presente documento.

4.2.2 ATIVIDADE II – OBTENÇÃO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Para a realização da filmagem utilizou-se a câmera termográfica FLIR A 40M. Esta foi empregada com uma captura de 60 imagens por segundo, os chamados 60 fps (*frames per second*). O ângulo entre o visor e o cordão de solda, considerando a mesa como referência, foi de 60°.

A Figura 34 é um esquema simplificado da forma como foram obtidas as imagens termográficas no presente estudo.

Figura 34 – Sistema de captação da imagem infravermelha para monitoramento da poça de fusão.



Para sintetizar a atividade de obtenção das imagens termográficas, pode-se defini-la da seguinte forma: (i) realização da soldagem; (ii) captura da imagem; e (iii) transmissão da imagem para o computador auxiliar.

No entanto, ao longo do experimento, ocorreu um defeito na transmissão da imagem para o computador auxiliar. O mesmo não era capaz de reconhecer as zonas isotérmicas da poça de fusão, limitando-se a 60 graus Celsius. Por consequência, foi necessário conceber o desenvolvimento de uma nova transmissão da imagem.

Detectou-se que o problema na transmissão da imagem para o computador auxiliar estava ocorrendo por uma falha no sistema que se conectava com o computador. Dessa maneira, buscou-se, na própria câmera, outro método de conexão. Optando-se, então, pela conexão direta com o monitor, sem passar pelo computador.

Essa nova metodologia exterminou o erro que estava ocorrendo na transmissão de imagem. No entanto, o monitor não possuía uma forma de guardar o vídeo que era produzido ao longo da soldagem. Para solucionar isso, passou-se a filmar a imagem que era projetada no monitor. A proposta de correção solucionou o erro de transmissão de imagem, mas gerou um erro de ruído na imagem.

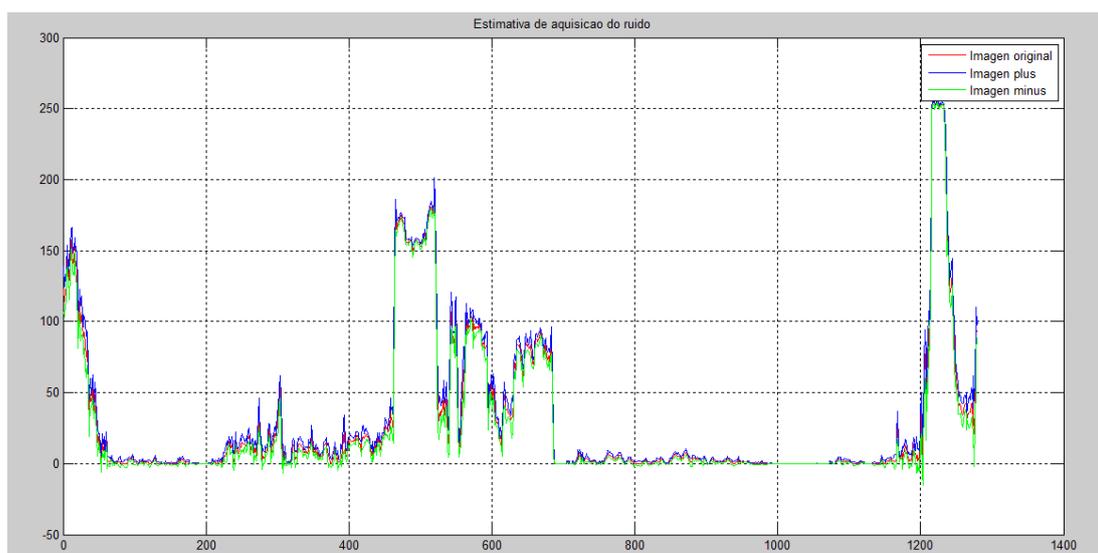
4.2.3 ATIVIDADE III – TRATAMENTO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

É preciso tratar as imagens termográficas para que essas não causem erro nos cálculos dos parâmetros. Para isso, foram se encontrando soluções, à medida em que os problemas iam ocorrendo. Estes são descritos em seguida, bem como as necessidades que os geraram.

Primeiramente, ocorreu um problema na transmissão de imagem para o computador que acabou gerando um ruído. Para esse problema escolheu-se tratar a imagem com o filtro mediana. Este filtro foi escolhido porque era preciso suavizar a borda das imagens. Sua implementação foi no software Matlab. Para isso, foram produzidos dois programas, um para estimar o ruído do sistema de aquisição de imagens e outro para aplicar o filtro previamente clarificado.

Primeiramente estimou-se o ruído do sistema de aquisição de imagens usando o algoritmo `estNoise`, função já existente no software Matlab. Seu funcionamento baseia-se em capturar diversas imagens da mesma cena em um ambiente sem variações de iluminação. Seus parâmetros de entrada são a imagem ruidosa, a altura da imagem e a largura da imagem. Com ele, colhe-se o valor do ruído médio e o valor do ruído máximo. A Figura 35 demonstra um gráfico de aquisição de ruídos.

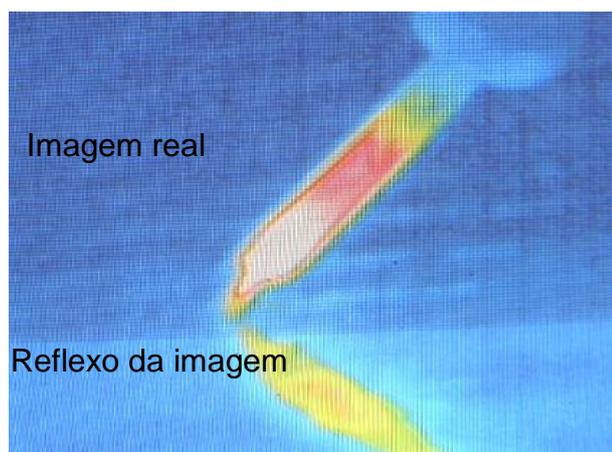
Figura 35 – Gráfico de aquisição de ruídos. Onde o eixo y refere-se à amplitude do ruído e o eixo x à dimensão.



Logo após, aplicou-se o filtro mediana, ainda com auxílio do software Matlab.

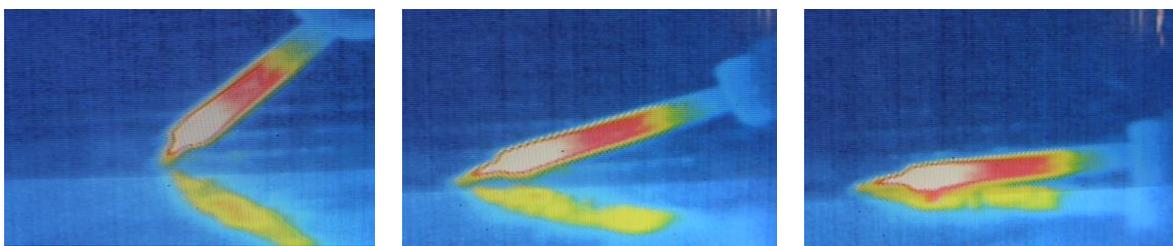
Outra falha detectada na imagem foi a existência de um reflexo referente à tocha no corpo de prova. Para eliminá-lo, fez-se um estudo mostrando o que era reflexo e o que era imagem real. A Figura 36 exemplifica claramente o defeito encontrado, por meio da filmagem de um ferro de soldagem de circuitos eletrônicos.

Figura 36 – Imagem termográfica com a imagem real e seu reflexo.



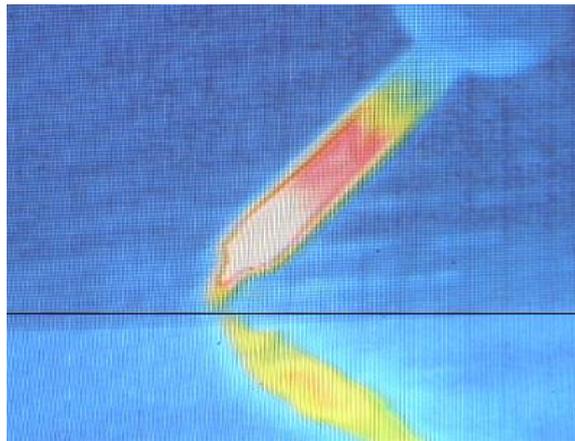
Passou-se para a correção com auxílio do computador. Foram feitos diversos testes com um ferro de solda. Os testes consistiam em posicionar o mesmo com ângulos diferentes, em relação ao corpo de prova e capturar a imagem termográfica que estes geravam. O objetivo era definir claramente o que era imagem real e o que era apenas o reflexo da imagem. A Figura 37 mostra algumas das combinações que foram feitas.

Figura 37 – Combinações de ângulos, feitas para a detecção da imagem real e do seu reflexo.



Dessa forma, foi possível traçar um eixo, onde a partir do mesmo, se desconsiderava a imagem que estava sendo obtida. A Figura 38 demonstra esse eixo.

Figura 38 – Eixo a partir do qual se ignora a imagem obtida.

