

**Técnica Schlieren como Ferramenta de Análise da Proteção Gasosa nos Processos de Soldagem:
Desenvolvimento de Infraestrutura****(Schlieren Technique as Gaseous Protection Analysis Tool in Welding Processes: Infrastructure
Development)***Marcelo Pompermaier Okuyama¹, Mateus Offemann Skowronski¹, Mateus Barancelli Schwedersky¹, Régis
Henrique Gonçalves e Silva¹**¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, LABSOLDA - Instituto de
Soldagem e Mecatrônica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.**marcelo@labsolda.ufsc.br, mateus.offemann@posgrad.ufsc.br, barancelli@labsolda.ufsc.br,
regis@labsolda.ufsc.br***Resumo**

A proteção gasosa tem grande importância nos processos de soldagem a arco voltaico. A natureza e as propriedades dos gases, sejam de proteção ou da atmosfera, tem efeitos significativos no resultado da soldagem. A técnica Schlieren pode ser utilizada como um método para analisar o fluxo gasoso e as possíveis causas dos problemas na soldagem em decorrência da proteção gasosa. O objetivo deste trabalho é demonstrar os detalhes da configuração dos equipamentos, a influência dos parâmetros da técnica no resultado da imagem obtida e a montagem do sistema voltado para aplicações em processos de soldagem. Para isso, foi desenvolvida uma bancada com estrutura do tipo Toepler em “Z”. A estrutura da bancada foi projetada de forma que pudesse atender a uma diversidade de aplicações relacionadas aos diversos processos de soldagem. Dessa forma, buscou-se uma maior flexibilidade nos ajustes e posicionamento tanto dos elementos básicos do sistema Schlieren quanto da própria estrutura da bancada. Isso permite que a mesma seja utilizada em diferentes configurações espaciais de acordo com as condições dos locais de aplicação. Com isso, foram testados dois formatos de aresta de corte, aberturas circulares com diâmetro variados e aresta retangular disposta nas posições vertical e horizontal. Para obtenção das imagens foi utilizada uma câmera de alta velocidade com lente macro de 180 mm. Além disso, foi investigada a influência do tipo da iluminação, comparando-se as imagens obtidas por meio de um sistema de iluminação LED pulsado e de um sistema com LASER pulsado. Os experimentos foram conduzidos na bancada desenvolvida utilizando o processo GTAW com argônio puro. Os resultados demonstraram que a forma construtiva e o posicionamento da aresta de corte, a intensidade, o tipo de iluminação e o correto posicionamento dos componentes afetam significativamente a sensibilidade do sistema, proporcionando diferentes níveis de nitidez, brilho e contraste. Nos ensaios, foram obtidos resultados satisfatórios com o uso das diferentes arestas de corte, entretanto, para isso, também foi necessário aumentar os tempos exposição da câmera para compensar a diminuição da intensidade luminosa provocada pela redução da área de passagem da luz. Exceção a isso foi a aresta circular com 0,5 mm de diâmetro, para a qual não foi possível a obtenção de imagens satisfatórias. Com isso, constatou-se que além do formato da aresta, a intensidade e o tipo da iluminação são variáveis com parcelas relevantes para a obtenção de imagens adequadas que permitam a análise dos fluxos gasosos envolvidos nos processos de soldagem.

Palavras-chave: *Gás de proteção, Filmagem em alta velocidade, LED, LASER.*

Abstract: *The shielding gas has major relevance in arc welding processes. The nature and properties of gases (shielding and atmospheric gases) have meaningful influence in the welding results. Schlieren technique can be used as a method to assess the gaseous flux and the possible causes of welding problems resulting from inefficient shielding. The aim of this work is to demonstrate the configuration details of equipment used in Schlieren technique, the parameters influence on resulting images and the setting of the system oriented to welding processes application. In order to achieve these objectives, a bench with “Z” Toepler structure was developed. The bench structure was designed in a way to serve to assess a diversity of applications related to welding processes. Thereby, a greater flexibility was aimed in the Schlieren system adjusts and emplacements as well as basic elements and the bench structure. This characteristic enables the bench to be used in diverse spatial configurations, according to the application’s place conditions. With this, two formats of knife-edges (circular cut-offs with assorted diameters and vertical/horizontal knife-edges) were tested. A high-speed camera with 180 mm macro lens was used to film the experiments. Furthermore, the influence of the illumination was checked out, comparing the images obtained with pulsed LED and LASER illuminations. The experiments were*

carried out in the developed bench using pure argon GTAW welding process. The results demonstrate that the knife-edge's design and location, the intensity and the type of illumination and the correct emplacement of the components meaningfully affects the system sensibility, providing different levels of clearness, brightness and contrast. Satisfactory results were obtained using different knife-edges, however, the exposure time was increased to compensate the decrease of lighting intensity due to the decrease in the light crossing area. Exception to this was the 0.5 mm circular cut-off diameter, whose use did not produce satisfactory images. With this, was proved that beside the knife-edge format, the illumination intensity and type are important variables to the adequate image acquisition, making possible an adequate gaseous flux analysis.

