

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGEM E MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO PARA AVALIAÇÃO DE DEPOSIÇÃO DE SOLDA

CRISTIANO RAFAEL STEFFENS*, BRYAN STEFAN GALANI PERNAMBUCO*, JUSOAN LANG MÓR*, SILVIA SILVA DA COSTA BOTELHO*, PAULO LILLES JORGE DREWS JUNIOR*

**Centro de Ciências Computacionais
Universidade Federal Do Rio Grande
Rio Grande, RS, Brasil*

Emails: cristianosteffens@furg.br, bryansgalanip@furg.br, jmor@furg.br, silviacb@furg.br, paulodrews@furg.br

Abstract— Understanding the welding process is a key challenge to improve weld deposition results. However, his full understanding is still open. In order to facilitate the study of the phenomena involved in the various modes of welding, a high-speed camera synchronized with a high-luminosity laser and a microcontrolled circuit were used to acquire the data during the process. Combining the acquired data such as current, voltage and wire speed, it was possible to obtain a dataset with different welding parameters, which made it possible to observe the critical aspects of welding. In addition, a software based on computer vision was created that allows the frame-by-frame analysis of a weld recording, providing statistical data and a structure that allows adding and displaying annotations for each frame. Therefore, through the mentioned tools the researchers will be able to evaluate the process and promote the development of hardware, software and control techniques related to the field.

Keywords— Weld, Shadowgraph, Computer Vision, Image Processing.

Resumo— Entender o processo de soldagem é um desafio-chave para aprimorar os resultados da deposição de solda. No entanto, seu completo entendimento permanece em aberto. Afim de facilitar o estudo dos fenômenos envolvidos nos diversos modos de soldagem, utilizou-se um arranjo composto de uma câmera de alta velocidade sincronizada com um laser de alta luminosidade, e um circuito micro-controlado para coletar os dados durante o processo. Combinando os dados adquiridos como corrente, tensão e velocidade do arame, foi possível obter um dataset com diferentes parâmetros de solda, que possibilitou a observação dos aspectos críticos da soldagem. Além disso, foi criado um software baseado em visão computacional que permite a análise quadro a quadro de uma gravação de solda, fornecendo dados estatísticos e uma estrutura que permite adicionar e mostrar anotações para cada quadro. Portanto, através das ferramentas citadas os pesquisadores poderão avaliar o processo e promover o desenvolvimento de hardware, software além de técnicas de controle relacionadas ao campo.

Palavras-chave— Solda, Perfilografia, Visão Computacional, Processamento de Imagem.

1 Introdução

A solda metálica desempenha um papel muito importante nas indústrias de manufatura e de construção. Controlar e entender o processo de solda são objetivos que vem sendo estudados há muitos anos (Committee and Olson, 1993). Kou (2003) destacam três tipos principais de processos de soldagem por fusão:

- Soldagem a Gás,
- Soldagem a arco elétrico,
- Soldagem por feixe de alta energia.

Para os ensaios feitos nesse artigo, utilizou-se o processo de Soldagem a arco elétrico FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*). Este trabalho difere de anteriores como Hong et al. (2016), uma vez que estes foram desenvolvidos ou aplicados com solda GMAW (*Gás-Metal Arc Welding*). FCAW é similar com o GMAW, porém, em função do uso de fluxo de soldagem, pode ser de 6 a 18% mais rápido do que o processo GMAW (Cardoso Junior et al., 2012).

O processo FCAW possui o eletrodo do arame tubular com fluxo envolto por dentro, protegendo

a solda da entrada de Oxigênio e Nitrogênio (Pohanish, 2003), que dificulta a oxidação e formação de bolhas na solda. Devido a sua similaridade com o GMAW também pode ser utilizado para todos materiais de quase qualquer espessura (Kou, 2003).

