

Luciano Machado Cirino

**CONSOLIDAÇÃO DE *KNOW-HOW*, TECNOLOGIA E
MÉTODOS PARA MONITORAÇÃO E CONTROLE DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM BASEADOS EM IMAGEM**

Documento submetido ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a Qualificação do
doutorando no Programa.

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique
Gonçalves e Silva

Florianópolis - SC
2017

RESUMO

Os processos de soldagem a arco vêm passando por diversos avanços ao longo do tempo, desde que foram criados. Talvez a evolução mais marcante que pode ser citada seja o desenvolvimento dos processos MIG/MAG e TIG com pulsação de corrente. Isto pode ser considerado um divisor de águas, contudo, sabe-se que muitos avanços só foram possíveis devido ao amplo desenvolvimento da eletrônica iniciado nos anos 1960-70. O número de variações ou modalidades dos processos MIG/MAG e TIG surgidos nos anos seguintes ilustra o quanto esses avanços foram significativos. Os avanços na eletrônica e também na mecatrônica produziram processos como STT, CCC, VP-GMAW, CMT, *RapidArc*, TIG-DE, TIP TIG, TOP TIG, *Dabber*, *Infocus*, FocusTIG. Estas denominações e siglas surgem em profusão no mercado cada qual com uma abordagem definida, focada em solucionar problemas e aumentar produtividade. Apesar de alguns destes serem descendentes diretos dos primeiros desenvolvimentos com controle de corrente, estes sistemas oferecem características que os transcendem. Sistemas complexos de monitoração dos sinais de corrente e tensão, formas de ondas de corrente otimizadas, capacidade de detecção e correção de perturbações durante a soldagem, alimentação dinâmica de arame com diferentes níveis de controle, tochas de soldagem inovadoras, comunicação com robôs e sistemas de movimentação, desconsideração por algumas abordagens anteriores ao operarem longe da faixa de operação considerada “normal” de cada processo, são exemplos de como os novos sistemas tornaram-se sofisticados. Esta diversidade de abordagens e características aliados ao desinteresse das fabricantes em esclarecer questões tecnológicas, tornam complicada qualquer pesquisa relacionada a estes novos desenvolvimentos. Inicialmente satisfatória, a pesquisa baseada em diagramas de tensão e corrente (oscilogramas) mostra-se agora insuficiente para o estudo destes novos desenvolvimentos. Entender de maneira plena um processo como o CMT exige agora que a análise inclua um componente visual com capacidade muito além daquela que a mera observação a olho nu pode oferecer. Desta forma, fez-se necessário uma renovação no aparato experimental presente no LABSOLDA-UFSC, que incluiu ferramentas como câmera de alta velocidade e termográfica. Estas, além da expansão da capacidade exploratória no que diz respeito aos novos sistemas, abrem ainda a possibilidade de empregá-las na monitoração de soldagem. Embora este

laboratório já as empregue com êxito em suas pesquisas e desenvolvimentos, ainda falta uma pesquisa mais aprofundada e com algum rigor científico para ao mesmo tempo delinear as capacidades das novas ferramentas e determinar novas possibilidades de aplicação. É este o objetivo central deste trabalho, realizar um trabalho que documente de maneira metodológica e científica como usar eficientemente as novas formas de monitoração e análise de processos e, além disso, determinar novas possibilidades de seu uso como por exemplo, na inspeção de soldagem em tempo real.

Palavras-chave: filmagem em alta velocidade, termografia, monitoração, análise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Câmera de alta velocidade modelo Y3 da empresa IDT. Fonte: IDT (2017).	17
Figura 2- Um sensor CCD (charged coupled device) montado em uma placa de circuitos. Fonte: Cidral (2011).	19
Figura 3 – Máquina digital em corte parcial. Nesta, o sistema ótico é formado por sete lentes sendo a objetiva a primeira delas (de fora para dentro). Em seguida, um prisma desvia os raios que formam a imagem para o sistema de oculares acima. Fonte: Albertazzi (2017).	21
Figura 4 – Imagem de um F1 intencionalmente fotografado com tempo de exposição alto (1/60 segundos \cong 16,7 ms) Fonte: Sutton (2015).	24
Figura 5- Esquema básico de uma câmera consistindo de uma lente (objetiva), de um diafragma ajustável (que limita a entrada de luz que chega ao obturador), um obturador que pode abrir e fechar rapidamente e um filme ou sensor fotossensível para captura da imagem. Fonte Hecht (2017).	25
Figura 6- Regulagem do tempo de exposição (1/125 s) em uma câmera digital portátil. Fonte: Wikihow (2017).	26
Figura 7 – (a) Imagem do arco voltaico no processo TIG sem o uso de iluminação LASER; (b) imagem da poça de fusão durante uma soldagem TIG com o uso de iluminação LASER. Fonte: Ogawa (2011).	28
Figura 8 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Fonte: LABSOLDA-UFSC (2017).	30
Figura 9 – Oscilogramas de tensão e corrente para o processo MIG/MAG Pulsado aplicado ao alumínio. Os picos de tensão indicados pelas setas são indicativos do destacamento de gota. Fonte: Dutra, Marques e Silva (2012).	30
Figura 10 - No caso do alumínio, a gota destacada no período de pulso deforma a gota metálica na forma aproximada de uma elipse (a) prejudicando a aparência do cordão de solda em (b). Adaptado de Dutra, Marques e Silva (2012).	31

Figura 11 - Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado que apresenta os parâmetros adicionais tempo de destacamento (t_{fd}) e corrente de destacamento (I_{fd}), além de rampas de elevação e decaimento de corrente. Adaptado de Wu, Chen e Lu (2006).	32
Figura 12 – A transferência metálica no sistema da FRONIUS caracteriza-se pelo destacamento de uma gota por pulso; o destacamento da gota ocorre no início da fase de destacamento.....	34
Figura 13 – Transferência metálica no sistema sinérgico LINCOLN caracteriza-se pelo destacamento de uma gota principal e de gotas secundários por pulso; o destacamento da gota ocorre no final da fase de pulso.....	34
Figura 14- Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG. Fonte: Adaptado de FRONIUS (2017).	35
Figura 15 - Análise do avanço e recuo no CMT com filmagem de alta velocidade.	36
Figura 16 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco no TIP TIG, Cold Wire, alimentação dinâmica. Fonte: Silva (2016).....	38
Figura 17 – Sistema de alimentação/oscilação do arame do processo TIP TIG. Fonte: Silva (2016).....	38
Figura 18 - Diferença entre os modos de transferência metálica com a variação na distância entre o eletrodo e arame, evidenciando a transferência por ponte (A), por destacamento (B), e por destacamento grosseiro (C). Fonte: Silva (2016).....	40
Figura 19 - Aspecto superficial e macrografias para TIG convencional e alimentação dinâmica de arame para três posições de soldagem; (a) vertical ascendente; (b) vertical descendente e; (c) sobrecabeça.	41
Figura 20 - Imagens do processo TIG convencional com alimentação dinâmica de arame.	42
Figura 21 – Aparato para realização de ensaio com a técnica Schlieren. Adaptado de Schnick et al. (2012).	43

Figura 22 - Bocais com diferentes geometrias ensaiados durante os experimentos com Schlieren. Os bocais (1) e (2) possuem 22 mm de diâmetro de abertura, porém com ângulos de saída diferentes. O bocal (3) tem 17 mm de abertura e o bocal (4) tem 22 mm de abertura, mas com comprimento menor. Fonte: Schwedersky (2015).	43
Figura 23 – Imagens obtidas com a técnica Schlieren comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais . Gás utilizado CO ₂ . Fonte: Schwedersky (2015).	44
Figura 24 - Imagens obtidas com a técnica Schlieren comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais . Obtidas com o arco aberto e gás argônio. Vazão utilizada: 10 l/min. Fonte: Schwedersky (2015).	45
Figura 25 - Velocidade da luz no vácuo e em um meio material. Alteração na velocidade c e no comprimento de onda λ segundo um mesmo índice de proporcionalidade n (índice de refração). Fonte: Albertazzi (2017). 51	
Figura 26 – Espectro eletromagnético (para radiação viajando através do vácuo). Fonte: Albertazzi (2017).....	52
Figura 27 – Resultados da Lei de Planck descritos graficamente. Fonte: FLIR (2015).	54
Figura 28 - Princípio de funcionamento básico de uma câmera termográfica. A caneca de café emite radiação infravermelha e ao incidir sobre a lente da câmera, esta é focalizada no detector (sensor) que, por sua vez, cria um sinal elétrico convertido mais tarde em imagem. Fonte: (ITC, 2013).....	58
Figura 29 – Xícara azul com impressões em azul e dourado; imagem normal e térmica. Fonte: ITC (2013).....	59
Figura 30 – O problema da reflexão. Fonte: ITC (2013).....	59
Figura 31– Dois exemplos diferentes de compensação de parâmetros do objeto para a mesma imagem. (a) emissividade em 0,70 e temperatura ambiente em 50,0°C. (b) emissividade em 0,10 e temperatura ambiente em 21,5°C. Fonte: ITC (2013).	60
Figura 32 - Métodos para indução de um fluxo de calor em um objeto para ensaio por termografia. Fonte: Rodríguez (2014).	61

Figura 33 – Imagens térmicas obtidas de uma tocha Infocus e uma tocha TIG convencional logo após terem sido empregadas na soldagem de um cordão de 27 cm, a mesma velocidade e com corrente de soldagem de 520 A. Fonte: Olivares et al. (2015).....	62
Figura 34 – Imagem térmica obtida com câmera embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto estava sendo submetida a soldagem TIG de quatro maneiras diferentes: (a) processo autógeno; (b) processo com alimentação contínua; (c) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz; (d) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz. Fonte: Paes (2016).	63
Figura 35 – Simulação comparando o perfil de temperatura na poça entre: (a) fusão entre o movimento convencional (linear) e (b) movimento de switch back. Adaptado de Kaneko, Yamane e Oshima (2009).	64
Figura 36 - Temperatura no verso da chapa durante uma soldagem TIG com (a) movimentação convencional (linear) e; (b) movimento de switch back (frequência de 2 Hz, avançando 10 mm em 300 ms e retornando 7,5 mm em 200 ms). Fonte: Schwedersky et al. (2017).	65
Figura 37 - Identificação de um “ponto frio” em uma imagem termográfica na soldagem de um passe de raiz. Fonte: Venkatraman et al. (2006).	66
Figura 38 – Representação esquemática do experimento realizado por Sreedhar et al. (2012).	67
Figura 39– Gráfico que mostra o comportamento da queda de temperatura é diferente para regiões com descontinuidades (defect region) e regiões sãs (no defect region). Fonte: Sreedhar et al. (2012).	67
Figura 40 – Imagem térmica que mostra a detecção de uma descontinuidade em um cordão de solda, confirmada por radiografia. Fonte: Sreedhar et al. (2012).	68
Figura 41 - Câmera de alta velocidade Y4-S2 da empresa IDT. Fonte: IDT (2013).	71

Figura 42 – Câmera termográfica modelo SC7200 F/3 da fabricante FLIR.
Fonte: FLIR (2007). 72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE – CONTEXTUALIZAÇÃO E APLICAÇÕES	17
2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS E QUESTÕES TECNOLÓGICAS	18
2.1.1 Células fotossensíveis - CCD e CMOS.....	18
2.1.2 Lentes e filtros.....	20
2.1.4 Tempo de exposição e obturador	24
2.1.5 Tipos de luz e LASER	27
2.2 FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE APLICADA A PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO.....	28
2.2.1 MIG/MAG pulsado.....	29
2.2.2 MIG/MAG CMT.....	35
2.2.3. Processo TIP TIG.....	37
2.2.4 Técnica Schlieren.....	42
3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA POR RADIAÇÃO E ASPECTOS TECNOLÓGICOS.....	48
3.1.1 Radiação térmica.....	49
3.1.2 O espectro eletromagnético.....	50
3.1.3 Corpo negro e emitância	52
3.1.4 Emissividade	55

3.1.5	Influência da atmosfera	56
3.1.6	A câmera termográfica	57
3.1.8	A imagem térmica	58
3.1.9	Temperatura aparente	60
3.1.10	Termografia ativa e passiva.....	61
3.2.	APLICAÇÕES NA ANÁLISE DE PROCESSOS, INSPEÇÃO E CONTROLE	62
4	OBJETIVOS	69
5	MATERIAIS E MÉTODOS	71
5.1	CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE	71
5.2	CÂMERA TERMOGRÁFICA	72
5.3	FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE APLICADA AO ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	73
5.4	FILMAGEN TERMOGRÁFICA APLICADA AO ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	74
6	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	75
7	PREVISÃO FINANCEIRA	77
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
9	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Poucos discordam que a soldagem é o método de união mais empregado na indústria atualmente. Há muito os rebites foram, em grande parte, substituídos por soldagem na construção de estruturas metálicas, na construção naval, aeronáutica e automobilística. Essa evolução foi gradual no início do século XX, ou seja, aconteceu na medida em que os engenheiros e técnicos ganharam mais afinidade com o processo de soldagem por eletrodos revestidos. Não obstante, surgiram novos processos de soldagem a arco que superavam o eletrodo revestido em versatilidade e capacidade de produção. O processo TIG, por exemplo, mostrou-se adequado para a soldagem de peças de alumínio em aviões americanos durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), enquanto o processo MIG/MAG passou a ser um processo amplamente empregado na indústria do pós-guerra especialmente para a soldagem de aços ao carbono.

Com o avanço da eletrônica nos anos 1960-70 surgiram os processos TIG e MIG/MAG com pulsação de corrente que prometiam diversas vantagens como maior refino de grãos, melhor aparência superficial dos cordões de solda, maior capacidade de produção, diminuição do número de respingos - este último sendo uma característica do processo MIG/MAG. Ou seja, as fontes de soldagem passaram a dispor de elementos que permitiam controle sobre a forma de onda de corrente de soldagem e, por conseguinte, sobre a transferência metálica. Com isso, o processo MIG/MAG tornou-se mais versátil permitindo a soldagem bem-sucedida de chapas finas de alumínio e aço inoxidável que, por suas características (alta condutividade térmica no caso do alumínio e alta tensão superficial no caso do aço inoxidável), têm menor soldabilidade em relação aos aços ao carbono. Nos últimos anos, os processos TIG e MIG/MAG experimentaram uma série de avanços notáveis no que diz respeito ao controle, não só da forma de onda de corrente, mas da alimentação de arame, no projeto de tochas, na monitoração do fluxo de gás de proteção sem falar da variedade formidável de modalidades de processo encontradas no mercado, cada qual prometendo “milagres tecnológicos” nunca antes alcançados.

A utilização de gabaritos, robôs antropomórficos e dispositivos de movimentação de tocha também foram se tornando cada vez mais

comuns na indústria à medida que ficavam mais acessíveis. Isso é comprovado especialmente quando se examina a indústria automobilística de hoje. Os sistemas de automação e mecanização em geral possuem ao menos dois componentes benéficos no tocante a soldagem: afastar o soldador da região de trabalho evitando que este fique exposto a radiação, fumos etc. (isto nem sempre é verdadeiro, já que a maior parte dos sistemas mecanizados exige a presença do operador) e o aumento de produtividade. Quando se fala de produtividade em soldagem tende-se a considerar apenas a velocidade com que o procedimento de soldagem é realizado. Isso é verdadeiro, porém, incompleto. De maneira mais ampla, se tem produtividade quando se produz no menor tempo possível, ao menor custo possível e com a maior qualidade possível dentro das especificações da norma e/ou do projeto. Com a automação é possível criar um ambiente industrial propício que conduz ao aumento de produtividade.

Entretanto, a automação tem alguns infortúnios. O preço dos equipamentos para soldagem ainda é alto, especialmente no Brasil pois os equipamentos geralmente são importados com custos proibitivos para a maioria das empresas de médio e pequeno porte. Esse fator associado a pouca informação em relação a processos de soldagem por parte de engenheiros, técnicos e empreendedores, cria uma barreira ao emprego de automação na soldagem. Resistência esta que parece bastante superada quando se trata de outros processos de fabricação, como usinagem por exemplo, haja vista a disseminação de centros de usinagem e tornos de controle numérico computadorizado (CNC) não só nas fábricas, mas também nas escolas técnicas. Estas atitudes contraproducentes podem ser contornadas mediante a diminuição dos impostos sobre a importação de bens de capital, a difusão de informações nas escolas técnicas e de engenharia e o desenvolvimento de tecnologia nacional. Tarefas de difícil efetivação, no entanto prementes para o desenvolvimento da indústria nacional. Uma das desvantagens ainda não citadas está no fato de que o robô ou sistema de movimentação não substitui os sentidos ou o “*feeling*” do soldador. Isto também vem sendo contornado com o uso de diversos sensores instalados no sistema de movimentação que permitem monitorar o processo ou mesmo a correção sem intervenção do operador. Contudo, estes sensores aumentam os custos dos sistemas.