Key-words: Shielding gas, High-speed film, LED, LASER.

1. Introdução

Os gases de proteção são fundamentais para diversos processos de soldagem a arco voltaico, como o GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). A proteção gasosa atua impedindo que haja contaminação da poça de fusão e eletrodo por gases da atmosfera, e, também, proporcionando condições adequadas para estabelecimento e manutenção do arco.

Uma característica desejada para uma tocha de soldagem é a eficácia da proteção gasosa, evitando que ocorra turbulência do fluxo de gás na saída do bocal. Um fluxo turbulento pode levar a contaminação por gases da atmosfera, podendo resultar em problemas como oxidação do metal de solda, porosidades, instabilidade do arco, entre outros. Além disso, gases atmosféricos como o oxigênio, o dióxido de carbono e o nitrogênio podem afetar as características do jato plasma e influenciar nos pontos de ancoramento do arco no cátodo e no ânodo [1], ou seja, influenciando o resultado do processo.

A técnica *Schlieren*, que será detalhada no item 2, representa uma forma relativamente simples de visualização de um fluxo de gás. Ela é tipicamente aplicada em diversas áreas, como aerodinâmica, balística e ventilação [2]. Por conta dessa possibilidade de verificar o comportamento do escoamento do gás, essa técnica também tem sido aplicada na área de processos de soldagem [1,3-6] e corte a plasma [7]. Na maioria dos casos, o interesse é estudar ou promover melhoria nos projetos das tochas e seus bocais.

Apesar da técnica *Schlieren* ser reconhecida por possibilitar a visualização do fluxo de gás, os trabalhos encontrados mostrando resultados na área de soldagem são poucos. Além disso, as informações disponíveis nos referidos trabalhos sobre o *set-up*, técnicas e resultados possíveis de obter são muito limitadas, de forma que são encontradas diversas dificuldades operacionais quando se tenta utilizar a técnica pela primeira vez. Schwedersky [6] relatou e discutiu algumas dificuldades ao tentar utilizar a técnica *Schlieren* em soldagem em seu trabalho. O principal problema apontado pelo autor, foi a dificuldade de se obter imagens com boa definição do fluxo do gás quando usando argônio puro em temperatura ambiente, condição altamente desejada para realização de comparações. Dessa forma, o autor supracitado só obteve resultados ao realizar a técnica com arco aberto, fato que implica em outras dificuldades operacionais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo discutir de forma mais aprofundada a utilização da técnica *Schlieren* em processos de soldagem e documentar e expor de maneira aprofundada o desenvolvimento de uma bancada para experimentos para essa finalidade. Serão apresentados os detalhes da configuração dos equipamentos e a influência dos parâmetros da técnica, como a posição da aresta de corte e o tipo de iluminação, no resultado da imagem obtida, contribuindo para o avanço e popularização da técnica na área de soldagem.

2. A Técnica Schlieren

A técnica *Schlieren* permite visualizar o fluxo de gás no meio transparente utilizando-se da variação da densidade causada por diferenças de temperatura, pressão e concentração dos gases envolvidos. Os distúrbios que causam mudanças na propagação da luz, em qualquer meio transparente, são indicados pelo índice de refração n . Para os gases há uma relação linear entre o índice de refração e a densidade do respectivo gás, dada pela Equação 1.

$$n = k\rho + 1, \tag{1}$$

onde k é a constante de Gladstone-Dale e ρ é a densidade do gás.

Basicamente, a configuração dos equipamentos pode ser feita de duas maneiras, conhecidas como sistema Toepler (Figura 1a) e Toepler com configuração em “Z” (Figura 1b). Ambas incluem, basicamente, uma fonte de luz, lentes ou espelhos côncavos, uma aresta de corte (também chamada de “faca”) e uma câmera para registro da imagem.