Quando utiliza-se FCAW no processo de soldagem, o soldador pode escolher entre 3 possíveis métodos de transferência do material para a peça de trabalho, que podem ser alternados ajustando dos valores de corrente e tensão (da Silva et al., 2017). Os métodos de transferência são:

- **Curto-Circuito**, em que o arame consumível é derretido na poça através de rápidos e sucessivos contatos, em cada curto-circuito os valores de corrente tendem a aumentar e os valores de tensão tendem a diminuir, extinguindo o arco e transferindo a gota para a poça (Souza et al., 2011);
- **Goticular ou Aerossol (Spray)**, é caracterizado por um fluxo contínuo de gotas finas e metal vaporizado que fluem do eletrodo para a peça de trabalho rapidamente, a medida que a corrente aumenta, o diâmetro da gota diminui causando um aumento na frequência

de transferência (Modenesi, 2007);

- **Globular**, é um modo de transferência entre o curto-circuito e o spray em que grandes gotas de arame líquido são desprendidas com baixa frequência da extremidade do eletrodo, devido principalmente a força gravitacional (Modenesi, 2007). O raio da gota pode ser até 1,5 vezes maior que o raio do arame.

Cada método de transferência tem suas limitações e deve ser cuidadosamente escolhido pelo soldador, a fim de obter os melhores resultados. Como por exemplo a transferência goticular que não deve ser utilizada para soldar chapas finas devido ao seu requisito de corrente elevada, enquanto a transferência por curto-circuito é geralmente utilizada para soldar chapas finas devido ao seu baixo nível de corrente e tensão. Já o modo de transferência globular é o mais indesejado, por apresentar muitos respingos, aquecimento elevado e menor qualidade da soldagem (Ramos, 2012).

2 Sistema de Aquisição

Com a finalidade de auxiliar no entendimento do processo de deposição, transferência e formação da poça de solda, utiliza-se uma câmera de alta velocidade *Phantom Miro 311*, fabricada pela *Vision Research Inc.*, um sistema de iluminação a laser de alta luminosidade *Cavilux* fabricado pela *Cavitar Ltd.* e um filtro óptico passa-banda para obter um conjunto de dados. A aquisição das imagens foi realizada utilizando duas técnicas para o imageamento: por perfilografia e o imageamento frontal. Para a aquisição dos dados foi utilizado um microcontrolador para armazenar e tratar os dados sobre grandezas elétricas do processo, dois transdutores de corrente e tensão e um encoder incremental, como pode ser observado na Figura 1.

2.1 Imageamento por Perfilografia

Um dos métodos utilizados para a aquisição das imagens foi o método de perfilografia (Rusu et al., 2011), que possibilita a observação dos contornos do chanfro de soldagem, fio consumível e poça de solda. Essa técnica consiste basicamente no posicionamento de uma câmera de alta velocidade sincronizada com um laser e um circuito microcontrolado como pode ser observado na Figura 2.

Devido ao alto brilho proveniente do arco elétrico, o laser deve ser posicionado de modo que exceda o brilho da solda. O feixe de luz emitido pelo laser é ampliado com o auxílio de lentes divergentes e convergentes (Ramos, 2012), iluminando apenas a região de interesse e gerando como entrada para a câmera a sombra do processo.

Neste experimento utilizou-se um comprimento de onda de 640 ± 10 nm, a uma frequên-

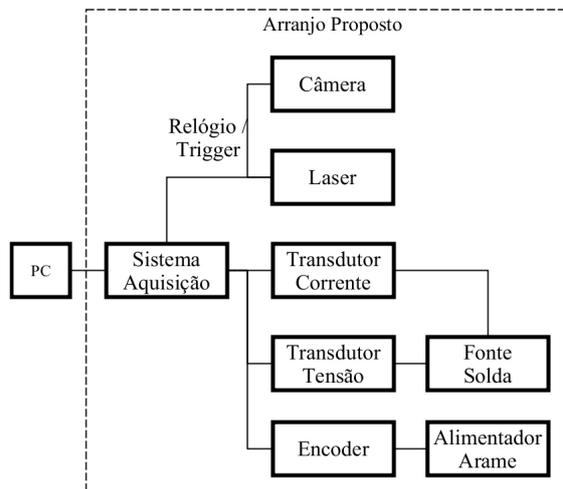


Figura 1: Abstração do arranjo utilizado para aquisição de imagem em sincronia com as grandezas elétricas do processo.

