

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO “HUMPING” NO PROCESSO TIG,  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA**

Por,  
**Maíra Bezerra do Rêgo Barros**

**Brasília, dezembro de 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO “HUMPING” NO PROCESSO TIG,  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA**

POR,

**Maíra Bezerra do Rêgo Barros**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

SADEK CRISOSTOMO ABSI ALFARO  
(Orientador)

MILTON LUIZ SIQUEIRA

WALTER GENNARI JUNIOR

---

---

---

Brasília, dezembro de 2013

### **Dedicatória**

Dedico este trabalho e todos os que vierem pela frente, ao meu pai, Otávio, e à minha mãe, Cristina, pois este simboliza um sonho realizado, que só conquistei devido ao auxílio, incondicional, deles. Pai, mãe, vocês são, foram e serão meus eternos guias. Obrigada por terem me ajudado a me transformar na mulher que sou hoje. Amo vocês.

Maíra Bezerra do Rêgo Barros

## **Agradecimentos**

Ao professor Sadek, por proporcionar-me a oportunidade de apresentar este projeto de graduação focado na área de soldagem, campo pelo qual me apaixonei e pretendo aprofundar-me em estudos vindouros. Não tenho palavras para expressar minha gratidão. Também destaco a colaboração eficiente e eficaz na solução dos meus desafios acadêmicos, por parte de todos os integrantes do laboratório GRACO, em particular do professor Guilherme Caribé, dos alunos de doutorado e mestrado Jesús, Hernando, Rodrigo, Jairo, Andrés e Fernando, além do técnico Marrocos. Por fim, agradeço, penhoradamente, ao meu co-orientador Giuliano e ao mestrando Felipe Albuquerque que ficaram comigo horas de seus dias de trabalho, estudo e descanso, ajudando-me a montar tochas, a programar, opinando sobre os textos etc. Suas paciências trouxeram-me a tranquilidade em dias de elevado estresse.

## RESUMO

Um dos processos mais adequados para união de dois metais é o de soldagem TIG. Sua maior eficiência ocorre quando executada a baixas velocidades, o que torna o processo pouco produtivo. Com velocidades mais elevadas, ocorre um defeito conhecido como “humping”, que causa falhas no cordão de solda. Em razão desse problema, a opção pela soldagem TIG é rara e somente ocorre em ocasiões específicas. Neste projeto de graduação foram produzidos alguns cordões de solda, objetivando o forçamento do defeito “humping”, para assim filmar-se o processo com auxílio de uma câmera termográfica. O monitoramento da poça de fusão, mediante imagens térmicas, permitiu determinar a distribuição de temperatura ao longo do processo de soldagem. O conhecimento destes gradientes térmicos é a base para as análises de defeitos no cordão de solda. Valendo-se do exame de imagens de infravermelho da poça de fusão, o presente projeto estudou as zonas isotérmicas, onde se observou a formação do defeito “humping” a temperaturas elevadas, com mudanças abruptas na geometria da poça, ocorridas em consequência dos fenômenos de fusão e solidificação. Após a identificação das zonas em que ocorreu o “humping”, foram feitos gráficos com o objetivo de analisar a área ocupada pelo defeito, visando combater, futuramente, a falha estudada.

---

## ABSTRACT

One of the most efficient process for connecting two metal machining is the TIG welding. However, its higher efficiency occurs at low speeds and it makes the process a little bit productive. Because of this problem, its choice is rare and used only in specifics moments. When we raise the welding speed, occurs a known defect called as humping. This defect causes failure in the weld drop. In this project, it will be made a weld bead in order to force the humping imperfections, after this, it can to film the process with the thermographic camera. The monitoring of the weld bead, through thermal imaging, it will determine the temperature distribution along the welding process. The knowledge of these thermal gradients is the basis for the analysis of defects in the weld bead. Using the infrared images of the weld bead, this project will study the isothermal zones, observing the formation of humping failing at elevated temperatures, with abrupt changes in the pool geometry, occurring because of the phenomena of melting and solidification. After the separation of the areas, in which they occur humping, it will be made the graphics in order to show the area occupied by the defect. Then, it will be possible in the future to correct the defect studied.

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO TEÓRICA</b> .....	<b>3</b>
2.1 SOLDAGEM .....	3
2.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	3
2.1.2 TIG - TUNGSTEN INERT GAS .....	3
2.1.3 FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM .....	5
2.1.4 EFEITO HUMPING .....	6
2.2 TERMOGRAFIA .....	8
2.2.1 HISTÓRICO .....	8
2.2.2 CONCEITOS BÁSICOS .....	10
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>12</b>
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	14
3.1.1 PRIMEIRA ETAPA .....	14
3.1.2 SEGUNDA ETAPA .....	17
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>21</b>
4.1 IMAGENS ANALISADAS .....	25
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>33</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>34</b>

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2. 1 - Esquema de uma soldagem TIG com adição de material. (Fogagnolo, 2011).....	4
Fig. 2. 2 - Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG. A e B são secções transversais dos locais indicados na figura do cordão. (Schwedersky, et al, 2011).....	6
Fig. 2. 3 - Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes. (Schwedersky, et al, 2011) .....	7
Fig. 2. 4 - Primeiro pirômetro ótico. (Galvão Junior, 2013) .....	8
Fig. 2. 5 - Termômetro de infravermelho. (Galvão Junior, 2013).....	9
Fig. 2. 6 - Exemplo de um CCD.....	9
Fig. 2. 7 – Exemplo de um CMOS.....	10
Fig. 3. 1 - Fonte Fronius INVERSAL 450 de soldagem.....	15
Fig. 3. 2 – Computador com o LabView em funcionamento. ....	15
Fig. 3. 3 - Mesa posicionadora com a tocha.....	16
Fig. 3. 4 - Câmera termográfica FLIR A 40.....	16
Fig. 3. 5 - Fonte Migatronik BDH 320 de soldagem.....	17
Fig. 3. 6 – Visor da fonte utilizada na segunda etapa.....	17
Fig. 3. 7 – Robô ABB R2000. ....	18
Fig. 3. 8 – Joystick responsável pela movimentação do robô.....	18
Fig. 3. 9 – Computador conectado ao robô. Através dele se transfere o programa de movimentação. ....	19
Fig. 3. 10 – Algoritmo de pós-processamento das imagens de infravermelho .....	19
Fig. 4. 1 - Imagem da chapa soldada com a câmera FLIR termográfica. ....	21
Fig. 4. 2 - Imagem dos três cordões de solda citados no texto. A ordem se soldagem foi feita de acordo com a numeração da imagem. ....	22
Fig. 4. 3 - Imagem dos três últimos cordões de solda realizados. ....	22
Fig. 4. 4 - Gráfico que associa descolamento com a variação de corrente.....	23
Fig. 4. 5 - Gráfico que associa descolamento com a variação de velocidade. ....	23
Fig. 4. 6 - Gráfico que associa descolamento com a variação de aporte térmico. ....	23
Fig. 4. 7 - Imagem dos três cordões de solda citados no parágrafo acima. A ordem de soldagem foi feita de acordo com a numeração da imagem. ....	24
Fig. 4. 8 – Cordão de solda com corrente de 130A.....	24
Fig. 4. 9 – Cordão de solda com corrente de 140A.....	24
Fig. 4. 10 - Imagem termográfica do cordão de solda.....	25
Fig. 4. 11 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 – 2.....	25
Fig. 4. 12 – Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	26
Fig. 4. 13 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 –3.....	26
Fig. 4. 14 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	26
Fig. 4. 15 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 –4.....	27
Fig. 4. 16 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 – 5.....	27
Fig. 4. 17 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	27

Fig. 4. 18 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 –6.....	28
Fig. 4. 19 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	28
Fig. 4. 20 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	28
Fig. 4. 21 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 –7.....	29
Fig. 4. 22 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixeis x Temperatura em graus Celsius. ....	29
Fig. 4. 23 – Gráfico de números de polígonos obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo. ....	30
Fig. 4. 24 – Gráfico de píxeis obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo. ....	30
Fig. 4. 25 – Gráfico da área do maior polígono em píxeis, obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo. ....	31
Fig. 4. 26 – Tolerância obtida entre corrente e velocidade antes de ocorrer o Humping.....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3 - 1 Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG.....	12
Tabela 3 - 2 Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG.....	13
Tabela 4 - 1 Relação entre o efeito humping e a faixa de experimentação.....	24
Tabela 4 - 2 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 11.....	25
Tabela 4 - 3 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 13.....	26
Tabela 4 - 4 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 15.....	27
Tabela 4 - 5 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 16.....	27
Tabela 4 - 6 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 19.....	28
Tabela 4 - 7 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 21.....	29

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$h$	Entalpia específica	[kJ/kg]
$T$	Temperatura	[°C ou K]
$W_{liq}$	Trabalho líquido	[kJ]
$t$	Tempo	[s]
$\dot{W}$	Potência	[kW]
$P_a$	Pressão do arco	[Pa]
$P_h$	Pressão hidrostática	[Pa]
$P_c$	Pressões capilares	[Pa]
$A_t$	Aporte térmico	[J/mm]
$I$	Corrente	[A]
$V$	Tensão	[V]
$v$	Velocidade	[mm/s]

### Símbolos Gregos

$\Delta$  Variação entre duas grandezas similares

### Grupos Adimensionais

$Pr$  Pressão relativa  
 $r$  Razão entre voltagem fornecida e voltagem demandada

### Subscritos

liq líquido

### Sobrescritos

• Variação temporal

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos mais importantes métodos de uniões metálicas utilizadas atualmente na indústria. 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). Dentre vários processos, o chamado TIG (Tungsten Inert Gas) (FOGAGNOLO, 2011) é o mais utilizado para materiais de difícil soldagem. Uma das principais limitações do processo TIG é a formação de descontinuidade no cordão quando se utilizam altas velocidade e corrente de soldagem, gerando assim a formação do defeito conhecido como humping, o que limita a produção (SCHWEDERSKY, et al, 2011).

O objetivo desse trabalho é a caracterização da formação do humping utilizando termografia por infravermelho. A caracterização consiste em relacionar as isotermas capturadas pela câmera termográfica com os parâmetros corrente e velocidade de soldagem, possibilitando assim a determinação dos limites superiores dessas variáveis, através da análise termográfica da poça de fusão, para antecipar-se à formação do defeito durante o processo.

O humping 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 lenta e custosa. 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 (PALACÍOS, 2010). Considerando essa afirmação, é plausível o estudo das isotermas da poça de fusão para caracterizar a formação do defeito.