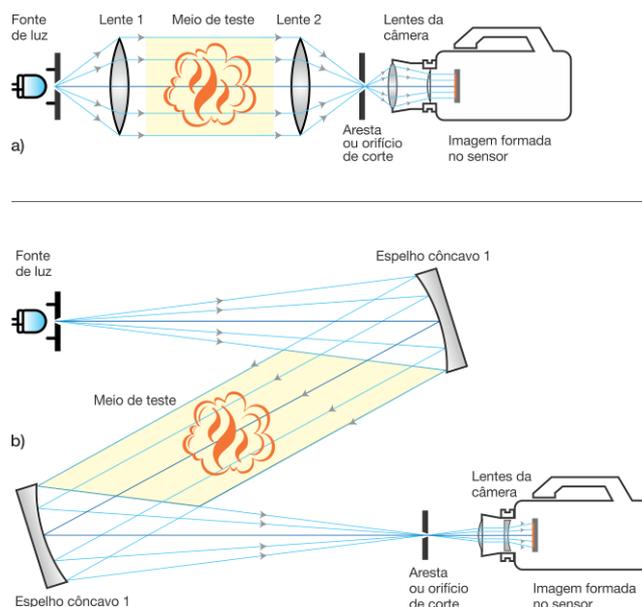


Figura 1. Configuração dos equipamentos da técnica *Schlieren*. (a) Sistema Toepler. (b) Sistema Toepler em “Z”.

Os dois sistemas funcionam sob o mesmo fundamento, porém, com a disposição dos equipamentos de maneira diferente. A luz é focada na primeira lente ou espelho, que devem ser, pelo menos, do tamanho do objeto a ser analisado. O primeiro espelho, ou lente, deve refletir ou transmitir a luz paralelamente ao segundo espelho ou lente. Então, a aresta de corte é inserida no ponto focal deste segundo espelho, ou lente, bloqueando a passagem de luz. A intensidade da iluminação se altera de acordo com a posição da aresta de corte, portanto, o seu ajuste é de fundamental importância para o sistema. Sua posição deve ser cuidadosamente alinhada com o ponto focal da segunda lente ou espelho, pois seu ajuste representa uma parcela significativa da qualidade da imagem obtida.

O efeito do ajuste da aresta de corte pode ser visto na Figura 2, onde intensidade da luz varia conforme o posicionamento descrito. A Figura 2a e 2c mostram uma distribuição não uniforme de luz. Isso ocorre quando a aresta de corte está muito próxima ou muito distante do segundo espelho. A Figura 2b mostra a distribuição uniforme de luz para um correto posicionamento da aresta de corte (no ponto focal do segundo espelho).

De acordo com Settles [2], um passo importante é o ajuste da percentagem de bloqueio de luz feito pela aresta de corte para se obter a sensibilidade desejada. Se o bloqueio é baixo, uma grande quantidade de luz irá passar para a lente da câmera, resultando em um fraco contraste da imagem e possibilidade de saturação¹ da imagem. Se o bloqueio for alto, é possível obter alto contraste, mas pode ocorrer perda de informações em regiões com gradiente de baixa densidade.

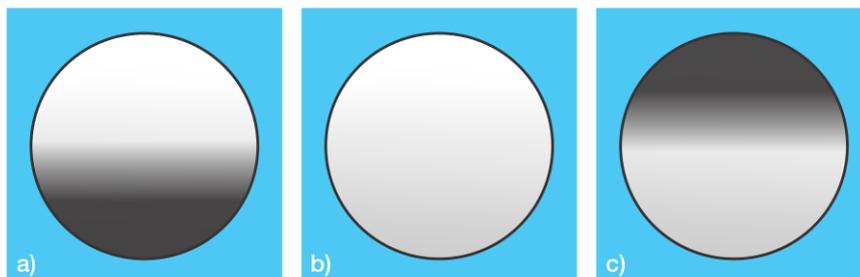


Figura 2. Efeito da aresta de corte na imagem obtida pela técnica *Schlieren*. (a) A aresta de corte muito próxima ao segundo espelho. (b) Aresta de corte no ponto focal do segundo espelho. (c) Aresta de corte muito distante do segundo espelho. (Adaptado de Settles [2])

¹ Saturação: No modelo HSV - Hue (matiz), Saturation (saturação) e Value (valor) - uma cor vai do escuro para o claro pela manipulação de sua saturação. Quanto menor a saturação mais branco há na cor.

2.1. Sensibilidade

A sensibilidade da técnica *Schlieren* representa a capacidade de visualização da variação de densidade do meio analisado. De acordo com Settles [2], o maior ângulo de desvio ocorre na periferia do escoamento e é dada por

$$\varepsilon_{m\acute{a}x} = 2 \cdot \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right), \quad (2)$$

onde n é o índice de refração no escoamento e n_0 o índice de refração fora do escoamento. O $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ é o maior ângulo de desvio dado em radianos, mas como seu valor é muito pequeno, por conveniência, é convertido para arcsegundos multiplicando por 206265. Settles [2] indica que o valor mínimo para que seja possível visualizar a variação de densidade é de 2,4 arcsegundos.