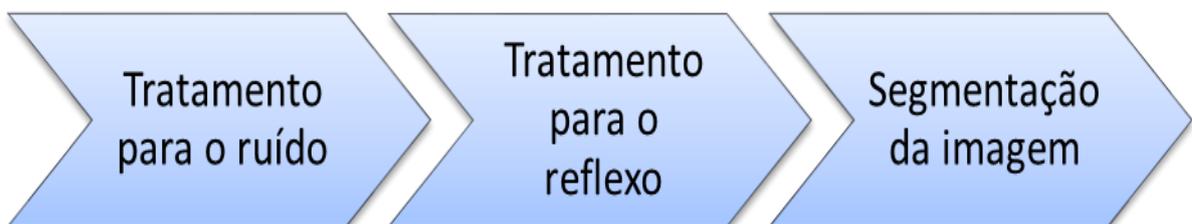


Uma vez que esse eixo foi claramente definido, é possível avançar para o tratamento de imagem, tomando-se a imagem obtida pela câmera, transformando-a para binária.

O código para realizar a segmentação consistia em transformar a imagem em tons de cinza. Logo após, define-se que *pixels* com valores maiores que 200 devem ser convertidos para pixels saturados, isto é 256. Também é definido que *pixels* com valores menores que 0,9 devem ser convertidos para 0. Esse processo gera uma imagem com apenas as cores preta e branca.

A Figura 39 é a representação do ciclo de cada tratamento que uma imagem precisava receber.

Figura 39 – Ciclo de tratamentos que cada imagem irá receber.

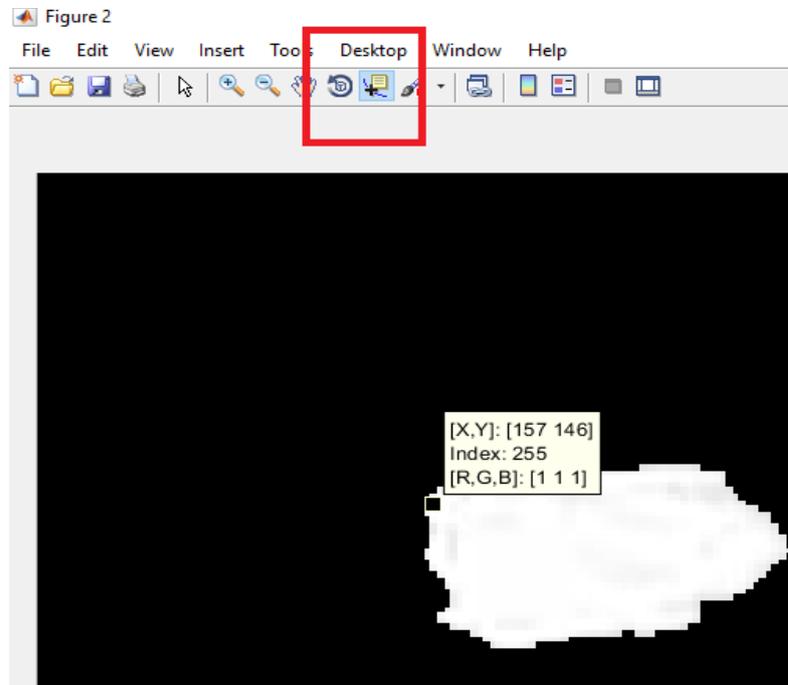


4.2.4 ATIVIDADE IV – CÁLCULO DO PARÂMETRO

De posse das imagens tratadas, coletou-se, novamente com auxílio do Matlab, a distância entre o primeiro pixel saturado a esquerda e acima até o último pixel saturado a direita e abaixo, essa distância foi chamada de diagonal. Também se coletou a distância entre o meio da diagonal até o primeiro pixel saturado acima, onde o valor do eixo x não variava, medindo apenas a variação

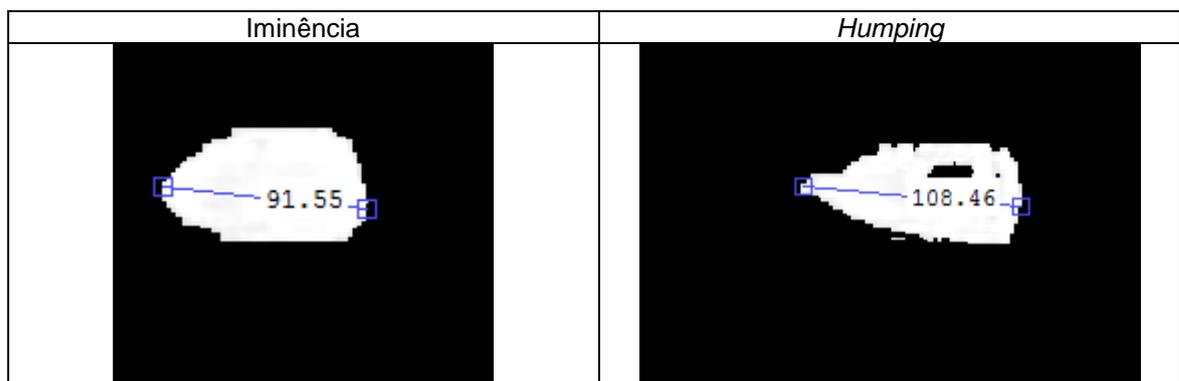
no eixo y, essa medida foi chamada de altura. A Figura 40 demonstra onde esses valores eram coletados no programa.

Figura 40 – Layout do Software Matlab para a coleta dos valores da diagonal e da altura.



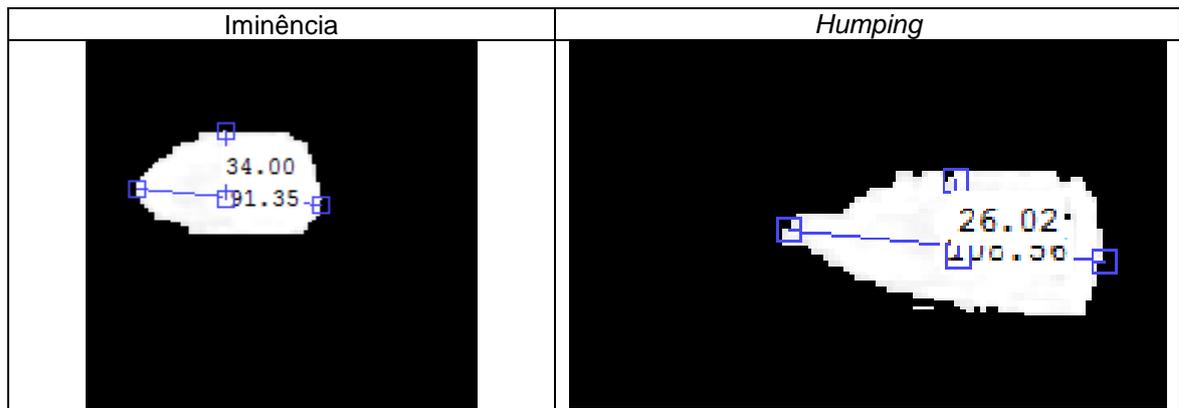
O próprio software indica as coordenadas X,Y e faz o cálculo referente ao valor da diagonal. A Figura 41 demonstra dois cálculos realizados, um para a iminência do *humping* e o outro quando o mesmo já ocorreu.

Figura 41 – Medidas das diagonais para a imagem com a iminência do *humping* e para a imagem com o defeito *humping*.



Só depois de traçar a diagonal é que é possível calcular a altura. A Figura 42 demonstra as medidas obtidas para uma imagem na iminência do defeito e para uma imagem com o defeito já configurado.

Figura 42 – Medidas das alturas para a imagem com a iminência do *humping* e para a imagem com o defeito *humping*.



Após a obtenção das imagens termográficas, foram feitas as análises do tamanho da diagonal e altura da poça. A Figura 43 e a Figura 44 demonstram os valores obtidos para os cordões que estavam na iminência do *humping* e para os cordões que estavam com o defeito *humping*, respectivamente. As imagens originais encontram-se no Anexo I, onde a Figura 53 é referente à Figura 43 e a Figura 54 é referente à Figura 44.

Figura 43 – Valores das diagonais e alturas obtidos para os cordões de solda na iminência do *humping*.