Diante de tamanho avanço tecnológico ao longo dos últimos anos e de tantos percalços, o Laboratório de Soldagem da Universidade Federal

de Santa Catarina (LABSOLDA – UFSC) vem tentando não só acompanhar as novas tecnologias que se apresentam no mercado, mas compreendê-las e dominá-las. O estudo pormenorizado destas novas tecnologias permite ao LABSOLDA-UFSC determinar qual o melhor processo ou a melhor técnica de soldagem para uma dada aplicação sem depender dos discursos dos fabricantes que são, quase invariavelmente, vagos e deficientes em informações práticas. Para tanto, foi preciso desenvolver um aparato instrumental que movimentou muitos técnicos e engenheiros ao longo destes anos. Esse esforço começou com a tese de doutoramento do Prof. Jair Carlos Dutra que desenvolveu a instrumentação básica para o monitoramento de soldagem, especialmente útil para determinar detalhes de processos de soldagem como o MIG/MAG Pulsado por exemplo. A posse de informações produzidas por este sistema de monitoramento serviu de base científica e apoio para a fabricação das primeiras fontes de soldagem nacionais de alta tecnologia por intermédio de uma empresa gerada dentro do LABSOLDA-UFSC, a IMC Soldagem. Daí em diante, o sistema de monitoramento passou por melhorias que geraram o Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Este permite a monitoração e determinação das formas de ondas de corrente e tensão de soldagem, velocidade de arame e vazão de gás. Permite ainda a avaliação da estabilidade do processo por meio de histogramas, cálculo de potência, energia de soldagem entre outros. Os sistemas de monitoração e controle aliados a uma atitude empreendedora, proveram o laboratório com uma qualidade única entre os laboratórios de soldagem do Brasil e provavelmente da América Latina: a capacidade de produzir e projetar equipamentos de alta tecnologia tanto para soldagem quanto para automação de processos.

Atualmente os processos de soldagem passam por um novo ciclo de evolução com melhorias e adaptações que antes pareciam impraticáveis. A evolução dos processos acabou dotando-os de comportamentos de alta dinâmica, maior complexidade e maior interação entre os parâmetros, controle da poça de fusão e da transferência metálica (por exemplo, CMT, CMT *Advanced*) além de extrapolarem suas faixas de operação tradicionais (como FocusTIG, RapidArc). Logo a necessidade de ampliação do arsenal de equipamentos de monitoramento e medição, fez-se fundamental para os próximos passos do LABSOLDA-UFSC não só no desenvolvimento de equipamentos, mas no desenvolvimento das pesquisas.

Para compreender por completo as nuances de processos como o *Cold Metal Transfer* (CMT) ou TIP TIG por exemplo, é necessário além da aquisição dos sinais de corrente e tensão de soldagem, a filmagem em alta velocidade do processo de soldagem em funcionamento, seja do arco voltaico, seja da alimentação de arame ou qualquer outro fator de importância no processo. Para um projeto de uma tocha de soldagem com um fluxo de gás laminar e capaz de proteger eficientemente a poça de fusão, seria de grande auxílio o emprego de filmagem em alta velocidade com a técnica conhecida como *Schlieren*. Para determinar o fluxo de calor em uma chapa de aço submetida a ação do arco elétrico ou até mesmo identificar uma descontinuidade em um cordão de solda, uma filmagem com a técnica de termografia pode ser eficiente.

Seria muita presunção descrever esta proposta como um projeto “para ordenar o caos” pois faltaria com a verdade. O LABSOLDA-UFSC já emprega estas ferramentas com frequência e sucesso a algum tempo. Deste modo, esta proposta visa, de maneira geral, realizar um projeto cujo o objetivo é compreender, consolidar e documentar de maneira metodológica e científica as técnicas supracitadas de monitoração e análise de processos de soldagem, de forma a aumentar a eficiência deste laboratório em suas pesquisas e torná-lo mais produtivo no projeto e desenvolvimento de soluções para questões de soldagem. Os resultados a serem obtidos permitirão, além da maior eficiência em pesquisa básica e aplicada (desenvolvimento tecnológico) em soldagem e automação, também a geração de conhecimentos necessários para o desenvolvimento de monitoração de aplicações industriais como a inspeção de solda em tempo real empregando técnicas de termografia, o projeto de tochas com auxílio da técnica *Schlieren*, determinação do fluxo de calor de uma poça de fusão durante a soldagem de raiz em um duto ou analisar a transferência metálica em um processo pulsado além de novas possibilidades de aplicação. Ademais, visa colocar estas informações ao alcance de todos, não só do laboratório, mas de todos aqueles interessados nestas técnicas.

2 FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE – CONTEXTUALIZAÇÃO E APLICAÇÕES

Este capítulo apresenta fundamentos da filmagem em alta velocidade (ou videografia de alta velocidade), ferramenta esta que pode ser colocada em um meio termo entre a ciência e a arte. Embora tenham o nome de câmeras de alta velocidade, pois capturam muitas imagens por segundo, estas foram desenvolvidas para a gravação e reprodução de imagens em câmera lenta de eventos transitórios. Capturas instantâneas de detalhes invisíveis a olho nu - ou para câmeras comuns - como um parafuso se soltando em um acidente automobilístico, um projétil saindo do cano de uma arma ou o voo rápido de um pássaro podem ser detectados via filmagem com câmeras de alta velocidade como a da **Figura 1**.



Figura 1 – Câmera de alta velocidade modelo Y3 da empresa IDT. Fonte: IDT (2017).

Uma câmera comum captura imagens com frequência de 24 até 30 quadros por segundo. Filmes também são reproduzidos nesta faixa, suficiente para criar a ilusão de movimento. As câmeras de alta velocidade – popularmente chamadas de “supercâmeras” - permitem captar detalhes e movimentos indetectáveis em filmagens com câmeras

convencionais ou pelo olho humano já que podem chegar a frequências de captura na ordem de centenas de milhões de quadros por segundo ou *frames per second* (Gugelmin, 2010).

2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS E QUESTÕES TECNOLÓGICAS

O conhecimento de certos conceitos básicos sobre filmagem, além dos principais parâmetros a serem levados em conta são fundamentais no âmbito deste trabalho. Conhecimentos que deverão ser aprofundados à medida que o trabalho avança. Inicia-se com duas partes fundamentais de uma câmera de alta velocidade ou não: o sensor fotossensível e as lentes e filtros, a importância do número de quadros por segundo e do tempo de exposição. Por fim, é dada atenção para a iluminação que abrange um elemento importante para a filmagem de alta velocidade de processos de soldagem: o LASER.

2.1.1 Células fotossensíveis - CCD e CMOS

Os sensores CCD (*charged coupled device*) e CMOS (*complementary metal-oxide semiconductors*) são um elemento central em câmeras digitais comuns ou de alta velocidade pois são responsáveis pela captação da imagem. Esses sensores substituíram os filmes para filmagem e fotografias, que atualmente sequer são encontrados no mercado¹.

Os sensores CCD são chips de silício semicondutores (**Figura 2**) que consistem de uma matriz de células fotossensíveis (*picture cells*) chamadas pixels². Uma matriz é constituída de “M” colunas x “N” linhas de pixels (VERSLUIS, 2013). De certa forma, o CCD funciona como um capacitor, acumulando carga para descarregar quando solicitado. É um dispositivo que pode converter um sinal de luz (imagem) em um sinal

¹ O desenvolvimento do sensor CCD rendeu o prêmio Nobel de Física para Willard S. Boyle e George E. Smith em 2009.

² A palavra pixel vem de “**p**icture **e**lement”. Um “x” foi adicionado para unir as sílabas iniciais das duas palavras formando pixel.

digital. Conforme mencionado, a área de imagem de um CCD consiste de inúmeros pixels posicionados no plano focal da câmera. Os pixels convertem a intensidade da luz em carga elétrica que é armazenada no pixel. Ou seja, quando o CCD está exposto a luz, os fótons incidem sobre a fina camada de silício ($8\ \mu\text{m}$) extraíndo elétrons de sua superfície. Os elétrons livres são então coletados no pixel sendo que quanto mais fótons acertam o CCD, mais elétrons são produzidos. Depois de encerrada a exposição, o conteúdo dos pixels passa por um amplificador e é então transferido para o circuito da câmera onde é digitalizado, sendo que a imagem digital é construída linha por linha. Em câmeras de alta velocidade, estes sensores tem uma arquitetura especial com saída (*output*) de até 5 Megapixels por milissegundo, o que corresponde a vários gigabits por segundo (VERSLUIS, 2013).

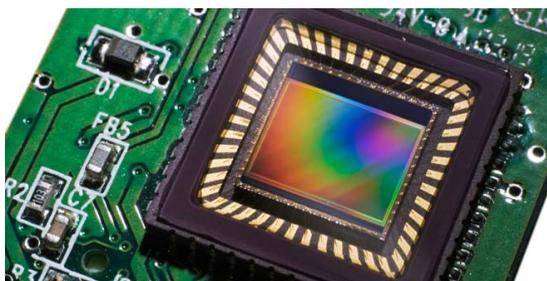


Figura 2- Um sensor CCD (*charged coupled device*) montado em uma placa de circuitos. Fonte: Cidral (2011).

Já os sensores que usam a tecnologia do tipo CMOS captam imagens com menor clareza e qualidade, contudo são mais econômicos tanto no custo quanto no consumo de energia. Por este motivo são bastante usados em telefones celulares e computadores portáteis. O funcionamento é semelhante ao CCD, com a diferença que as células fotossensíveis neste último são passivas, ou seja, assim que são capturadas, as informações concernentes à imagem passam por um amplificador e são armazenadas em um dispositivo separado do sensor. No sensor CMOS, cada célula fotossensível é também um amplificador, logo o CMOS é capaz de realizar o processamento local básico dos dados, permitindo uma leitura mais rápida. A **Tabela 1** apresenta uma comparação entre os dois sistemas.

Tabela 1 - Comparação entre sensores CCD e CMOS.

Características	Sensor CCD	Sensor CMOS
Qualidade da imagem	Melhor, com menos ruído	Pior, mais ruidosa
Sensibilidade à luz	Mais sensível	Menos sensível
Consumo de energia	Elevado	Baixo
Custo do sensor	Mais caro	Mais acessível
Maturidade Tecnológica	Bem estabelecida	Em evolução
Resolução	Mais elevada	Mais limitada

Fonte: Albertazzi e Pinto (2017).

2.1.2 Lentes e filtros

Embora sejam os elementos mais simples de um sistema ótico, as lentes são de grande importância. Ampliação, nitidez, definição e até mesmo a possibilidade de regulagem do foco estão ligados às lentes e sua qualidade. As lentes podem ser convergentes (convexas, positivas) ou divergentes (côncavas, negativas). Em geral, são feitas de vidro e a lente objetiva de um sistema ótico (ou seja, a lente que fica mais próxima ao objeto) é uma convergente. A **Figura 3** a seguir apresenta uma câmera digital com um sistema ótico onde uma série de sete lentes se segue à objetiva. A imagem do objeto é projetada no sensor fotossensível de forma invertida. Outros elementos óticos (prismas, espelhos e outras lentes de formas variadas) são integrados ao sistema ótico para garantir que a imagem chegue ao visor sem inversão e reproduzida sem distorção sob quaisquer níveis de luminosidade (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011).

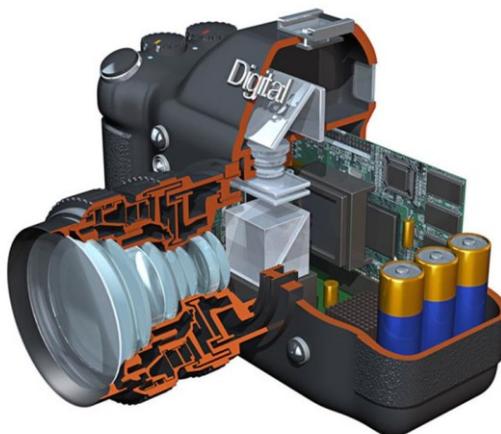


Figura 3 – Máquina digital em corte parcial. Nesta, o sistema óptico é formado por sete lentes sendo a objetiva a primeira delas (de fora para dentro). Em seguida, um prisma desvia os raios que formam a imagem para o sistema de oculares acima. Fonte: Albertazzi (2017).

Além das lentes já incorporadas ao sistema óptico, ainda é possível instalar outro sistema de lentes adicionais sendo estes do tipo:

- Grande-angular (que captura um ângulo maior de visão);
- Teleobjetiva (que podem produzir imagens nítidas e sem distorções de objetos em primeiro plano e outros mais distantes, em segundo plano);
- Lente “zoom” e;
- Lentes com finalidades especiais (para uso científico).

Os filtros ajustadores de luz (*light adjusting filters*) são elementos anexados à lente da câmera e usados para modificar a luz, antes que ela alcance o sensor fotossensível (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011). Os filtros podem ser feitos de vidro óptico, plástico ou gelatina³ (geralmente colorida). Os filtros mais comuns são:

- Filtros de contraste;

³ São como as lentes de contato que são feitas de um plástico semelhante a gelatina que contém 38 a 79% de água. Permitem a passagem de oxigênio a córnea e absorvem água como uma esponja, mantendo a lente flexível.

- Filtros ultravioleta e *skylight*;
- Filtro polarizador;
- Filtro de densidade neutra e;
- Filtro de correção.

Os filtros de contraste controlam a intensidade da tonalidade no preto-e-branco. Como “uma maçã vai aparecer em tonalidades de cinza; mais cinza claro ou cinza escuro” (FOLTS, LOWELL E ZWAHLEN, 2011). Já os filtros ultravioletas e *skylight* controlam a passagem de luz ultravioleta (UV) de forma a evitar o registro de uma imagem “fantasma”, (pouco nítida e fora de foco). O filtro UV elimina a imagem secundária para que somente a luz visível seja registrada. O filtro polarizador absorve brilhos e reflexos. A luz polarizada vibra em uma direção somente sendo que este filtro permite selecionar a direção de luz que passa pelo filtro. O filtro de densidade neutra funciona como “óculos escuros” diminuindo o brilho de uma cena e o filtro de correção compensam as diferenças entre o tipo de luz que o filme requer e o tipo de luz realmente usado. No estudo de processos de soldagem os filtros UV, polarizador e densidade neutra podem ser de grande utilidade haja visto o fato de que o arco elétrico é formado por luz no espectro visível, UV e infravermelha.

2.1.3 Taxa de aquisição de imagens

A taxa de aquisição de imagens ou *frame rate*, medido em fps:

“[...] vai determinar o menor tempo entre dois eventos que podem ser capturados. Embora um único quadro possa ser registrado em uma fração de milissegundos usando câmeras comuns, a taxa de aquisição de imagens limita o menor tempo entre dois quadros consecutivos a ser da ordem de 16 a 33 ms em alta resolução. Por exemplo, em uma taxa de aquisição de imagens de 60 fps tem-se $1/60 = 16,67$ ms entre eventos” (LUMENERA, 2017).

Um filme é o registro de uma sequência de imagens discretas. Se é uma filmagem com o objetivo de investigar um fenômeno que não pode

ser captado por câmeras comuns, o número de quadros a serem registrados por segundo (fps) deve estar em acordo com a natureza do fenômeno, levando em conta as características deste, sob pena de a filmagem não registrar o objeto da análise. Em um fenômeno cíclico, por exemplo, uma das características a serem levadas em conta é sua frequência. O teorema de amostragem de Nyquist (OLSHAUSEN, 2000) que diz que a frequência de amostragem (f_a) ou o *frame rate* (taxa de aquisição de imagens), para aplicações em filmagem, deve ser maior ou igual a duas vezes a frequência do fenômeno (f), conforme a **Equação (1)**:

$$f_a \geq 2f \quad (1)$$

Não obstante, Versluis (2013) recomenda o uso de um *frame rate* 5 a 10 vezes maior que a frequência do fenômeno cíclico e apresenta a **Equação (2)** para uma estimativa, levando em consideração mais características:

$$f_a = \frac{N \cdot u}{l}, \quad (2)$$

onde N é o número de amostras (de 5 a 10 conforme supramencionado), u é a velocidade típica de um fenômeno e l uma escala de comprimento, normalmente o “campo de visão”. Por exemplo, um conta gotas a uma altura de 20 cm, forma gotas que caem a uma velocidade u de 2 m/s, estimada por meio da **Equação (3)** - que nada mais é do que o resultado do equilíbrio entre as energias potencial e cinética de uma gota. Aplicando a **Equação 2** e considerando um campo de visão de 20 mm e $N = 10$, tem-se um frame rate de 1000 fps.

$$u = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

Embora nem sempre as características do fenômeno a ser estudado sejam facilmente dedutíveis, se faz necessário que o operador tenha algum conhecimento prévio a respeito do fenômeno que deseja registrar. A Equação (1) e a Equação (2) servem como um guia para

facilitar uma primeira regulagem, além de ajudar a compreender um importante princípio da filmagem em alta velocidade.

2.1.4 Tempo de exposição e obturador

Outro parâmetro de importância é o tempo de exposição (*exposure time, shutter time*). O tempo de exposição indica quanto tempo o filme ou o sensor fotossensível (CCD ou CMOS) estará exposto a luz que circunda o objeto ou ambiente que se quer fotografar ou filmar. A escolha acertada do tempo de exposição leva a captura de uma imagem nítida e definida de, *e.g.*, uma aeronave em movimento ou um automóvel em alta velocidade. Nestes últimos, um tempo de exposição curto será mais adequado para criar o chamado efeito de paralisação (*freezing*). Por exemplo, para obter o efeito de *freezing* na fotografia de uma aeronave voando a aproximadamente 480 km/h, Ang (2016) recomenda um tempo de exposição de 1/640 segundos ($\cong 1,56$ ms) em câmeras comuns. Por outro lado, a escolha intencional (ou não) de um tempo de exposição muito longo pode levar a formação de um efeito de *blur* (borrão) na imagem capturada (HALLIDAY, RESNICK; WALKER, 2010). Quando realizado intencionalmente, o efeito cria uma imagem que passa a ideia de movimento ou alta velocidade como na fotografia da **Figura 4**.



Figura 4 – Imagem de um F1 intencionalmente fotografado com tempo de exposição alto (1/60 segundos $\cong 16,7$ ms) Fonte: Sutton (2015).