Na avaliação de uma tocha para o processo TIG-DE (Duplo Eletrodo), Schwedersky [6] relatou que ao realizar ensaios em temperatura ambiente, não foi possível obter boa visualização do escoamento de fluxo de argônio puro, enquanto que com CO₂ puro foi possível obter boas imagens do escoamento nas mesmas condições. O referido autor relata que o maior ângulo calculado de desvio entre argônio e ar seria de aproximadamente 4,5 arcsegundos, enquanto que no caso do CO₂, o máximo desvio seria de 16,2 arcsegundos, e sugere que essa diferença serve como indicativo para explicar a referida dificuldade no caso do argônio. Como a densidade dos gases é modificada quando a temperatura varia, uma alternativa é realizar o ensaio com o arco aberto, de forma que a porção do gás que está mais próxima ao arco é fortemente aquecida, resultado em contraste suficiente para identificar a movimentação do gás nesta região. Por outro lado, a aplicação da técnica com arco aberto acarreta em outras dificuldades que serão discutidas nos próximos itens.

3. Desenvolvimento da Bancada com Sistema Toepler em “Z”

A estrutura da bancada foi projetada de forma que pudesse atender a uma diversidade de aplicações relacionadas aos processos de soldagem. Dessa forma buscou-se uma maior flexibilidade nos ajustes e posicionamento tanto dos elementos básicos do sistema *Schlieren* quanto da própria estrutura para o uso em diferentes configurações espaciais (Figura 3). A estrutura poderá ser utilizada para testes em diversas bancadas de ensaios inclusive em posições não tradicionais para aplicações com *Schlieren* mas que são de grande importância em processos de soldagem como a posição sobre cabeça e orbital em tubos ou dutos.



Figura 3. Modelo em CAD 3D da bancada desenvolvida em perfis de alumínio apresentando as principais regulagens disponíveis

4. Procedimento Experimental

De forma esquemática, a Figura 4 demonstra a disposição dos elementos na estrutura desenvolvida e a denominação dos componentes utilizados para a montagem do sistema Toepler em “Z”. Além disso, na Tabela 1

são indicados os equipamentos utilizados para as filmagens com iluminação LED e Laser.

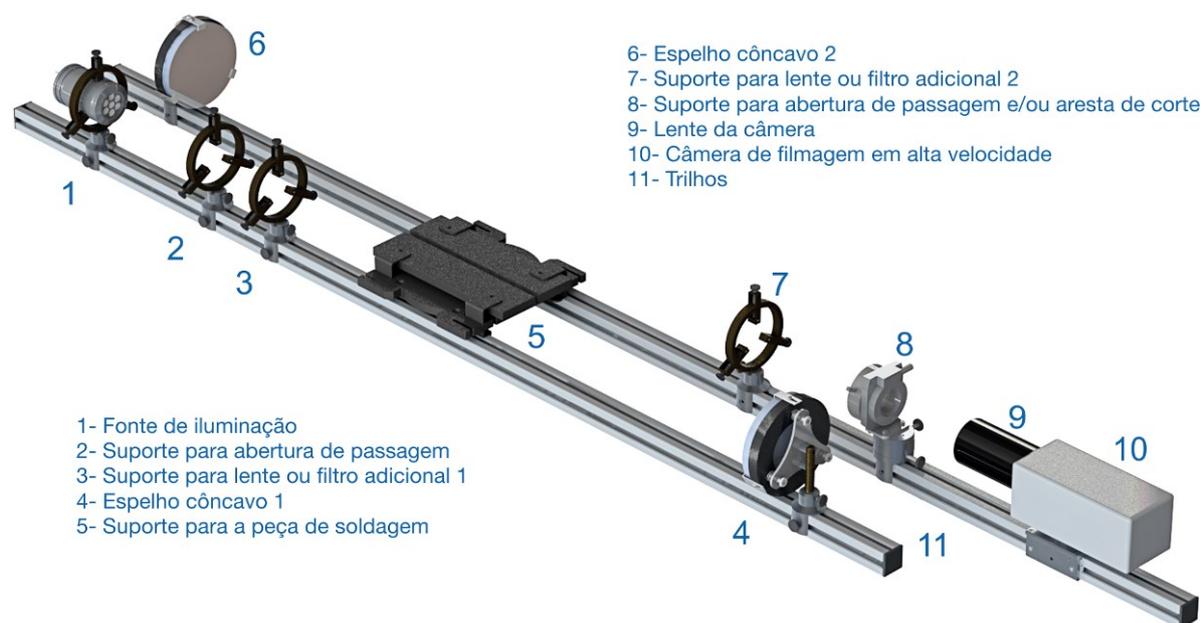


Figura 4. Vista em perspectiva dos trilhos com a identificação dos elementos utilizados no sistema Toepler em “Z”.

Tabela 1. Listagem dos componentes utilizados para filmagem utilizando o Sistema Toepler em “Z” com iluminação LED e LASER.

