



TÉCNICA SCHLIEREN APLICADA À VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM BOCAIS DE SOLDAGEM

André Alves de Resende

Universidade Federal de Uberlândia - Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem – Av. João Naves de Ávila, nº 2121 Bairro Santa Mônica, Bloco O
e-mail, aaresende@gmail.com

Louriel Oliveira Vilarinho

e-mail, vilarinho@mecanica.com.br

Resumo: No processo de soldagem TIG, o fluxo de gás tem papel fundamental, visto que uma falta de proteção na poça e nas regiões adjacentes pode ocasionar problemas tanto de estabilidade do arco como problemas geométricos e estruturais do cordão de solda, sendo assim é importante para a melhoria do processo o estudo do gás usado e o seu escoamento no momento da soldagem. Como ocorre na maioria dos escoamentos, o gás de proteção sofre variações de densidade devido a gradientes de temperatura e concentração, e conseqüentemente variações nas propriedades ópticas. Para isso está sendo proposto a visualização do escoamento da proteção gasosa através da técnica schlieren que possibilita a visualização dos raios que sofreram desvios ao passar pelo arco de soldagem devido às variações nas propriedades ópticas. A sensibilidade é um aspecto essencial já que caracteriza a funcionalidade do método. Com essa técnica foi possível visualizar os gradientes térmicos do arco representados por variações nos tons de cinza das imagens.

Palavras-chave: soldagem, óptica, schlieren, visualização, escoamento.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união de materiais para obter a coalescência localizada, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição. A solda é resultado desse processo. O processo de soldagem ao qual está ligado este trabalho é o TIG (Tungsten Inert Gas), também conhecido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), onde, dentre outros aspectos, existe uma proteção gasosa. Essa proteção é feita utilizando-se gases inertes (argônio, hélio ou suas misturas).

O gás de proteção influencia na tensão e no formato do arco, bem como na geometria e qualidade cordão de solda. Dessa forma é de extrema importância o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a visualização do escoamento de gás de proteção e plasma.

A técnica Schlieren propicia um estudo qualitativo e quantitativo dos fenômenos que ocorrem na dinâmica de fluido. Podendo assim, ser utilizado para o estudo da dinâmica de gases e plasma que ocorrem no arco de soldagem e que são decisivos para o processo. Desta forma, será utilizado um sistema óptico-mecânico para a visualização do arco elétrico, onde será estudado o escoamento do gás para avaliação da qualidade e produtividade do processo de soldagem.

2. TÉCNICA SCHLIEREN

A palavra alemã “schliere” designa uma heterogeneidade local num determinado meio transparente, o que irá causar uma deflexão irregular da luz, conforme mostra a Figura 1. Esta palavra vem então sendo utilizada para designar certos dispositivos ópticos que permitem não

somente a visualização qualitativa do fenômeno, como heterogeneidades ópticas, mas também a medição quantitativa do grau de deflexão.

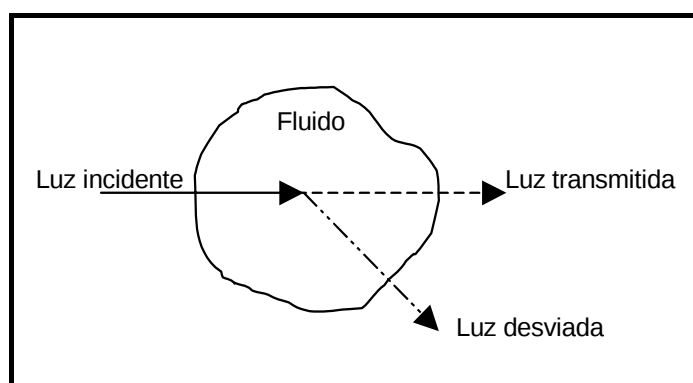


Figura 1– Interação da luz com o fluxo de fluido.