A visão humana é sensível à variação de comprimento de onda de 720nm a 400nm, o que impossibilita a visualização das ondas de calor emitidas no momento da soldagem. Já a câmera termográfica utilizada neste trabalho, é capaz de captar as ondas com tamanho entre 7.5µm a 13µm. Com o auxílio da termografia será possível observar as isotermas que ocorrem durante o processo de formação do humping, permitindo evitar os que o excesso dos valores da corrente e da velocidade de soldagem provoque o defeito, aumentando a produção.

O presente trabalho desenvolver-se-á em cinco capítulos. O primeiro capítulo será denominado introdução e nele será feita uma breve apresentação dos objetivos do trabalho e a área que o mesmo irá atuar.

No capítulo dois, será feita uma revisão sobre o assunto abordado neste projeto de graduação. O capítulo três vai explicar como será conduzido o experimento e as decisões

tomadas para o resultado encontrado. O quarto capítulo irá apresentar os resultados obtidos, fazendo uma discussão sobre estes. O quinto capítulo apresentará as conclusões deste trabalho.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 SOLDAGEM

#### 2.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Soldagem é um processo de fabricação que pode ser utilizada para revestimento, prototipagem e união de materiais, em escala atômica (SANCHES, 2010). Ela pode ser feita 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 e deformação nas peças a serem unidas. O primeiro é conhecido como soldagem por fusão e o segundo, soldagem por pressão ou processo de soldagem no estado sólido (FOGAGNOLO, 2011).

Para a união de peças pelo processo de fusão é realizada uma descarga elétrica sustentada através de um gás ionizado em alta temperatura, o plasma, que produz 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 (FOGAGNOLO, 2011). No próximo capítulo será feita uma explicação detalhada deste tipo de processo.

#### 2.1.2 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 através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem unidas. A solda pode ser feita com adição de metal, para isso basta colocá-la diretamente na poça (MEDEIROS, 2005).

Para que não haja contaminação pela atmosfera, é feita uma proteção na poça de fusão. Esta proteção pode apresentar-se de duas formas: a primeira é por uma atmosfera de gás inerte e a segunda por uma mistura de gases inertes (FOGAGNOLO, 2011).

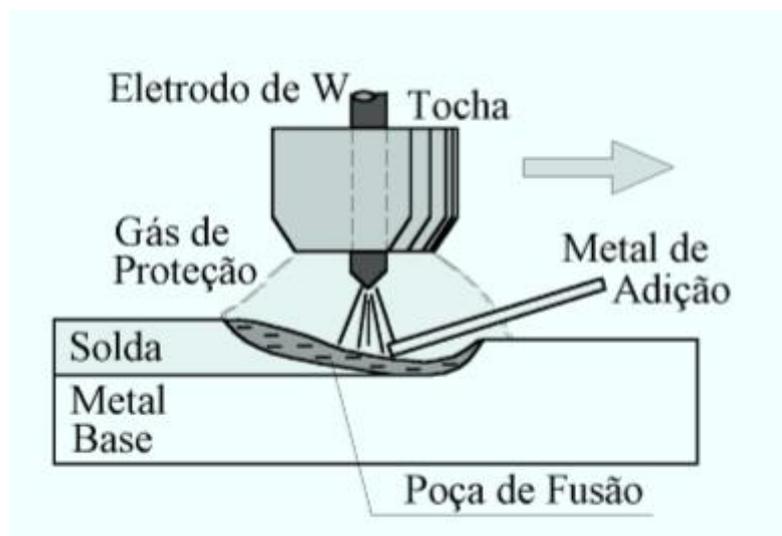


Fig. 2. 1 - Esquema de uma soldagem TIG com adição de material. (Fogagnolo, 2011)

Devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de material, é possível ter um excelente domínio do calor cedido à peça. Por esse motivo é capaz de soldar materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados.

No entanto, 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, se trata de uma solda usada prioritariamente em metais não ferrosos e aços inoxidáveis. Também é muito utilizada na indústria aeroespacial e de aviação, devido a sua alta qualidade.

O arco elétrico gerado no processo TIG é uma descarga elétrica em um meio gasoso parcialmente ionizado, que fornece calor para fundir o metal base. O arco se estabelece entre a ponta do eletrodo de tungstênio e o metal base, sendo que o eletrodo tem polaridade negativa e a peça tem polaridade positiva, o que é conhecida como polarização direta.

Para o melhor entendimento de como é gerada a corrente utilizada na soldagem, o próximo capítulo irá explicar os tipos de fontes existentes.

### 2.1.3 FONTES DE ENERGIA PARA SOLDAGEM

A soldagem TIG exige um equipamento capaz de fornecer tensões e correntes da maneira mais adequada para a criação de um bom cordão de solda, esse equipamento é a fonte de energia. Há algum tempo elas estão sendo estudadas com a associação de sistemas eletrônicos. Nesse contexto, pode-se dividir as fontes em dois tipos: as convencionais e as eletrônicas (ARCOVERDE JÚNIOR & MOTTA, 2011). Neste capítulo serão apresentados alguns tipos de fontes utilizadas atualmente.

Inicialmente será explicada a fonte convencional. Ela pode trabalhar de duas formas. Na primeira, a energia elétrica fornecida pela rede de alimentação é utilizada para produzir uma saída adequada para a soldagem. Na segunda, pode-se converter outra forma de energia para gerar a energia da soldagem.

No primeiro caso, a energia elétrica da rede é convertida para baixa tensão, buscando a proteção do soldador. Geralmente essa redução é feita com auxílio de um transformador. Já no segundo caso, a energia elétrica é gerada por um alternador que pode ser acionado por um motor a combustão ou por um motor elétrico (MODENESI, 2009).

Fontes convencionais, em geral, são insuficientes para controlar diversos eventos que ocorrem no arco e na transferência de metal, além de serem de difícil interação com sistemas digitais de controle. Nos anos 60, começaram a introduzir os dispositivos eletrônicos para o controle da fonte. Sua utilização se justifica, uma vez que a fonte eletrônica possui um desempenho melhor que a fonte convencional.

Existem diferentes tipos de fontes eletrônicas, sendo as mais conhecidas as tiristorizadas e as transistorizadas. As fontes tiristorizadas permitem a condução de corrente no sentido de baixa resistência quando se inicia um pequeno sinal. Este sinal é enviado a uma conexão adicional conhecida como gatilho ou gate. Para regular a saída desta fonte, o momento do disparo do gatilho é controlado a cada meio ciclo de corrente (MODENESI, 2009).

As fontes transistorizadas são divididas em: série; as chaveadas no secundário; e as inversoras. Nas fontes em série o transistor é um dispositivo eletrônico cuja saída é controlada através do ajuste de uma pequena corrente passando através de uma de suas conexões. O seu funcionamento pode ser explicado através de um sistema hidráulico análogo no qual a passagem de água no duto principal é controlada por uma válvula acionada por uma pequena vazão de água em um duto secundário (MODENESI, 2009).

Nas fontes chaveadas, os transistores trabalham como chaves que são abertas e fechadas a uma elevada velocidade. Desta forma, a saída da fonte é controlada pela razão dos tempos em que os transistores permanecem abertos ou fechados. Embora o circuito básico destas fontes seja muito similar aos outros, a utilização dos transistores no modo chaveado permite um grande aumento na eficiência da fonte e, assim, a utilização de resfriamento ao ar. A maior eficiência permite também uma construção mais simples, com menor número de transistores, o que reduz o preço da fonte. (MODENESI, 2009)

Os tipos de fontes apresentados acima usam um transformador convencional para reduzir a tensão da rede até o valor requerido para a soldagem. As fontes inversoras trabalham com um transformador muito menor, o que é possível quando a frequência da corrente alternada é grandemente elevada, melhorando, assim, a eficiência do transformador. (MODENESI, 2009)

#### 2.1.4 EFEITO HUMPING

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".

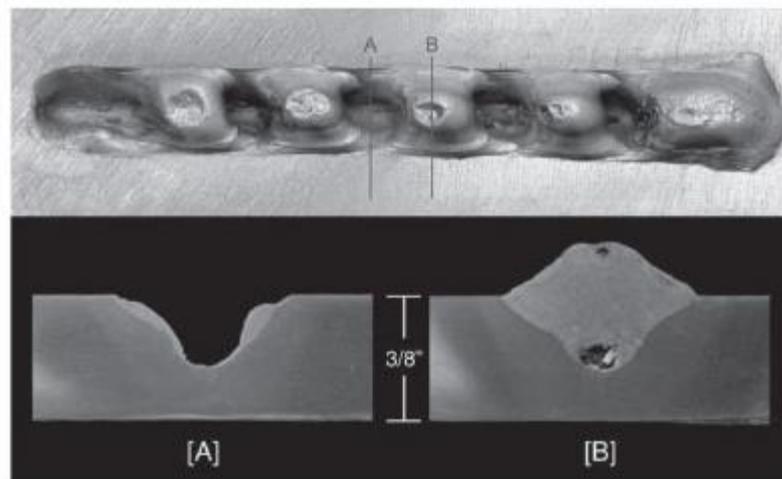


Fig. 2. 2 - Cordão sobre chapa realizado com o processo TIG. A e B são secções transversais dos locais indicados na figura do cordão. (Schwedersky, et al, 2011)

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, e 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 2. 3 representa a poça em alta corrente.

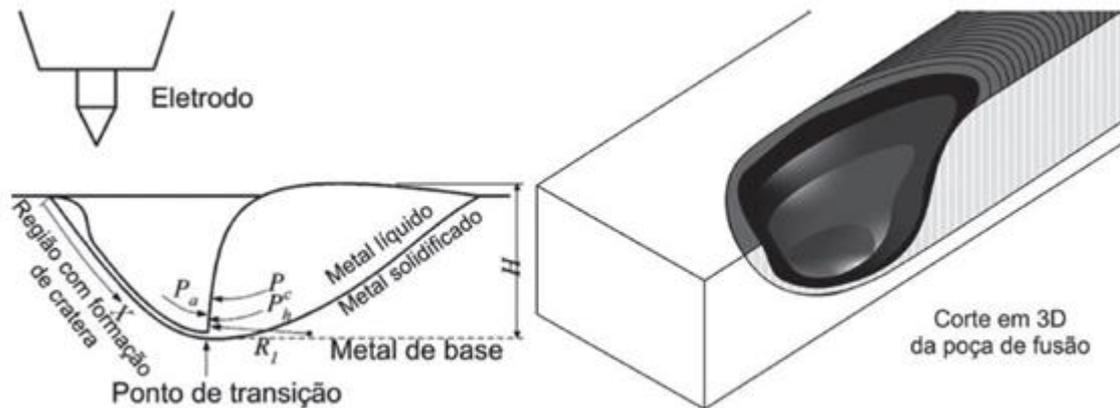


Fig. 2. 3 - Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes. (Schwedersky, et al, 2011)

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 as consideradas mais importantes:

- Pressão do arco ( $P_a$ ): 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, irão existir diferentes condições. Para situações de correntes mais baixas, existe a tendência de que as pressões  $P_h$  e  $P_c$  sejam maiores do que  $P_a$ , e não ocorra o aparecimento da cratera. À medida que a corrente vai aumentando,  $P_a$  começa a se tornar maior do que as outras pressões, e começa a existir a formação de cratera (SCHWEDERSKY, et al, 2011).