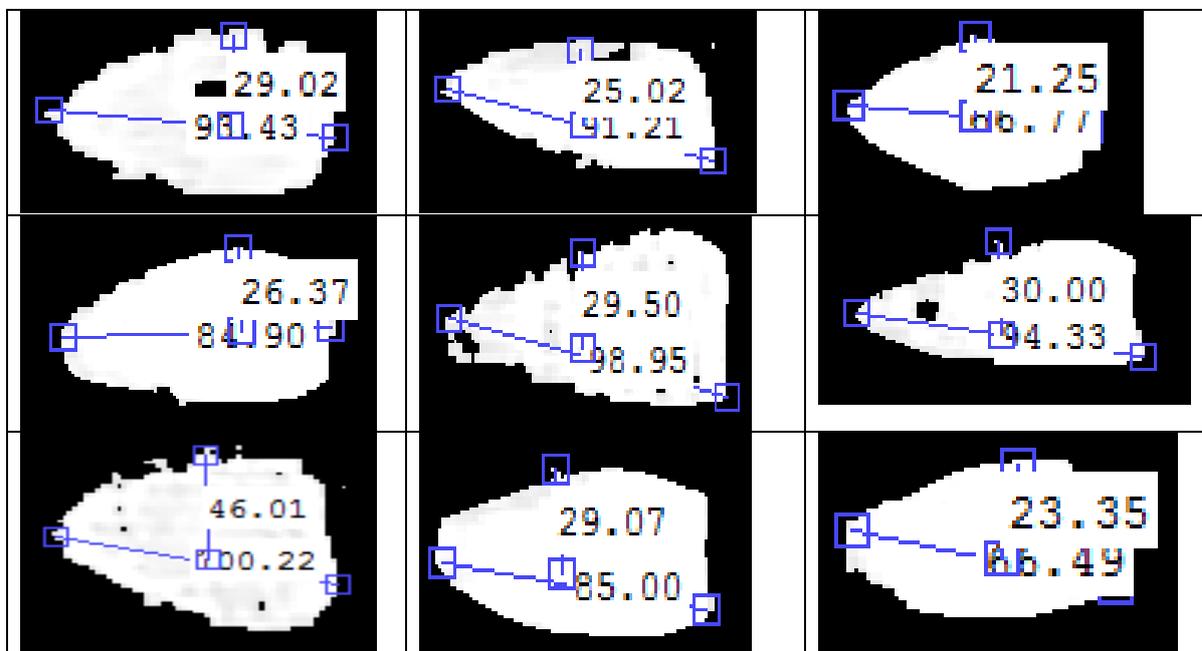
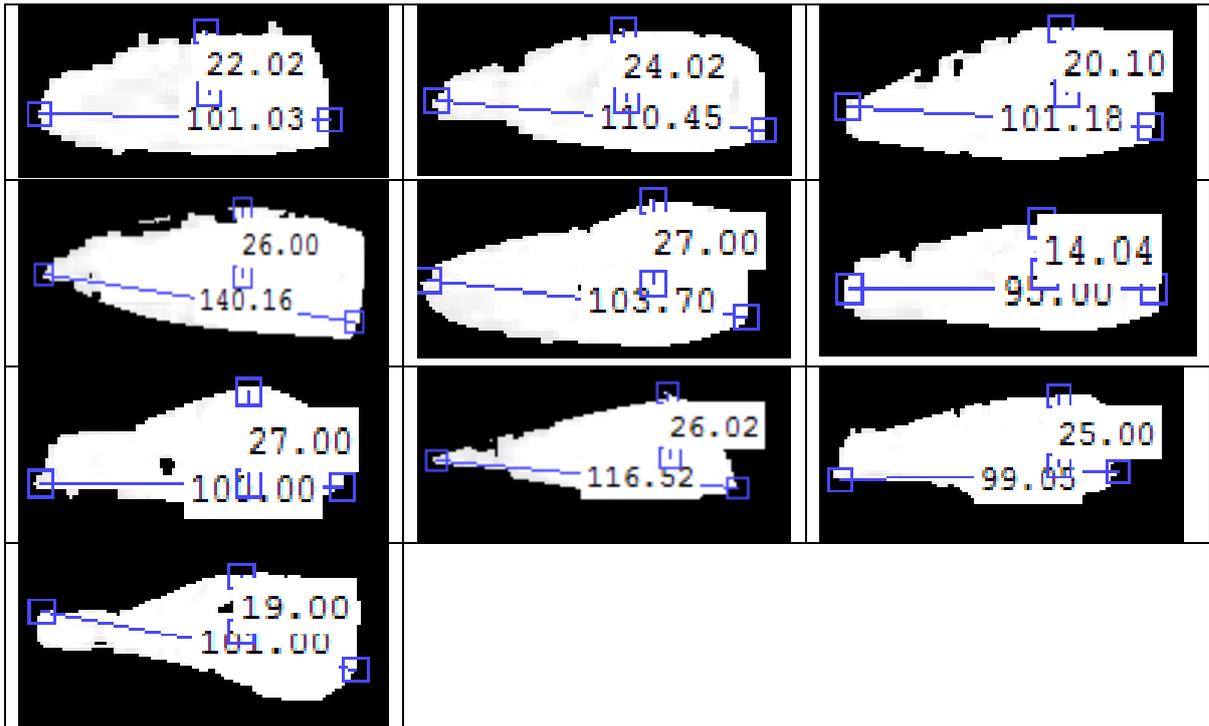




Figura 44 – Valores das diagonais e alturas obtidos para os cordões de solda com o defeito humping.



Para desenvolver o parâmetro entre a iminência e o *humping*, tomou-se a razão entre a diagonal e a altura. Foram obtidas e tratadas 20 imagens, sendo dez tomadas para a iminência e mais dez imagens para o *humping*. A Tabela 12 mostra os valores obtidos.

Tabela 12 – Valores das diagonais e das alturas, obtidos nas imagens tratadas

Iminência		<i>Humping</i>	
Diagonal	Altura	Diagonal	Altura
93,43	29,02	101,03	22,02
91,21	25,02	110,45	24,02
66,77	21,25	101,18	20,10
84,90	26,37	95,00	14,04
98,95	29,50	140,16	26,00
94,33	31,75	103,70	27,00
100,22	46,01	101,00	27,00
85,00	29,07	116,52	26,02

66,49	23,35	99,05	25,00
116,32	39,50	101,00	19,00

Após a coleta dos dados das diagonais e das alturas calculou-se a razão entre eles. A equação (11) mostra a relação utilizada.

$$R = \frac{\textit{diagonal}}{\textit{altura}} \quad (11)$$

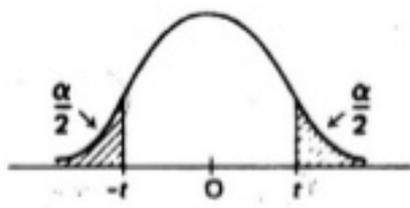
Encontram-se na Tabela 13 todos os resultados obtidos com a equação (11).

Tabela 13 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas

Iminência		<i>Humping</i>	
Medições	Erro aleatório	Medições	Erro aleatório
3,22	0,18	4,59	-0,19
3,65	0,61	4,59	-0,19
3,14	0,10	5,03	0,25
3,22	0,18	6,77	1,99
3,35	0,31	5,39	0,61
2,97	-0,07	3,84	-0,94
2,18	-0,86	3,84	-0,94
2,92	-0,12	4,48	-0,30
2,85	-0,19	3,96	-0,82
2,94	-0,10	5,32	0,54

Com os cálculos das razões, partiu-se para o cálculo da distribuição de probabilidade t-Student. Ela foi útil para definir o intervalo de valor seguro da razão que garante a iminência do *humping*. A Figura 45 mostra como é o gráfico da distribuição t de Student.

Figura 45 – Gráfico da distribuição t-Student.



Onde α é o valor de significância.

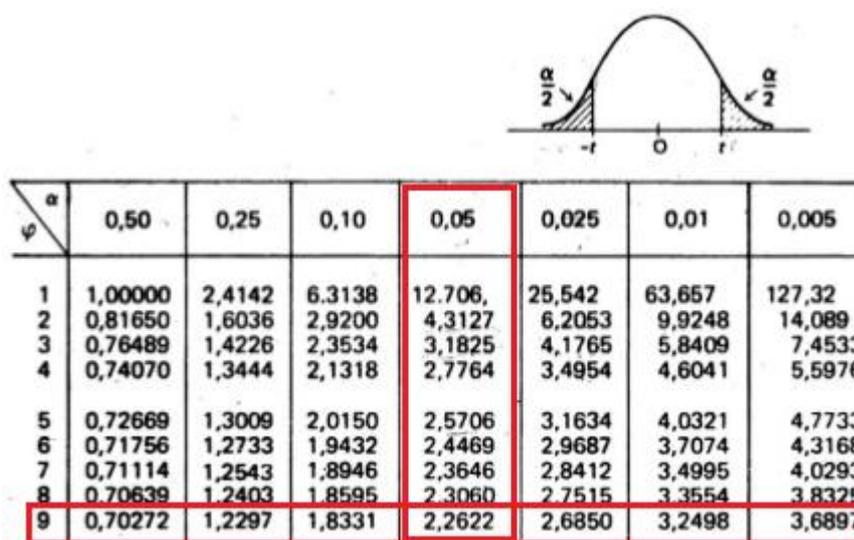
Para obter o valor t, presente no gráfico, procura-se na tabela t-Student o valor de α e o valor de grau de liberdade. No caso do presente cálculo, o valor do grau de liberdade foi 9, o número de determinações independentes (dimensão da amostra) menos o número de parâmetros estatísticos a serem avaliados na população, como mostra a equação (12).

$$GL = 10 - 1 = 9 \quad (12)$$

Para um grau de confiança de 95%, tem-se $\alpha = 0,05$.

De posse dos dois valores, é possível entrar na tabela t-Student e encontrar o valor t. A Figura 46 demonstra como o mesmo foi obtido.

Figura 46 – Obtenção do valor t na tabela t-Student.