Componentes do Sistema Toepler em “Z”	Sistema com LED	Sistema com LASER
1. Fonte de iluminação	IDT, Kit de Iluminação com LED pulsado	Cavitar, CAVILUX HF com potência de pulso de 500 W
2. Abertura de passagem (Ø) 1	2,0 mm	2,0 mm
3. Lente ou filtro adicional 1	-	Filtro ND variável (2 a 400), Greika - 72mm
4. Espelho côncavo 1 (Ø)	152,4 mm	152,4 mm
5. Peça de soldagem	Chapa de aço carbono com 12,7 mm de espessura	Chapa de aço carbono com 12,7 mm de espessura
6. Espelho côncavo 2 (Ø)	152,4 mm	152,4 mm
7. Lente ou filtro adicional 2	-	Edmund Optics, 810 ± 10 nm
8. Abertura de passagem (Ø) e arestas de corte 2	0,5; 1,0 e 2,0 mm de diâmetro; aresta vertical esquerda; horizontal superior e horizontal inferior	0,5; 1,0 e 2,0 mm de diâmetro; aresta vertical esquerda; horizontal superior e horizontal inferior
9. Lente da câmera	Canon, Macro EF 180 mm	Canon, Macro EF 180 mm
10. Câmera de filmagem	IDT, Y4S2	IDT, Y4S2
11. Estrutura em perfil de alumínio	230 mm de distância entre os centros dos trilhos	230 mm de distância entre os centros dos trilhos

Para a análise das diferenças na imagem devido à fonte de iluminação, foram utilizados dois tipos de iluminação: um Kit de LED da IDT, mesma fabricante da câmera de alta velocidade e um sistema de iluminação laser Cavilux Hf da empresa Cavitar. Os dois sistemas possuem lentes próprias para proporcionar foco na fonte de luz. No caso do sistema LASER a lente divergente pode ser ajustada para aumentar ou reduzir a área de foco. E o sistema de LED produz pulsos de maior intensidade quando sincronizados com a frequência de aquisição da câmera.

Como abertura de passagem da luz foi utilizado um orifício com 2 mm de diâmetro para todos os ensaios apresentados. Esse diâmetro foi selecionado após a realização de ensaios preliminares nos quais foram testados diferentes diâmetros de orifício (entre 0,5 e 12,0 mm), também foram feitos testes sem o uso de nenhum

elemento de corte da luz. Dessa forma, os melhores resultados foram obtidos utilizando-se uma placa circular com 4,1 mm de espessura e com furo escareado com 2 mm de diâmetro.

Na filmagem com LASER foi utilizado um filtro ótico de Densidade Neutra (ND) variável entre 2 e 400 o que representa uma variação entre 0,3 e 2,7 de densidade óptica, proporcionando uma redução de exposição de cerca de 1,5 a 9 stops. O uso desse filtro para diminuir a exposição do sensor foi necessário devido à grande intensidade luminosa produzida pelo equipamento Cavilux o qual saturava a imagem mesmo utilizando-se o menor tempo de exposição suportado pela câmera 1 μ s.

Para a montagem da bancada de ensaios com sistema Toepler em “Z” foram utilizados dois espelhos esféricos côncavos (superfície frontal f/10) com diâmetro externo de 152,4 mm (diâmetro suficiente para a análise de escoamentos em tochas de soldagem convencionais) e distância focal de 1524 mm.

O suporte central da peça foi projetado de forma independente da estrutura de fixação dos equipamentos óticos, assim como o suporte para a tocha, para evitar possíveis vibrações ou movimentos que interferissem na aquisição das imagens.

O suporte adicional para filtros foi utilizado durante as filmagens com iluminação LASER para permitir a passagem somente da faixa de luz produzida pelo equipamento Cavilux Hf, sendo assim, foi empregado um filtro passa banda da Edmund Optics com 810 ± 10 nm.

Para o controle preciso da posição da abertura de passagem e da aresta de corte foi projetado um suporte especial com regulagem de movimento nos 3 eixos X, Y e Z além de permitir a rotação dos elementos no eixo central.

A lente da câmera utilizada foi a Canon EF 180mm f/3.5L Macro USM por ser uma lente macro telefoto com ampliação máxima de 1x que permite a obtenção de close-ups em tamanho real. Além disso, seu sistema interno de lentes flutuantes minimiza as oscilações e aberrações causadas por mudanças na distância focal.

Para a produção das imagens, foi utilizada uma câmera de alta velocidade IDT MotionPro Y4-S2 com frequência de 4000 quadros por segundo, tempo de exposição variando entre 40 e 160 μ s para filmagens com LED pulsado e entre 1 e 4 μ s para as filmagens com LASER. Todos os vídeos foram gravados com resolução de 1016 x 1016 pixels, entretanto a área de interesse final ficou em aproximadamente 850 x 480 pixels. Na Figura 5 é apresentada uma fotografia da bancada utilizada nos ensaios com *Schlieren* juntamente com os equipamentos para soldagem e equipamentos para filmagem.