No presente trabalho, o efeito “humping” será estudado com o auxílio de uma câmera termográfica. Para um melhor entendimento de como isso será feito, o próximo capítulo irá explicar o que é a termografia e sua utilização.

## 2.2 TERMOGRAFIA

### 2.2.1 HISTÓRICO

A relação entre o calor e a vida fascinava os antigos filósofos e médicos gregos. Estes tentavam perceber os meios pelos quais o calor era libertado do corpo. Vários estudos foram feitos, visando compreender a relação da temperatura com a saúde humana. A termografia é uma técnica que surge mais tarde, levando em conta toda a investigação realizada pelos antigos (ainda que para fins medicinais).

Em 1884, Boltzmann mostrou como a lei empírica do corpo negro de Josef Stefan, formulada em 1879, poderia ser derivada dos princípios físicos termodinâmicos. Boltzmann chegou conclusivamente à seguinte fórmula:

$$\text{Radiação} = \text{Temperatura}^4 * \text{Constante} \quad (1)$$

Por seus estudos, Boltzmann foi chamado o pai da termografia infravermelha. Neste tipo de técnica, um pequeno processador dentro do aparelho usa esta fórmula para prever com precisão a temperatura do alvo. A primeira patente de um pirômetro ótico surge anos mais tarde, em 1901 (LIRA, 2003).

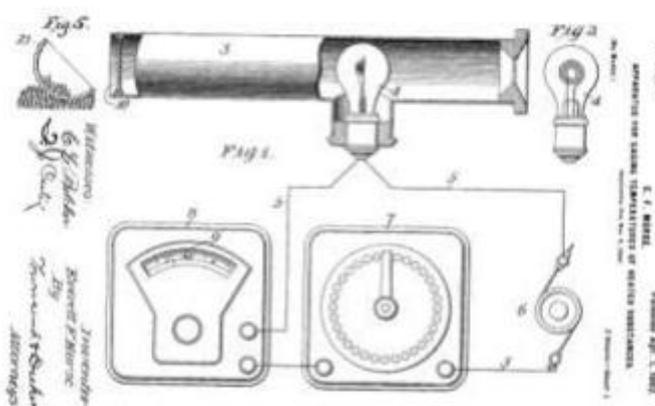


Fig. 2. 4 - Primeiro pirômetro ótico. (Galvão Junior, 2013)

Em 1913, L. Bellingham apresentou um método para detectar a presença de icebergs e navios a vapor usando um espelho e uma termopilha. O seu termômetro de infravermelho apresenta melhorias em relação ao pirômetro ótico porque com ele era possível detectar objetos com temperatura inferior à temperatura ambiente (GALVÃO JUNIOR, 2013).

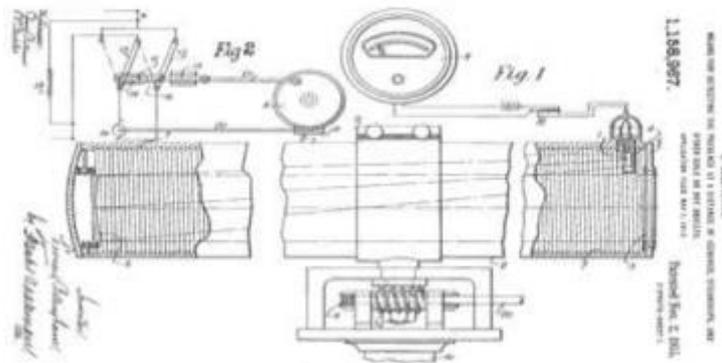


Fig. 2. 5 - Termômetro de infravermelho. (Galvão Junior, 2013)

A evolução de aparelhos de detecção de temperatura em objetos surgiu ao longo do século XIX, em que foram desenvolvidos Termômetros de Infravermelho de curto alcance utilizando termopilhas, termopilhas em miniatura, e cristais termoelétricos como sensores de infravermelhos. Esta evolução permitiu o desenvolvimento da atual câmara termográfica, que já sofreu inúmeras alterações desde a sua versão original.

Atualmente, a câmera capta a radiação infravermelha emitida pelo corpo observado através de dois tipos de circuitos integrados. São eles o CCD (charge-coupled device) e o CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor).

Primeiramente será explicado o funcionamento do CCD, figura 2.7. A imagem é colhida por uma matriz formada de inúmeros fotossensores, cada um deles capta a luz que se projeta sobre ele, esta corresponderá a um pixel na imagem. Cada um desses fotossensores armazena um valor de intensidade luminosa, que não pode ser lido diretamente. A leitura é feita na extremidade do CCD depois que as cargas acumuladas nos fotossensores se deslocam para lá (Bauermann, 2008).

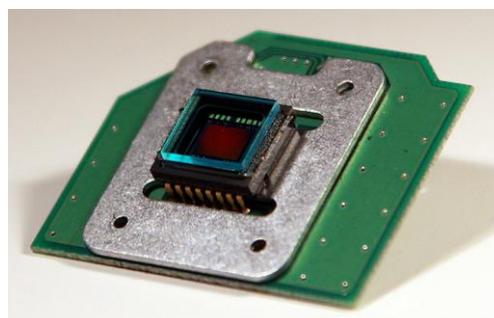


Fig. 2. 6 - Exemplo de um CCD.

O CMOS, figura 2.8, tem uma função semelhante ao CCD, mas tem como vantagem a leitura direta dos sinais. Isso faz com que a conversão da imagem seja mais rápida. No

entanto, parte da luz que chega não é absorvida pelo sensor, o que pode gerar imperfeições e ruídos. A câmera utilizada no trabalho tem como circuito integrado o CMOS.



Fig. 2. 7 – Exemplo de um CMOS.

## 2.2.2 CONCEITOS BÁSICOS

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 objeto capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele em qualquer comprimento de onda. Outra característica importante é que nenhuma superfície emite mais radiação que um corpo negro à mesma temperatura. Este corpo é um corpo teórico. O corpo real é capaz de emitir uma determinada parte de energia e o parâmetro que define essa emissão é a emissividade ( $\epsilon$ ).

A emissividade é a capacidade de um corpo emitir energia. Para defini-la utiliza-se o corpo negro como referência, sua emissividade é 1 e as outras emissividades são calculadas em relação ao percentual que equivalem a ele. Chegando ao mínimo de zero. Portanto a emissividade obrigatoriamente estará entre o valor de 0 e 1.

Um corpo real tem uma emissão dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$W = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \quad (2)$$

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

A radiação térmica é a taxa de emissão de energia de um certo material, dada a sua temperatura. A radiação térmica está relacionada com a energia libertada devido às oscilações ou transições dos elétrons, átomos, íons ou moléculas mantidos pela energia interna do material. Todo material com temperatura acima do zero absoluto emite energia térmica.

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

Para o melhor funcionamento da câmera é preciso definir alguns parâmetros que poderão influenciar na radiação captada pela lente. Estes parâmetros serão determinados, para o presente trabalho, no próximo capítulo.

### 3 METODOLOGIA

O presente projeto será dividido em duas etapas que se entrelaçam para a consecução do objetivo desejado.

Na primeira, a caracterização do humping utilizando termografia por infravermelho realizar-se-á a partir de uma série de experimentos, que inicialmente terão como finalidade a definição dos limites superiores de velocidade e corrente de soldagem para o sistema TIG a ser utilizado, sem que haja a formação do humping.

Para isso serão produzidos cordões de soldas que variam, para a sua produção, a velocidade e a corrente simultaneamente. Após esses experimentos, será possível definir a velocidade e a corrente máxima com as quais o humping começa a acontecer. Na realização dos ensaios é 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).

O sistema de soldagem utilizado comportará uma mesa posicionadora com movimento linear, acionada por um motor de passo, uma fonte de soldagem TIG eletrônica e uma tocha com refrigeração líquida, todos disponíveis no laboratório GRACO (Grupo de Automação e Controle) da Universidade de Brasília (UnB).

O sensoriamento será realizado por uma câmera termográfica e um medidor de corrente. Os sistemas de soldagem e de sensoriamento serão controlados por um software desenvolvido em Labview, que grava os parâmetros velocidade e corrente de soldagem em arquivos digitais.

Os principais parâmetros de soldagem descritos abaixo na tabela 3 - 1 são definidos com base em estudos anteriormente realizados (PALACÍOS, 2010) e testados experimentalmente, com a finalidade de se encontrar os melhores valores para a produção de um cordão contínuo de alta produtividade.

Tabela 3 - 1 Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG.

<b>PARÂMETROS FIXOS</b>	
Material	Aço 1020 de 300 x 50 x 6mm
Tipo de gás	100% Argônio
Vazão de gás	13 l/min
Eletrodo	Negativo EWTh-2; 1/8"

Taxa de aquisição da câmera ( <i>frames per second</i> -fps)	60 fps
Distância eletrodo-chapa ( <i>gap</i> )	3 mm
Tensão de Soldagem ( V )	17,1 V
<b>PARÂMETROS VARIÁVEIS</b>	
Velocidade de Soldagem ( V )	De 4 a 16,3 mm/s com aceleração de 0, 5 mm/s <sup>2</sup>
Corrente de Soldagem ( A )	De 40 a 286 A com aceleração de 10 A/s <sup>2</sup>

Utilizando-se os parâmetros acima citados, é possível realizar o experimento da primeira etapa da forma que será descrita nos capítulos seguintes.

Na segunda etapa, com o conhecimento da velocidade crítica em que ocorre o humping e da corrente máxima que poderá ser utilizada, serão feitas duas combinações:

- a primeira consiste em produzir cordões de soldas feitos com velocidades variando entre 1mm/s abaixo da velocidade crítica e 1,5mm/s acima da velocidade crítica; e
- a segunda consiste em produzir cordões de soldas feitos com a corrente entre 25A abaixo da corrente crítica e 15A acima da corrente crítica encontrada na primeira fase.