Comumente, usava-se um dispositivo mecânico conhecido como obturador (*shutter*) para controlar o tempo de exposição (**Figura 5**) mediante a rápida abertura e fechamento do mesmo no momento do registro da imagem (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011). Os obturadores mecânicos mais rápidos podem chegar a 1 ms, não obstante, esse tempo de exposição será inadequado para filmagens de alta velocidade.

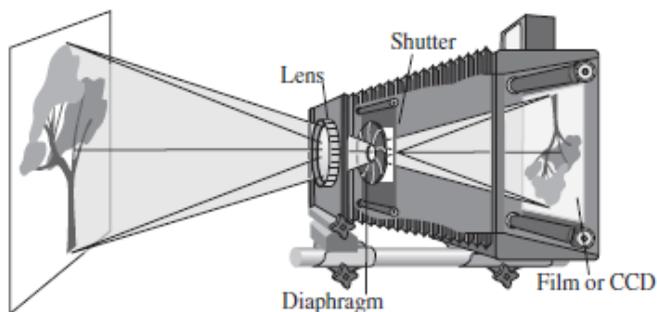


Figura 5 - Esquema básico de uma câmera consistindo de uma lente (objetiva), de um diafragma ajustável (que limita a entrada de luz que chega ao obturador), um obturador que pode abrir e fechar rapidamente e um filme ou sensor fotossensível para captura da imagem. Fonte: Hecht (2017).

Em câmeras de alta velocidade, o mais comum é o controle do tempo de exposição por intermédio de obturador eletrônico com controle via *software* (**Figura 6**). Nesse caso, os tempos de exposição podem, dependendo da câmera, diminuir para até 1 μ s. Há dois tipos de abordagem para esta aplicação: *global* e *rolling*. Em um sensor com um obturador *global*, todas as células fotossensíveis (pixels) são expostas simultaneamente durante o tempo de exposição. Em sensores com obturador do tipo *rolling* cada célula fotossensível é exposta “sequencialmente uma por uma, da esquerda para a direita, linha por linha durante o tempo de exposição” (LUMENERA, 2017). Cada pixel é exposto, mas há um atraso (*lag*) entre o primeiro pixel da primeira linha, iniciando sua exposição, e o último pixel da última linha, iniciado sua exposição. O obturador *rolling* é mais adequado para imagens estáticas

ou com pouca movimentação do objeto em relação a câmera. Ou seja, a luz incide sobre os pixels em instantes diferentes e, quando se está tentando fotografar ou filmar um evento transitório em alta velocidade, a incidência de *blur* na imagem é comum. Logo, para filmagens de alta velocidade, o mais indicado é um obturador do tipo *global*, a fim evitar a ocorrência de *blur*.



Figura 6 - Regulagem do tempo de exposição (1/125 s) em uma câmera digital portátil. Fonte: Wikihow (2017).

Em filmagens científicas, mais uma vez, para uma correta regulagem inicial da câmera de alta velocidade, é necessário algum conhecimento prévio do fenômeno a ser registrado. Exemplo: considere-se uma bolha de ar se formando em uma tubulação conduzindo água que em seguida explode. O intervalo entre a formação e a explosão da bolha é menor do que $300 \mu\text{s}$. Em uma filmagem com uma taxa de aquisição de 2000 fps, tem-se um tempo entre dois quadros consecutivos de $500 \mu\text{s}$. Empregando um tempo de exposição igual ao tempo entre dois quadros, provavelmente não se verá nenhum detalhe da bolha. Para registrar maiores detalhes da formação e explosão da bolha será necessário usar um tempo de exposição muito curto, em torno de $25 \mu\text{s}$, doze vezes menor que o tempo de duração do evento (VERLUIJS *et al.*, 2000). Logo, para que o tempo de exposição seja igual ao tempo entre dois quadros consecutivos, é necessária uma taxa de aquisição de 40000 fps (nesse caso, é provável que se perca em resolução). Em síntese, o tempo de

exposição deverá ser muito menor do que o tempo de duração do evento a ser registrado.

2.1.5 Tipos de luz e LASER

Em fotografia e filmagem, o domínio da luz é de grande relevância para a captação de imagens. Em filmagens de alta velocidade e conforme o caso, o emprego do sistema de iluminação pode ser a diferença entre a obtenção de uma imagem altamente definida e uma imagem inútil para o objetivo do estudo. Do ponto de vista da fotografia, os tipos de luz são: a luz natural, a luz existente e a luz artificial (FOLTS; LOWELL; ZWAHLEN, 2011). A luz natural nada mais é do que a luz do sol que pode ser suave ou difusa, dependendo das condições climáticas. A luz existente (ou disponível) é a luz encontrada no local da fotografia em recintos fechados e é geralmente pouco uniforme, ficando certas áreas altamente iluminadas enquanto outras ficam nas sombras. Embora também possa ser artificial, a luz existente se diferencia da luz artificial por não ser especificamente projetada para fotografia ou filmagem, tendo como objetivo principal apenas iluminar ambientes.

A luz artificial pode ser necessária e suficiente em filmagens de alta velocidade cujo o objeto de análise não envolva um arco voltaico. Nestes casos, tem-se o LASER, acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, é “uma fonte de luz que produz um raio de luz altamente coerente e quase monocromático como resultado da emissão cooperativa de muitos átomos” (YOUNG; FREEDMAN, 2016). O LASER não é normalmente empregado em fotografias ou em filmagens convencionais ou mesmo na maioria das aplicações de alta velocidade. Todavia, tem importante papel quando se trata de filmagens de alta velocidade de processos de soldagem devido à natureza do arco voltaico. Este último, emite luz, raios infravermelhos e ultravioletas com grande intensidade sendo que, uma filmagem de alta velocidade empregando apenas a câmera não serviria para qualquer análise haja visto que será registrado apenas um clarão. Uma maneira de atenuar a intensidade da luz proveniente do arco voltaico, eliminá-lo quando conveniente ou até melhorar a qualidade da imagem é o uso de iluminação LASER, cujo comprimento de onda é diferente da maior parte do espectro do arco (OGAWA, 2011). Se o obturador eletrônico da câmera estiver em sincronia com a pulsação do laser há aumento da eficiência da iluminação

externa, o que pode ser útil na filmagem de certos eventos. Em suma, um LASER de intensidade e comprimento de onda adequados são essenciais para se conseguir uma imagem clara e definida, geralmente em associação com a filtros. A **Figura 7.a** mostra a filmagem do arco voltaico no processo TIG onde pode-se visualizar a extremidade do eletrodo de tungstênio, mas não a poça de fusão. Na **Figura 7.b** pode-se observar não só o eletrodo, mas também a poça de fusão, no entanto, a intensidade luminosa do arco foi praticamente eliminada.

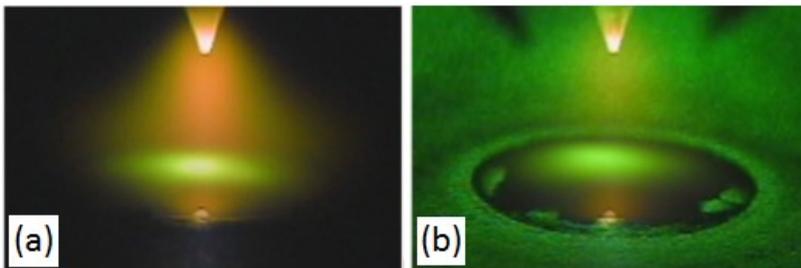


Figura 7 – (a) Imagem do arco voltaico no processo TIG sem o uso de iluminação LASER; (b) imagem da poça de fusão durante uma soldagem TIG com o uso de iluminação LASER. Fonte: Ogawa (2011).

2.2 FILMAGEM EM ALTA VELOCIDADE APLICADA A PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO

Quando se fala de filmagem em alta velocidade aplicada à análise de processos de soldagem, geralmente a primeira imagem que vem à mente, é uma câmera sofisticada sendo empregada para a monitoração e análise da transferência metálica no processo MIG/MAG (*metal inert gas/metal active gas*). Dada a importância da transferência metálica neste processo, esta é, de fato, uma das principais aplicações das técnicas de filmagem em alta velocidade, como se verá no primeiro exemplo a seguir. Contudo, a medida que os processos de soldagem evoluíram ao longo das últimas décadas, a filmagem em alta velocidade mostrou-se útil para a

análise de outros fatores de importância no êxito da operação de soldagem e no funcionamento dos processos em si. Como será visto mais adiante, a soldagem de alta velocidade mostra-se útil não só no estudo do processo MIG/MAG, mas auxilia também na compreensão de fenômenos característicos de processos como TIG (*tungsten inert gas*). Este item tem como objetivo principal demonstrar o quanto a aplicação da filmagem de alta velocidade pode ser útil no estudo dos processos de soldagem a arco, especialmente quando se trata de modalidade especiais de MIG/MAG e TIG.

2.2.1 MIG/MAG pulsado

No LABSOLDA-UFSC, até menos de uma década atrás, o estudo de processos com controle de formato de onda de corrente (como o MIG/MAG Pulsado) ficava restrito a avaliação dos diagramas de corrente e tensão ou oscilogramas coletados a partir do Sistema de Aquisição Portátil (**Figura 8**). Apesar da coleta de dados a partir desse equipamento permitir uma série de análises e determinações de parâmetros via cálculo, a mera avaliação dos oscilogramas limita o pesquisador a presumir alguns fenômenos sem maior base de constatação, especialmente no que diz respeito a transferência metálica, produzindo incertezas quanto ao resultado.

Por exemplo, em um oscilograma como o da **Figura 9**, que mostra um formato de onda típico de um processo pulsado tradicional (formato de onda retangular) o pico de tensão identificado com uma seta é um indicativo do destacamento de uma gota metálica. Entretanto, a partir da avaliação do oscilograma, por exemplo, não se pode inferir que:

1. Com certeza que o processo pulsado analisado respeita a condição UGPP (uma gota por pulso)⁴. Em outras palavras, não é possível determinar o destacamento ou não de gotas secundárias;
2. Quanto ao momento exato de destacamento da gota. Ou seja, no pulso ou na base. O pico de tensão é apenas um indicativo que pode ser confundido com alguma interferência (*ripple*) ou vice-versa e;

⁴ Originalmente, ODPP (*one droplet per pulse*).

3. Se, para determinada situação, é mais vantajoso o destacamento na base, no pulso ou em uma fase de destacamento.



Figura 8 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Fonte: LABSOLDA-UFSC (2017).

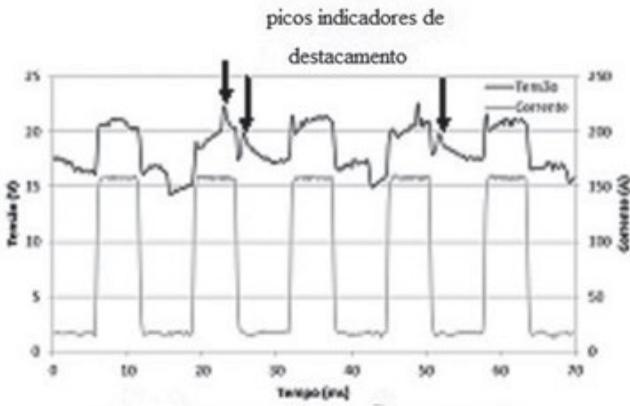


Figura 9 – Oscilogramas de tensão e corrente para o processo MIG/MAG Pulsado aplicado ao alumínio. Os picos de tensão indicados pelas setas são indicativos do destacamento de gota. Fonte: Dutra, Marques e Silva (2012).

Um exemplo representativo, particularmente no tocante ao item (3) da lista, está no estudo de Dutra, Marques e Silva (2012), que demonstraram, para o caso da soldagem MIG de alumínio ER 4043, Ø1,2 mm e argônio como gás de proteção, que a gota metálica, quando destacada no período de pulso, de fato é acelerada em demasia, sofrendo um alongamento, assumindo uma forma elíptica, e resultando num cordão de aparência irregular, conforme expõe a **Figura 10**. Sem a filmagem em alta velocidade essa verificação seria impossível.

Nos últimos anos, as fabricantes de fontes de soldagem têm apresentado formas de onda mais complexas, que introduzem parâmetros diferentes daqueles considerados básicos (JOSEPH *et al.*, 2005). Por exemplo, a forma de onda empregada no sistema sinérgico da fonte de soldagem FRONIUS CMT *Advanced* 4000R (EVANS, 2012), apresentada na **Figura 11**, difere-se da retangular principalmente pelas rampas de corrente (no início e no fim do pulso) e por uma fase de destacamento de gota caracterizada por tempo de fase de destacamento (t_{fd}) e corrente de fase de destacamento de gota (I_{fd}), de valor inferior a corrente de pulso (I_p), mas superior a corrente de base (I_b).

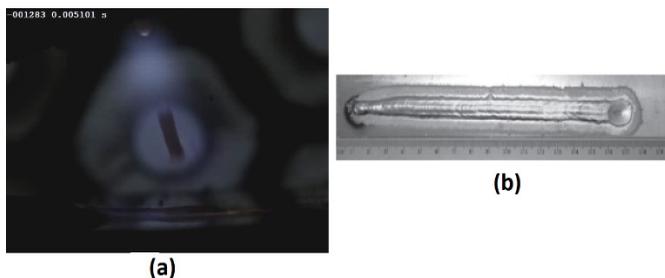


Figura 10 - No caso do alumínio, a gota destacada no período de pulso deforma a gota metálica na forma aproximada de uma elipse (a) prejudicando a aparência do cordão de solda em (b). Adaptado de Dutra, Marques e Silva (2012).

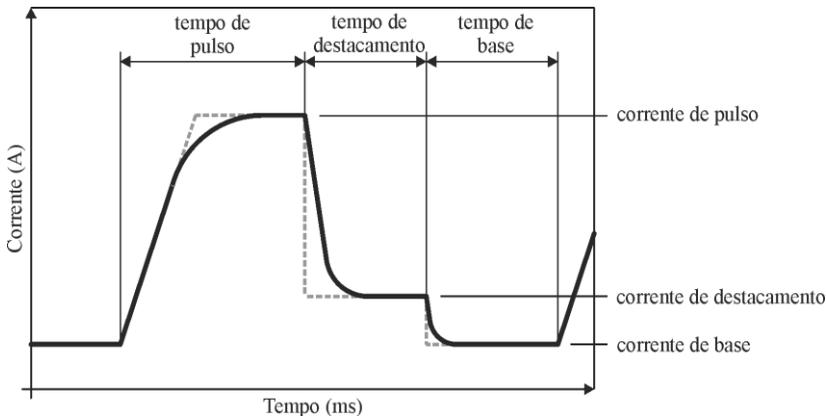


Figura 11 - Forma de onda avançada para MIG/MAG Pulsado que apresenta os parâmetros adicionais de destacamento (t_{fd}) e corrente de destacamento (I_{fd}), além de rampas de elevação e decaimento de corrente. Adaptado de Wu, Chen e Lu (2006).

Os experimentos apresentados a seguir são parte de um Relatório Interno do LABSOLA-UFSC⁵ e destinaram-se a avaliar dois formatos de onda avançados. Neste caso, a análise pormenorizada dos formatos de onda das fontes FRONIUS CMT *Advanced 4000R* (EVANS, 2012) e LINCOLN *Power Wave 455* (LINCOLN, 1999) foi possível devido a filmagem de alta velocidade sincronizada com a aquisição dos formatos de onda de corrente e tensão. Estas fontes apresentam sistemas sinérgicos que denotam a abordagem de cada fabricante no que concerne ao processo MIG/MAG Pulsado aplicado a soldagem de aços ao carbono. A análise das formas de onda das fontes de soldagem demonstrou que os fabricantes FRONIUS e LINCOLN empregam I_p altas (de 556 A e 515 A, respectivamente), se comparadas à *setups* clássicos (AMIN, 1983). Ademais, são empregados t_p relativamente curtos (de 1,5 ms para FRONIUS e 2,4 ms para LINCOLN).

Embora as formas de onda dos sistemas sinérgicos da fonte FRONIUS e LINCOLN incorporem uma fase de destacamento de gota,

⁵ Análise das Formas de onda das Fontes Fronius CMT Advanced 4000R, OTC DW300, Lincoln Power Wave 45. Florianópolis: LABSOLDA_UFSC, 2015. 20 p. Relatório Interno.

caracterizada por t_{fd} e I_{fd} , apenas no primeiro sistema o destacamento da gota realmente ocorreu na fase de destacamento, como se constata na ilustração da **Figura 12**. Esta última mostra quadros consecutivos de filmagem de alta velocidade sincronizada com a aquisição dos sinais de tensão e corrente do sistema da FRONIUS que obedeceu à condição UGPP. Isto não aconteceu no sistema LINCOLN, conforme mostra a **Figura 13**, com destacamento de gotas secundárias seguintes a uma gota principal. Percebe-se que após o destacamento da gota metálica forma-se um filamento que colapsa em gotas menores que a gota principal. A análise dos vídeos sugere que o tempo de pulso (t_p) deve ser suficientemente longo apenas para causar a estrição da gota metálica que será destacada na fase de destacamento. A estrição da gota inicia-se a 1,2 ms após o início da subida da corrente para ambos os sistemas sinérgicos. Após o início da estrição da gota metálica, o sistema sinérgico LINCOLN mantém a gota metálica exposta a corrente de pulso (I_p) por mais 1,2 ms, sendo que logo após se inicia a fase de destacamento. No caso da gota metálica formada no sistema sinérgico da FRONIUS, esta fica apenas 0,3 ms exposta a I_p após sua estrição, tempo bastante pequeno, suficiente apenas para aumentar a estrição da gota e garantir o destacamento depois do pulso. Em termos de estabilidade de transferência metálica, se pode notar que a FRONIUS gera gotas mais esféricas e regulares (sendo UGPP) com melhor direcionabilidade ao longo do eixo do arame, enquanto o sistema LINCOLN gera gotas disformes (em decorrência de menor tensão superficial e, assim, maior sensibilidade a assimetrias da força eletromagnética radial), o que contribui para desvio de sua trajetória do eixo central.