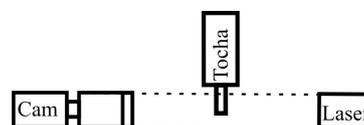


Figura 2: Técnica de imageamento utilizando perfilografia permite visualizar o contorno do arame, gota e poça. Sua aplicação é restrita a solda sobre chapa.

cia de 1 kHz ou 3 kHz, com um pulso de energia de 500 W, combinado com o filtro óptico passa-banda. A câmera também foi configurada a uma frequência de 1 kHz ou 3 kHz. As imagens adquiridas pelo imageamento por perfilografia facilitam o processamento digital, uma vez que elas estão em escala de cinza, normalmente preenchidas em preto (sombra do objeto) ou branco (luz do laser que passa pelo filtro e atinge o sensor da câmera) como pode ser observado na Figura 3.

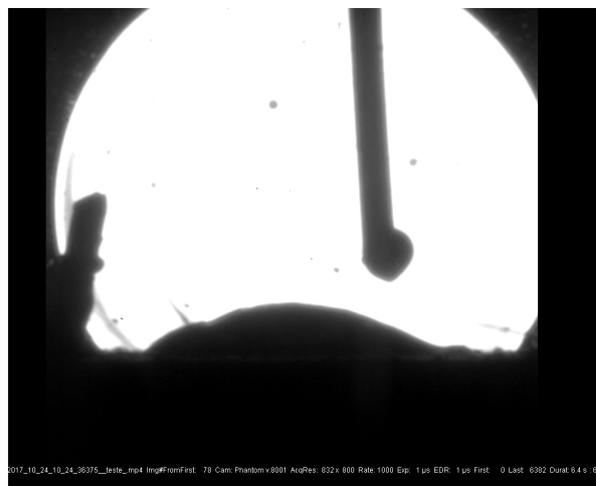


Figura 3: Imagem coletada pelo método de Perfilografia.

2.2 Imageamento Frontal

O outro método utilizado foi o imageamento frontal, que consiste na utilização tanto da câmera quanto do laser na parte frontal do processo de solda como observado na Figura 4, possibilitando uma visão real da transferência de solda e não de sua sombra. Essa técnica não é recomendada para processamento digital, devido á sua maior variação na escala de cinza, não focando no preto ou branco como pode ser visto na Figura 5.

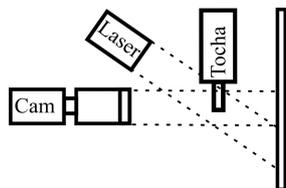


Figura 4: Técnica de imageamento utilizando iluminação frontal permite visualizar informação de brilho e desprendimento de gases. Permite visualização de soldagem dentro de chanfro.



Figura 5: Imagem coletada pelo método de imageamento frontal.

2.3 Circuito micro-controlado

O circuito micro-controlado é composto de um microcontrolador para armazenar e tratar os dados obtidos, dois transdutores sendo um para obter os valores de corrente e o outro o de tensão (Hüttner et al., 2016), e um encoder incremental que é capaz de converter a posição de uma rotação em uma saída digital através de abertura e fechamento dos contatos (Platt, 2012). Um circuito de condicionamento de sinais é aplicado para ajustar as entradas a níveis lógicos suportados pelo micro-controlador, além de sincronizar os dados coletados dos transdutores com um sinal de clock geral fornecido pela câmera.