A alteração dessas variáveis far-se-á com auxílio de dois mecanismos:

- o robô da ABB R2000, responsável pela determinação da velocidade; e
- a fonte Migatronica BDH20, responsável pela variação de corrente.

Para essa etapa são criados novos parâmetros, conforme mostra a tabela 3 – 2, baseados nos resultados obtidos no experimento da primeira etapa.

Tabela 3 - 2 Parâmetros de soldagem considerados no processo TIG.

<b>PARÂMETROS FIXOS</b>	
Material	Aço 1020 de 300 x 50 x 6mm
Tipo de gás	100% Argônio
Vazão de gás	13 l/min
Eletrodo	Negativo EWTh-2; 1/8"
Taxa de aquisição da câmera ( <i>frames per second</i> -fps)	60 fps
Distância eletrodo-chapa ( <i>gap</i> )	3 mm
Tensão de Soldagem ( V )	Automática
<b>PARÂMETROS VARIÁVEIS</b>	
Velocidade de Soldagem ( V )	-1mm/s da velocidade critica até +1,5 mm/s da velocidade critica
Corrente de Soldagem ( A )	-25 A da corrente máxima até +15 A da corrente máxima

Utilizando-se os parâmetros acima citados, é possível realizar o segundo experimento da forma que será descrita nos capítulos seguintes.

### **3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

O presente experimento, como explicado acima, foi realizado em duas etapas. Na primeira foi preciso o auxílio dos seguintes equipamentos:

- a fonte de soldagem;
- o cilindro de gás de proteção;
- a câmera de infravermelho;
- a tocha de soldagem;
- a mesa linear; e
- o sistema de aquisição de dados.

Na segunda etapa foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a fonte de soldagem;
- a cilindro de gás de proteção;
- a câmera de infravermelho
- a tocha de soldagem;
- o robô ABB R2000;
- o sistema de controle do robô; e
- o sistema de aquisição de dados.

Todos esses equipamentos serão descritos mais detalhadamente abaixo.

#### **3.1.1 PRIMEIRA ETAPA**

Para a execução das soldas pelo processo GTAW será utilizada uma fonte de soldagem multiprocessal, denominada INVERSAL 450, em corrente contínua, com polaridade direta (PALACÍOS, 2010). Ao longo do processo ocorrerá simultaneamente uma variação de corrente, valor definido por  $\alpha$ , e uma variação de velocidade, valor definido por  $\beta$ .



Fig. 3. 1 - Fonte Fronius INVERSAL 450 de soldagem.

A corrente e a velocidade serão medidas por meio de um sistema de aquisição que visualiza estas duas variáveis em função do tempo, ao longo do processo de soldagem. O software foi desenvolvido no ambiente de programação LabVIEW®, da National Instruments (National Instruments, 2006), fornecido pelo Laboratório de Soldagem do Grupo de Automação e Controle (GRACO) da Universidade de Brasília (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 soldar (PALACÍOS, 2010).

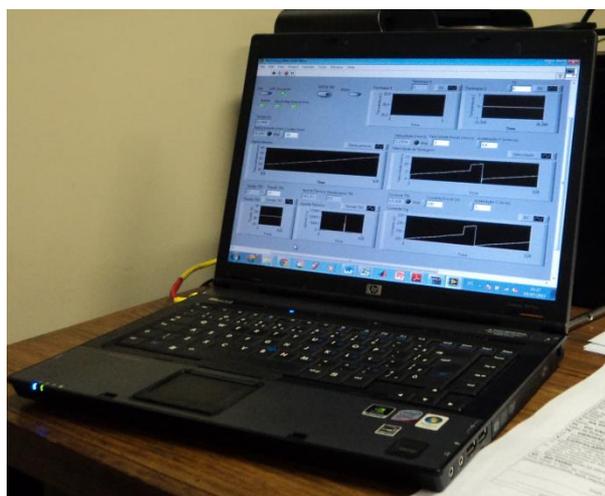


Fig. 3. 2 – Computador com o LabView em funcionamento.

A mesa linear que será utilizada apresenta um movimento unidimensional. Isso irá aumentar a precisão dos resultados, uma vez que a aquisição das imagens infravermelhas será

realizada em um ponto fixo. Para que a posição do arco não mude durante o processo, a tocha ficará fixa e a peça a ser soldada será movimentada pela mesa.



Fig. 3. 3 - Mesa posicionadora com a tocha.

Para controlar a velocidade, o sentido do giro do motor e o tempo do processo, usa-se um micro-controlador (PIC16C63A). O sistema permite a utilização da velocidade em uma faixa de 1 a 16 mm/s, que atende às velocidades requeridas no processo TIG (PALACÍOS, 2010). Neste trabalho, o espectro de variação de velocidade será menor, pois a velocidade inicial será 4mm/s.

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  $\mu\text{m}$  no espectro eletromagnético (PALACÍOS, 2010).



Fig. 3. 4 - Câmera termográfica FLIR A 40.

### 3.1.2 SEGUNDA ETAPA

O cilindro de gás de proteção, a câmera de infravermelho, a tocha de soldagem e o sistema de aquisição de dados, utilizados em ambas as etapas, já foram descritos acima. Neste capítulo apresentar-se-ão apenas os materiais que diferem da primeira etapa.

Para a execução das soldas pelo processo GTAW foi utilizada uma fonte de alta tensão, denominada Migatronik BDH320 (figura 3.5), em corrente contínua. A cada espaço pré-definido<sup>1</sup> ocorrerá uma variação de corrente, valor definido por  $\alpha$ , e esta será aplicada com auxílio do visor da própria fonte (figura 3.6).



Fig. 3. 5 - Fonte Migatronik BDH 320 de soldagem.



Fig. 3. 6 – Visor da fonte utilizada na segunda etapa.

<sup>1</sup> No caso específico foi de 240 mm.

A movimentação da tocha será realizada pelo robô ABB R2000 (figura 3.7). Ele possui 6 graus de liberdade, possibilitando movimentação nos eixos X, Y e Z e rotação em relação aos mesmos, podendo chegar a uma velocidade de 1000 mm/s.



Fig. 3. 7 – Robô ABB R2000.

A movimentação do robô pode ser feita por meio de um joystick (figura 3.8) ou por meio de um programa que transfere as informações para a memória do robô (figura 3.9).

Nesse trabalho, utilizou-se o joystick para posicionar-se o robô sobre a placa a ser soldada, a fim de obter-se a leitura das coordenadas iniciais da operação. Após a aquisição desses dados, eles são inseridos no programa que controla o robô, com fins a execução do movimento de soldagem<sup>2</sup>. O programa responsável por essa movimentação encontra-se descrito no Anexo 1 – Programa de Controle da Soldagem.



Fig. 3. 8 – Joystick responsável pela movimentação do robô.

---

<sup>2</sup> A execução por parte do robô trará estabilidade ao processo de soldagem.



Fig. 3. 9 – Computador conectado ao robô. Através dele se transfere o programa de movimentação.

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo das imagens capturadas durante o processo foi realizada com a utilização do programa FLIR R&D software. De posse da imagem, aplica-se o algoritmo abaixo (figura 3. 10) que permite quantificar as variações da área para cada isoterma.

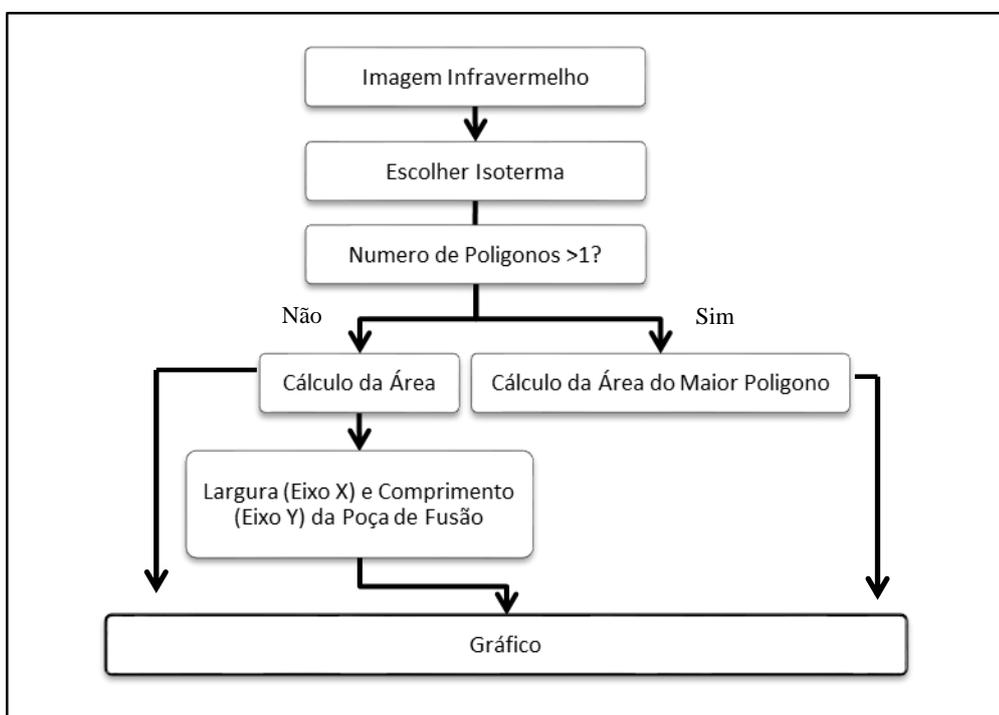


Fig. 3. 10 – Algoritmo de pós-processamento das imagens de infravermelho

O algoritmo orienta o pesquisador a selecionar a isoterma a estudar, identificando em seguida o número de polígonos, fase onde se pode confirmar o humping<sup>3</sup>. No prosseguimento, o sistema calcula as áreas e o comprimento dos eixos horizontal e vertical de cada polígono, para entender-se melhor a formação do erro na solda. No caso da ocorrência de mais de um polígono, aquele de maior área é utilizado para fins de cálculo. Os resultados obtidos são apresentados em gráficos quantitativos.

---

<sup>3</sup> Definem-se polígonos como as regiões fechadas, encontradas na imagem, delimitadas pelas isotermas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Projeto de Graduação 1 foi realizado um experimento base. A partir desses dados coletados foram feitas as escolhas dos parâmetros para o Projeto de Graduação 2.