Fonte: Fonseca e Martins, 2010

Com o valor t encontrado, pode-se calcular o intervalo de confiança. A equação (13) mostra como se calcula o intervalo da razão para um grau de confiança de 95%.

$$\text{Intervalo de confiança} = \mu \pm t \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

Onde μ é a média da população, σ_x é o desvio padrão da população, n, o número de elementos da amostra e t é o valor retirado da tabela.

Primeiramente, serão feitos todos os cálculos referentes à iminência do *humping*.

Com auxílio do software Excel, fez-se a análise de dados e obteve-se a estatística descritiva dos mesmos. A Tabela 14 mostra os valores obtidos.

Tabela 14 – Estatística descritiva obtida com o software Excel

Média	3,044
Desvio padrão	0,386988
Variância da amostra	0,14976
Contagem	10

Com os valores obtidos, desenvolveram-se as equações (14), (15) e (16)

$$\text{Intervalo de confiança} = 3,044 \pm 2,2622 \frac{0,386988}{\sqrt{10}} \quad (14)$$

$$\text{Intervalo de confiança} = 3,0 \pm 0,3 \quad (15)$$

$$\text{Intervalo de confiança} = [2,7 , 3,3] \quad (16)$$

O intervalo de confiança para a razão da iminência do *humping* ficou definido, então, como entre 2,7 a 3,3.

O desenvolvimento do intervalo de confiança do cordão com o defeito *humping* foi semelhante ao desenvolvimento da iminência do *humping*. A Tabela 15 mostra os valores obtidos com auxílio do software Excel.

Tabela 15 – Estatística descritiva obtida com o software Excel

Média	4,781
Desvio padrão	0,899882
Variância da amostra	0,809788
Contagem	10

Com os valores obtidos, desenvolveram-se as equações (17), (18) e (19).

$$\text{Intervalo de confiança} = 4,78 \mp 2,2622 \frac{0,899882}{\sqrt{10}} \quad (17)$$

$$\text{Intervalo de confiança} = 4,8 \pm 0,6 \quad (18)$$

Intervalo de confiança = [4,2 , 5,4]

(19)

O intervalo de confiança para a razão do defeito *humping* ficou definido, então, como entre 4,2 a 5,4.

Após a realização dos cálculos de intervalo de confiança para a iminência do *humping* e para o defeito *humping*, pode-se definir o parâmetro no qual uma imagem deve ficar para se encontrar a iminência e o mesmo. Atingindo-se por consequência um dos objetivos do presente trabalho.

4.3 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO PARÂMETRO

O presente item passa por cada atividade necessária para a validação do parâmetro de iminência do *humping* desenvolvido no processo I. O objetivo é explicar as considerações que foram feitas e analisar os resultados obtidos.

4.3.1 ATIVIDADE I – REALIZAÇÃO DA SOLDA

Nessa atividade, a corrente e a velocidade variaram do começo ao final do cordão de solda. Essa variação foi feita com auxílio da mesa linear. Ela apresenta um movimento unidimensional. Isso aumenta a precisão dos resultados, uma vez que a aquisição das imagens infravermelhas será realizada em um ponto fixo.

A velocidade e a corrente foram medidas por meio de um sistema de aquisição que monitora estas duas variáveis em função do tempo, ao longo do processo de soldagem. Portanto, os valores que são apresentados aqui são referentes aos valores obtidos do programa.

Foram realizados três cordões de solda. Todos eles com a mesma combinação. Velocidade inicial de 4 mm/s e aceleração de 0,5 mm/s². Corrente inicial de 40 A e taxa de variação de 10 A/s.

Nessa etapa, não houve a necessidade de verificação para avaliar se o valor colocado na máquina era semelhante ao valor reproduzido pela mesa, pois o importante, neste momento do trabalho, é a imagem que foi obtida ao longo da soldagem.

4.3.2 ATIVIDADE II – OBTENÇÃO DAS IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Essa atividade foi feita exatamente como a Atividade II do Processo I. A única diferença aqui, foi que não houve o erro de ruído causado pela segunda captação de imagens.

4.3.3 ATIVIDADE III – SELEÇÃO DO MOMENTO QUE SERÁ AVALIADO NA IMAGEM TERMOGRÁFICA

As imagens obtidas nessa etapa foram retiradas da filmagem do cordão de solda realizado com a mesa linear. Dessa forma, sabe-se que o cordão invariavelmente irá começar sem defeito e passará a apresentá-lo ao longo do processo de soldagem.

Imagens com apenas uma zona isoterma não possuíam o defeito e imagens com duas ou mais zonas isotermas separadas possuíam o defeito. É presumível admitir-se que o momento onde não ocorre o *humping*, poucos instantes antes da efetivação do defeito, será o momento da iminência do mesmo. Dessa forma, selecionaram-se os três momentos que seriam tratados para verificar e validar o parâmetro desenvolvido no processo I.

4.3.4 ATIVIDADE IV – TRATAMENTO DA IMAGEM TERMOGRÁFICA

Essa atividade foi feita exatamente como a Atividade III do Processo I. A única diferença aqui foi que não houve necessidade para o tratamento do erro de ruído.

4.3.5 ATIVIDADE V – APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PARÂMETRO DESENVOLVIDO NO PROCESSO I

Após a obtenção e o tratamento das imagens, capturou-se, novamente com auxílio do Matlab a distância da diagonal e a distância da altura.

A versão do Matlab utilizada aqui era mais atualizada do que a versão utilizada no Processo I, isso fez com que houvesse uma mudança visual na forma de apresentação dos dados. Não obstante, a obtenção dos mesmos permaneceu inalterada. Dessa forma, o próprio software indica as coordenadas X,Y. Com elas, fez-se o cálculo referente a um triângulo pitagórico para achar o valor da diagonal. A Tabela 16 demonstra os valores das coordenadas e suas respectivas diagonais, o Anexo II demonstra os cálculos para encontrar o valor das diagonais.

Tabela 16 – Coordenadas obtidas com o software Matlab

Coordenadas (x,y) da extremidade da esquerda	Coordenadas (x,y) da extremidade da direita	Diagonal
(110, 100)	(197, 113)	87,97
(257, 100)	(340, 98)	83,02
(143, 128)	(236, 135)	93,26

Com os valores das diagonais, traçaram-se as alturas. A Tabela 17 apresenta os valores encontrados das coordenadas da parte inferior, das coordenadas da parte superior, a altura é a subtração das coordenadas y.

Tabela 17 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura

Coordenadas (x, y) da parte inferior	Coordenadas (x, y) da parte superior	Altura
(154, 118)	(154, 89)	29
(299, 99)	(299, 72)	27
(190, 131)	(190, 101)	30

Como para desenvolver o parâmetro entre a iminência e o *humping*, tomou-se a razão entre a diagonal e a altura, para validá-lo, conseqüentemente, o mesmo cálculo deverá novamente ser realizado. Encontram-se na Tabela 18 os três valores obtidos.

Tabela 18 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas

3,03
3,07
3,11

A partir desse momento, admitiu-se que o parâmetro desenvolvido no processo I foi verdadeiro. Ao ser feita determinada afirmação sobre uma população, em especial sobre um parâmetro dessa população, é natural buscar-se formas de corroborar essa afirmação. Para isso, escolheu-se o teste de hipótese.

Primeiramente, formulou-se uma hipótese, que no caso do presente trabalho afirmou-se que o parâmetro desenvolvido estava correto. Essa primeira hipótese é denominada de Hipótese Nula e foi representada por H_0 .

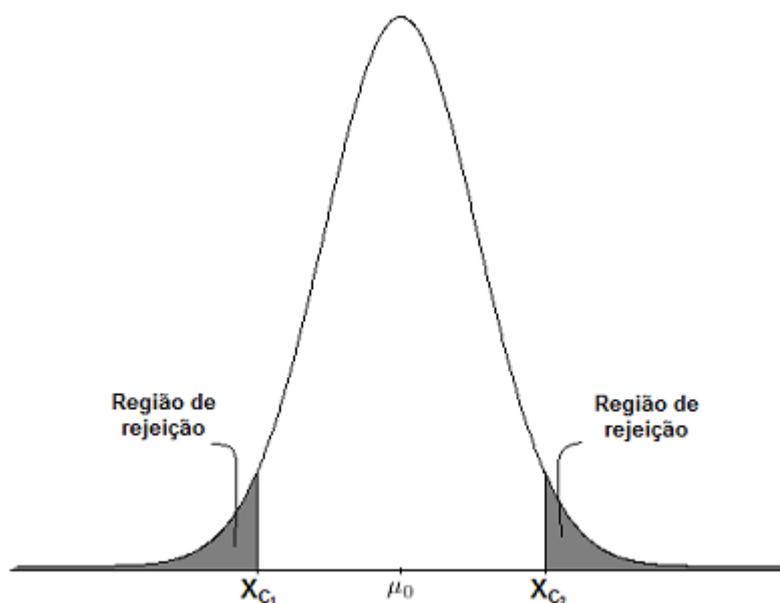
A hipótese que se usa como alternativa à hipótese nula, isto é, a hipótese que se aceita quando a hipótese nula é rejeitada, é chamada Hipótese Alternativa e foi

representada por H_1 . No caso do presente trabalho, a hipótese alternativa foi que o parâmetro desenvolvido estava errado.