3 Sistema de Análise de Dados

Para a construção do sistema de Análise de Dados utilizou-se a IDE (*Integrated Development Environment*) *QT Creator*, que é um ambiente de trabalho multiplataforma utilizado para desenvolver interfaces utilizando a linguagem de programação C++, criado pela empresa norueguesa *Trolltech*. A linguagem utilizada, C++ (Ellis and Stroustrup, 1990), foi inicialmente desenvolvida por Bjarne Stroustrup e tornou-se uma das linguagens comerciais mais populares desde os anos de 1990, devido ao seu grande desempenho e base de utilizadores. Diversas bibliotecas foram utilizadas nesse software, destacando-se *OpenCv* e a *GNU C Library - GLIBC*.

A Biblioteca OpenCV é utilizada principalmente para a área de visão computacional, possuindo módulos de processamento de imagens e vídeo, estrutura de dados, álgebra Linear, GUI (Interface Gráfica do Usuário) básica com sistema de janelas independentes, controle de mouse e teclado, além de mais de 350 algoritmos de Visão computacional como: filtros de imagem, calibração de câmera, reconhecimento de objetos, análise estrutural e outros (Itseez, 2015; Itseez, 2014).

Outra biblioteca utilizada foi a *GNU C Library- GLIBC* distribuída sob a licença *GNU Lesser General Public License*, que fornece implementações de funções estatísticas. As funções estatísticas básicas incluem rotinas para calcular a média, variância e desvio padrão. Funções mais avançadas permitem calcular desvios absolutos, inclinação e curtoses, bem como os percentis medianos e arbitrários. Os algoritmos usam relações de recorrência para calcular quantidades médias de maneira estável, sem grandes valores intermediários que podem causar um fluxo excessivo (Gough, 2009).

A ferramenta de visualização das imagens adquiridas contém algumas restrições gerais como:

- Os arquivos podem ter um número arbitrário de pontos de amostra;
- O menor número de amostras restringe o limite de todos os dados que são mostrados;
- Não há limites rígidos de tamanho de amostra implicados;
- A reprodução de vídeo só para quando o usuário clica no botão *stop*;
- Se um comentário for adicionado no mesmo quadro em que já existia outro, o mesmo será sobrescrito;
- Caso algum arquivo de dados não seja fornecido pelo usuário, o programa acusará sua falta através de uma mensagem.

Além disso, a ferramenta de visualização possui controle da velocidade de reprodução do vídeo (quadros por segundo), uma caixa de seleção que permite a sincronia dos valores do gráfico com o vídeo, um botão de começar e outro de parar, um botão de avançar 10 quadros e outro de retroceder 10 quadros, um botão para adicionar comentário no quadro (que ficará salvo no mesmo diretório do vídeo em um arquivo CSV (*Comma-separated values*), ou seja, com os valores separados por vírgula, facilitando o tratamento desse arquivo) e um último botão para remover todos comentários do vídeo (remove todas anotações do arquivo CSV).

O software também exibe estatísticas do vídeo e do ensaio como mostrado na Figura 7, incluindo o número limitante de dados do arquivo, a média e desvio padrão de corrente e tensão, a média de velocidade do arame, a correlação entre corrente e tensão, corrente e velocidade do arame, a autocorrelação de tensão e de corrente. Além destas variáveis, o software proposto computa dados do quadro atual, como a média do brilho, a mediana, o desvio padrão, a inclinação, a curtose e um histograma da imagem em escala de cinza. Todos os valores de corrente, tensão e velocidade do arame são plotados em um gráfico multi-escalar que pode ou não ser reproduzido em sincronia com o vídeo.

O fluxograma mostrado na Figura 6, retrata a ordem de execução dos módulos da ferramenta de visualização que pode ser dividida em 4 grandes etapas:

- O primeiro a ser executado é o de processamento, que carrega os arquivos com os valores de corrente, tensão e velocidade do arame, verificando sua existência e associando o vídeo com os comentários do mesmo;
- O segundo computa os valores estáticos com base nos dados inseridos e renderiza os gráficos;
- O terceiro módulo é responsável pelo processamento do vídeo em si, realizando o carregamento do vídeo, fazendo a extração das características da imagem e computando os dados do quadro;
- O quarto e último módulo é responsável pela exibição, onde ocorre a renderização da imagem e das anotações e as exibe na interface.