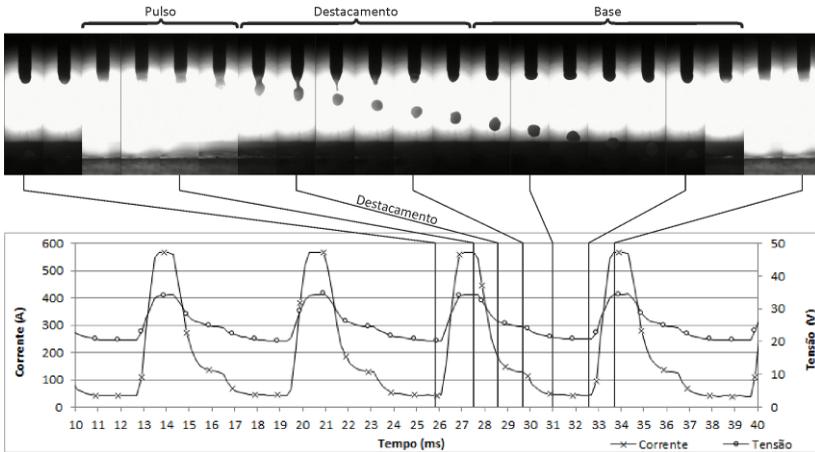


Figura 12 – A transferência metálica no sistema da FRONIUS caracteriza-se pelo destacamento de uma gota por pulso; o destacamento da gota ocorre no início da fase de destacamento.

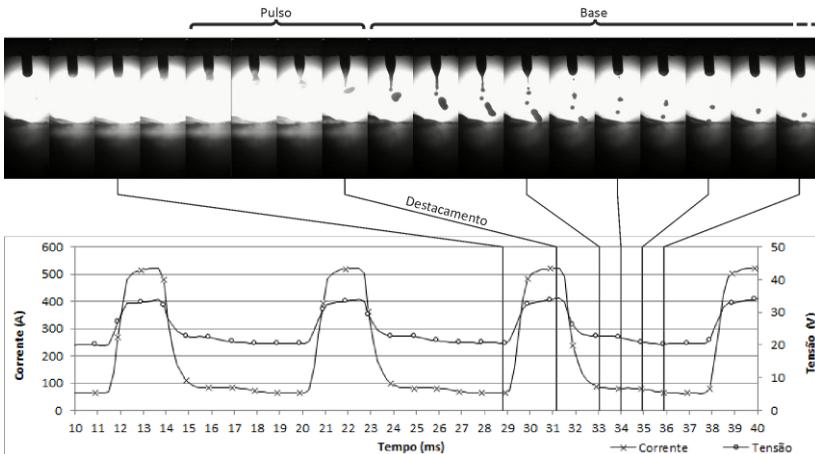


Figura 13 – Transferência metálica no sistema sinérgico LINCOLN caracteriza-se pelo destacamento de uma gota principal e de gotas secundários por pulso; o destacamento da gota ocorre no final da fase de pulso.

2.2.2 MIG/MAG CMT

A união de chapas de aço galvanizado e alumínio, por meio de processos de soldagem a arco, mostra-se um desafio do ponto de vista técnico. Os aspectos limitantes são: formação de fases intermetálicas frágeis (FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_3) cuja espessura aumenta com o calor imposto a junta (CAO *et al.*, 2013) e; os vapores e óxidos de zinco podem causar descontinuidades como porosidade, fusão incompleta e mesmo trincas.

Como solução para estes problemas e com o intuito de atender uma demanda da indústria automobilística, Bruckner (2005) apresentou o sistema MIG/MAG CMT (*Cold Metal Transfer*) cuja principal inovação está na integração da movimentação do arame ao processo de soldagem. Sempre que ocorre o curto-circuito, a corrente de soldagem é reduzida e ocorre a retração do arame para promover o destacamento da gota metálica (**Figura 14**). Enfim, esse sistema surgiu para tornar possível a soldagem (ou solda-brasagem) de juntas de alumínio e aço galvanizando, embora possa ser empregado com sucesso em outras aplicações como por exemplo na soldagem de passes de raiz de chapas de alumínio 5083 (MARQUES, 2013).

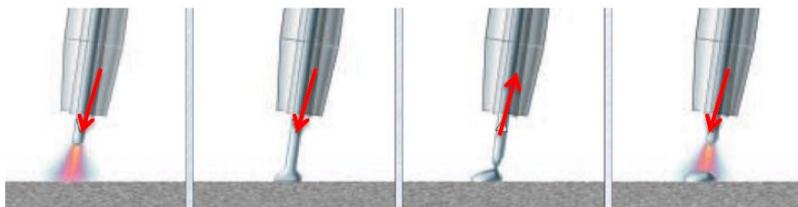


Figura 14 - Movimento de avanço e recuo do arame para o MIG/MAG.

Fonte: Adaptado de FRONIUS (2017).

O LABSOLDA-UFSC passou a estudar o processo CMT com recursos da filmagem de alta velocidade, conduzindo inicialmente ensaios que avaliaram o movimento de avanço e recuo do arame diretamente no

sistema de roletes da tocha de soldagem⁶. Os vídeos realizados possibilitaram a verificação dos valores das distâncias de avanço e recuo, assim como a velocidade média que o motor opera em cada um dos tempos⁷. A **Figura 15** apresenta imagens da filmagem realizada, em duas situações. Na imagem da esquerda verificam-se sobre o rolete as linhas vermelhas que marcam os extremos do movimento de recuo. A imagem da direita mostra o ângulo de deslocamento para o movimento de avanço. Com o valor conhecido do diâmetro do rolete, foi possível determinar os valores de deslocamento e velocidade. Verificou-se que, para a situação testada, com uma corrente regulada em 100 A e arame de alumínio ER4043 de 1,2 mm, as velocidades de recuo foram maiores que as de avanço.

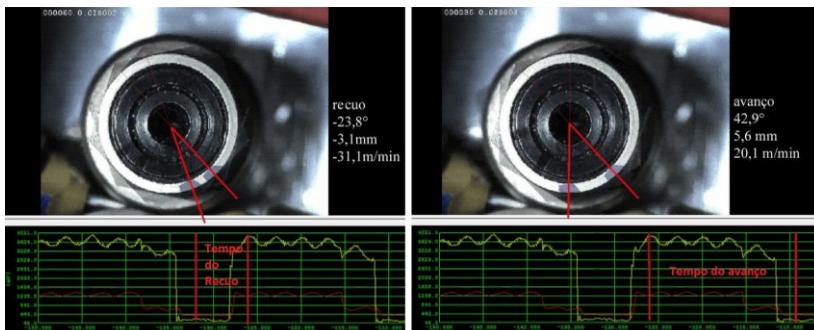


Figura 15 - Análise do avanço e recuo no CMT com filmagem de alta velocidade.

Este é um bom exemplo na qual apenas a monitoração dos sinais de corrente e tensão e, até mesmo apenas a filmagem da transferência metálica, não revela todos os detalhes do processo. Além disso, observa-se um crescimento da aceitação, oferta por diversas empresas e

⁶ A tocha fornecida pela FRONIUS para o processo CMT possui roletes que são responsáveis pelo movimento de recuo característico do processo MIG/MAG CMT.

⁷ Os créditos pelas imagens e pelos resultados são de Cleber Marques e foram apresentados em seu exame de qualificação de título “Análise de técnicas e efeitos físicos da movimentação dinâmica do arame junto à poça de fusão em processos de soldagem MIG/MAG e TIG e desenvolvimentos derivados”.

implementação industrial de processos como MIG/MAG CMT e, do mesmo modo, o TIP TIG, que será visto a seguir.

2.2.3. Processo TIP TIG

Quando há a necessidade de deposição de material, como em soldagens de passes de raiz, por exemplo, o processo TIG permite um bom controle da poça de fusão no que concerne a adição de material, seja sob a forma de vareta (soldagem manual) ou arame (soldagem semiautomática ou automatizada). Isto é devido ao fato de que corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame não têm a relação de dependência característica do processo MIG/MAG, conferindo ao processo uma certa liberdade neste aspecto.

Apesar desta característica favorável, o processo TIG não tem tanta aceitação a nível industrial quando comparado ao processo MIG/MAG, especialmente no que concerne a soldagem mecanizada ou robotizada. Neste caso, a robustez é um fator limitante pois o sucesso da operação de soldagem depende de maneira crítica de aspectos como distância eletrodo-peça (DEP), conservação do eletrodo de tungstênio, limpeza das peças de trabalho, vazão de gás de proteção e correto dimensionamento e alinhamento das juntas. Em suma, o processo exige maiores cuidados operacionais em relação a processos a arco com eletrodos consumíveis. Como agravante, soldagens (especialmente as autógenas) em velocidades de soldagem altas são bastante suscetíveis a incidência de *humping* (SAVAGE; NIPES; AGUSA, 1979).

Para aumentar a capacidade de produção e suprimir a formação de *humping* estudos foram conduzidos e focaram no emprego de misturas de gases (SCHWEDERSKY, 2011), modificações no projeto da tocha como o uso de dois eletrodos (QIN; MENG; FU, 2015) (SCHWEDERSKY *et al.*, 2016). Em outro âmbito, foram desenvolvidas variações de processo, que utilizam alimentação automática de arame, como na década de 1960 onde foi desenvolvida a técnica do *Hot Wire*. (OLIVARES, 2015). Já os sistemas Dabber TIG (RUDY, 1982) e TIP TIG (WILSON, 2007) focam no aumento de desempenho mediante a introdução de alimentação dinâmica de arame e, eventualmente, combinado com *Hot Wire*. Concernente ao TIP TIG, entende-se por alimentação dinâmica como a imposição de um movimento recíproco linear (de avanço e retração) sobreposto à movimentação normal do

arame, conforme ilustrado na **Figura 16**. A reciprocidade é produzida pelo sistema de alimentação de arame, especialmente projetado para essa aplicação (**Figura 17**).

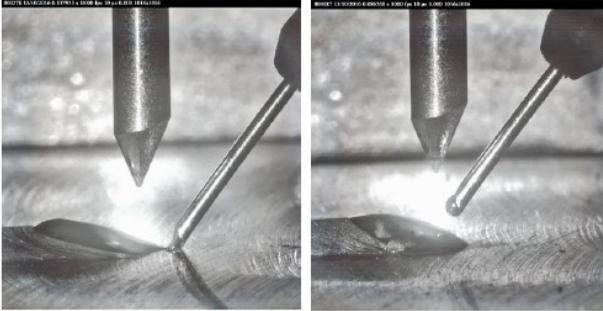


Figura 16 - Filmagem em alta velocidade dos procedimentos de soldagem utilizando alimentação de arame pela frente do arco no TIP TIG, *Cold Wire*, alimentação dinâmica. Fonte: Silva (2016).

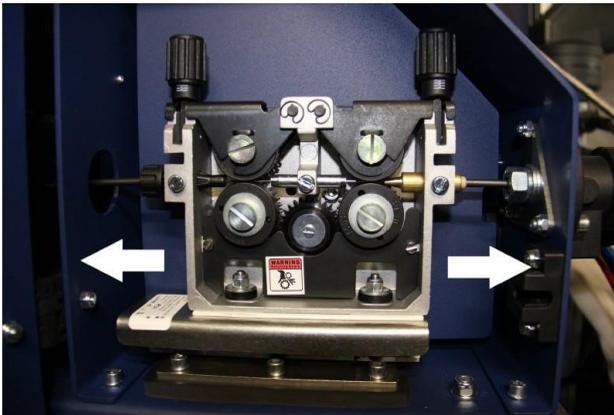


Figura 17 – Sistema de alimentação/oscilação do arame do processo TIP TIG. Fonte: Silva (2016).

Wilson (2007) argumenta que esta oscilação linear na alimentação de arame confere ao TIP TIG uma capacidade de produção comparável ao processo MIG/MAG. Em comparação com o TIG convencional, o TIP TIG permitiria soldagens com velocidades "três vezes maiores", segundo anúncio do próprio fabricante deste equipamento. Ainda segundo Wilson, o motivo para tanto reside no fato de que "o movimento de avanço e retração linear promove energia cinética na poça de fusão". Apesar de sugerir a agitação da poça de fusão promovida pela movimentação do arame, a explicação é no mínimo vaga. Consultando o Manual Técnico do TIP TIG quanto à frequência de oscilação do arame para a produção de tal efeito, este apenas sugere uma regulagem básica e não traz maiores informações. Ou seja, as informações relacionadas a fundamentos básicos do processo ainda carecem em muito de rigor técnico.

Silva (2016) conduziu uma pesquisa exploratória que objetivou justamente dar maior rigor técnico às informações fornecidas pelo fabricante do sistema TIP TIG, focando inicialmente na questão da alimentação dinâmica de arame e baseando-se em dados fornecidos por aquisição de dados via SAP e filmagens de alta velocidade. A partir de análise das filmagens de alta velocidade constatou-se, por exemplo, que pode não haver movimento de recuo do arame durante a soldagem. O recuo do arame é dependente de condições como o peso da bobina de arame, disposição do mangote que condiciona o conduíte e propriedades de atrito intrínsecas ao próprio conduíte (PAES, 2016). Foi possível também determinar como se dá a transferência metálica do processo TIP TIG, já que nesse caso se tem uma alimentação de arame. Com a filmagem em alta velocidade, foi possível caracterizar de forma contundente a transferência metálica e classificá-la em três tipos: por ponte, por destacamento e por destacamento grosseiro (**Figura 18**). Isto variando apenas a distância entre o eletrodo e a extremidade do arame, seguindo a recomendação de Pigozzo (2015).

Silva observa ainda que:

“[...] os benefícios da ação mecânica de pulsação do arame durante a soldagem. Este movimento cria uma perturbação na poça de fusão, que conseqüentemente, modifica as características da tensão superficial, conforme indica o fabricante. A combinação destes fatores gera o aumento da fluidez da poça de fusão, uma maior tolerância

quanto às variações geométricas da junta a ser soldada, isenção de porosidade, controle térmico da poça de fusão e maior molhabilidade do cordão de solda.”

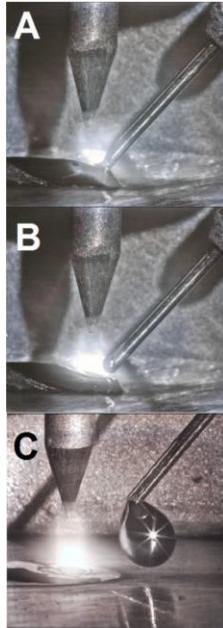


Figura 18 - Diferença entre os modos de transferência metálica com a variação na distância entre o eletrodo e arame, evidenciando a transferência por ponte (A), por destacamento (B), e por destacamento grosseiro (C). Fonte: Silva (2016).

Um passo adiante seria determinar condições de filmagem que permitissem visualizar melhor a movimentação da poça de fusão, o que pode ser um desafio. Mais recentemente, o LABSOLDA-UFSC determinou alguns benefícios do emprego de alimentação dinâmica de arame para o processo TIG comparando uma soldagem com corrente constante e alimentação constante com outra realizada da mesma forma,

porém com alimentação dinâmica⁸. Os corpos de prova foram feitos de chapas de aço carbono SAE 1020, chanfradas posteriormente. Foram realizados dois passes de solda, incluindo o passe de raiz. Na situação onde a corrente foi constante o cordão de solda mostra baixa molhabilidade e, por conseguinte, com excesso de convexidade. Estes problemas podem ser contornados pela utilização de alimentação dinâmica, sendo que a **Figura 19** traz cordões de solda realizadas nesta condição. Possivelmente, a alimentação dinâmica de arame causa uma perturbação (ou agitação) que modifica o fluxo natural de material na poça de fusão. Como consequência, o material fundido acomoda-se de maneira diferente produzindo maior molhabilidade. A soldagem dos corpos de prova foi monitorada por filmagens (**Figura 20**) que sugerem que, no momento do recuo do arame, o rompimento do contato da ponta do arame com a poça de fusão provoca essa agitação.

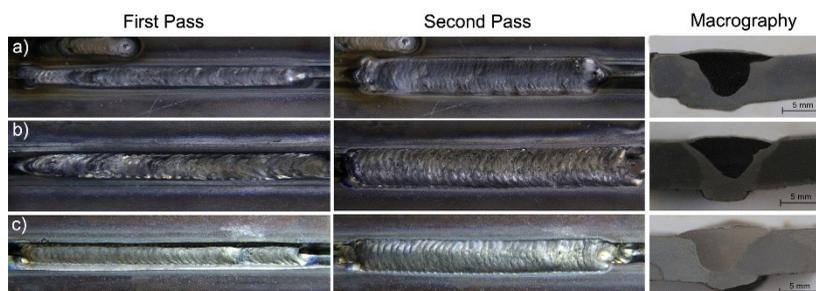


Figura 19 - Aspecto superficial e macrografias para TIG convencional e alimentação dinâmica de arame para três posições de soldagem; (a) vertical ascendente; (b) vertical descendente e; (c) sobrecabeça.