Na primeira fase do processo foram simultaneamente variadas a velocidade e a corrente, deixando a tensão em um valor constante de 17,5 V. Cabe esclarecer que este valor é selecionado pela própria fonte, pois ao eleger-se o tipo de soldagem que será realizada, bem como os outros parâmetros, a fonte é capaz de fazer uma média da melhor tensão a ser trabalhada nestas condições.

Também foi realizada a filmagem com uma câmera termográfica. Nela será possível verificar as temperaturas da poça de fusão no momento da solda.



Fig. 4. 1 - Imagem da chapa soldada com a câmera FLIR termográfica.

Foram obtidos seis cordões de solda, cujos processos de produção serão descritos seguir:

- Primeiro cordão: a soldagem ficou defeituosa, em razão de que a ponta do eletrodo de tungstênio já estava desgastada desde o começo da soldagem, causando o humping no início do cordão. Para fins de análise deste projeto, tal cordão não será considerado para estudo.

- Segundo cordão: o eletrodo de tungstênio já estava devidamente afiado. O início do processo de soldagem ficou adequado, considerando-se o padrão visual. No entanto, a vazão de gás estava baixa, em cerca de 13 l/min e isso acabou causando imperfeições no cordão, não sendo possível visualizar o defeito estudado.

- Terceiro cordão: com o eletrodo de tungstênio afiado e a vazão do gás alterada para 15 l/min, obteve-se um cordão perfeito até determinada velocidade e corrente. No prosseguimento do processo e com níveis mais elevados de velocidade e corrente, formou-se o humping a ser estudado.



Fig. 4. 2 - Imagem dos três cordões de solda citados no texto. A ordem de soldagem foi feita de acordo com a numeração da imagem.

A partir do terceiro cordão, foi possível definir-se a melhor combinação (eletrodo afiado e vazão de 15 l/min) para a realização do estudo do humping em uma chapa de 6 mm de espessura do aço 1020.

Segue-se o estudo com a realização de mais três soldas, visando encontrar o ponto em que esse efeito ocorre. Nesta fase do processo, a solda dos três cordões foi iniciada a uma velocidade e corrente semelhantes<sup>4</sup>.



Fig. 4. 3 - Imagem dos três últimos cordões de solda realizados.

<sup>4</sup> Valores: velocidade de 4 mm/s e corrente de 50 A.

Conforme mostrado na figura 4. 3, é possível observar que o surgimento do humping ocorre com aproximadamente 5 centímetros de cordão de solda. Este valor será analisado nos gráficos de corrente, de velocidade e de aporte térmico apresentados logo a seguir, donde poder-se-ão levantar os valores no momento da ocorrência do efeito.

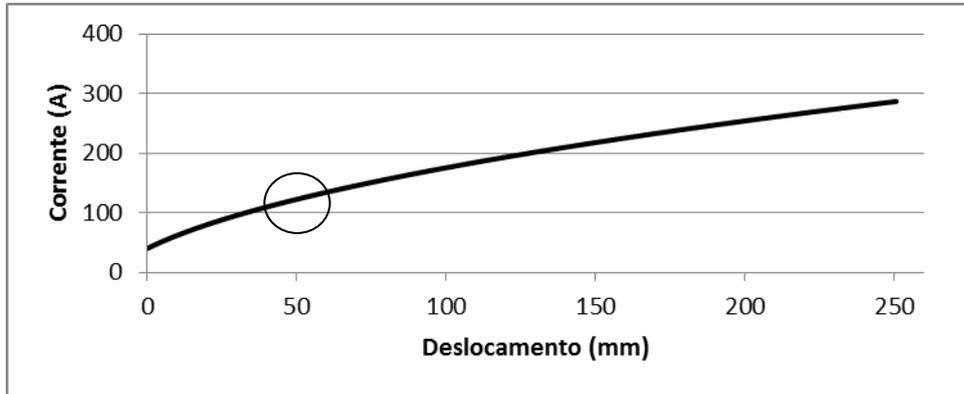


Fig. 4. 4 - Gráfico que associa descolamento com a variação de corrente.

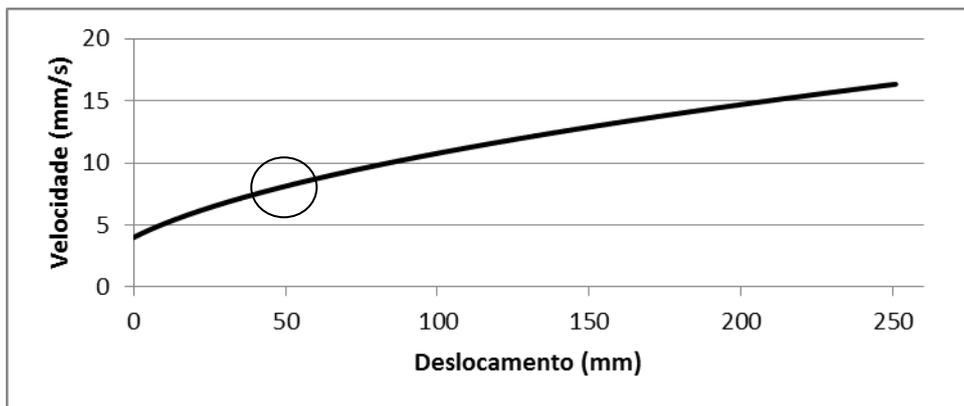


Fig. 4. 5 - Gráfico que associa descolamento com a variação de velocidade.

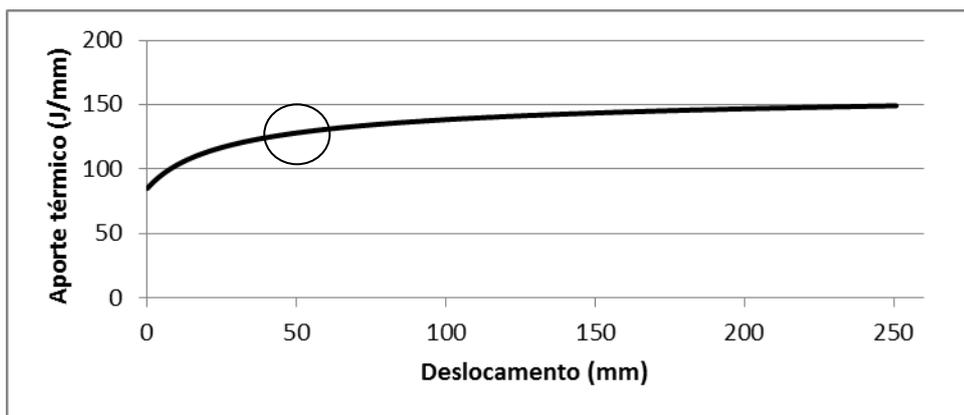


Fig. 4. 6 - Gráfico que associa descolamento com a variação de aporte térmico.

Analisando os gráficos acima, é possível encontrar o momento aproximado de surgimento do humping. Para a corrente, levanta-se o valor de 125 A; para a velocidade, cerca de 8 mm/s; e para o aporte término, em torno de 130 J/mm.

Com os valores acima encontrados, foi possível definir os parâmetros com os quais foram realizadas as medições na segunda etapa. A tabela 4 - 1 relaciona os valores utilizados na experimentação aos valores encontrados no efeito humping:

Tabela 4 - 1 Relação entre o efeito humping e a faixa de experimentação

Ocorrência do Efeito Humping	Faixa de Experimentação
Velocidade	
8 mm/s	7 mm/s a 9,5 mm/s
Corrente	
125 A	100 A a 140 A

O cordão de solda foi projetado para ter 240mm, variando a velocidade a cada 40mm em um valor de 0,5mm/s. Portanto, as velocidades de estudos foram 7mm/s, 7,5mm/s, 8mm/s, 8,5mm/s, 9mm/s e 9,5mm/s.

Os três primeiros cordões de soldas foram feitos com 100A, 110A e 120A. Conforme mostrado na figura 4.7, o humping não ocorreu em nenhuma combinação. O único defeito detectado ocorreu na soldagem de número 2, em razão de uma baixa vazão de gás.

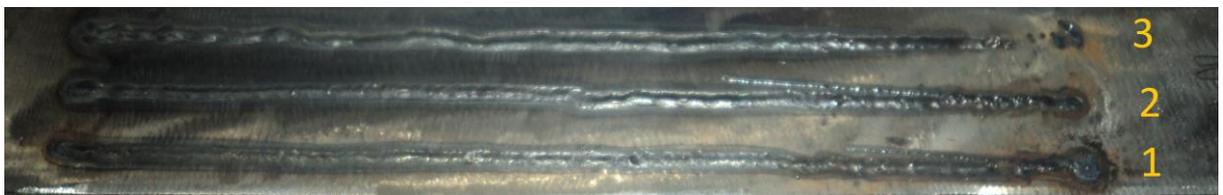


Fig. 4. 7 - Imagem dos três cordões de solda citados no parágrafo acima. A ordem de soldagem foi feita de acordo com a numeração da imagem.

Os dois cordões de soldas apresentados a seguir, foram produzidos com 130A e 140A. Conforme mostrado na figura 4.8, a 130A, o humping ocorreu na segunda combinação. Portanto, a 7,5mm/s começa o defeito no cordão. No último cordão, como a corrente já começa muito elevada, com 140A, a solda desde o início apresenta-se com defeito, conforme mostrado na figura 4.9.



Fig. 4. 8 – Cordão de solda com corrente de 130A.



Fig. 4. 9 – Cordão de solda com corrente de 140A.

Após definir quando ocorre o humping, serão analisadas as imagens obtidas pela câmera termográfica. A partir delas, será possível definir a temperatura em que a poça se solidifica, bem como o tamanho que a mesma fica após o processo.

A figura 4.10 mostra três momentos do cordão de solda. Na imagem 1, não há o aparecimento do defeito humping. Na imagem 2, observa-se o início do descolamento da poça de fusão. Na imagem 3, tem-se o surgimento do humping.

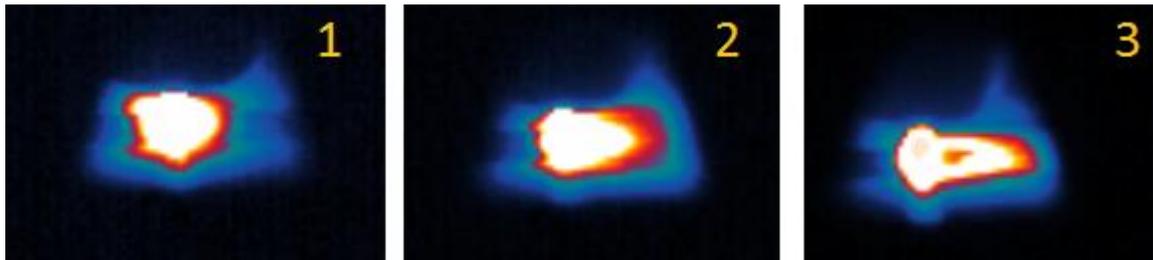


Fig. 4. 10 - Imagem termográfica do cordão de solda.