A técnica Schlieren tem sido freqüentemente utilizado em laboratórios termodinâmicos e aerodinâmicos, devido à combinação de um arranjo óptico relativamente simples com um alto grau de resolução. A técnica Schlieren propicia um estudo qualitativo e quantitativo dos fenômenos que ocorrem na dinâmica de fluidos, podendo assim, ser utilizado para o estudo da dinâmica de gases e plasma que ocorrem no arco de soldagem e que são decisivos para o processo. Desta forma, será utilizado um sistema óptico-mecânico para a visualização do arco elétrico, onde será estudado o escoamento do gás para avaliação da qualidade e produtividade do processo de soldagem. Nota-se, então a importância deste método para o estudo do plasma no arco de soldagem. Na Figura 2 estão algumas imagens encontradas na literatura obtidas pela técnica

Toepler foi o primeiro a descrever em seu livro os componentes básicos (lentes e espelhos) da técnica Schlieren com fonte de luz (“slit-source”) e aresta de corte (“knife-edge”) e suas aplicações, incluindo a visualização de escoamentos, desde então o nome “método de Toepler” se tornou comum nesta área.

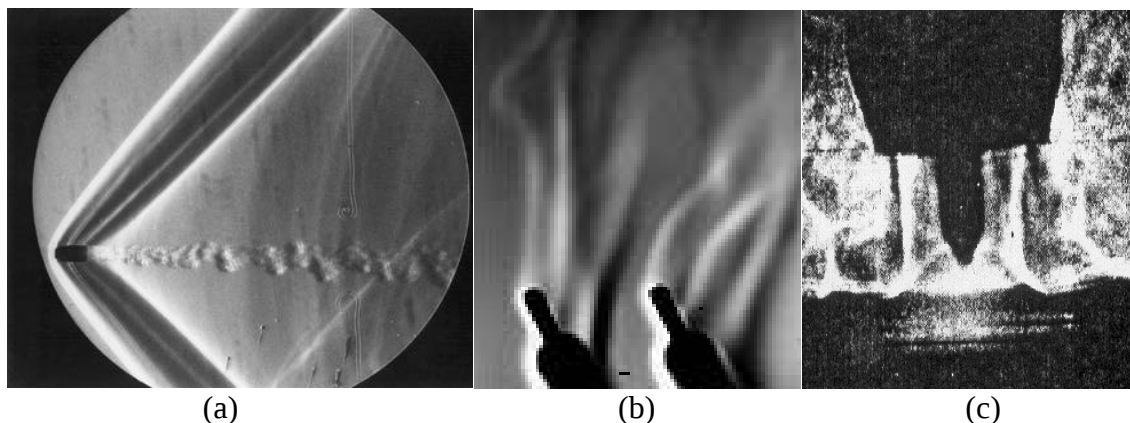


Figura 2 - Exemplos de imagens obtidas com o Schlieren: (a) Ondas de choque de um projétil em voo (Davidhazy, 1998); (b) Fluxo de calor em ferros de solda (Davidhazy, 1998), e (c) Processo TIG (Okada et al, 1980)

2.1 Método de Toepler

O principal componente desta técnica é a aresta de corte (“knife-edge”), mostrada na Figura 3, sendo utilizado inicialmente por Toepler. Ao se considerar o arranjo mostrado na Figura 3 tem-se que uma imagem da fonte de luz é formada no plano da aresta de corte, o qual coincide com o plano focal da segunda lente, também chamada de “Schlieren Head”. A aresta de corte é perpendicular ao plano da figura e a fonte de luz é pontual ou uma linha paralela à aresta. A lente da câmera serve

para formar a imagem do meio de teste no filme fotográfico, eliminando a possibilidade de efeitos de sombra e penumbra.

Caso existam estas heterogeneidades no meio de teste, o foco da segunda lente não mais será constituído de um ponto, mas sim, de uma região. Desta forma, a representação destas heterogeneidades consistirá da imagem formada no filme, onde os diferentes desvios sofridos pelo feixe do laser, devido aos diferentes índices de refração, estarão representados por diferentes tonalidades de cinza.