⁸ Os créditos por estes resultados são de Kauê Riffel, Rafael Nunes, Hellington Direne, Matheus Schwedersky e Régis Henrique Gonçalves e Silva. Os resultados completos serão apresentados no congresso *Rio Pipeline Conference & Exhibition 2017*.

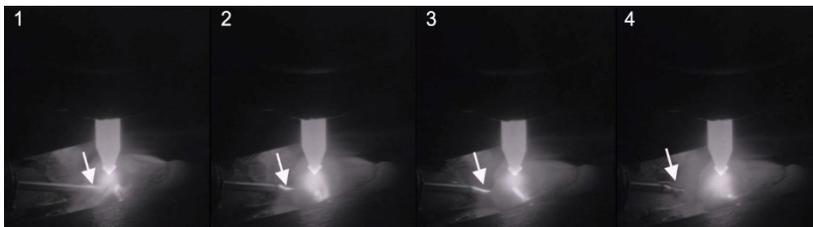


Figura 20 - Imagens do processo TIG convencional com alimentação dinâmica de arame.

2.2.4 Técnica *Schlieren*

O fluxo de gás de proteção através da tocha de soldagem é um ponto importante do processo, pois deste depende a integridade do cordão de solda. Esse ponto se torna cada vez mais importante à medida que se emprega movimentação rápida da tocha de soldagem em processos automatizados o que pode destruir a atmosfera protetora criada pelo fluxo de gás sobre o cordão de solda. Desta forma, torna-se extremamente útil para o desenvolvimento de tochas o ensaio das mesmas em operação empregado a técnica *Schlieren* associada a filmagens de alta velocidade. Embora o exemplo a seguir seja mais focado em projeto, esta técnica também é útil para avaliação do tipo de gás, das características de proteção para diferentes peças (chanfros, chapa plana) e posições de soldagem.

Schwedersky (2015) empregou esta técnica para ensaiar uma tocha projetada para acomodar dois eletrodos de tungstênio, concepção chamada de duplo eletrodo ou TIG-DE. A **Figura 21** mostra o aparato empregado pelo autor para a realização dos testes. A técnica tem como princípio a mudança de velocidade da propagação da luz que acaba causando desvio na direção original da onda. Ao passar através de um meio com maior índice de refração (como um gás diferente, por exemplo), um feixe de luz tende a ser desviado. O desvio será maior conforme maior for a diferença de índice de refração de cada gás. Então emprega-se um arranjo ótico que projeta uma luz paralelamente ao volume que se deseja observar (no caso, o fluxo de gás saindo da tocha de soldagem). Após passar pelo fluxo de gás, o feixe de luz é focalizado empregando-se um

espelho côncavo. Ao posicionar uma lâmina ou chapa com um pequeno orifício central no ponto focal é possível impedir a passagem da parte do feixe de luz que foi desviado e com isso, é formada uma imagem que apresenta regiões mais escuras onde houve a maior refração.

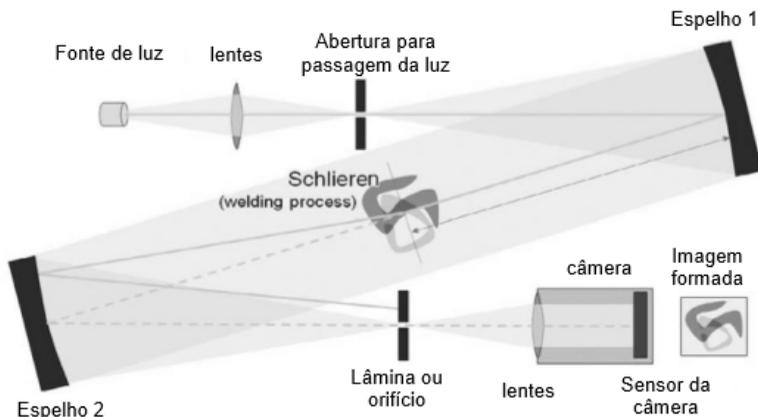


Figura 21 – Aparato para realização de ensaio com a técnica *Schlieren*.
Adaptado de Schnick et al. (2012).

Para a tocha duplo eletrodo, foram ensaiados os quatro bocais mostrados na **Figura 22**. A partir deste experimento foram obtidas as imagens da **Figura 23** para cada um dos bocais empregando CO₂ como gás de teste.

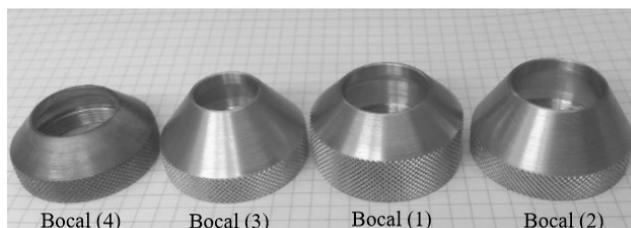


Figura 22 - Bocais com diferentes geometrias ensaiados durante os experimentos com *Schlieren*. Os bocais (1) e (2) possuem 22 mm de diâmetro de abertura, porém com ângulos de saída diferentes. O bocal (3) tem 17 mm de abertura e o bocal (4) tem 22 mm de abertura, mas com comprimento menor. Fonte: Schwedersky (2015).

Quando concluídos, o autor considerou que os ensaios foram de pouca ajuda para a avaliação dos diferentes bocais para a nova tocha uma vez que não foi possível visualizar o fluxo com gás argônio (o gás realmente utilizado no processo) em ensaios subsequentes. Para se conseguir visualizar o fluxo de argônio, foi necessário a filmagem como o arco aberto como mostra a **Figura 24**. Desta forma, o LABSOLDA-UFSC vem tentando iniciativas para dominar esta técnica, dentre as quais este trabalho faz parte.

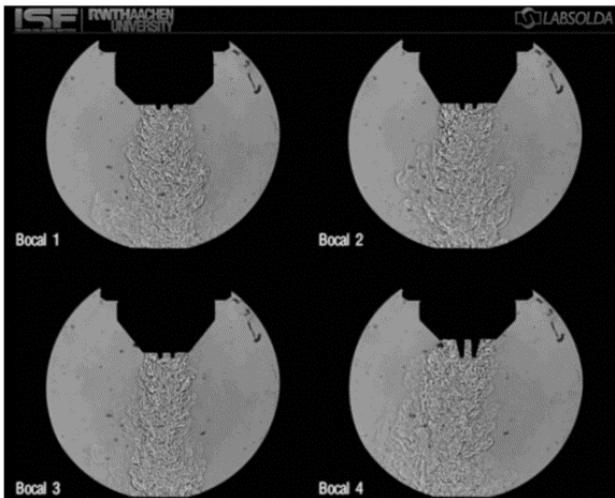


Figura 23 – Imagens obtidas com a técnica *Schlieren* comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais ⁹. Gás utilizado CO₂. Fonte: Schwedersky (2015).

⁹ O vídeo completo pode ser visto em: <http://www.labsolda.ufsc.br/index.php/videos/videos-tecnicos/video/schlieren-tocha-tig-duplo-catodo-sem-arco-bocais-1-2-3-e-4>



Figura 24 - Imagens obtidas com a técnica Schlieren comparando o fluxo de gás com os diferentes bocais ¹⁰. Obtidas com o arco aberto e gás argônio. Vazão utilizada: 10 l/min. Fonte: Schwedersky (2015).

¹⁰ O vídeo completo pode ser visto em: <http://www.labsolda.ufsc.br/index.php/videos/videos-tecnicos/video/schlieren-tocha-tig-duplo-catodo-com-arco-bocais-1-2-3-e-4>

3 FILMAGEM TERMOGRÁFICA – CONTEXTUALIZAÇÃO E APLICAÇÕES

Quando se pensa em produtividade em soldagem, provavelmente a solução que vem à mente está relacionada com automação de soldagem. É sabido que a automação pode aumentar significativamente a produtividade. No entanto, quando se trata de operações de soldagem de alta responsabilidade, sendo o caso mais representativo, a soldagem de tubulações para escoamento de petróleo, gás natural ou produtos químicos agressivos, a inspeção também se torna um fator a ser considerado. Geralmente o trabalho de inspeção é lento e metódico. Tomando como exemplo a construção de uma tubulação do tipo supracitado, um ensaio de raio-X exige o isolamento da área além de ser razoavelmente demorado e, da mesma forma, o processamento e análise dos dados. O ensaio de ultrassom é mais rápido, mas também exige método para ser executado. Em ambos, os técnicos devem ter qualificação para trabalhar com este tipo de ensaio não-destrutivo o que também torna o processo de inspeção mais custoso. Por fim, nenhum dos ensaios pode ser realizado em tempo real.

Em busca de um procedimento de inspeção mais simples, que seja menos exigente em termos de treinamento e que possa ser realizado instantes após a realização do cordão ou mesmo em tempo real, este trabalho visará avaliar a possibilidade de usar técnicas de termografia para inspeção de soldagem. Evidentemente, que não se espera substituir de imediato os ensaios não-destrutivos já consolidados e constantes em norma, mas verificar a viabilidade das técnicas de termografia. Enfim, mostrar sua confiabilidade pode ser equiparada às técnicas tradicionais.

De ordem menos prática, embora também de importância, tem-se como segundo objetivo, avaliar a eficiência da filmagem termográfica como ferramenta para o estudo dos processos de soldagem no que tange a o fluxo de calor na poça de fusão.

Portanto, este capítulo apresentará alguns princípios básicos de transferência de calor por radiação onde serão definidas a natureza da radiação térmica, o espectro eletromagnético e a faixa onde a radiação térmica atua, os conceitos de emitância, corpo negro e emissividade, a influência do ambiente e as preocupações iniciais no momento de calibrar uma câmera termográfica. O entendimento destes conceitos é

fundamental em termografia. Em seguida o funcionamento básico da câmera é levado em conta assim como a imagem térmica e outras considerações de ordem técnica. Por fim, são analisadas as aplicações mais comuns da termografia na indústria e mais especificamente na área de soldagem.

3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA POR RADIAÇÃO E ASPECTOS TECNOLÓGICOS

O controle de temperatura é crucial para uma diversidade de processos industriais, por exemplo:

- Processos de fundição;
- Produção de alimentos;
- Destilação fracionada do petróleo;
- Tratamento térmico de metais;
- Processos de injeção de plásticos;
- Usinagem de materiais;
- No interior de um motor a combustão;
- Produção de energia elétrica por usinas nucleares ou termoelétricas etc.

Nestes casos, a aplicação de termômetros, pirômetros e outros tipos de medidores de temperatura pode ser suficiente para controlar esses processos. Em alguns casos, nem sempre estes dispositivos são os mais adequados, especialmente quando, por motivos de segurança, é desejável estar distante do alvo ou quando se quer fazer uma análise da variação de temperatura a fim de sistematizar um fenômeno mais específico. Por exemplo, a inspeção de um quadro elétrico de comando pode ser mais eficiente usando-se técnicas de termografia. O conhecimento do fluxo de calor em uma chapa sendo soldada pode ser determinante para a prevenção de uma falha posterior.

Define-se termografia infravermelha como “a ciência de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas sem contato” (ITC, 2013). Termografia significa “escrever com o calor” e a imagem gerada costuma ser chamada

de “termograma” ou imagem termográfica. As vantagens do emprego desta técnica são sintetizadas na lista a seguir:

- Possibilidade de medir temperaturas sem que haja contato do instrumento com o alvo;
- Medir temperaturas a distância e em locais de difícil acesso;
- É possível visualizar os dados em duas dimensões (imagem térmica) e;
- É possível analisar o comportamento da temperatura no tempo em função de um determinado tipo de aquecimento em tempo real.

3.1.1 Radiação térmica

Primeiramente, os modos de troca de energia por radiação são quatro como segue (ITC, 2013):

- Emissão: quando energia é liberada pelo material;
- Absorção: quando energia é retida pelo material;
- Reflexão: quando energia é refletida pelo material e;
- Transmissão: quando energia é transmitida pelo material.

Todo material emite e absorve continuamente ondas eletromagnéticas ou fótons, pelo incremento ou decremento de seus níveis de energia (MODEST, 2013). A força e os comprimentos de onda das emissões dependem da temperatura do material. A transferência de calor como radiação térmica se distingue das demais formas de transferência de calor - condução e convecção - de formas notáveis. Tal como a luz, a radiação térmica se propaga no vácuo e tem natureza “dual” (dualidade onda-partícula), *i.e.*, em alguns momentos é mais adequado considerá-la uma onda eletromagnética como, por exemplo, quando se propaga no vácuo ou em um meio qualquer. Quando se trata dos fenômenos de emissão e absorção é mais conveniente tratá-la como sendo formada por fótons (HECHT, 2002). As propriedades radiativas geralmente são difíceis de medir e muitas vezes exibem comportamento errático (MODEST, 2013). Como a transferência de calor por radiação torna-se mais importante a medida que a temperatura aumenta, pode chegar a um ponto onde é predominante sobre a condução e a convecção. Deve-se considerá-la seriamente em aplicações como fornos, foguetes, motores,

reações nucleares, durante a reentrada de veículos espaciais e em aplicações de coleta de energia solar.

3.1.2 O espectro eletromagnético

A radiação térmica se propaga em todas as faixas do espectro eletromagnético. Boa parte da energia solar que chega ao planeta Terra está no espectro visível da luz. No entanto, em objetos que se encontram ao nosso redor, normalmente a propagação se dá na faixa do infravermelho (ITC, 2013). Todas as ondas eletromagnéticas ou fótons, propagam-se através de qualquer meio em alta velocidade. Como a luz é uma parte do espectro eletromagnético, esta velocidade é conhecida como velocidade da luz, c . A velocidade da luz depende do meio através do qual a onda eletromagnética viaja, e deve ser relacionada a velocidade da luz no vácuo (absoluta), c_0 :

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (4)$$

onde n é o índice de proporcionalidade, mais conhecido como índice de refração absoluto. Para o vácuo, o índice de refração é $n \equiv 1$ e no ar corresponde a $n = 1,00029$, ou seja, tanto para o vácuo quanto para o ar, a luz e as demais ondas eletromagnéticas se propagam praticamente na mesma velocidade. O comprimento de onda λ diminui quando a onda eletromagnética passa para um meio mais refringente como mostra a **Figura 25**.

Mais apropriadamente, para caracterizar uma onda eletromagnética deve-se ter em conta: frequência, ν (medida em Hz); comprimento de onda, λ (μm ou nm) e; frequência angular, ω (radianos/s). As quatro grandezas estão relacionadas conforme a **Equação 5**:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = c\eta \quad (5)$$

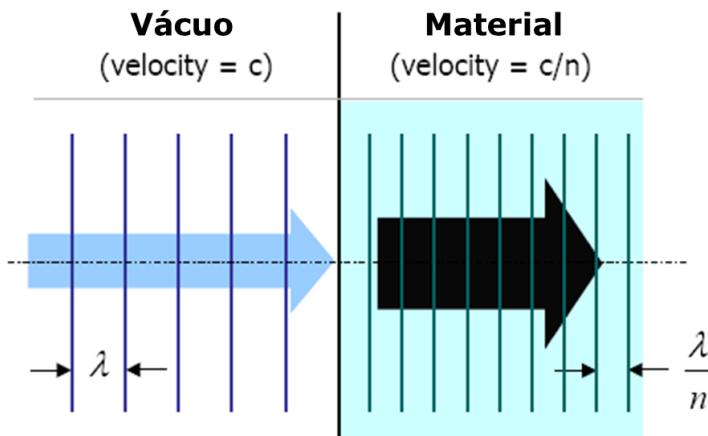


Figura 25 - Velocidade da luz no vácuo e em um meio material. Alteração na velocidade c e no comprimento de onda λ segundo um mesmo índice de proporcionalidade n (índice de refração). Fonte: Albertazzi (2017).

Cada onda ou fóton carrega consigo uma energia ϵ , de tal forma que:

$$\epsilon = h\nu, \quad (6)$$

sendo que h é a constante de Planck¹¹.

A radiação térmica pode ser definida como “aquela cujas ondas eletromagnéticas são emitidas por um meio em razão apenas de sua temperatura” (MODEST, 2013). O espectro eletromagnético, apresentado na **Figura 26**, mostra as faixas de frequência e comprimentos de onda. O infravermelho (IV), de maior importância no âmbito deste trabalho,

¹¹ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947) – físico teórico alemão que desenvolveu a teoria quântica, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1918, além de outras contribuições. Sua teoria quântica revolucionou o entendimento dos processos atômicos e subatômicos ao mesmo tempo que a relatividade de Albert Einstein revolucionava o entendimento sobre espaço e tempo. O valor numérico da constante de Planck com a precisão conhecida de hoje é $h = 6,62606957 \times 10^{-34}$ J.s.

estende-se de 3×10^{11} a 4×10^{14} Hz e pode-se dividi-lo em quatro regiões, embora esta divisão seja imprecisa segundo Hecht (2002):

- IV próximo ou próximo do visível (780-3000 nm);
- IV intermediário (3000-6000 nm);
- IV térmico (6000-15000 nm) e;
- IV longínquo (15000 nm-1 mm).

O infravermelho é emitido abundantemente, num espectro contínuo, por corpos quentes, tais como aquecedores elétricos, carvão em brasa, aquecedores domésticos e, cerca de metade da energia emitida pelo sol é no IV. Uma lâmpada elétrica incandescente emite mais radiação IV do que luz no espectro visível (HECHT, 2017).