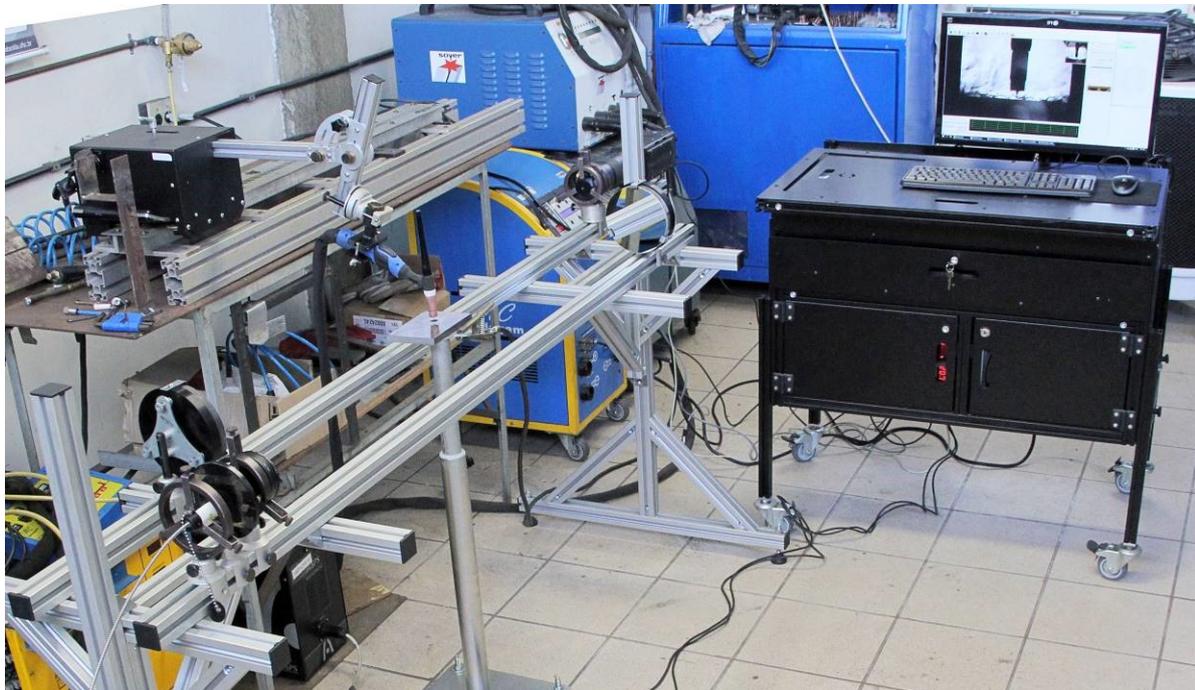


Figura 5. Fotografia da bancada utilizada nos ensaios com Schlieren.

Os experimentos com soldagem foram conduzidos utilizando uma tocha GTAW estacionária na área de teste entre os dois espelhos através do suporte de um manipulador robótico Tartilope V2F. Os ensaios com abertura do arco foram realizados sobre chapa de aço carbono com 12,7 mm de espessura, 63,5 mm de largura e 150 mm de comprimento. Foi utilizado um eletrodo de tungstênio com 2,4 mm de diâmetro, dopado com 2% de tório (EWTh-2) e com afiação pontiaguda com 45°. A corrente utilizada foi de 100 A e, o gás de proteção, argônio puro com vazão de 15 L/min, para todos os ensaios.

5. Resultados e Discussão

Inicialmente, para cada tipo de iluminação foram feitos testes mantendo-se os mesmos tempos de exposição 40 μ s para LED e 1 μ s para LASER. Esses valores foram obtidos em ensaios preliminares utilizando-se como referência a abertura com 2mm de diâmetro. Em seguida aumentaram-se os tempos de exposição para compensar as perdas de luz produzidas pela redução do diâmetro ou pelo uso de arestas de corte. As arestas de corte foram posicionadas nas posições horizontal superior, horizontal inferior e lateral esquerda, sempre buscando-se reduzir em 50% a área de abertura com 2 mm de diâmetro. Na Figura 6, foram selecionados os ensaios que apresentaram os melhores resultados.