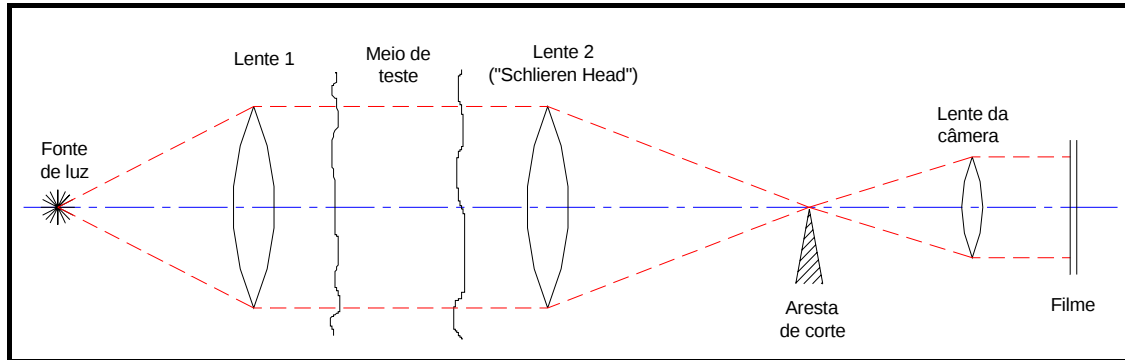


Figura 3 – Sistema Teopler Schlieren com raios paralelos de luz através do meio de teste.

2.2. Sensibilidade

A sensibilidade do método schlieren está relacionado à capacidade de ele permitir a visualização da mínima variação de densidade do meio de teste em análise. O maior ângulo de desvio ocorre na periferia do escoamento e é dada aproximadamente por

$$\varepsilon_{\max} = 2 \cdot \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) \quad (1)$$

onde n é o índice de refração no escoamento e n_0 o índice de refração fora do escoamento. O valor numérico de $\varepsilon_{\max}$ dado pela Equação 1 é em radianos, mas como seu valor é muito pequeno, por conveniência, será convertido para arcsegundos multiplicando por 206265.

De acordo com Settles (2001), uma variação de 2% na densidade dentro e fora do escoamento causa um desvio de aproximadamente 2.4 arcsegundos. Este é o valor mínimo para que a técnica Schlieren consiga revelar a variação de densidade.

Podem também ser observados os seguintes pontos a fim de aumentar a sensibilidade do método:

- Um laser de menor potência proporciona maior sensibilidade, contudo introduz ruídos na imagem, que podem ser reduzidos ou até eliminados com tratamento das imagens via MatLab®;
- A espessura da lamina de corte desempenha papel importante, devendo ser a mais fina possível, de forma a evitar a difração do feixe após passar pela aresta de corte. O acabamento da aresta ou furo deve também ser observado, não devendo existir rebarbas ou deformações.
- Ambientes mais escurecidos proporcionam maior sensibilidade, ou seja, quanto mais escuro o ambiente, melhor.

2.3. Aberrações Ópticas

Denomina-se aberração óptica ao efeito causado quando todos os raios de um objeto puntiforme não estão localizados num único ponto imagem, o que resulta numa imagem não nítida. O esmaecimento da imagem de um ponto-objeto sobre o eixo e que se deve aos raios que atingem um espelho ou uma lente em pontos afastados do eixo é denominado a aberração de esfericidade

(aberração esférica). Um esmaecimento semelhante da imagem de pontos fora do eixo, devido a ampliações diferentes de diferentes partes da lente ou do espelho, é denominado coma, em virtude da imagem com forma de cometa que se observa. A formação de duas imagens retilíneas perpendiculares entre si, em diferentes localizações, de um mesmo ponto-objeto fora do eixo é o astigmatismo. A distorção da forma da imagem de um objeto extenso, devida à dependência entre a ampliação e a distância do ponto-objeto ao eixo, é denominada a distorção.