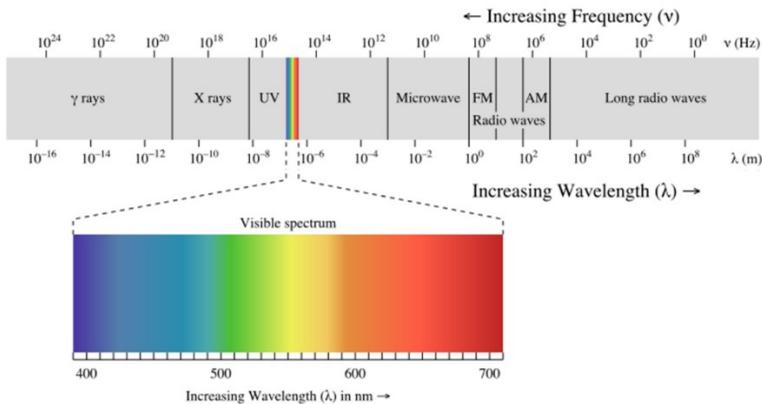


Figura 26 – Espectro eletromagnético (para radiação viajando através do vácuo). Fonte: Albertazzi (2017).

3.1.3 Corpo negro e emitância

Quando uma onda eletromagnética incide sobre um material sólido ou líquido parte da energia é refletida e parte penetra o meio. A quantidade de energia que consegue penetrar o meio depende do tipo de

material. Um material pode ser “opaco” onde a radiação penetra, mas não reemerge ou em outras palavras, a onda eletromagnética é bastante atenuada. O contrário é um material “transparente” e quando uma onda eletromagnética é parcialmente atenuada, este material é dito “semitransparente”. Um material opaco que não reflete nenhuma radiação é chamado de “absorvedor perfeito” (*perfect absorber*) ou “corpo negro”. Como se viu anteriormente, normalmente um corpo absorve, reflete radiação e deixa parte desta passar. De maneira simples, o balanço de energia segue a **Equação 7**:

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (7)$$

onde os coeficientes α , ρ e τ descrevem a energia absorvida, refletida e transmitida (refratada), respectivamente. Cada coeficiente pode ter um valor de 0 a 1 e, quando $\alpha = 1$, $\rho = 0$ e $\tau = 0$, tem-se um corpo negro perfeito (FLIR, 2015). Embora inexistentes na natureza, os corpos negros servem como padrão para a classificação das demais superfícies pois absorveriam o máximo possível de energia radiativa. Ao mesmo tempo que os corpos negros absorvem muita radiação, também emitem muita energia radiativa, mais do que qualquer outro corpo a mesma temperatura. Em suma, os corpos negros são perfeitos absorvedores e emissores de energia radiativa em qualquer comprimento de onda e em qualquer direção.

As curvas na **Figura 27** representam a Lei de Planck em forma de gráfico, ou a radiação por unidade de comprimento de onda e unidade de área, chamada de “emitância espectral radiante de corpo negro” (FLIR, 2015). Quanto mais alta a temperatura, mais intensa é a emissão de radiação. Cada curva de emissão tem um valor máximo distinto em um certo comprimento de onda. O valor máximo pode ser calculado pela lei de deslocamento de Wien¹²:

$$\lambda_{max} = 2898/T, \quad (8)$$

¹² Wilhelm Wien (1864 - 1928) – físico alemão que recebeu o Prêmio Nobel em 1911 por sua Lei de deslocamento concernente a emissão de radiação por corpos negros.

onde λ_{max} é o comprimento de onda na intensidade máxima.

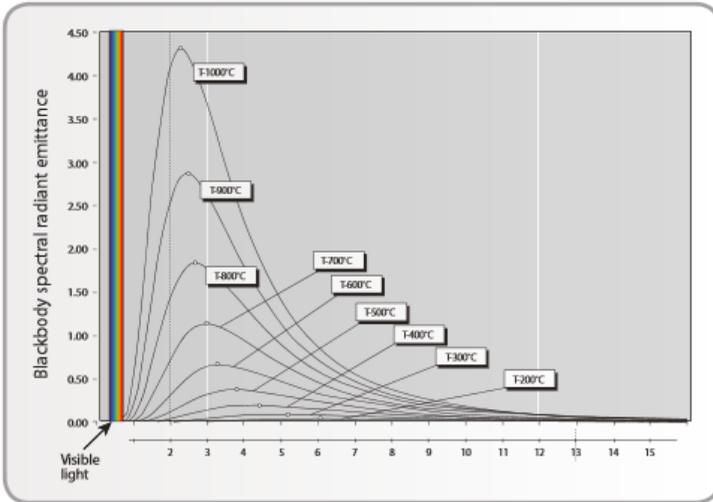


Figura 27 – Resultados da Lei de Planck descritos graficamente. Fonte: FLIR (2015).

Usando as curvas de emitância ou a Equação 10, é possível determinar que, por exemplo:

“[...] um objeto a 30°C tem um máximo próximo a 10 μm. Um objeto a 1000°C tem uma intensidade radiante máxima a 2,3 μm. O último caso tem uma emitância aproximadamente 1400 vezes maior do que o corpo negro a 30°C, com uma parte considerável da radiação no espectro visível” (FLIR, 2015).

O entendimento adequado destas curvas é importante na calibração da câmera termográfica. A Lei de Stefan-Boltzmann¹³ pode ser usada para calcular o total de energia irradiada por um corpo negro que a partir de agora, por conveniência será denotada por W_b :

$$W_b = \sigma T^4, \quad (9)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). Por exemplo, de acordo com a Equação (9) um corpo negro hipotético com uma temperatura de 300K pode irradiar 500 W/m².

3.1.4 Emissividade

Como não se vai tentar medir a temperatura de um corpo negro, é necessário determinar a **Equação (9)** para objetos normais. As propriedades radiativas de outros objetos são descritas em relação ao corpo negro perfeito (FLIR, 2015). Se um corpo negro irradia uma energia denotada por W_b e um objeto normal a mesma temperatura irradia W_o , então a razão entre os dois valores é:

$$\varepsilon = \frac{W_o}{W_b} \quad (10)$$

Logo a emissividade ε é um número entre 0 e 1 e quanto melhores as propriedades radiativas do objeto, maior a sua emissividade. A **Tabela 2** mostra o valor de emissividade para alguns metais. Comparando dois materiais, o ferro fundido ($\varepsilon = 0,81$) emite mais radiação do que o aço inoxidável ($\varepsilon = 0,45$), por exemplo. A **Equação (11)** então incorpora o valor de ε no momento do cálculo de fluxo radiante a partir de objetos comuns, de modo que se tem:

$$W_o = \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

¹³ Esta lei recebeu os nomes dos cientistas austríacos Josef Stefan (1835 – 1893) e Ludwig Edward Boltzmann (1844 – 1906). O primeiro desenvolveu a lei teoricamente enquanto o segundo a provou experimentalmente.

Tabela 2 – Valores de emissividade (ϵ) para alguns metais.

Material	Especificação	Espectro	Emissividade (ϵ)
Alumínio	Anodizado, cinza claro, opaco	2-5 μm	0,61
Latão	Placa, laminada	Espectro total	0,06
Ferro fundido	Fundido	Espectro total	0,81
Bronze	Fosforo Bronze	8-14 μm	0,06
Aço	Laminado sob alta temperatura	Espectro total	0,6
Magnésio	Polido	Espectro total	0,07
Aço inoxidável	Laminado	Espectro total	0,45

Fonte: FLIR (2015).

3.1.5 Influência da atmosfera

Em um experimento, onde se deseja filmar termograficamente um objeto aquecido, o próprio ar atmosférico e outros gases que possam estar entre a câmera termográfica e o objeto, tenderão a atenuar a radiação emitida mascarando as medições. Esta atenuação se dá por absorção nos gases e dispersão nas partículas e depende do comprimento de onda da radiação. A atmosfera normalmente transmite luz visível muito bem, contudo, neblina, fumaça, chuva e neve podem impedir que objetos distantes sejam observados (FLIR, 2015). O mesmo princípio vale para radiação infravermelha.

Faz-se necessário um sistema de correção que previna que temperaturas medidas por termografia sejam cada vez mais atenuadas (*i.e.*, cada vez mais distantes do valor verdadeiro) à medida que a distância objeto-câmera aumenta. Os *softwares* de câmeras infravermelhas normalmente disponibilizam esse sistema de correção, sendo outro parâmetro de importância na fidelidade dos resultados deste tipo de medição. Usualmente, câmeras infravermelhas que captam comprimentos de onda longos (*long wavelength cameras*), na faixa de 8 a 14 μm (*long wave windows*) costumam fornecer resultados confiáveis a despeito da atenuação causada pelo ambiente pois a atmosfera tende a agir como um filtro passa-alta acima de 7,5 μm . Câmeras que trabalham na faixa de 2

até 5,6 μm (*short/mid-wave windows*) empregam sensores altamente sensíveis para aplicações militares e de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia de ponta. Neste caso, a correta calibração da câmera para compensar a atenuação causada pela atmosfera é fundamental para que os resultados sejam confiáveis.

3.1.6 A câmera termográfica

Os principais componentes de uma câmera termográfica são: as lentes, o detector (*focal plane array* ou FPA), um resfriador (*cooler*) para o detector e a parte eletrônica auxiliar e *software* para processamento e visualização de imagens. A câmera converte radiação infravermelha invisível em uma imagem visível (FLIR, 2015). A radiação infravermelha é irradiada a partir do alvo e a câmera capta isso. Amparadas pela **Figura 28**, as palavras a seguir resumem de maneira bastante simples o funcionamento de uma câmera termográfica:

“A radiação infravermelha passa através de lentes, e é focalizada no detector, muito parecido com o que ocorre com a radiação visual no filme de uma câmera normal. O detector criará um sinal elétrico de algum tipo, que variará de acordo com a intensidade da radiação infravermelha que incide nele. Nota: a intensidade, nada mais! O sinal elétrico é amplificado e digitalizado e enviado para os componentes eletrônicos da câmera. Ele então é convertido em uma figura que é exibida no visor da câmera, e aí podemos ver uma imagem infravermelha.” (ITC, 2013).

A câmera termográfica capta tanto a radiação infravermelha refletida quanto a emitida. A câmera termográfica não mede temperaturas, mede a radiação e calcula a temperatura (FLIR, 2015). Há dois tipos básicos de câmeras termográficas, conforme seus detectores, já citados no item sobre influência da atmosfera, chamados de janelas atmosféricas (*atmospheric windows*): aqueles que estão na faixa de comprimento de onda curtos/médio (SW/MW) e as que estão na faixa de comprimento de onda longo (LW).

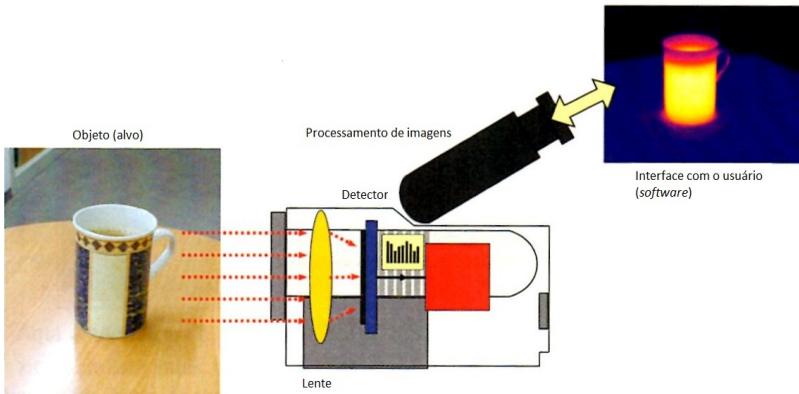


Figura 28 - Princípio de funcionamento básico de uma câmera termográfica. A caneca de café emite radiação infravermelha e ao incidir sobre a lente da câmera, esta é focalizada no detector (sensor) que, por sua vez, cria um sinal elétrico convertido mais tarde em imagem. Fonte: (ITC, 2013).

3.1.8 A imagem térmica

A imagem térmica ou termograma é uma imagem da intensidade de radiação térmica e não uma figura de distribuição de temperatura. Na **Figura 29**, que apresenta uma xícara azul com detalhes em dourado. Embora toda a superfície da xícara esteja mais ou menos a mesma temperatura, na imagem térmica a parte azul tem uma emissividade elevada e, portanto, irradiará mais do que a impressão dourada, que tem emissividade mais baixa. A imagem térmica mostra as diferenças de intensidade de radiação, mas não diferenças reais de temperatura (ITC, 2013). Em outras palavras, o que provoca o contraste na imagem térmica é diferença de emissividade e não de temperatura.



Figura 29 – Xícara azul com impressões em azul e dourado; imagem normal e térmica. Fonte: ITC (2013).

Reflexos podem ser problemáticos quando se tenta realizar uma filmagem cujo o alvo é um material reflexivo. A **Figura 30** apresenta um técnico fazendo uma filmagem de frente para uma chapa de aço inoxidável. Para evitar esse resultado, obviamente, a primeira medida é evitar ficar diretamente de frente para o alvo. Depois deve-se posicionar a câmera em um ângulo que esta não apareça no termograma. Tapumes podem ser empregados para bloquear a luz proveniente de outras fontes e possíveis fontes de reflexo.

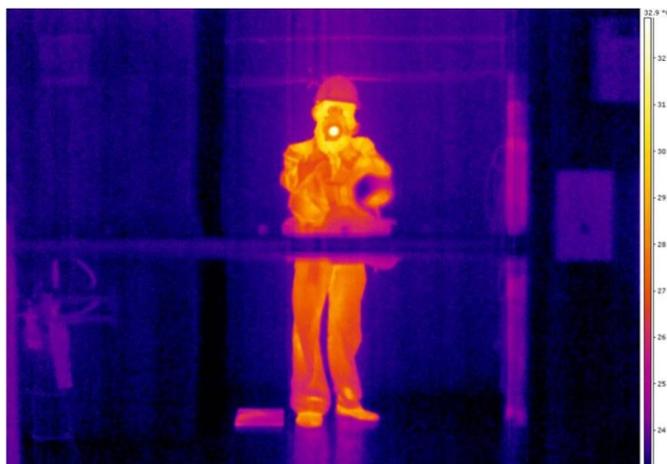


Figura 30 – O problema da reflexão. Fonte: ITC (2013).

3.1.9 Temperatura aparente

Em definição, a temperatura aparente “é a leitura não compensada de uma câmera infravermelha, contendo toda a radiação incidente no instrumento, independente de suas fontes” (ITC, 2013). Isto é, quando no *software* da câmera ou na interface, ajusta-se a emissividade para 1,0 e distância objeto-câmera em zero, mede-se a temperatura aparente, pois nenhuma compensação é feita.

A temperatura verdadeira é medida quando se faz as compensações necessárias, entre elas a regulagem de emissividade (propriedade do alvo) e outras devem ser considerados como temperatura ambiente e umidade relativa (propriedades do ambiente). Lembrando que a compensação ou a regulagem dos parâmetros da câmera não alteram a imagem térmica em si e sim os resultados das medições. Por exemplo, na **Figura 31** em (a) tem-se uma imagem térmica na qual os valores de emissividade (“Emiss”) e temperatura ambiente (“Tamb”) estão em destaque. Há também três pontos de controle em Sp1, Sp2 e Sp3. Os valores para cada ponto estão no canto superior direito da imagem (a). Em (b) os valores de emissividade e temperatura ambiente são alterados de modo que as temperaturas medidas também são. A imagem térmica não é alterada pois a intensidade da radiação emitida pelos alvos não se modifica.

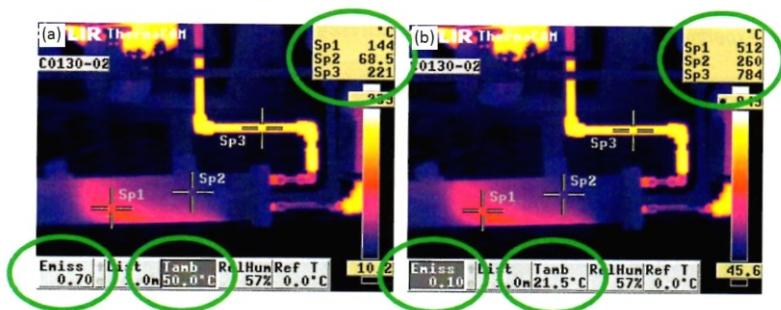


Figura 31– Dois exemplos diferentes de compensação de parâmetros do objeto para a mesma imagem. (a) emissividade em 0,70 e temperatura ambiente em 50,0°C. (b) emissividade em 0,10 e temperatura ambiente em 21,5°C. Fonte: ITC (2013).

3.1.10 Termografia ativa e passiva

A termografia pode ser classificada em duas abordagens quando se considera esta como uma técnica de ensaio não-destrutivo (RODRÍGUEZ, 2014): termografia passiva e termografia ativa. Na termografia passiva não há aquecimento do objeto a ser monitorado (ou testado) por meio de uma fonte de calor externa. Esta análise tem por objetivo detectar “comportamentos de temperatura anormais que revelam problemas potenciais” (RODRÍGUEZ, 2014), ou seja, descontinuidades ou defeitos internos em uma peça de um determinado material. Essencialmente, na termografia ativa, algum tipo de estimulação é utilizado para aumentar a temperatura do objeto (induzir um fluxo de calor na peça). A Figura 32 mostra alguns métodos para provocar o aumento de temperatura no objeto a ser monitorado a fim de detectar uma falha. Para processos de soldagem, contudo, estes métodos são desnecessários se a técnica de termografia for empregada em tempo real.