Após a definição da hipótese nula e da hipótese alternativa, foi preciso definir-se o a regra de decisão. Para o presente trabalho, utilizou-se a curva de distribuição t-Student. Nela, se o valor calculado ficar dentro dos valores de parâmetro da curva, a afirmação nula é verdadeira, caso contrário a mesma é rejeitada.

A Figura 47 mostra as áreas de rejeição referente ao método escolhido.

Figura 47 – Demonstração da área de rejeição.



Para o cálculo do teste de hipótese é preciso seguir o mesmo procedimento do cálculo t da distribuição t-Student.

Com auxílio do software Excel, fez-se a análise de dados e obteve-se a estatística descritiva dos mesmos. A Tabela 19 mostra os valores obtidos.

Tabela 19 – Estatística descritiva

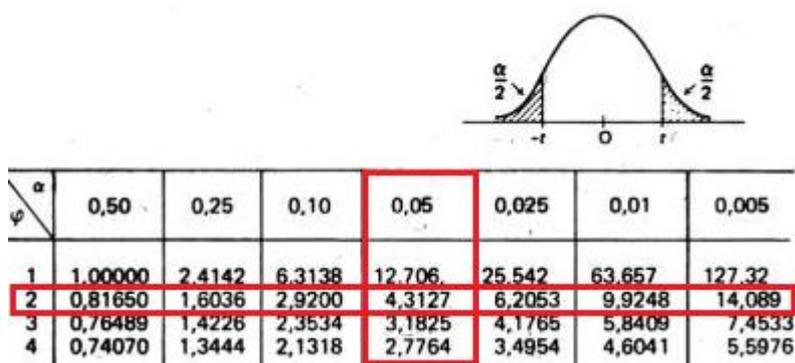
Média	3,07
Desvio padrão	0,04
Variância da amostra	0,0016
Contagem	3

Com a média e o número de amostras é possível calcular a distribuição de probabilidade t-Student. Ela foi necessária para definir-se o intervalo de rejeição.

Considerando $GL = 2$, para um grau de confiança de 95%, tem-se $\alpha = 0,05$. O Anexo III explica o significado desse alfa para o teste de hipótese.

De posse dos dois valores, é possível entrar na tabela t-Student e encontrar o valor t. A Figura 48 demonstra como o mesmo foi obtido.

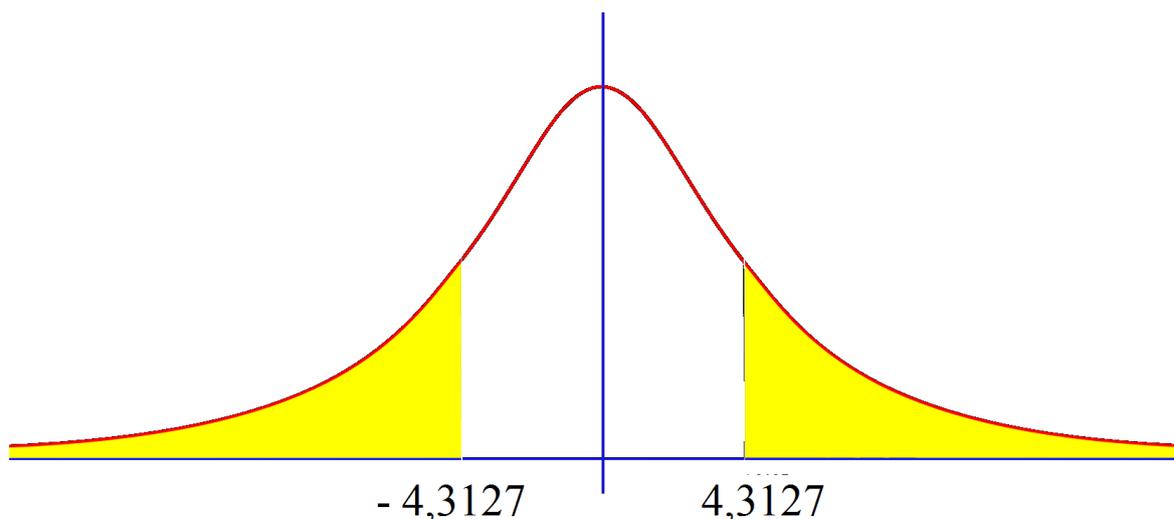
Figura 48 – Obtenção do valor t na tabela t-Student



Fonte: Fonseca e Martins, 2010

Com o valor t encontrado, pode-se definir a região de rejeição. A Figura 49 mostra a mesma.

Figura 49 – Gráfico da distribuição t-Student.



Após encontrar o valor do intervalo foi possível calcular o valor t da amostra. A hipótese H_0 seria aceita se o valor encontrado ficasse entre $-4,3127$ e $4,3127$ e

seria rejeitada se o valor encontrado fosse menor que -4,3127 ou maior que 4,3127. O cálculo do t da amostra encontra-se na equação (20).

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)\sqrt{n}}{S} \quad (20)$$

Onde t é o valor do t da amostra, \bar{x} é o valor da média amostral, μ é o valor da media populacional, S é o valor do desvio padrão da amostra e n é o tamanho da amostra.

Substituindo os respectivos valores, tem-se:

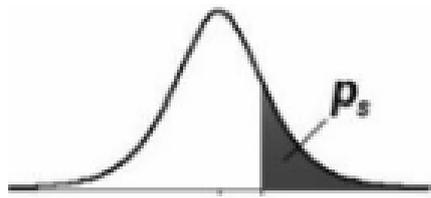
$$t = \frac{(3,07 - 3,04)\sqrt{3}}{0,04} \quad (21)$$

$$t = 1,299 \quad (22)$$

Diante do t encontrado, aceita-se a hipótese nula. Portanto o parâmetro desenvolvido para o cordão de solda na iminência do *humping* está correto.

O mesmo teste foi feito para o cordão de solda ideal, no entanto, nesse caso, sabe-se que o valor da razão encontrada deve ser menor que o valor da iminência. Portanto, escolheu-se o teste t-Student unicaudal à esquerda. Se o valor encontrado for menor que o valor t calculado, aceita-se a hipótese nula. Caso contrário, rejeita-se a mesma. A Figura 50 demonstra a área os, que é a área de rejeição.

Figura 50 – Área de rejeição p_s para a distribuição t-Student.



A maneira de calcular foi semelhante à maneira utilizada no teste de hipótese anterior. Fez-se o cálculo referente a um triângulo pitagórico para achar o valor da diagonal. A Tabela 20 demonstra os valores das coordenadas e suas respectivas diagonais, o Anexo II demonstra os cálculos para encontrar o valor das diagonais.

Tabela 20 – Coordenadas obtidas com o software Matlab

Coordenadas (x,y) da extremidade da esquerda	Coordenadas (x,y) da extremidade da direita	Diagonal
(165, 100)	(248, 105)	83,15
(152, 99)	(241, 106)	89,27
(143, 100)	(229, 110)	85,41

Com os valores das diagonais, traçaram-se as alturas. A Tabela 21 apresenta os valores encontrados das coordenadas da parte inferior, das coordenadas da parte superior, a altura é a subtração das coordenadas y.

Tabela 21 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura

Coordenadas (x, y) da parte inferior	Coordenadas (x, y) da parte superior	Altura
(207, 104)	(207, 75)	29
(196, 100)	(196, 72)	28
(186, 107)	(186, 79)	28

Com os valores das diagonais e das alturas, foram feitas as razões. Vide Tabela 22.

Tabela 22 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas

2,87
3,18
3,05

Com auxílio do software Excel fez-se a análise de dados e obteve-se a estatística descritiva dos mesmos. A Tabela 23 mostra os valores obtidos.

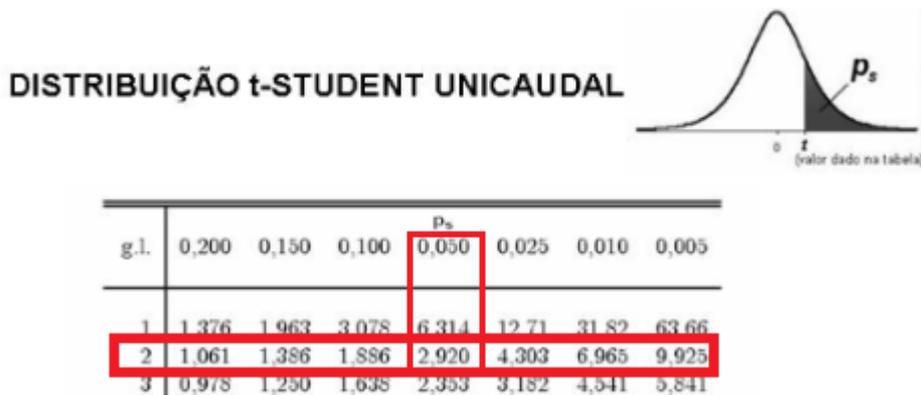
Tabela 23 – Estatística descritiva

Média	3,03
Desvio padrão	0,16
Variância da amostra	0,0242
Contagem	3

Com a média e o número de amostras é possível calcular a distribuição de probabilidade t-Student. Sabendo que $GL = 2$, para um grau de confiança de 95%, tem-se $\alpha = 0,05$.