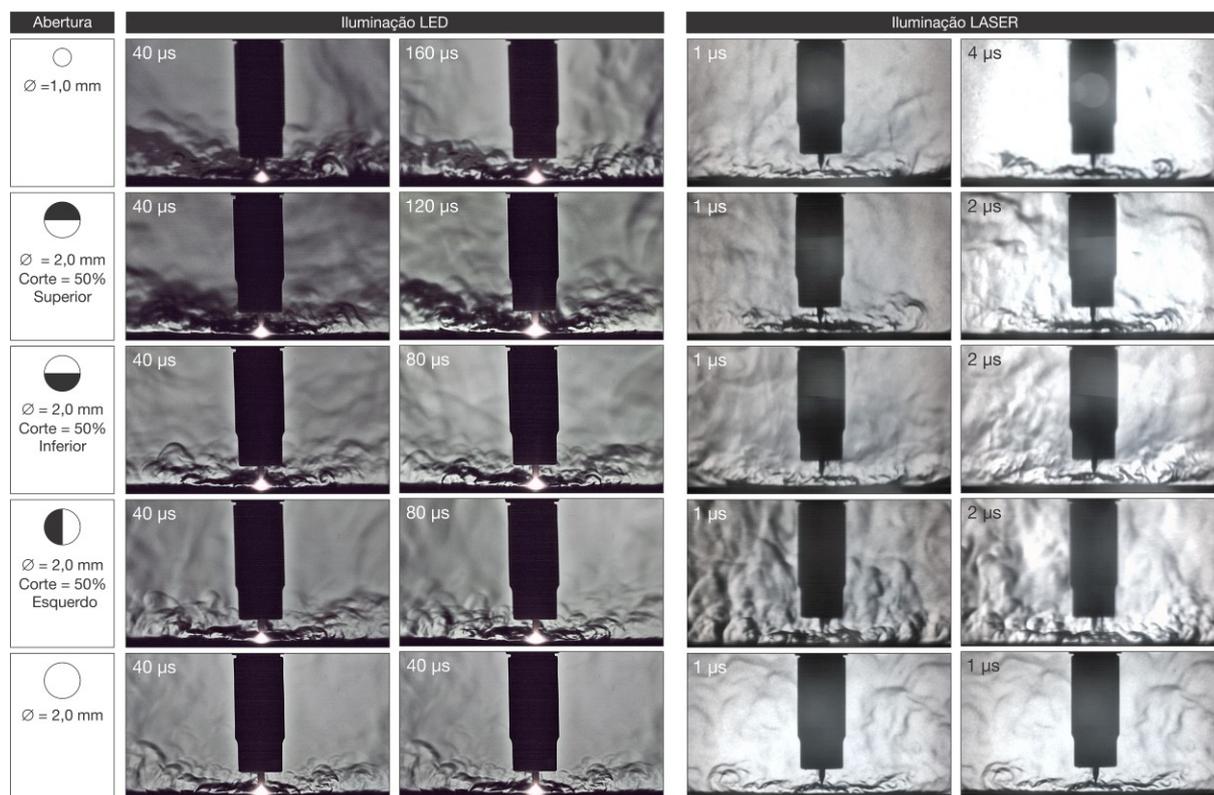


Figura 6. Resultados obtidos com filmagem em alta velocidade utilizando os sistemas de iluminação LED pulsado e LASER pulsado com diferentes aberturas, arestas de corte e tempos de exposição.

Os resultados satisfatórios foram obtidos com o uso das diversas arestas de corte testadas, entretanto, para isso, também foi necessário aumentar os tempos exposição da câmera para compensar a diminuição do fluxo luminoso provocada pela redução da área de passagem da luz. Com isso, constatou-se que além do formato da aresta, a intensidade e o tipo da iluminação são variáveis com parcelas relevantes para a obtenção de imagens adequadas que permitam a análise dos fluxos gasosos envolvidos nos processos de soldagem.

Em relação ao uso dos diferentes tipos de iluminação, LED e LASER, a diferença mais significativa consiste na possibilidade de se bloquear a luz produzida pelo arco elétrico com o uso de um filtro óptico correspondente à fonte de iluminação LASER. Dessa forma, é possível aumentar os tempos de exposição da câmera para obter imagens mais nítidas e com maiores níveis de contraste em toda área de aquisição. Já no caso da iluminação LED, se os tempos de exposição forem aumentados o resultado será uma maior saturação, principalmente, na área do arco elétrico.

Outros testes foram realizados, entretanto, os resultados foram considerados insatisfatórios nas condições avaliadas. No caso de diâmetros do orifício de passagem menores que 1 mm não foi possível obter imagens com nitidez e foco (Figura 7a). Já, nas imagens obtidas com diâmetros maiores que 2 mm os efeitos do *Schlieren* foram pouco perceptíveis (Figura 7b).