#### 4.1 IMAGENS ANALISADAS

Nesse capítulo serão analisadas 6 imagens. Cada imagem irá gerar um perfil térmico da poça de fusão.

O número de polígonos e o tamanho dos pixels de cada imagem permitirão a geração de três gráficos, identificados logo abaixo, tendo sido empregado nessa análise o algoritmo de pós-processamento das imagens de infravermelho, apresentado em capítulo anterior:

- O número de polígonos em cada imagem;
- A largura e o comprimento do cordão; e
- A área dos cordões de solda.

Após esses gráficos, será possível traçar um novo gráfico com a caixa de tolerância entre corrente e velocidade antes que surja o humping.

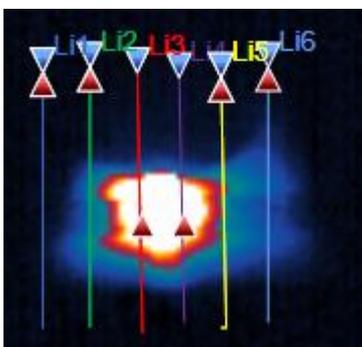


Fig. 4. 11 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 – 2.

Tabela 4 - 2 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 11.

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	50
Velocidade (mm/s)	4
Aporte térmico (J/mm)	75
Eixo X (pixels)	21
Eixo Y (pixels)	16

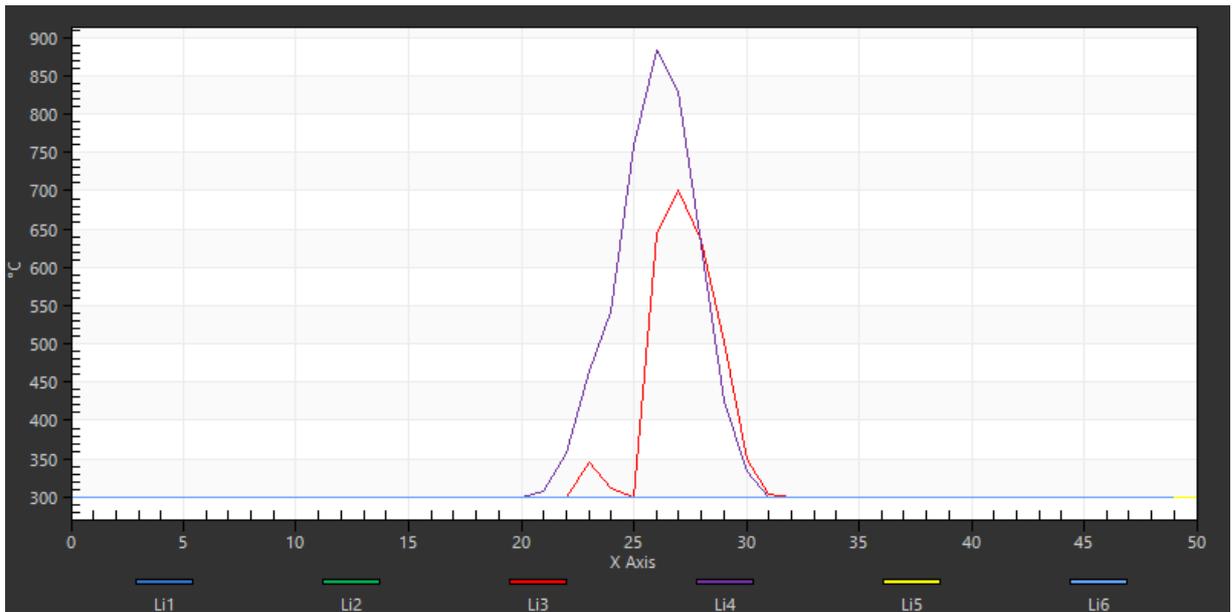


Fig. 4. 12 – Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

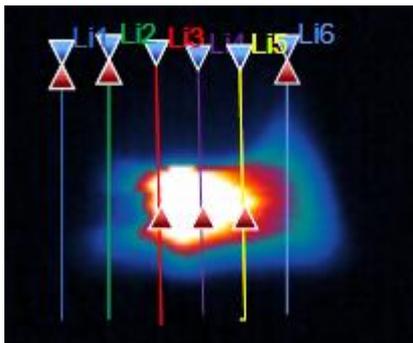


Fig. 4. 13 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 -3.

Tabela 4 - 3 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 13.

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	81
Velocidade (mm/s)	6
Aporte térmico (J/mm)	100
Eixo X (pixels)	28
Eixo Y (pixels)	15

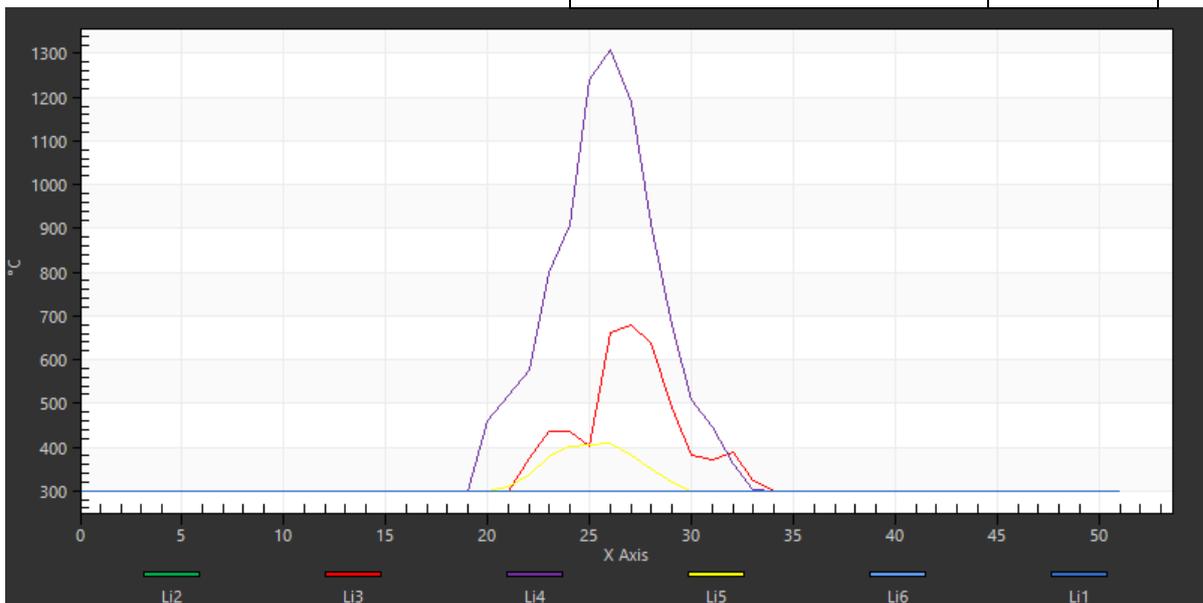


Fig. 4. 14 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

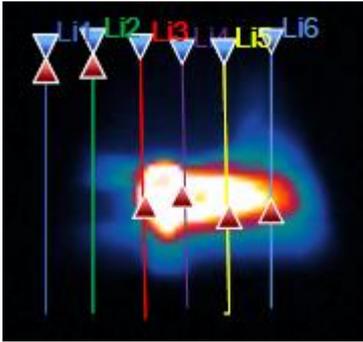


Fig. 4. 15 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 -4.

Tabela 4 - 4 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 15.

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	122
Velocidade (mm/s)	8
Aporte térmico (J/mm)	125
Eixo X (pixels)	32
Eixo Y (pixels)	15

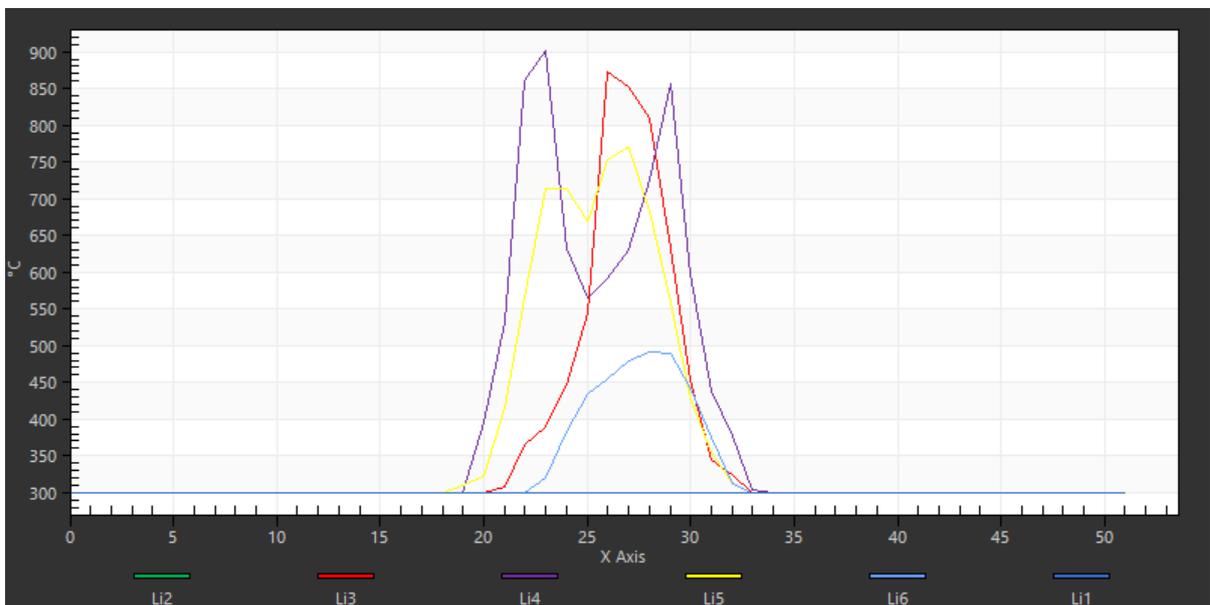


Fig. 4. 17 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

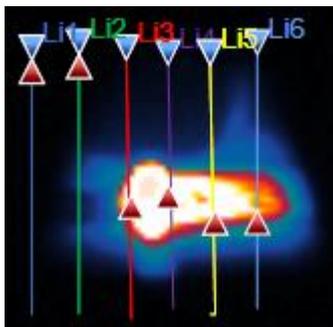


Fig. 4. 16 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 - 5.