De posse dos dois valores, é possível entrar na tabela t-Student unicaudal e encontrar o valor t. A Figura 51 Figura 48 demonstra como o mesmo foi obtido.

Figura 51 – Obtenção do valor t na tabela t-Student



Fonte: Fonseca e Martins, 2010

Após encontrar o valor do intervalo, foi possível calcular o valor t da amostra. A hipótese H0 seria aceita se o valor encontrado ficasse abaixo de 2,920. O cálculo do t da amostra encontra-se na equação (23).

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)\sqrt{n}}{S} \quad (23)$$

Onde t é o valor do t da amostra, \bar{x} é o valor da média amostral, μ é o valor da media populacional, S é o valor do desvio padrão da amostra e n é o tamanho da amostra.

Substituindo os respectivos valores, tem-se:

$$t = \frac{(3,03-3,04)\sqrt{3}}{0,16} \quad (24)$$

$$t = - 0,11 \quad (25)$$

Diante do t encontrado, aceita-se a hipótese nula. Portanto o parâmetro desenvolvido para o cordão de solda ideal está correto.

Por fim, o mesmo teste foi feito para o cordão de solda com o defeito já instalado, no entanto, nesse caso, sabe-se que o valor da razão encontrada deve ser superior ao valor da iminência. Portanto, escolheu-se o teste t-Student unicaudal à direita. Se o valor encontrado for maior que o valor t calculado, aceita-se a hipótese nula. Caso contrário, rejeita-se a mesma.

A Tabela 24 demonstra os valores das coordenadas e suas respectivas diagonais, o Anexo II demonstra os cálculos para encontrar o valor das diagonais.

Tabela 24 – Coordenadas obtidas com o software Matlab

Coordenadas (x,y) da extremidade da esquerda	Coordenadas (x,y) da extremidade da direita	Diagonal
(149, 152)	(273, 162)	124,40
(167, 166)	(278, 175)	111,36
(152, 159)	(284, 171)	132,54

Com os valores das diagonais, traçaram-se as alturas. A Tabela 25 apresenta os valores encontrados das coordenadas da parte inferior, das coordenadas da parte superior, a altura é a subtração das coordenadas y.

Tabela 25 – Coordenadas obtidas com o software Matlab para a altura

Coordenadas (x, y) da parte inferior	Coordenadas (x, y) da parte superior	Altura
(211, 157)	(207, 136)	21
(223, 171)	(223, 152)	19
(218, 165)	(218, 141)	24

Com os valores das diagonais e das alturas, foram feitas as razões. Vide Tabela 26.

Tabela 26 – Valores da razão entre as diagonais e alturas obtidos nas imagens tratadas

5,92
5,86
5,52

Com auxílio do software Excel fez-se a análise de dados e obteve-se a estatística descritiva dos mesmos. A Tabela 23 mostra os valores obtidos.

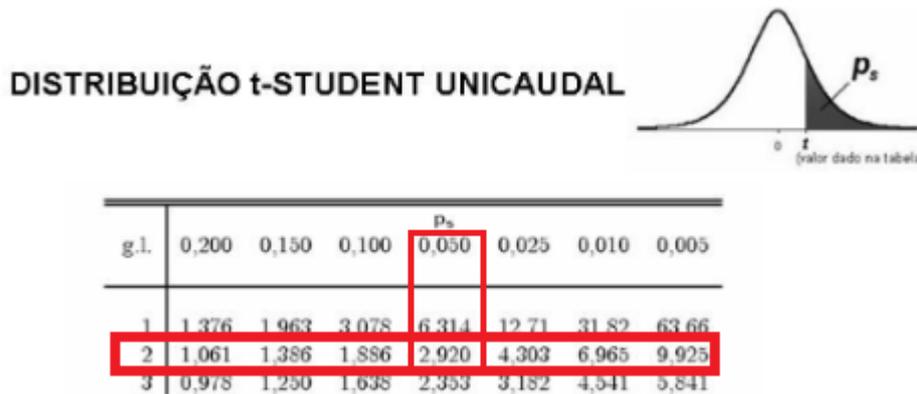
Tabela 27 – Estatística descritiva

Média	5,76
Desvio padrão	0,22
Variância da amostra	0,0465
Contagem	3

Com a média e o número de amostras é possível calcular a distribuição de probabilidade t-Student. Sabendo que $GL = 2$, para um grau de confiança de 95%, tem-se $\alpha = 0,05$.

De posse dos dois valores, é possível entrar na tabela t-Student unicaudal e encontrar o valor t. A Figura 51/Figura 48 demonstra como o mesmo foi obtido.

Figura 52 – Obtenção do valor t na tabela t-Student



Após encontrar o valor do intervalo foi possível calcular o valor t da amostra. Como se trata de uma unicaudal à esquerda, o valor da tabela será negativo. A hipótese H0 seria aceita se o valor encontrado ficasse acima de - 2,920.

Substituindo os respectivos valores, tem-se:

$$t = \frac{(5,52-3,04)\sqrt{3}}{0,22} \quad (26)$$

$$t = 19,18 \quad (27)$$

Diante do t encontrado, aceita-se a hipótese nula. Portanto o parâmetro desenvolvido para o cordão de solda com o defeito *humping* está correto.

Conclui-se, então, o último objetivo do presente trabalho que era o da validação do parâmetro desenvolvido.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho tinha como problema central o controle do defeito *humping* no processo TIG por meio de monitoramento termográfico da poça de fusão. Para isso, diz-se de maneira sucinta, que foi proposto o desenvolvimento de um parâmetro capaz de detectar a iminência do defeito em estudo e o defeito propriamente dito.

Visando atender o proposto, fez-se um estudo sobre soldagem, termografia e processamento de imagem. Com o conhecimento adquirido após essa instrução, passou-se para a parte experimental do processo. Nessa, o projeto foi dividido em três etapas, pois assim seria mais viável para se atingir o proposto.

Por fim, fez-se o tratamento e a análise dos dados, sempre buscando a contribuição necessária para que fossem alcançados os objetivos formulados na introdução.

No início do trabalho, foram apresentados quatro objetivos específicos diferentes, sendo todos eles concretizados ao longo do desenvolvimento da presente dissertação.

- A definição da velocidade e da corrente ideal onde o cordão de solda começa bom e ao longo do processo passa a exibir o defeito estudado foi concretizada no capítulo 3 de metodologia. Após alguns testes, encontrou-se a combinação de velocidade igual a 9 mm/s e corrente igual a 190 A;
- A identificação de indicadores de tendência à formação do defeito tipo *humping*, no processo TIG, com base nos sinais de tensão de soldagem e na geometria da poça de solda visualizada em imagens térmicas foi atingida no capítulo 4. Mediram-se as diagonais e as alturas tanto das poças de fusão que estavam na iminência do *humping* como das poças de fusão que já possuíam o defeito *humping*;
- A criação de um parâmetro, utilizando os dados das imagens térmicas processadas e transformadas em imagens binárias, isto é, preto e

branco também foi atingida no capítulo 4. Fez-se um indicador proporcional, que não trabalhava com apenas uma perspectiva da poça de soldagem. Este indicador foi o cálculo da razão entre a diagonal e a altura obtidas no objetivo anterior; e

A validação do parâmetro criado foi atingida, mais uma vez, no capítulo 4. Foram realizadas soldagens com diferentes combinações de corrente e velocidade. De posse das imagens termográficas das mesmas, fez-se o cálculo da razão desenvolvida no objetivo anterior. Logo após, fez-se o teste de hipóteses de Student e chegou-se à conclusão que o parâmetro desenvolvido estava correto.

Ao concluir todos os objetivos específicos, pode-se afirmar que o objetivo geral do trabalho foi logrado. Dessa forma, fica claro que houve o desenvolvimento do parâmetro de detecção da iminência do *humping*.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Considerando todas as áreas estudadas no presente trabalho e para dar continuidade ao mesmo, sugere-se:

- Estudo do impacto financeiro que o aumento da velocidade no processo TIG causaria para a indústria e quais mudanças na sua escolha isso acarretaria;
- Estudo e desenvolvimento de outros parâmetros, ademais dos termográficos, relacionados ao cordão de solda ideal e ao *humping*;
- Estudo e desenvolvimento de outros parâmetros, ademais dos termográficos, relacionados a outros tipos de soldagens e outros tipos de defeitos;
- Desenvolvimento de um programa capaz de captar as imagens termográficas e realizar as medições do parâmetro da iminência do *humping* sem auxílio externo do fator humano;
- Desenvolvimento de um programa capaz de captar as imagens termográficas e realizar as medições do parâmetro da iminência do *humping* em tempo real;

- Desenvolvimento de um controle de malha fechada, utilizando o parâmetro criado nesta dissertação para chegar-se à velocidade e a corrente máxima permitida sem o surgimento do defeito *humping*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, S. et al. Characterization of “*Humping*” in the GTA welding process using. *Journal of Materials Processing Technology*: vol. 223, 216 – 224, abril, 2015.