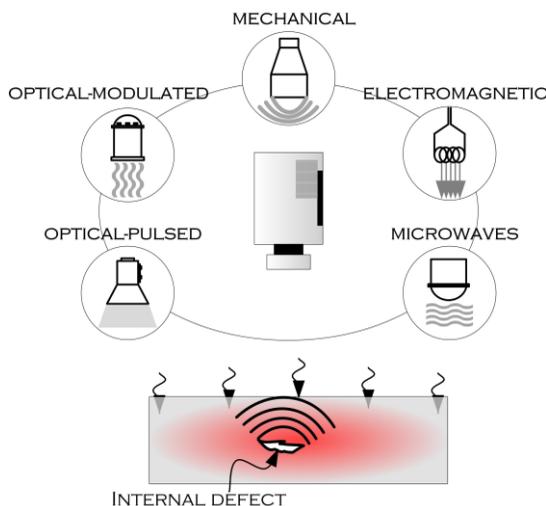


Figura 32 - Métodos para indução de um fluxo de calor em um objeto para ensaio por termografia. Fonte: Rodríguez (2014).

3.2. APLICAÇÕES NA ANÁLISE DE PROCESSOS, INSPEÇÃO E CONTROLE

Este item visa demonstrar a utilidade da filmagem termográfica especificamente na área de soldagem, inspeção e controle. Como primeiro exemplo tem-se Olivares *et al.* (2015) que empregou imagens termográficas para avaliar comparativamente o resfriamento do eletrodo de tungstênio em uma tocha do tipo Infocus¹⁴ em relação a uma tocha TIG convencional, mas com capacidade para suportar correntes de até 520 A)¹⁵. Os resultados das imagens termográficas (**Figura 33**), demonstram que a tocha Infocus consegue manter uma temperatura menor (30 °C) que uma tocha convencional.

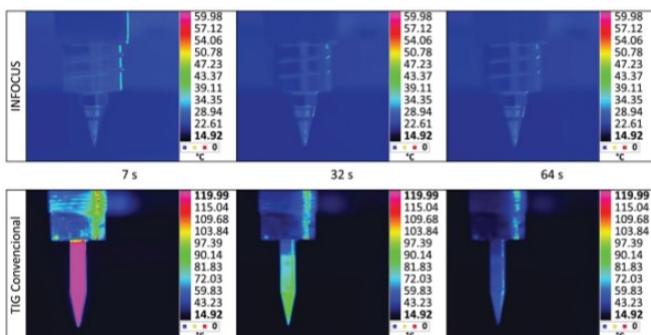


Figura 33 – Imagens térmicas obtidas de uma tocha Infocus e uma tocha TIG convencional logo após terem sido empregadas na soldagem de um cordão de 27 cm, a mesma velocidade e com corrente de soldagem de 520 A. Fonte: Olivares *et al.* (2015).

¹⁴ A tocha Infocus é descrita como capaz de produzir um arco mais constricto pela delimitação da região de emissão de elétrons do eletrodo de tungstênio. Essa característica deve-se ao sistema de refrigeração do eletrodo, projeto e material da tocha. Para maiores informações acessar <http://www.kjellberg.de/files/Documents/Welding/Applications/High-Performance-Welding-InFocus.pdf>

¹⁵ Ambas as tochas foram ensaiadas sob condições iguais. A corrente, a velocidade de soldagem e o comprimento do cordão de solda foram mantidos constantes.

Esse resultado demonstra que a tocha Infocus tem um sistema de refrigeração muito mais eficiente do que as tochas convencionais, o que torna possível a realização de cordões de solda em correntes bastante altas (mais de 1000 A) por grandes períodos de tempo.

O trabalho de Paes (2016) tratou sobre o emprego de soldagem TIG com alimentação dinâmica de arame na soldagem de passes de raiz em tubulações e avaliou seu desempenho no que diz respeito a produtividade além de outros fatores. Como parte da análise, foi qualificada a influência da alimentação dinâmica de arame no gradiente térmico da poça de fusão. Para avaliar a influência da alimentação dinâmica de material sobre a poça de fusão, Paes instalou uma câmera termográfica embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto se conduzia soldagem com TIG nos modos sem alimentação (processo autógeno), com alimentação contínua de arame e com alimentação dinâmica. A **Figura 34** evidencia que a adição de material afeta a temperatura da poça de fusão e, que a medida que a frequência da alimentação dinâmica de arame aumenta temperatura da poça de fusão diminui. Este autor sugere que o resultado pode estar associado “ao fato do arame ter se deslocado para fora do arco voltaico e ter trocado calor com o ambiente” (PAES, 2016). Quando o arame retorna tem-se então, uma redução da temperatura da poça de fusão. Ademais, parte do calor do arco também se perde na fusão do arame de adição.

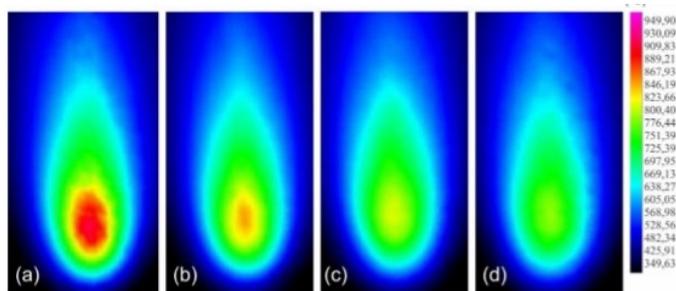


Figura 34 – Imagem térmica obtida com câmera embaixo de uma chapa de aço carbono enquanto estava sendo submetida a soldagem TIG de quatro maneiras diferentes: (a) processo autógeno; (b) processo com alimentação contínua; (c) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz; (d) processo com alimentação dinâmica e frequência de 1 Hz. Fonte: Paes (2016).

Schwedersky *et al.* (2017) avaliaram a eficiência da técnica de *switch back*¹⁶ no aumento de produtividade do processo TIG. É de senso comum que, quando se aumenta a velocidade de soldagem, deve-se aumentar também valor de corrente o que faz com que ocorra um aumento de pressão sobre a poça de fusão que é responsável pela formação de *humping*. Atribui-se ao *switch back* a capacidade de modificar o perfil da poça de fusão como mostra a **Figura 35**. É possível notar que com o movimento de *switch back* a parte posterior da poça é mais alongada na superfície (**Figura 35.a**). Isso favorece uma distribuição de calor e da pressão sobre a poça de fusão inibindo a formação de *humping*. A **Figura 35** mostra ainda que as temperaturas são diferentes no verso da chapa assim como a morfologia da poça. Neste caso, a região mais quente em (b) está mais afastada do centro do arco e tem comprimento menor. Isto foi confirmado com uma filmagem termográfica apresentada na **Figura 36**.

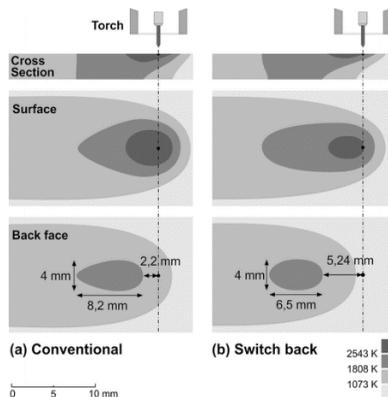


Figura 35 – Simulação comparando o perfil de temperatura na poça entre: (a) fusão entre o movimento convencional (linear) e (b) movimento de switch back. Adaptado de Kaneko, Yamane e Oshima (2009).

¹⁶ O *switch back* é uma técnica de soldagem que consiste em oscilar a tocha de soldagem no sentido longitudinal ao cordão de solda, havendo necessariamente uma sobreposição de trajetória entre o movimento de reversão e o movimento de avanço. Mais informações em http://www.labsolda.ufsc.br/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2015_guilherme.pdf

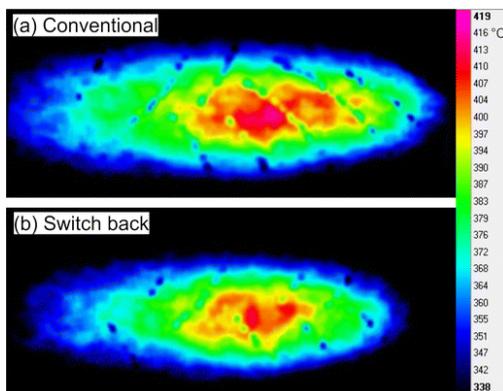


Figura 36 - Temperatura no verso da chapa durante uma soldagem TIG com (a) movimentação convencional (linear) e; (b) movimento de *switch back* (frequência de 2 Hz, avançando 10 mm em 300 ms e retornando 7,5 mm em 200 ms). Fonte: Schwedersky *et al.* (2017).

Em aplicações como as citadas anteriormente, a termografia é bastante útil e já está consolidada. Embora o emprego de termografia na área de inspeção de soldagem ainda não esteja tão bem estabelecida, já existem trabalhos que demonstram que o estudo desta área pode render bons frutos. O trabalho de Venkatraman *et al.* (2006) aponta para a possibilidade do uso de termografia para a detecção de falta de penetração na soldagem de raiz com TIG de juntas de topo formadas por chapas de aço inoxidável AISI 316 LN com 8 mm de espessura e com chanfro em “V”. Ao monitorar a soldagem de um passe de raiz em uma destas juntas, os autores identificaram a formação de um “ponto frio” na imagem térmica que denota falta de penetração nesta região (**Figura 37**).

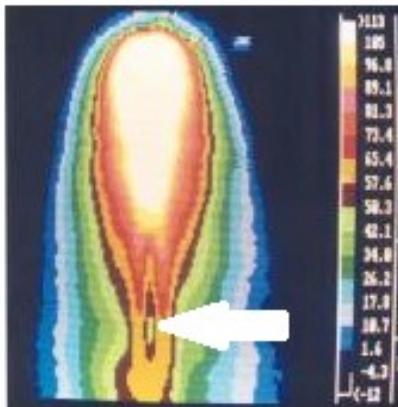


Figura 37 - Identificação de um “ponto frio” em uma imagem termográfica na soldagem de um passe de raiz. Fonte: Venkatraman *et al.* (2006).

Sreedhar *et al.* (2012) obtiveram avanços empregando termografia para monitorar a soldagem TIG de um reservatório de alumínio AA-2219-T87. Como mostra a **Figura 38** os autores fixaram a câmera junto a tocha de modo a focar a imagem 150 mm distante da região do arco voltaico. Este procedimento evitou a saturação da imagem e capturou imagens do cordão de solda já formado e em processo de resfriamento. Em seguida à captura, as imagens foram tratadas em um algoritmo desenvolvido no MATLAB para obter o gráfico da **Figura 39**. Este mostra que, em uma área de interesse, a região onde há descontinuidades (*defect region*) possui uma assinatura térmica distinta daquela onde o cordão de solda é são (*no defect region*). Um segundo algoritmo foi desenvolvido para permitir a comparação entre radiografias e imagens térmicas conforme apresentado na **Figura 40** onde o autor evidencia o indício da formação de um poro na imagem térmica, confirmada por radiografia. Deste modo, com um trabalho que poderá envolver o desenvolvimento de algoritmos para tratamento de imagem, é possível identificar indícios termográficos de descontinuidades internas em cordões de solda.

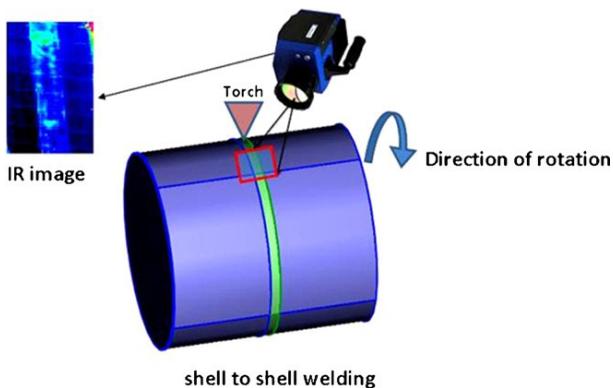


Figura 38 – Representação esquemática do experimento realizado por Sreedhar *et al.* (2012).

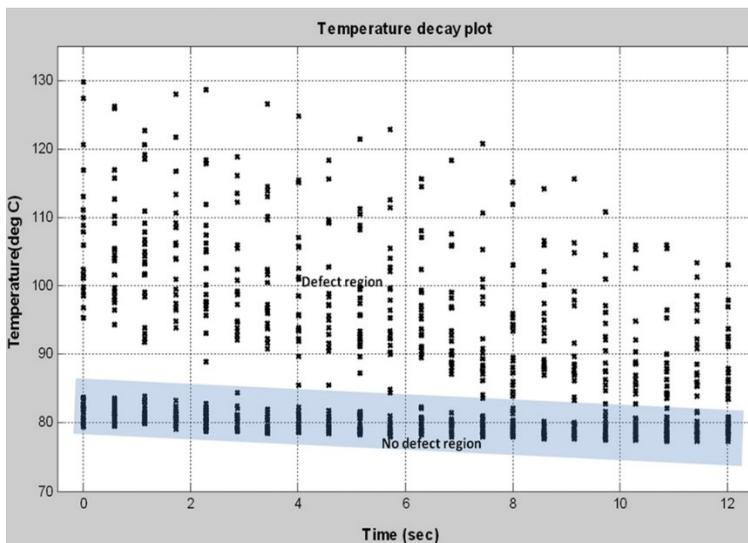


Figura 39– Gráfico que mostra o comportamento da queda de temperatura é diferente para regiões com descontinuidades (*defect region*) e regiões sãs (*no defect region*). Fonte: Sreedhar *et al.* (2012).

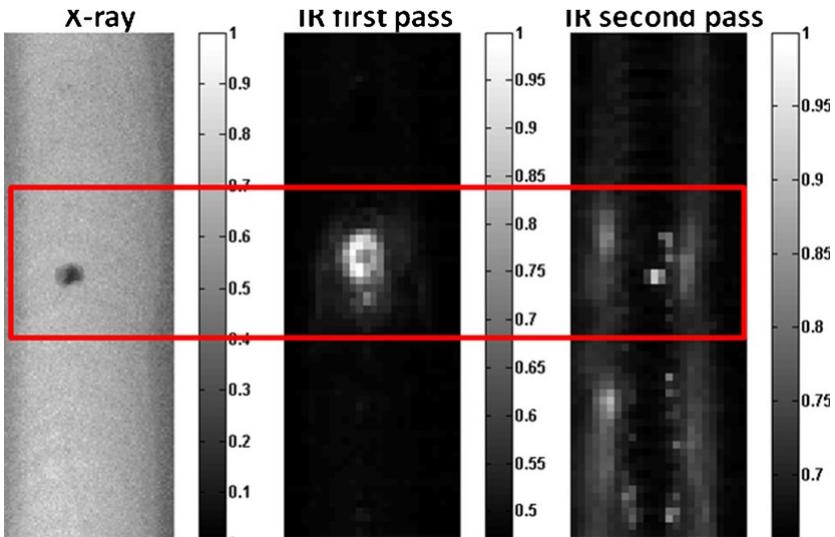


Figura 40 – Imagem térmica que mostra a detecção de uma descontinuidade em um cordão de solda, confirmada por radiografia.
Fonte: Sreedhar *et al.* (2012).

4 OBJETIVOS

Conforme já observado na introdução deste trabalho, a equipe do LABSOLDA-UFSC vem buscando não só se manter atualizado com essas novas tecnologias em processos de soldagem, mas, na medida do possível, entendê-las e dominá-las. Quando processos como TIP TIG e MIG/MAG CMT passaram a empregar a movimentação de avanço e retração do arame (altamente controlada, como no caso do CMT, ou não) apenas a aquisição das formas de onda de corrente e tensão passou a não ser suficiente, pois esses processos vão além do simples controle das formas de onda. O entendimento desses processos, que aqui é citado resumidamente, foram alvo de estudos que envolveram não só a análise dos diagramas de corrente *vs.* tensão, mas também de filmagens de alta velocidade.

Há ainda o problema da produtividade que nem sempre considera adequadamente o tempo de preparação da junta e do cordão de solda (tempos-mortos), o tempo com inspeção e o tempo perdido com retrabalhos. O LABSOLDA-UFSC já vem empregando a filmagem termográfica para o estudo e análise de processos, porém sem maior enfoque na área de inspeção de cordões de solda o que torna este um bom assunto para pesquisas.

Deste modo, o objetivo geral deste trabalho é o entendimento de técnicas de filmagem em alta velocidade e termografia para uso na monitoração de processos de soldagem, seja na área de física da soldagem quanto na área de inspeção, se vislumbrando como resultado a formulação de um “guia” de elevado nível para aplicação das metodologias. Para atingimento do objetivo geral se faz necessário o cumprimento de metas intermediárias e específicas que se elencam em:

- Consolidação de infraestruturas específicas para aplicação das técnicas de filmagem de alta velocidade, filmagem termográfica e *Schlieren*;
- Determinação da influência de configurações de instalação e especificações técnicas dos sistemas de monitoração e acessórios sobre os resultados, para atendimento a diferentes demandas de monitoração (shadowgrafia, monitoração da poça, monitoração do arco, monitoração da ponta do arame com arco, monitoração

do arame sem arco, monitoração do pó (PTA-P), monitoração do gás de proteção, monitoração do gás de arraste, etc.);

- Definição de faixas operacionais e de configuração (instrução para montagem das bancadas) para diferentes processos, condições (tocha estacionária, posições de soldagem, disposição dos sistemas e acessórios para evitar influência do meio, como reflexos de radiação infravermelha, ou reflexos de luz, etc.) e parametrizações de soldagem;
- Especificação de procedimentos de filmagem térmica, *Schlieren*, e filmagem de alta velocidade para aplicações selecionadas (pelo menos um tipo de chanfro; chapa plana; posições vertical, plana e sobrecabeça; e aço) e;
- Verificar a eficácia da termografia em inspeção de soldagem em tempo real. Se viável, devem ser apresentados os indícios e padrões na imagem térmica que denunciam a formação de descontinuidades internas em um cordão de solda. Neste último, cabe um paralelo da técnica de termografia com as técnicas de inspeção mais comuns, em especial o já consolidado ensaio de raio-X.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item busca mostrar as duas principais ferramentas deste trabalho, com alguns aspectos técnicos: as câmeras Y4-D2 e SC 7200. Além disso, como método será apresentada uma previsão de alguns trabalhos a serem realizados durante a realização deste trabalho.