Tabela 4 - 5 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 16

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	163
Velocidade (mm/s)	10
Aporte térmico (J/mm)	150
Eixo X (pixels)	28
Eixo Y (pixels)	14

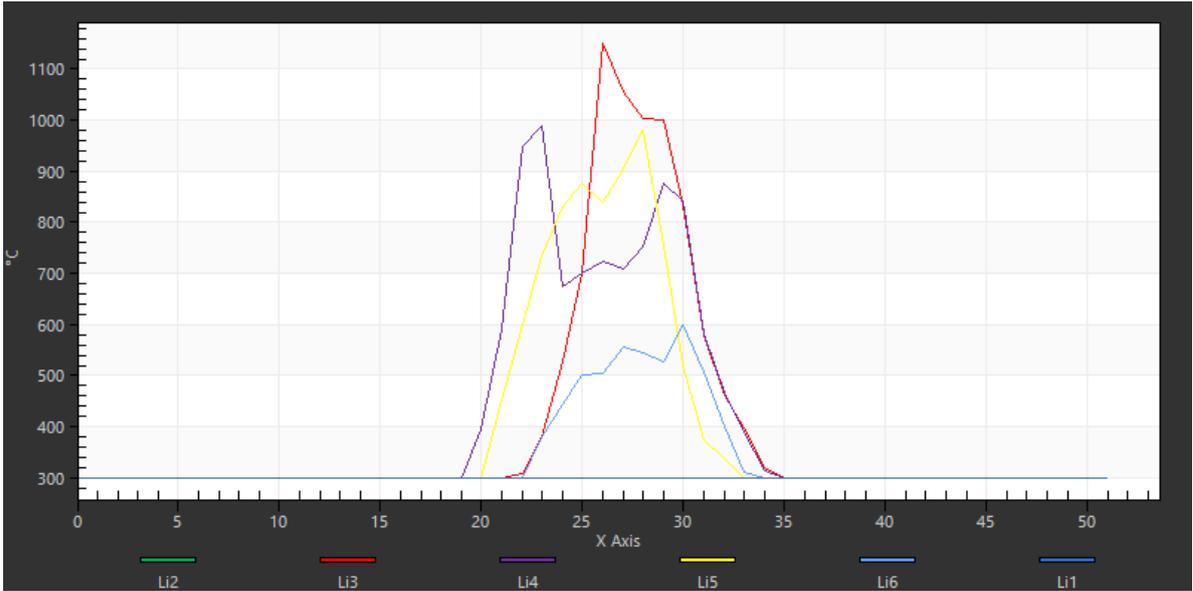


Fig. 4. 19 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

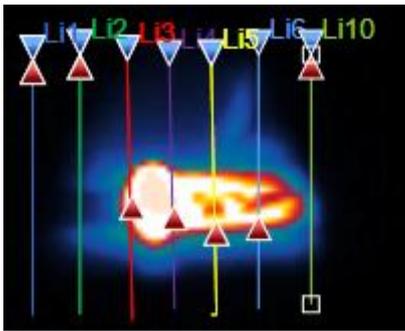


Fig. 4. 18 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 -6.

Tabela 4 - 6 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 19

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	204
Velocidade (mm/s)	12
Aporte térmico (J/mm)	150
Eixo X (pixels)	42
Eixo Y (pixels)	17

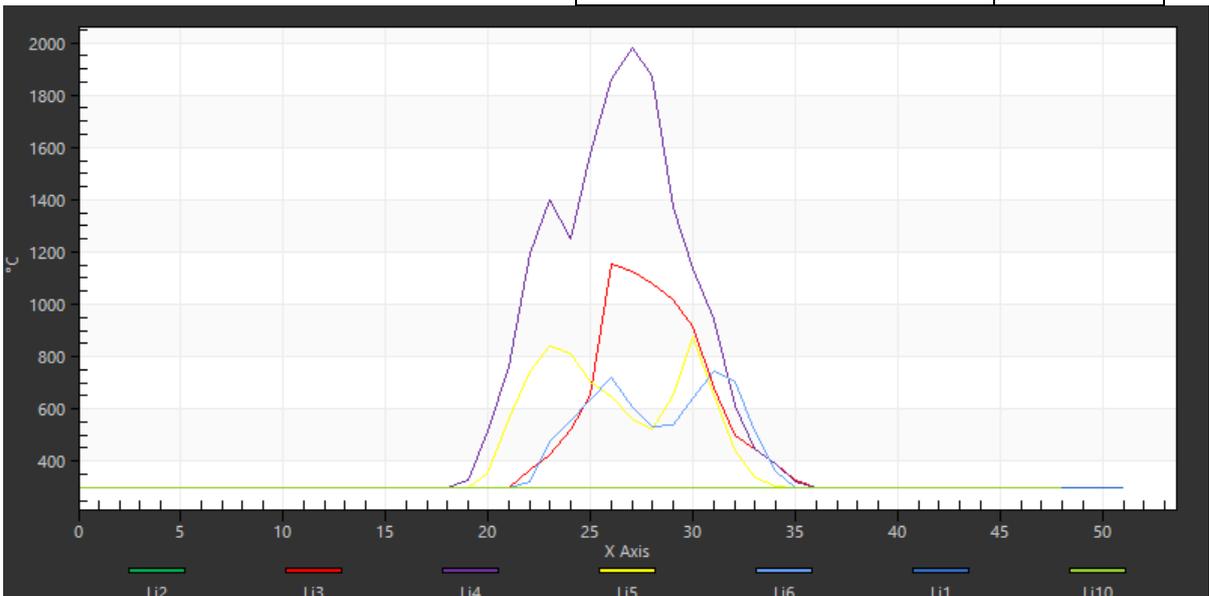


Fig. 4. 20 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

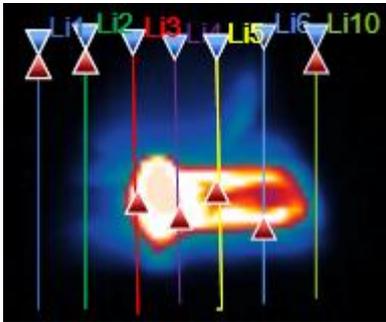


Fig. 4. 21 - Perfil térmico da poça de fusão para um cordão depositado utilizando os parâmetros da tabela 4 -7.

Tabela 4 - 7 Parâmetros utilizados no cordão de solda da figura 4. 21

Parâmetros de soldagem (TIG)	
Tensão (V)	17,5
Corrente (A)	240
Velocidade (mm/s)	16
Aporte térmico (J/mm)	150
Eixo X (pixels)	40
Eixo Y (pixels)	17

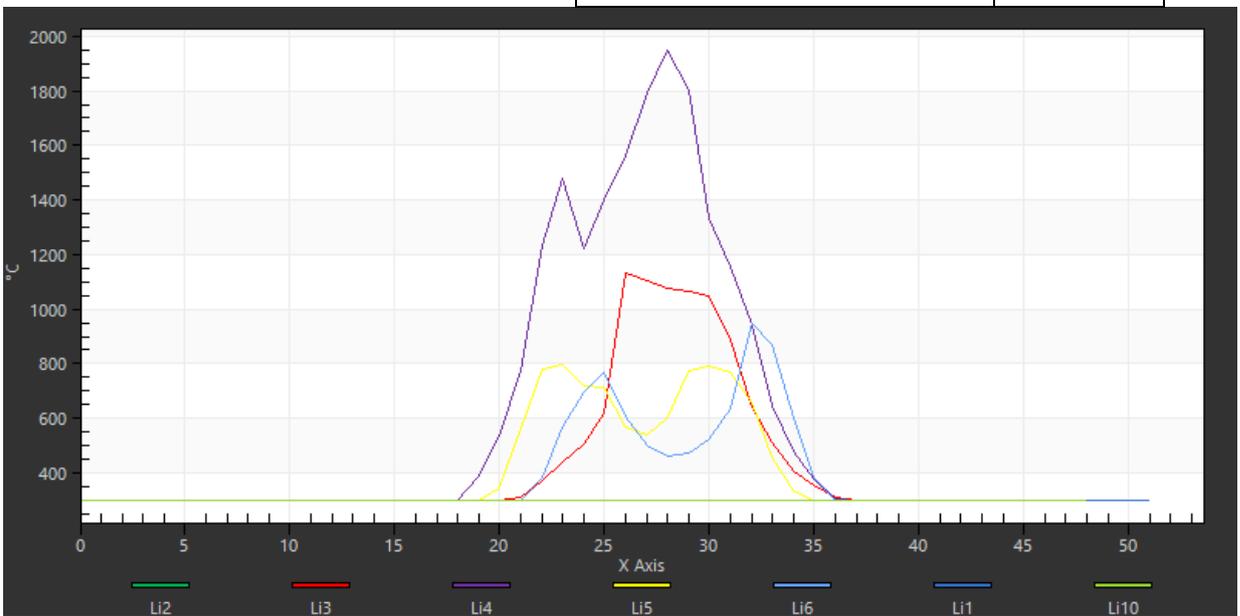


Fig. 4. 22 - Gráfico obtido no programa FLIR R&D referente a Comprimento de linha em Pixels x Temperatura em graus Celsius.

Após analisar as seis imagens, com auxílio dos gráficos de perfil térmico, é possível evidenciar-se que nas duas primeiras existe apenas um polígono visível; nas seguintes existem dois polígonos detectáveis, conforme mostra o gráfico da figura 4.23.

Nas imagens com dois polígonos ocorre o efeito humping no cordão.

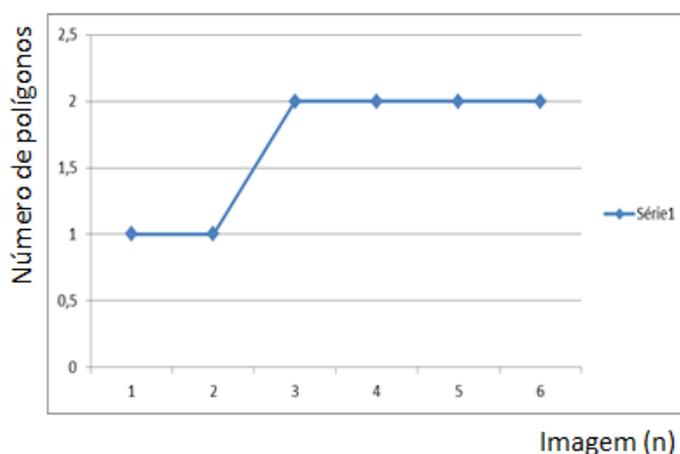


Fig. 4. 23 – Gráfico de números de polígonos obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo.