BARREIRA, E. S. B. M. *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico dos edifícios*. 2004. 183. Dissertação de mestrado – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004

BARROS, M. B. R. *Caracterização do defeito “humping” no processo TIG, utilizando técnicas de termografia*. 2013. 46. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2013.

BOVIK, A. C., *Handbook of Image & Video Processing*. Segunda edição. Burlington, Estados Unidos da América: Elsevier, 2005.

BRACARENSE, A. Q. *Processo de soldagem TIG-GTAW*. 2000. 22. Apostila da Escola de Engenharia do Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2000.

CHAPMAN, D. M. F.; ELLIS, D. D. Elusive decibel: Thoughts on sonars and marine mammals. *Journal of the Canadian Acoustical Association*, Dartmouth, Canadá, vol.26, n 2, 29-31, junho, 1998.

CHAPUIS, J. *Une approche pour l’optimisation des opérations de soudage à l’arc*. 2011. 212. Tese de doutorado - Université Montpellier II, Montpellier, França, 2011.

COSTA, A. F. *Classificação de pedestres em imagens degradadas*. 2013. 89. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2013.

COSTA, A. L. N. T. *Redução de ruído em imagens*. 2009. 379. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

DONG, T.L. *Solidificação do metal de solda*. 2009. Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2009.

FARIAS, R.D. *Espaço de cores, morfologia matemática e extração de feições*. 2016. 82. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2016.

FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A. *Curso de Estatística*. São Paulo, Brasil: Atlas, 2010.

FRANCO, L.D.N. Sincronização, captura e análise de imagens da poça de soldagem no processo GMAW convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito. 2007. 143. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2007.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Digital Image Processing. Terceira edição. Londres, Inglaterra: Pearson Education, 2002.

KAUL, R. et al. Effect of active flux addition on laser welding of austenitic stainless steel. Science and Technology of Welding and Joining: vol. 12, n 2, 127 – 137, julho, 2007.

KOU, S., Welding Metallurgy. Segunda edição. Estados Unidos da América: Wiley, 2003.

LEE, J. S. Digital image smoothing and the sigma filter. Comput. Graphics Image Processing: vol. 24, 255–269, novembro, 1983.

LENG, X. S.; ZHANG, G. J.; WU, L. Experimental study on improving welding efficiency of twin electrode TIG welding method. Science and Technology of Welding and Joining: vol. 11, n 5, 550 – 554, abril, 2006.

LIMA, R. M. S. P. *Processamento de imagem na análise de documentos de engenharia*. 1995. 165. Dissertação de mestrado – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1995.

LUKAS, J.; FRIDRICH, J.; GOLJAN, M. Digital Camera Identification From Sensor Pattern Noise. IEEE Transactions on Information Forensics and Security: vol. 1, n 2, 205-214, junho, 2006.

Manual de instruções de uso Migatronc BDH320.

Manual de instruções de uso ThermoVision A40 M

Manual de instruções de uso ABB IRB2000

Manual de instruções de uso Fronius TPS-5000

MAXIMO, M. A. S.; PANTOJA, J. C. Aplicação da termografia infravermelha para identificar patologias em edifícios de arquitetura monumental. In: Congresso Internacional Sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas - CINPAR 2017, 13., 2017, Crato, CE.

MENDEZ, P. F. *Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding*. 1999. 195. Tese de doutorado - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Estados Unidos da América, 1999.

MENG, X. et al. High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*: vol 214, 2417 – 2424, maio, 2014.

OLIVEIRA, M. A. *Estudo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame para Aplicação em Revestimentos Metálicos*. 2001. 91. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.

OLIVERIA, R. A.; SILVA, A. P. B. William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras idéias sobre radiação infravermelha. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Campina Grande, Brasil: vol. 36, n 4, 46031 – 460311, outubro, 2014.

PALACÍOS, A. M. G. *Uso de Técnicas de Termografia para Detecção de Descontinuidades no Processo GTAW Através do Monitoramento da Poça de Fusão*. 2010. 107. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2010.

QIN, G.; MENG, X.; FU, B. High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*: vol. 220, 58 – 64, janeiro, 2015.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. *Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico*. Santa Maria, Brasil: Edeme, 1979.

ROCHA, E. J. R. *Uso da termografia na análise do resfriamento de chapas soldadas*. 2012. 162. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2012.

ROE, E. *Restauração Digital de Imagens Coloridas de Documentos Históricos*. 2015. 163. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.

SANCHES, R. A. *Defeitos em Solda Detectáveis Através de Inspeção Visual*. 2010. 63. Trabalho de conclusão de curso - Centro Universitário Luterano de Manaus, Manaus, Brasil, 2010.

SANDOVAL, D. A. M. *Método para Detecção Automática de Nudez em Imagens Digitais utilizando Redes Neurais Artificiais*. 2014. 73. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2014

SAVAGE, W.F., et al. Weld metal solidification mechanics. *Welding Journal*, Columbus: 175s–181s, 1965.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of arc force on defect formation in GTA Welding. *Welding journal*, Columbus: 212s - 224s, julho, 1979.

SCHWEDERSKY, M. et al. Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo: vol 16, n 4, 333 – 340, dezembro, 2011.

SCHWEDERSKY, M. B. *Estudo e desenvolvimento do processo tig duplo eletrodo*. 2015. 192. Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2015.

SILVA, A. J. R. *Detection and characterization of defects in composite materials using thermography*. 2016. 242. Tese de doutorado – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

SILVA, T. C. *Concepção, projeto, construção e teste de um aparato experimental para medição de emissividade de ligas com memória de forma*. 2014. 102. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2014.

SOUSA, G. G. *Monitorização da trajetória de uma bola num jogo de Ténis de Mesa*. 2012. 83. Dissertação de mestrado – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

WINKLER, M. A. *Estimação da Posição do Teclado em Dispositivos Móveis a partir de Vídeos Capturados por Câmeras de Vigilância*. 2016. 73. Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2016.

WANG, X. et al. Numerical simulation of arc weld pool in double electrodes tungsten inert gas welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*: vol. 85, 924 – 934, março, 2015.

ANEXO I: IMAGENS TERMOGRÁFICAS SEM TRATAMENTO

Figura 53 – Imagens termográficas sem tratamento para a iminência do *humping*.