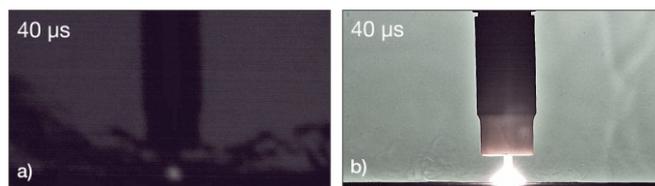


Figura 7. Resultados considerados insatisfatórios, em a) utilizando abertura com 0,5 mm de diâmetro e em b) sem o uso de elementos para bloquear a passagem da iluminação, ambos com LED.

Outro fator que pôde ser evidenciado e corrobora a literatura (Schwedersky [6]), trata da dificuldade de se visualizar o fluxo de argônio puro, que possui densidade semelhante ao ar atmosférico. Neste caso, também só foi possível a visualização do fluxo de gás, de maneira satisfatória, quando houveram diferenças na pressão, temperatura ou concentração, ou seja, durante o processo de soldagem com o estabelecimento do arco elétrico.

6. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo documentar e expor de maneira aprofundada o desenvolvimento e aplicação de uma bancada de experimentos para a utilização da técnica *Schlieren* em análises da proteção gasosa nos processos de soldagem.

Foram demonstrados os detalhes da configuração dos equipamentos e a influência dos parâmetros de filmagem em alta velocidade na produção de imagens. Assim, pôde-se constatar que o uso de diferentes aberturas e arestas de corte influenciaram no resultado final. Estes elementos foram responsáveis diretos pela obtenção de imagens com maior ou menor nitidez dos efeitos produzidos pelo fluxo do gás de proteção.

Da mesma forma, o uso dos diferentes tipos de iluminação proporcionou resultados que podem ser de grande interesse dependendo do objeto da análise. A principal característica que diferencia a aplicação dos dois tipos de iluminação, LED e LASER, é perceptível em condições normais de soldagem com arco aberto. Neste caso, a aplicação da iluminação LASER minimizou a interferência da luz produzida pelo arco elétrico. Essa característica possibilita que se façam comparações, em condições similares de iluminação, entre diversos tipos de gases ou até mesmo entre diferentes versões de processos de soldagem. No caso do argônio puro o uso do LASER é particularmente recomendado pois produziu os melhores resultados com arco aberto e considerando-se que a visualização do fluxo do gás de proteção é quase imperceptível sem a presença do arco.

É importante destacar que as maiores dificuldades iniciais para obtenção de imagens por meio da técnica *Schlieren* estão diretamente relacionadas ao correto alinhamento e disposição dos componentes do sistema. Dessa forma, verificou-se a importância do desenvolvimento e uso de equipamentos que possibilitaram os ajustes de acordo com as necessidades de aplicação do sistema.

Enfim, espera-se que este trabalho seja seguido por diversos outros que contribuam para o avanço e popularização da técnica *Schlieren* na área de soldagem.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à toda equipe do LABSOLDA ao POSMEC e UFSC pela oportunidade de desenvolvimento pessoal, profissional e acadêmico. Merecem destaque o projetista Mário Cesar do Nascimento Junior responsável pela produção dos modelos 3D e construção da bancada de ensaios, assim como, o doutorando Luciano Machado Cirino pela participação na realização dos ensaios e revisões deste artigo. Também são merecedoras de agradecimentos as agências de fomento à pesquisa CNPq e Petrobras que contribuíram com a pesquisa com subsídios para compra de equipamentos e pagamento de bolsas.

8. Referências Bibliográficas

- [1] SIEWERT, E.; WILHELM, G.; HÄSSLER, M.; SCHEIN, J.; HANSON, T.; SCHNICK, M.; FÜSSEL, U.; Visualization of Gas Flows in Welding Arcs by the Schlieren Measuring Technique. *Welding Journal*, p. 1s-5s, January 2014.
- [2] SETTLES, G. S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001.
- [3] SCHNICK, M.; DREHER, M.; ZSCHETZSCHE, J.; FUESSEL, U.; SPILLE-KOHOFF, A.; Visualization and optimization of Shielding Gas Flows in Arc Welding. *Welding in the World Peer-reviewed Section*, nº1-2 2012 Vol. 56.

- [4] BITHARAS, I.; CAMPBELL, S. W.; GALLOWAY, A. M.; MCPHERSON, N. A.; MOORE, A. J. Visualisation of alternating shielding gas flow in GTAW. *Materials and Design* 91, p. 424-431, 2016.
- [5] RESENDE, A. A.; VILARINHO, L. O. Técnica Schlieren Aplicada à Visualização de Escoamentos em Bocais de Soldagem. 15° POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2005.
- [6] SCHWEDERSKY, M. B. Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG Duplo Eletrodo. Florianópolis, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.
- [7] PREVOSTO, L.; ARTANA, G.; MANCINELLI, B.; KELLY, H. Schlieren technique applied to the arc temperature measurement in a high energy density cutting torch. *J. Appl. Phys.* 107, 023304 (2010).