4 Resultados

Para a validação da funcionalidade e confiabilidade do software foram avaliados mais de 20 vídeos de solda, sendo 7 de imageamento frontal e 14 de imageamento por perfilografia, alternando entre os modos de transferência globular, curto-circuito e spray. Nas Figuras 7 e 8 observa-se os

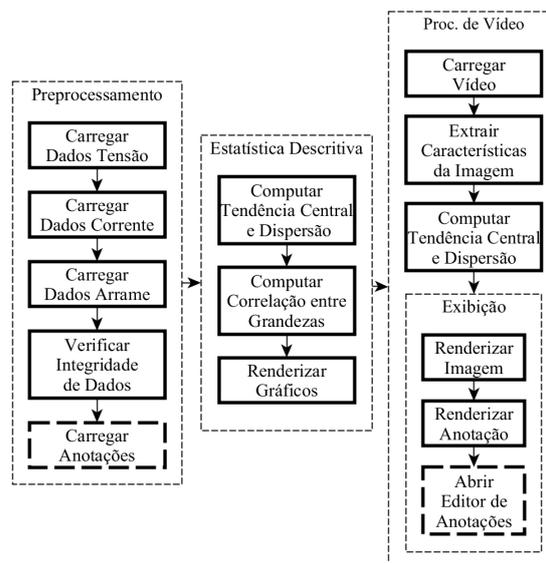


Figura 6: Sistema de análise de dados desenvolvido permite carregar, validar e computar medidas de estatística descritiva. A renderização do vídeo e dos gráficos das grandezas elétricas permite ao pesquisador identificar a ocorrência de fenômenos de interesse.

dados estatísticos de um ensaio e do quadro na ferramenta de visualização desenvolvida e um gráfico dos valores de tensão (vermelho), corrente (azul) e velocidade do arame (verde), respectivamente.

O tempo para o processamento dos quatro módulos do software leva em torno de 42 segundos em um computador convencional. As Figuras 9, 10 foram coletadas de um processo de soldagem FCAW com Polaridade Inversa, em que a chapa esta carregada negativamente e o eletrodo carregado positivamente. A polaridade inversa atua de modo que o fluxo de elétrons seja gerado no sentido inverso da força gravitacional, incorrendo em uma maior taxa de fusão e uma concentração do calor do arco na base (Souza et al., 2009). A máquina de soldagem atua para controlar o nível de tensão. A variação de corrente ocorre primariamente em função da resistência elétrica no arco.

Através da análise dos dados obtidos pela ferramenta é possível observar os picos de tensão e corrente e realizar correções no próximo processo de solda. Além de possibilitar a observação de fenômenos do desprendimento da gota do arame e contato da mesma com a chapa, como por exemplo: o fluxo de elétrons, a força repulsiva atuando para cima na gota devido à emissão de elétrons, o que justifica a gota sendo assimetricamente repelida. Tais fenômenos podem ser nitidamente observados nas Figuras 9, 10.

Os resultados obtidos nesse trabalho colaboraram na validação de modelos como os de Oliveira Evald et al. (2016), conforme já apresentado nas Figuras 3, 5, 7, e 8.