5.1 CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

A câmera de alta velocidade empregada no LABSOLDA-UFSC é um modelo Y4-D2 da fabricante IDT (2017) apresentada na **Figura 41**.



Figura 41 - Câmera de alta velocidade Y4-S2 da empresa IDT. Fonte: IDT (2013).

As especificações técnicas básicas constam na Tabela 3, como segue:

Tabela 3 – Especificações técnicas básicas da câmera Y4-S2 da fabricante IDT.

Característica	
Máx. fps com máx. Resolução	4.500 fps e 1024x1024
Nº máx. de quadros/segundo	108.000 fps 1024x16
Tempo de exposição mínimo	1 μ s
Faixa de temp. operacional	-40 °C a +50 °C
Memória	64 GB
Sensor	CMOS
Tamanho da imagem	1 Megapixel
Comunicação	USB 2.0

Fonte: IDT Specification Sheet (2013).

5.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA

A câmera termográfica a ser empregada no desenvolvimento deste trabalho será uma SC7200 F/3 da fabricante FLIR (2017), apresentada na **Figura 42**. A Tabela 4 traz as especificações técnicas básicas desta câmera.



**Figura 42 – Câmera termográfica modelo SC7200 F/3 da fabricante FLIR.
Fonte: FLIR (2007).**

Tabela 4 - Especificações técnicas básicas da câmera SC7200 F/3 da fabricante FLIR.

Característica	
Distância focal	50 mm
Tolerância de medição	+/- 1 °C
Faixa de temp. operacional	-20 °C a +55 °C
Faixa de temp. medição	5 até 3000°C
Frequência de Aquisição	Até 175 Hz
Número de pixels	320 x 256 pixels
Material do detector	InSb

Fonte: FLIR (2012).

5.3 FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE APLICADA AO ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

Além é claro do estudo teórico de trabalhos concernentes às filmagens de alta velocidade, serão realizadas filmagens ou ensaios especificam que servirão de orientação em filmagens que possam vir a ser realizadas no LABSOLDA-UFSC, além de colocarem em prática técnicas provenientes da leitura de artigos, teses, livros, etc. A ideia subentendida nesses ensaios é cumprir as metas elencadas na seção de Objetivos mas para tanto, deve-se ter em mente de que há três situações básicas em filmagens de alta velocidade de processos de soldagem, sendo estas mesmas relacionadas ao objeto de estudo da pesquisa: filmagem do arco voltaico, filmagem da poça de fusão e filmagem do arame de adição durante a soldagem. Estas três situações envolvem a determinação de parâmetros de soldagem com valores bastante específicos. Os ensaios com filmagem de alta velocidade então, visarão determinar para cada situação quais as melhores regulagens para, por exemplo, o LASER, para a taxa de aquisição, para o tempo de exposição, além de determinar a necessidade do uso de outro tipo de iluminação e filtros. Embora sejam menos complexas, situações onde o objeto de estudo não envolve o arco voltaico serão levadas em conta situações onde o objeto.

Alguns ensaios que podem desde já ser citados são as filmagens de alta velocidade:

- Do processo TIP TIG como tentativa de captar a movimentação da poça de fusão e sua possível influência na fusão do arame e do metal de base;
- Do arame de adição durante a soldagem MIG/MAG CMT;
- Do fluxo de gás em tochas comerciais com a Infocus (OLIVARES, 2015) e de tochas projetadas no LABSOLDA como as para Duplo Eletrodo (SCHWEDERSKY, 2015) e para o processo Plasma Pó ou PTAP (ALVES, 2011) com a técnica *Schlieren* a fim de identificar indícios de turbulência prejudiciais ao processo.

5.4 FILMAGEN TERMOGRÁFICA APLICADA AO ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os estudos teóricos concernente filmagem termográfica serão uma parte relevante deste trabalho porém deixar de lado os ensaios em situações específicas, visando atender as necessidades do próprio laboratório. Os ensaios servirão para colocar em prática e testar novas técnicas que venham a ser aprendidas durante os estudos teóricos onde sempre serão levados em conta aspectos como as propriedades do alvo (emissividade, reflexão) e as propriedades do ambiente (temperatura, umidade relativa). Como exemplos de ensaios que deverão ser realizados tem-se:

- Filmagem termográfica de cordões de solda realizados com processo TIG e MIG/MAG durante o resfriamento na tentativa de identificar indícios ou padrões de temperatura que possam denunciar a formação de descontinuidades. Detectados as descontinuidades, realizar comparação com um ensaio não destrutivo já consolidado, no caso o raio-X;
- Verificar a possibilidade de filmagem termográfica da poça de fusão durante a soldagem. Verificar a possibilidade de uso equipamento já existente no LABSOLDA-UFSC e a aquisição de equipamentos para este fim em específico;
- Filmar tochas de soldagem projetadas no LABSOLDA-UFSC em operação e verificar em qual faixa de temperatura e corrente elétrica estas podem operar sem danos mesma.

6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Como a proposta de defesa dentro, apresenta-se a Tabela 5 com o cronograma proposto de acordo com a lista de atividades que segue:

1. Pesquisa global em relação à literatura técnica e parceiros tecnológicos nacionais e internacionais;
2. Aprofundamento da pesquisa sobre emprego de filmagem de alta velocidade para a o estudo de processos de soldagem objetos do trabalho;
3. Aprofundamento da pesquisa sobre emprego de técnicas de termografia para identificação de descontinuidades em soldagem ou mesmo de defeitos em produtos de outros processos de fabricação;
4. Pesquisa sobre novas tecnologias em filmagem de alta velocidade e termografia;
5. Ensaios para determinação da influência de instalação e especificações técnicas dos sistemas de monitoração (filmagem de alta velocidade, *Schlieren* e termografia);
6. Ensaios para a determinação da influência da configuração das bancadas de testes e condições de soldagem nos sistemas de monitoração no que diz respeito aos resultados e ao atendimento de demandas;
7. Filmagens termográficas do resfriamento de cordões de solda a procura de padrões térmicos ou indícios que possam identificar descontinuidades;
8. Definição de faixas operacionais e de configuração dos sistemas de monitoração (instruções para montagem das bancadas) para diferentes processos e condições;
9. Documentação de resultados e escrita da tese e;
10. Defesa da tese.

7 PREVISÃO FINANCEIRA

As despesas vislumbradas para o trabalho proposto estão organizadas na Tabela 6. Aqueles itens marcados com um asterisco (*) já estão disponíveis para uso. Os recursos para custeio de outros itens serão provenientes de projetos de pesquisa já em curso no LABSOLDA.

Tabela 6 – Previsão orçamentária.

Descrição	Valor
Sistema MIG/MAG CMT FRONIUS*	R\$ 80.000,00
Sistema PTA-P*	R\$ 80.000,00
Sistema TIP TIG*	R\$ 200.000,00
Sistema LASER*	R\$ 150.000,00
Câmera termográfica FLIR*	R\$ 200.000,00
Câmera de alta velocidade IDT*	R\$ 320.000,00
Material para corpos de prova	R\$ 5.000,00
Consumíveis de soldagem	R\$ 4.000,00
Serviços de usinagem	R\$ 2.500,00
Valor total:	R\$ 1.041.500,00

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a proliferação de variações de processos de soldagem que apresentam novas técnicas e abordagens inovadoras faz-se necessário que o LABSOLDA-UFSC dedique parte de seus esforços na consolidação de novos métodos de monitoração de soldagem (baseados em imagem). Estes últimos transcendem as limitações dos métodos baseados na aquisição de sinais elétricos, método já consolidado a alguns anos. Inerente aos objetivos, este trabalho tratará de disponibilizar uma série de informações com a finalidade de tornar mais eficaz o uso desses novos métodos de monitoração, quando empregados como ferramenta de pesquisa. E isto, não apenas para o LABSOLDA-UFSC mas para outros pesquisadores que por ventura já empregam ou planejam empregar estas técnicas.

Portanto, conforme demonstrado neste texto, o estudo destas técnicas está em consonância com os objetivos e pretensões do laboratório além de ser um objeto de pesquisa bastante adequado para o momento atual dos desenvolvimentos em processos de soldagem.

9 REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando. **Óptica Geométrica - Parte 2**: Florianópolis: UFSC, 2017. 96 slides, color. Apresentação para a disciplina Fundamentos de Visão Computacional.

ALBERTAZZI, Armando; PINTO, Tiago. **Sistemas Ópticos**. Florianópolis: UFSC, 2017. 104 slides, color. Apresentação para a disciplina Fundamentos de Visão Computacional.

ALVES, Jônathas Alexandre. **Desenvolvimento de um Sistema de Alimentação de Consumíveis em Pó para Soldagem Pta-P com Capacidade**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/site/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2011_jonathas.pdf>. Acesso em: 01 maio 2017.

AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding (M. Amin). **Metal Construction**, [s.i.], p.272-278, 1983.

ANG, Tom. **Fundamentals of Photography**. Londres: Octopus Publishing Group Ltd, 2016. 352 p. Revisado e Atualizado por: Vincent Burgeon.

BRUCKNER, Jergen. Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum. **Welding Journal**, Miami, v. 84, n. 6, p.38-40, 2005. Disponível em: <<https://app.aws.org/wj/2005/06/038/>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

CAO, R. et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 213, n. 10, p.1753-1763, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.004>.

CIDRAL, Beline. **O que preciso saber na hora de comprar uma câmera digital?** 2011. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2010/12/o-que-preciso-saber-na-hora-de-comprar-uma-camera>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

DUTRA, Jair Carlos; MARQUES, Cleber; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e. Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsad. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.201-209, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242012000300004>.

EVANS, J. (Ed.). **Cold Metal Transfer - Robotics**. [s.i.], 2012. Color. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-BBF1EF32-82E0BBF5/fronius_uk/CMTRobotics_pres_openhouse__538>. Acesso em: 01 maio 2017.

FLIR (Ed.). **FLIR SC7000 LWIR Series: Infrared Cameras for Research & Science**. [s.i.], 2012. 2 p.

FLIR. **The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals: The ultimate resource guide for using infrared in the research and development industry**. Boston: Flir, 2015. Disponível em: <for R&D Professionals>. Acesso em: 17 abr. 2017.

FOLTS, James A.; LOWELL, Ronald P.; ZWAHLEN JUNIOR, Fred C. **Manual de Fotografia**. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda, 2011. 412 p. Revisão Técnica: Denise Camargo.

FRONIUS (Ed.). **CMT: Cold Metal Transfer: Processo de solda MIG / MAG com arco voltaico em curto circuito**. 2017. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt>. Acesso em: 01 maio 2017.

GUGELMIN, Felipe. **Supercâmeras: imagens além da visão humana**. 2010. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/video/6863-supercameras-imagens-alem-da-visao-humana.htm>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamental of Physics**. 9. ed. Hoboken, Nj: Wiley, 2010. 1136 p.

HECHT, Eugene. **Optics**: Global Edition. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2017. 722 p.

HECHT, Eugene. **Ótica**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2002. 790 p. Tradução de: José Manuel N. V. Rebordão.

IDT. **Specification Sheet: Y Model 4-S2**. 2013. Especificações Básicas Sobre o Equipamento. Disponível em: <<http://www.crijolanta.com.pl/produkty/idt/y4-s2.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

IDT. **Y Series Cameras: Y Models**. 2017. Disponível em: <<https://idtvision.com/products/cameras/y-series-cameras/>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

ITC. **Termografia Nível 1**: Manual do Curso. Sorocaba: Infrared Training Center, 2013. Rev 1.1.

JOSEPH, A. et al. Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.311-318, jun. 2005. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/174329305x40624>.

KANEKO, Y.; YAMANE, S.; OSHIMA, K. Numerical Simulation of MIG Weld Pool in switchback welding. **Welding In The World**, [s.l.], v. 53, n. 11/12, p.333-341, 2009.

LABSOLDA - UFSC (Florianópolis). **SAP 4.0 - Sistema de Aquisição Portátil**. 2017. Informações técnicas sobre o SAP 4.0. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/sap_4.php> . Acesso em: 24 abr. 2017.

LINCOLN ([s.i.]) (Ed.). **POWER WAVE 455**: Operator's Manual. 1999. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/im583.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2017.

LUMENERA. **High-Speed Imaging: An in-depth look at USB 3.0 cameras & technical specifications.** 2007. Disponível em: <<https://www.lumenera.com/media/wysiwyg/documents/casestudies/USB3whitepaper.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

MARQUES, Cleber. **Prospecções Da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas De Alumínio.** 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/index.php/public/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/216-prospeccoes-da-natureza-fisica-da-soldagem-mig-automatizada-de-ligas-de-aluminio>>. Acesso em: 1 jul. 2017.

MODEST, Michael F. **Radiative Heat Transfer.** 2. ed. Amsterdam: Academic Press, 2003. 807 p.

OGAWA, Y. High speed imaging technique Part 1 – high speed imaging of arc welding phenomena. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.i.], v. 16, n. 1, p.33-43, jan. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/136217110x12785889549903>.

OLIVARES, Erick Alejandro González et al. Estudo da Técnica Tig Keyhole por Meio do Análise Comparativo entre Duas Tochas de Alta Produtividade. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.262-274, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2003.02>.

OLIVARES, Erick Alejandro González. **Uma Abordagem Técnica e Científica do Processo TIG Keyhole à Luz de Novas Tecnologias e Aspectos Comparativos com o Processo Plasma.** 2015. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/index.php/public/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/367-uma-abordagem-tec>>. Acesso em: 01 maio 2017.

OLSHAUSEN, Bruno A. **Aliasing: Sensory Processes**. 2000. Disponível em: <<http://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2000.

PAES, Luiz Eduardo dos Santos. **Soldagem TIG Orbital – Uma Contribuição para a Mudança de Paradigma de Produtividade**. 2017. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PIGOZZO, Ivan Olszanski. **Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Pa**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/347-sold>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

QIN, Guoliang; MENG, Xiangmeng; FU, Banglong. High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.i.], v. 220, p.58-64, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprot.2015.01.011>.

RODRÍGUEZ, Fernando de Jesús López. **Detecção e Caracterização de Defeitos Internos por Termografia Infravermelha Pulsada**. 2014. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

RUDY, J. F. Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal T. **Asme 1982 International Gas Turbine Conference And Exhibit: Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery**, Londres, v. 2, n. 1, p.1-4, abr. 1982. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2276342&resultClick=1>>. Acesso em: 01 maio 2017.

SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding. **Welding Journal**, Miami, n. 07, p.212-224, jul. 1979. Disponível em: <https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1979_07_s212.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2017.

SCHNICK, M. et al. VISUALIZATION AND OPTIMIZATION OF SHIELDING GAS FLOWS IN ARC WELDING. **Welding In The World**, [s.l.], v. 56, n. 1, p.54-61, 2012.

SCHWEDERSKY, M. B. et al. Two-dimensional arc stagnation pressure measurements for the double-electrode GTAW process. **Science And Technology Of Welding And Joining**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.275-280, 19 abr. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2015.1104095>.

SCHWEDERSKY, Mateu Barancelli. **Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG Duplo Eletrodo**. 2015. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/publicacoes/teses_dissertacoes/tese_2015_mateus.pdf>. Acesso em: 01 maio 2017.

SCHWEDERSKY, Mateus Barancelli et al. Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. **Welding In The World**, [s.l.], p.1-7, 10 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-017-0465-6>. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-017-0465-6>>. Acesso em: 01 maio 2017.

SILVA, Rafael Gomes Nunes. **Caracterização do Processo de Soldagem TIG com Alimentação de Arame Dinâmica em Alta Frequência**. 2016. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SREEDHAR, U. et al. Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.i.], v. 212, n. 7, p.1557-1566, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.002>.

SUTTON, Mark. **Shoot like a Pro with Formula One Photographer**. 2015. Disponível em: <<http://www.singaporegp.sg/on-track/F1-Insights/shootlikeapro>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

TIP TIG. **TIP TIG:** The evolution of TIG. 2017. Disponível em: <<http://www.tiptigusa.com/>>. Acesso em: 01 maio 2017.

VENKATRAMAN, B et al. Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation. In: **ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON NDT**, 12., 2006, Auckland, New Zealand. [s.i]: A-pcndt, 2012. p. 1 - 5.

VERSLUIS, M. How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles. **Science**, [s.l.], v. 289, n. 5487, p.2114-2117, 22 set. 2000. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.289.54>.

VERSLUIS, Michel. High-speed imaging in fluids. **Experiments In Fluids**, [s.l.], v. 54, n. 2, p.1458-1513, fev. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-013-1458-x>.

WIKIHOW. **Como Escolher uma Velocidade de Obturador**. 2007. Disponível em: <<http://pt.wikihow.com/Escolher-uma-Velocidade-de-Obturador>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

WILSON, Mike. TIP TIG: new technology for welding. **Industrial Robot: An International Journal**, [s.l.], v. 34, n. 6, p.462-466, 23 out. 2007. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/01439910710832057>.

WU, C S; A CHEN, M; LU, Y F. Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding. **Measurement Science And Technology**, [s.l.], v. 16, n. 12, p.2459-2465, 31 out. 2005. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/009>.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. 534 p. Tradução de: Daniel Vieira.