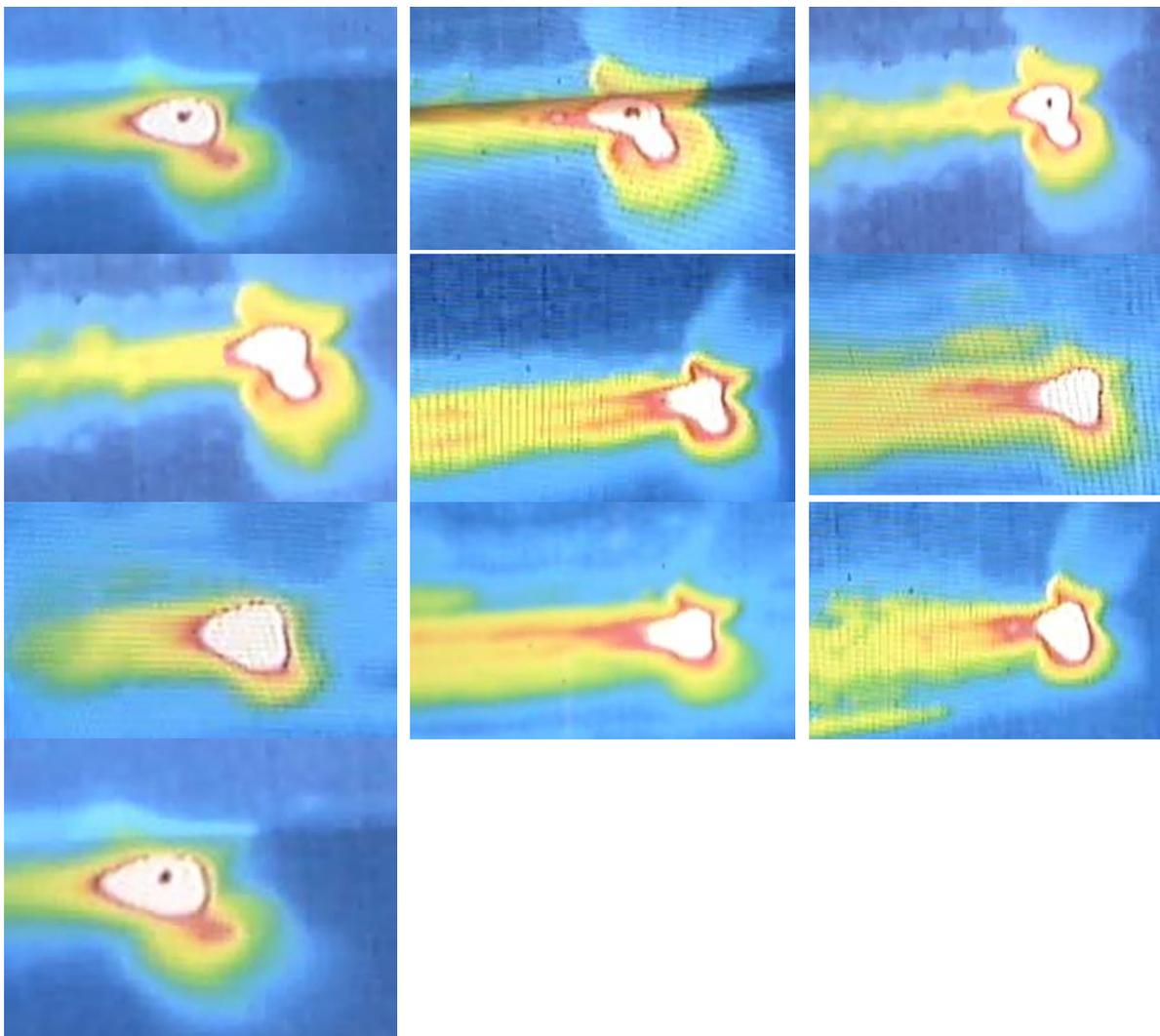
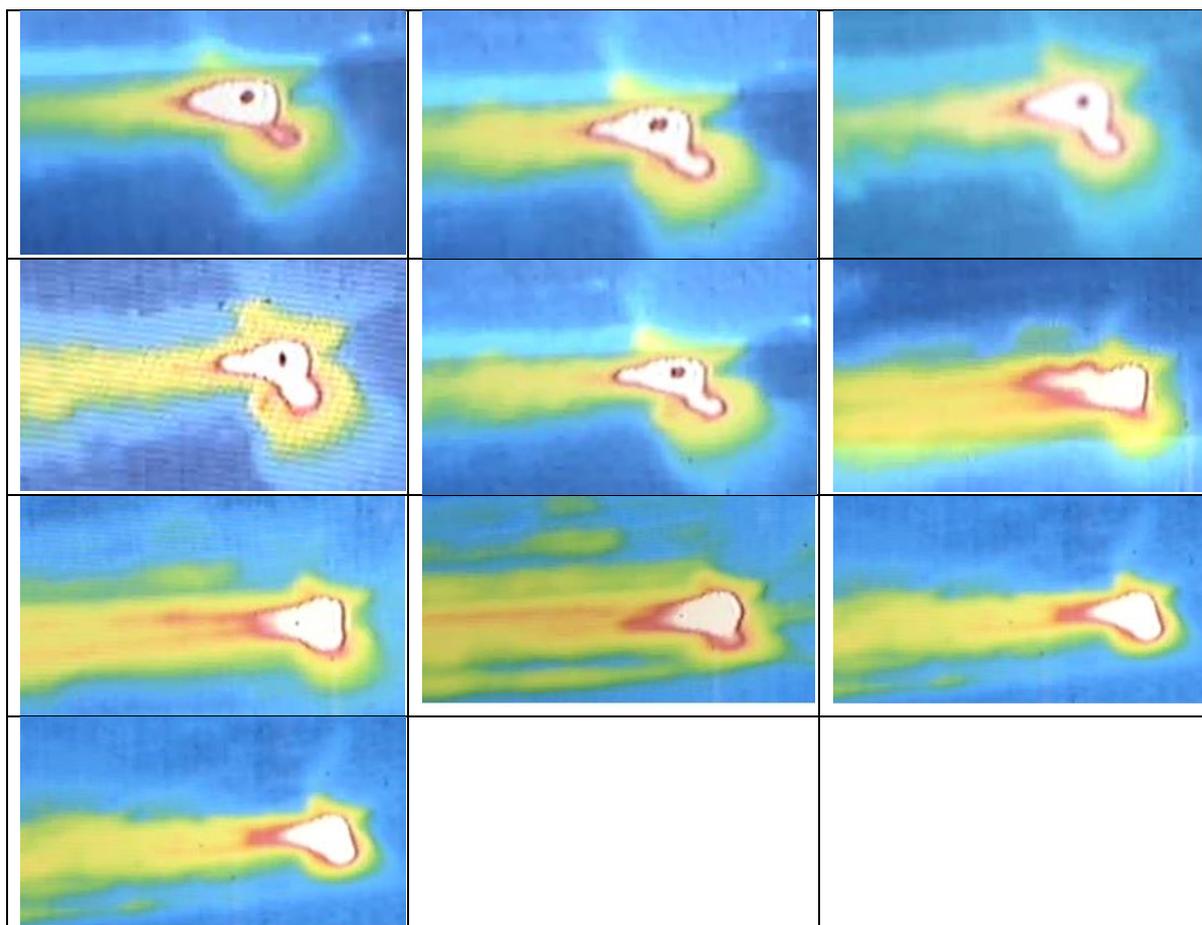
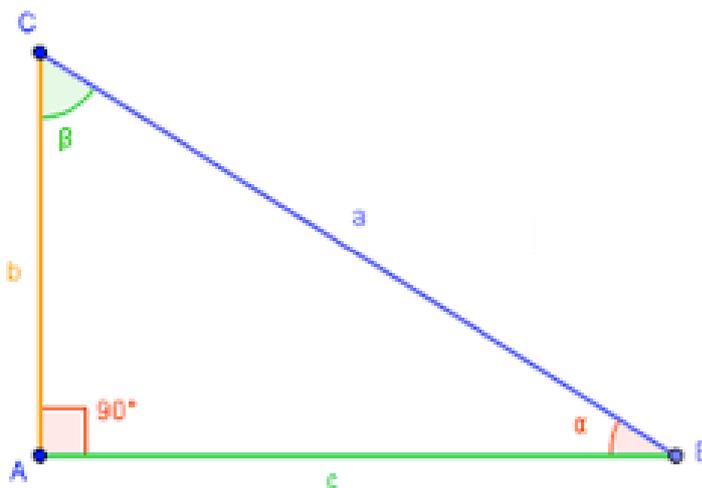


Figura 54 – Imagens termográficas sem tratamento para o defeito *humping*.



ANEXO II: CÁLCULOS PARA OBTER AS DIAGONAIS NO PROCESSO II

Figura 55 – Triângulo retângulo com a hipotenusa e os catetos marcados para a relação de Pitágoras.



Pitágoras define que $a^2 = b^2 + c^2$. Para encontrar o valor de b subtrai-se a segunda coordenada y pela primeira coordenada y. Para encontrar o valor de c subtrai-se a segunda coordenada x pela primeira coordenada x. O valor de a será calculado pelo teorema de Pitágoras e é referente a diagonal da poça da fusão.

CORDÃO DE SOLDA COM IMINÊNCIA DO *HUMPING*

Imagem I:

$$b = 113 - 100 = 13$$

$$c = 197 - 110 = 87$$

$$a^2 = 13^2 + 87^2$$

$$a = 87,97$$

Imagem II:

$$b = 98 - 100 = -2$$

$$c = 340 - 257 = 83$$

$$a^2 = -2^2 + 83^2$$

$$a = 83,02$$

Imagem III:

$$b = 135 - 128 = 7$$

$$c = 236 - 143 = 93$$

$$a^2 = 7^2 + 93^2$$

$$a = 93,26$$

CORDÃO DE SOLDA IDEAL

Imagem I:

$$b = 105 - 100 = 5$$

$$c = 248 - 165 = 83$$

$$a^2 = 5^2 + 83^2$$

$$a = 83,15$$

Imagem II:

$$b = 106 - 99 = 7$$

$$c = 241 - 152 = 89$$

$$a^2 = 7^2 + 89^2$$

$$a = 89,27$$

Imagem III:

$$b = 110 - 100 = 10$$

$$c = 229 - 143 = 86$$

$$a^2 = 10^2 + 86^2$$

$$a = 85, 41$$

APÊNDICE I: ERROS COMETIDOS NOS TESTES DE HIPÓTESES

Nenhum teste de hipóteses é 100% certo. Como o teste é baseado em probabilidades, sempre há uma possibilidade de chegar-se a uma conclusão errada. Ao realizar um teste de hipóteses, dois tipos de erros são possíveis: tipo I e tipo II. A tabela 17 demonstra quais são os quatro resultados possíveis para o teste e os dois tipos de erros.

Tabela 17 – Possíveis resultados de um teste de hipóteses

	Aceitar H_0	Rejeitar H_0
H_0 verdadeiro	Decisão correta	Erro tipo I
H_0 falsa	Erro tipo II	Decisão correta

Erro tipo I

Quando a hipótese nula é verdadeira, mas é rejeitada, o erro cometido é tipo I. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é α , que é o nível de significância definido no teste de hipóteses. Um α de 0,05 indica que se aceita uma chance de 5% de erro de rejeitar a hipótese nula. Para reduzir este risco, usa-se um valor inferior para α . Entretanto, usar um valor inferior para alfa significa uma menor probabilidade de detectar uma diferença verdadeira, se efetivamente existir uma.

Erro tipo II

Quando a hipótese nula é falsa, mas não é rejeitada, o erro cometido é tipo II. A probabilidade de cometer um erro do tipo II é β , que depende do poder do teste. Para diminuir o risco de cometer um erro do tipo II deve-se assegurar que o teste tenha potência suficiente. Isto é feito garantindo que o tamanho amostral seja grande o suficiente para detectar uma diferença prática, quando realmente existir uma.