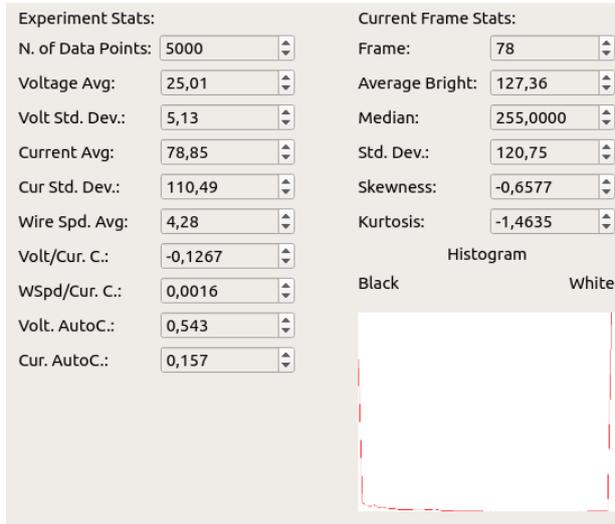


Figura 7: Exibição das estatísticas do ensaio e do quadro na ferramenta de visualização. Pode-se observar que a tensão média durante a soldagem foi de 25 volts, regulado de maneira estável pela fonte de soldagem. Já a corrente apresenta desvio padrão maior que a média em função dos picos de curta duração em que existe fechamento de curto-circuito entre o eletrodo e a peça de trabalho.

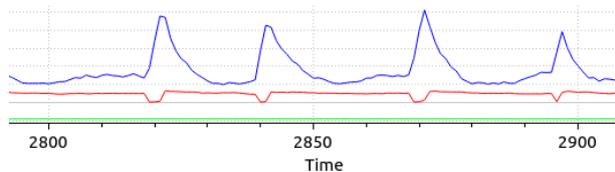


Figura 8: Gráfico dos valores de tensão em volts (vermelho), corrente em amperes (azul) e velocidade do arame em metros por minuto (verde).

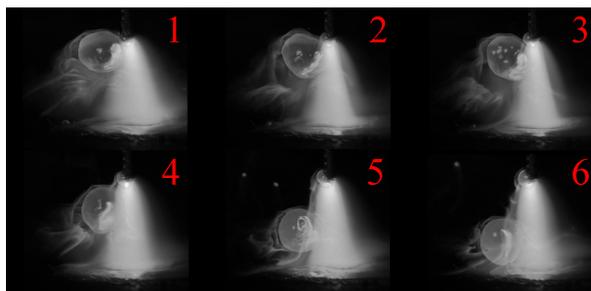


Figura 9: Sequência de quadros apresentando a formação e desprendimento da gota em processo de solda FCAW com polaridade invertida. Sequencia permite visualizar a atuação das forças no desprendimento.

5 Conclusão

Através da revisão bibliográfica dos modos de transferência e das grandezas elétricas do processo de soldagem, foi possível identificar a possibilidade de estudo das variáveis utilizadas no processo de

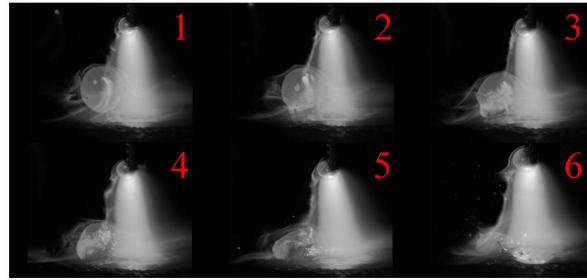


Figura 10: Sequência de quadros apresentando o contato da gota com a peça de trabalho (poça de material fundido) em processo de solda FCAW.

deposição de solda do tipo FCAW. Desta forma, a contribuição dessa pesquisa relaciona-se com a análise e visualização dos parâmetros que foram gerados pelo processo, através de técnicas de aquisição de imagem, técnicas de visão computacional e um sistema para medição das variáveis. Através da utilização do sistema de aquisição e do artefato de software apresentado, os pesquisadores da área de soldagem podem avaliar o processo e promover o desenvolvimento de hardware, software e técnicas de controle relacionadas ao campo.