2.4. Sistema de Toepler Modificado (Configuração em Z)

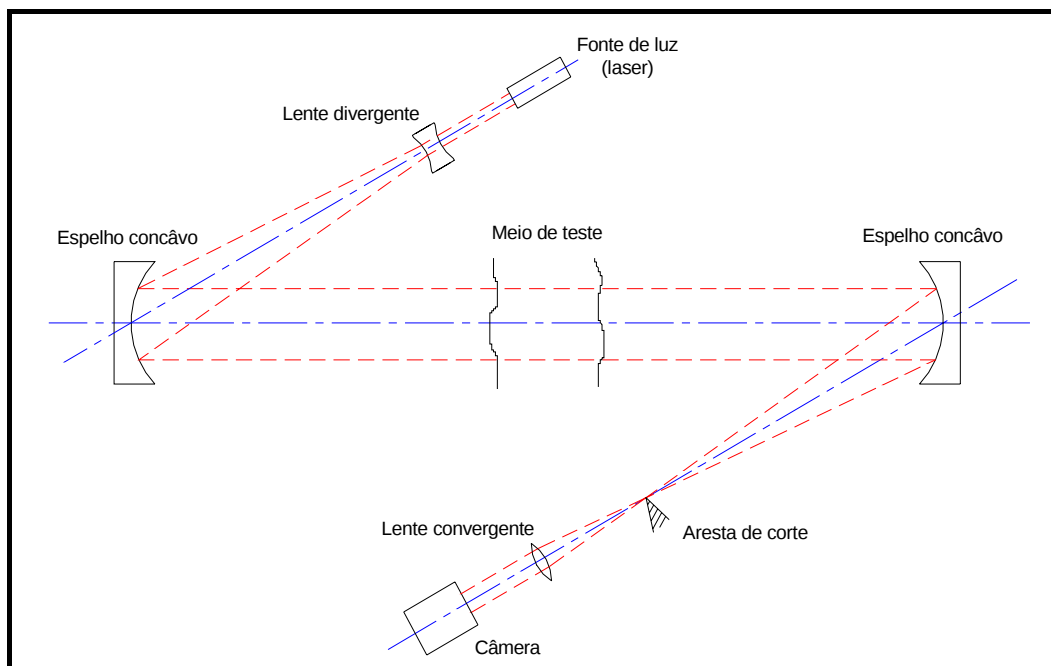


Figura 4 – Configuração em Z utilizando dois espelhos esféricos ou parabólicos.

Uma variedade de modificações de sistema Toepler esta presente na literatura, a configuração em Z, apresenta bons resultados na redução de efeitos de aberrações ópticas, mais especificamente a aberração cromática, além de permitir um campo de visão mais amplo. Estas aberrações são introduzidas pelo uso de lentes ou espelhos esféricos (ou parabólicos), particularmente se os espelhos não são coaxiais (configuração em Z, mostrada na Figura 4). Para pequenos ângulos de desalinhamento entre os espelhos, o coma é a aberração mais significativa. A configuração em Z cancela o coma no plano da aresta de corte.

2.5. Filtros

Nos sistemas tradicionais, geralmente o meio que se esta visualizado pela técnica Schlieren não emite luz em nenhum comprimento de onda e neste caso a imagem registrada pelo filme corresponde apenas à imagem da luz desviada pelo meio de teste, no entanto quando se aplica a mesma técnica em soldagem, a intensidade luminosa emitida pelo laser e pelo arco de solda se apresenta em um amplo espectro (Figura 5), sendo a intensidade de luz emitida pelo arco mais forte que a intensidade emitida pelo laser, torna-se impossível a distinção entre a imagem produzida pela luz do laser e pela luz do arco de solda. Mas como pode ser visto na Figura 5 o espectro do laser está fora do espectro do arco, portanto se for utilizado no lado da câmera um filtro passa-banda (comprimento de onda $\lambda = 632.8nm$), o espectro de luz emitido pelo arco será eliminado e será registrado pela câmera apenas a imagem produzida pelo feixe de luz do laser que passou pelo meio de teste Figura 6.