Ao analisar a figura 4. 24 percebe-se que a partir da terceira imagem, o crescimento do eixo vertical e horizontal ocorre de maneira irregular. Isso se dá em razão de um alongamento na poça de fusão que causará o humping posteriormente.

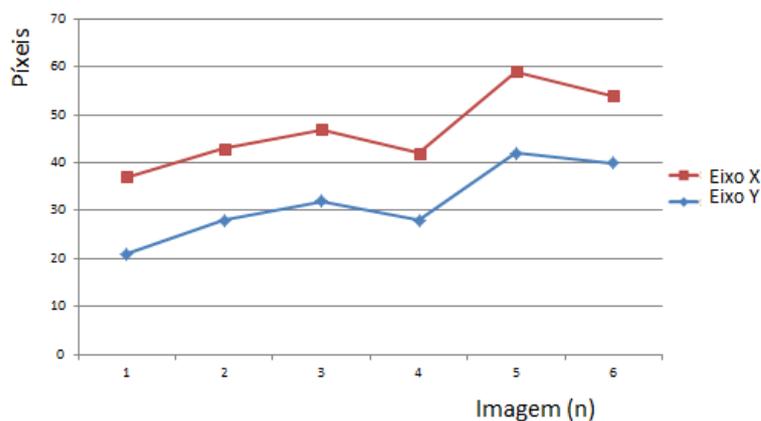


Fig. 4. 24 – Gráfico de pixels obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo.

O mesmo ocorre com o gráfico obtido na figura 4. 25. Nela, percebe-se que as áreas da poça de fusão crescem de maneira irregular, pois o humping que se produz acaba dividindo-a.

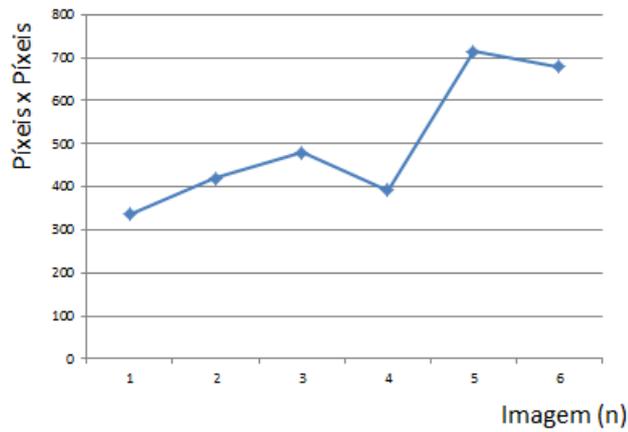


Fig. 4. 25 – Gráfico da área do maior polígono em pixels, obtido na avaliação das seis imagens referidas inicialmente no capítulo.

Ao fim e ao cabo, após todos os estudos realizados, é possível criar-se um gráfico, apresentado na figura 4. 26, mostrando a tolerância que pode ser admitida entre a variação de corrente e a variação da velocidade, onde não ocorra o humping.

Nele identifica-se que das combinações utilizadas, aquelas que estão abaixo de 120A não terão o surgimento do humping.

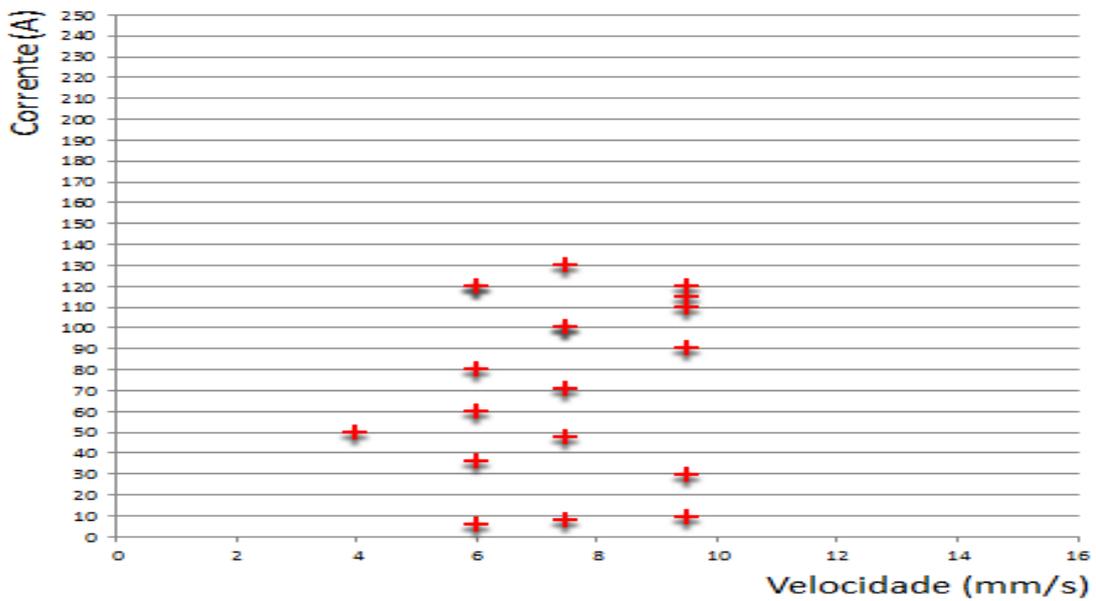


Fig. 4. 26 – Tolerância obtida entre corrente e velocidade antes de ocorrer o Humping.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho examinou a soldagem TIG e a formação de um defeito em seu cordão conhecido como humping.

Foram realizados estudos com o objetivo de analisar o surgimento desse efeito no cordão de solda, por meio da captura de imagens em uma câmera infravermelha, além da comparação de outros parâmetros.

A metodologia utilizada analisou as maiores correntes e as maiores velocidades possíveis de serem usadas na soldagem em estudo, sem causar o defeito acima mencionado.

O monitoramento da poça de fusão em tempo real, através da câmera termográfica, permitiu a detecção imediata do humping. Com isso seria possível parar o processo e recomeçar com outra combinação mais favorável.

A realização do procedimento experimental poderá contribuir futuramente para o desenvolvimento de soluções para o defeito humping, tornando a soldagem TIG mais eficiente e eficaz, ademais de econômica, inserindo-a de maneira mais competitiva no mercado.

Ao mesmo tempo, admite-se que poderão ser feitas pesquisas estudando formas de reduzir o seu surgimento, retardá-lo ou mesmo extingui-lo.

O trabalho atinge, então, o objetivo proposto quando de sua idealização, que era o de caracterizar o surgimento do humping através do monitoramento do cordão de solda, via câmera infravermelha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcoverde Júnior, D.A., Motta, D.S. **Desenvolvimento do sistema de monitoramento remoto e aquisição de dados de uma fonte de soldagem didática**. Salvador, 2011.
- Bauermann, G. **O que são sensores CCDs e como eles funcionam?**. Santa Maria, 2008.
- Bauermann, G. **CCD ou CMOS: qual a diferença?**. Santa Maria, 2008.
- Brioschi, M.L. **A História da Termografia**. São Carlos, 2013.
- Fognolo, J.B. **Apostila de Introdução à Processos e Metalurgia da Soldagem**. Campinas, 2011.
- Gioia, A.L.S., Silva Júnior, I.F. **Metodologia de Medição de Índices de Produtividade em Soldagem de Tubulações em Obras Industriais**. São Paulo, 2008.
- Galvão Junior, N. **Apostila curso de termografia**. São Paulo, 2013.
- Lira, F.A. **Metrologia na indústria**. São Paulo, 2003.
- Medeiros, R.C. **Apostila do Curso de Soldagem - Montagem Industrial**. São Paulo, 2005.
- Modenesi, P.J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte, 2009.
- Oliveira, M.A. **Estudo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame para Aplicação em Revestimentos Metálicos**. Florianópolis, 2001.
- Palacios, A.M.G. **Uso de Técnicas de Termografia para Detecção de Descontinuidades no Processo GTAW Através do Monitoramento da Poça de Fusão**. Brasília, 2010.
- Qites, A.M., Dutra, J.C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Santa Maria, 1979.
- Sanches, R.A. **Defeitos em Solda Detectáveis Através de Inspeção Visual**. Manaus, 2010.
- Schwedersky, et al. **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos**. São Paulo, 2011.

**PROGRAMA DE CONTROLE DA SOLDAGEM**

COMMENT Ensaio Maira

V=100.0 MAX=1500.0

TCP 1

RECT COORD

FRAME 0

COMMENT Reset Weld Start

RESET OUTP 5

COMMENT Pwr Src ErrReset

SET OUTP 6

RESET OUTP 6 DELAY 0.01 S

COMMENT Sel Manual Mode

LET R 1 = 3

TRANSFER R 1 TO PORT NO 1

POS V=100.00% FINE X=1364.00 Y=-50.00 Z=605.88 Q1=1.000000 Q2=0.000000  
Q3=0.000000 Q4=0.000000

POS V=20.00% FINE X=1314.00 Y=-208.63 Z=555.88 Q1=1.000000 Q2=0.000000  
Q3=0.000000 Q4=0.000000

FRAME 3

POS V=10.00% C2 X=0 Y=0 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

SET OUTP 6

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=7.00% C2 X=0 Y=-040 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=7.50% C2 X=0 Y=-080 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.00% C2 X=0 Y=-120 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.50% C2 X=0 Y=-160 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.00% C2 X=0 Y=-200 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.50% C2 X=0 Y=-240 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=50.00% C2 X=15 Y=000 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=7.00% C2 X=15 Y=-040 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=7.50% C2 X=15 Y=-080 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.00% C2 X=15 Y=-120 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.50% C2 X=15 Y=-160 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.00% C2 X=15 Y=-200 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.50% C2 X=15 Y=-240 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT UNTIL INP 5 = 1

SET OUTP 5

POS V=50.00% C2 X=30 Y=000 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

WAIT UNTIL INP 5 = 1

POS V=7.00% C2 X=30 Y=-040 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=7.50% C2 X=30 Y=-080 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.00% C2 X=30 Y=-120 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=8.50% C2 X=30 Y=-160 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.00% C2 X=30 Y=-200 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

POS V=9.50% C2 X=30 Y=-240 Z=0 Q1=1.000000 Q2=0.000000 Q3=0.000000  
Q4=0.000000

RESET OUTP 5

WAIT UNTIL INP 5 = 1

CALL PROG 2000

STOP