Em trabalhos futuros, buscar-se-há implementar algoritmos para segmentação, detecção e classificação da gota na imagem, afim de que a ferramenta de visualização possa, além de gerar as informações da deposição de solda, gerar informações da gota como centroide, diâmetro e velocidade de desprendimento. A extração destas informações possibilita um estudo mais amplo sobre o processo, e abrangendo campos de pesquisa como avaliação do movimento da gota em transferência (Rodrigues and Scotti, 2004) e avaliação da influência da corrente de pulso, tempo de pulso e estabilidade da transferência (Andrade, 2012).

Agradecimentos

Os autores reconhecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências

- Andrade, A. F. C. d. (2012). *Influência da corrente de pulso, do tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo mig-p*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Cardoso Junior, R., Bracarense, A., Campos, F., Souza, C., Silveira, D. and Lins, V. (2012). Avaliação da soldagem multipasse de chapas espessas de aço inoxidáveis lean duplex uns s32304 soldadas pelos processos smaw, gmaw

- e fcaw: parte 1: propriedades mecânicas, *Soldagem e Inspeção* **17**(4): 306–316.
- Committee, A. I. H. and Olson, D. (1993). *ASM handbook: Welding, brazing, and soldering*, ASM Handbook, ASM International.
- da Silva, R. Z., Maurell, I. P., Werhli, A. V., Souza, D., da Costa Botelho, S. S. and Steffens, C. R. (2017). Análise inteligente de modos de transferência metálica em soldagem gmaw a partir de visão computacional, *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 5650–5655.
- de Oliveira Evald, P. J. D., Mór, J. L., Steffens, C. R., da Costa Botelho, S. S. and Azzolin, R. Z. (2016). Modelagem das dinâmicas da formação da gota e transferência de massa em processos de soldagem à arco, *Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. 1, Sociedade Brasileira de Automática, p. 6.
- Ellis, M. A. and Stroustrup, B. (1990). *The annotated C++ reference manual*, Addison-Wesley.
- Gough, B. (2009). *GNU scientific library reference manual*, Network Theory Ltd.
- Hong, H., Han, Y., Du, M. and Tong, J. (2016). Investigation on droplet momentum in vppa-gmaw hybrid welding of aluminum alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **86**(5): 2301–2308.
- Hüttner, V., de Paula, D. D., Pereira, L. C. M., do Amaral Leivas, E., Steffens, C. R. and da Costa Botelho, S. S. (2016). Welding turns digital: Electronics and fpga-based design to actuate a linear welding work cell, *Revista Jr de Iniciação Científica em Ciências Exatas e Engenharia* **14**.
- Itseez (2014). The opencv reference manual, <https://docs.opencv.org/3.0-beta/opencv2refman.pdf>.
- Itseez (2015). Open source computer vision library, <https://github.com/itseez/opencv>.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*, John Wiley & Sons.
- Modenesi, P. J. (2007). Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais, *Belo Horizonte*.
- Platt, C. (2012). *Encyclopedia of Electronic Components Volume 1: Resistors, Capacitors, Inductors, Switches, Encoders, Relays, Transistors*, Vol. 1, "O'Reilly Media, Inc."
- Pohanish, R. P. (2003). *Glossary of metalworking terms*, Industrial Press Inc.
- Ramos, E. G. (2012). Análise da oscilação da poça de solda em gmaw por meio de processamento de imagens obtidas por perfilografia.
- Rodrigues, C. E. A. L. and Scotti, A. (2004). Levantamento e avaliação do movimento de gotas em transferência na soldagem mig/mag.
- Rusu, C. C., Mistodie, L. R. and Ghita, E. (2011). Laser shadowgraph system for the electrical arc investigation, *University "Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering* **73**(2): 189–198.
- Souza, D., Resende, A. and Scotti, A. (2009). Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo mig/mag, *Soldagem e Inspeção (Impresso)* **14**: 192–198.
- Souza, D., Rossi, M. L., Keocheguerians, F., NASCIMENTO, V., VILARINHO, V. and Scotti, A. (2011). Influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem mig/mag por curto-circuito, *Soldagem e Inspeção, São Paulo* **16**(2): 114–122.