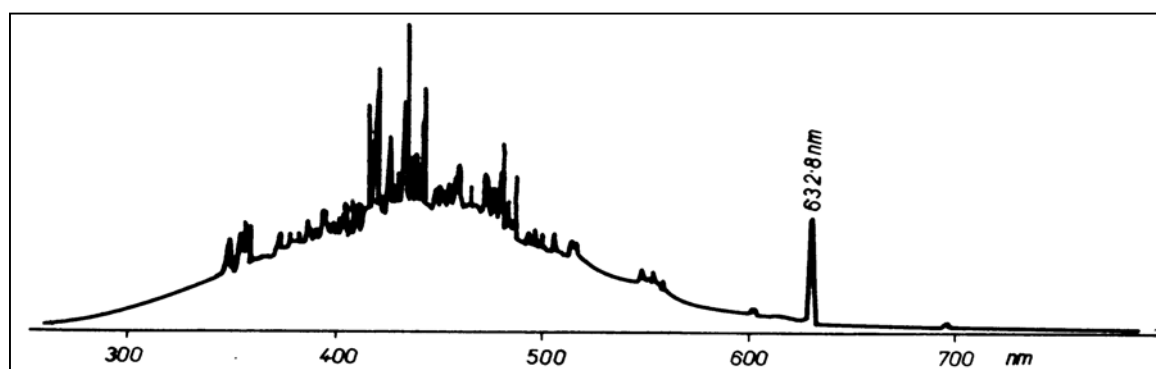


Figura 5 – Espectro do arco TIG e do feixe de laser (Okada et al, 1980).

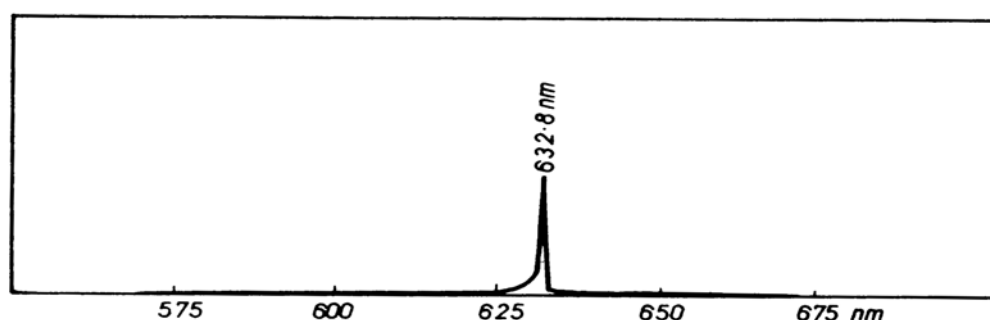


Figura 6 – Espectro Próximo ao feixe de laser com filtro passa banda (Okada et al, 1980).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos com a técnica Schlieren, o ponto de maior importância e que interfere de forma direta nos resultados obtidos é o correto posicionamento dos equipamentos, para melhorar a sensibilidade da técnica é recomendado realizar o experimento com pouca iluminação ambiente, montar o equipamento em um ambiente com baixo índice de vibrações e com o mínimo de correntes de ar. Abaixo está descrito um procedimento de montagem e posicionamento dos componentes:

1. O primeiro espelho deve ser posicionado de tal forma que sua distância focal coincida com a fonte luminosa. Isto é importante para que os raios de luz que atravessam o meio de teste estejam paralelos garantindo assim que a imagem tenha o mesmo tamanho do objeto (escoamento).
2. O segundo espelho deve ser posicionado de tal forma que reflita toda a luz emitida pelo primeiro espelho.
3. Mova a aresta de corte ao longo do eixo principal do espelho de modo a localizar o plano focal. Quando isto é conseguido, a iluminação da tela é uniforme, conforme Figura 7.b.

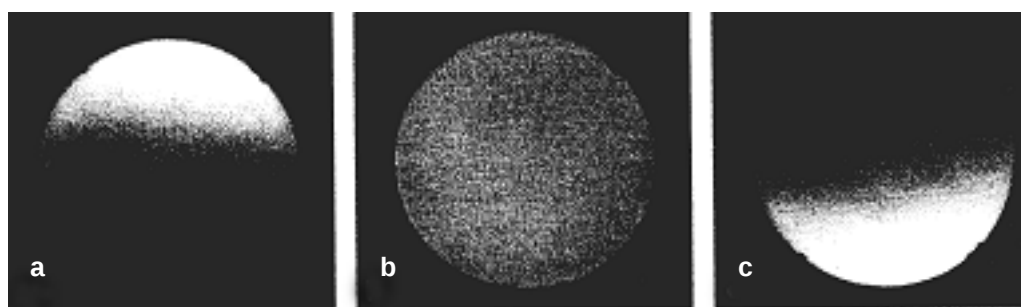


Figura 7 – Efeito do posicionamento da aresta de corte ao longo do eixo principal do espelho. Aresta de corte próxima ao espelho (a), na posição correta (b) e afastada do espelho (c). (Settles, 2001)

4. Mova a faca no plano focal, vendo os possíveis diferentes graus de iluminação da tela. Com isso, a sensibilidade do sistema é variada. Isto pode ser feito colocando suas mãos (mornas) na região de teste. Se o sistema tiver boa sensibilidade você poderá ver os gradientes na densidade causados por convecção natural.

Foram realizados sete testes, apresentados na Tabela 1, para verificar a influência da corrente de soldagem e da sensibilidade da técnica através da variação do diâmetro do furo “d” utilizado como aresta de corte. No teste T01 não foi usada aresta de corte, obtendo-se uma imagem de shadowgrafia convencional.

Tabela 1– Ensaios propostos

Ensaio	Corrente [A]	d [mm]
T01	40	—
T02		0.5
T03		1.0
T04	70	0.5
T05		1.0
T06		0.5
T07	100	1.0

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A imagem obtida para o ensaio T01 está mostrada na Figura 8. Como não foi utilizada a aresta de corte, a imagem apresenta apenas a sombra do eletrodo e da chapa.

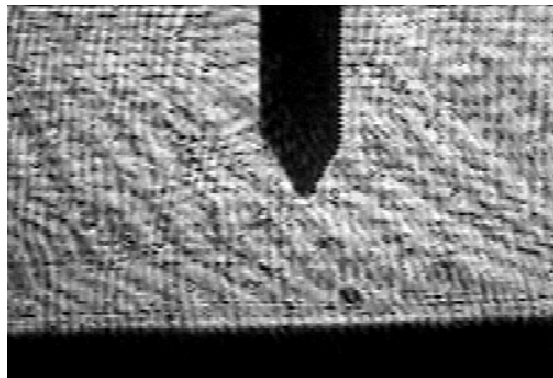


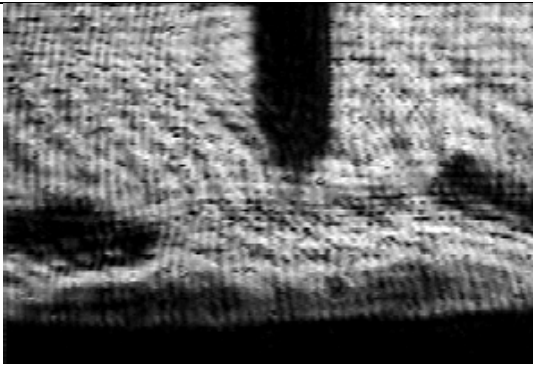
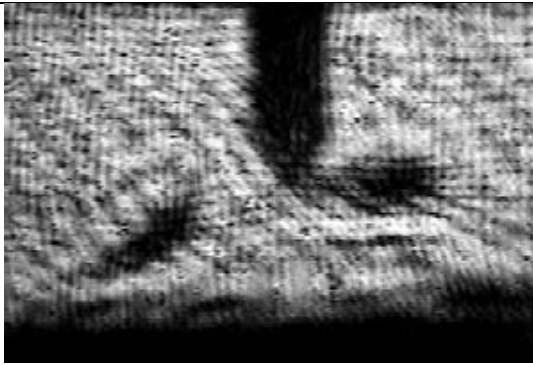
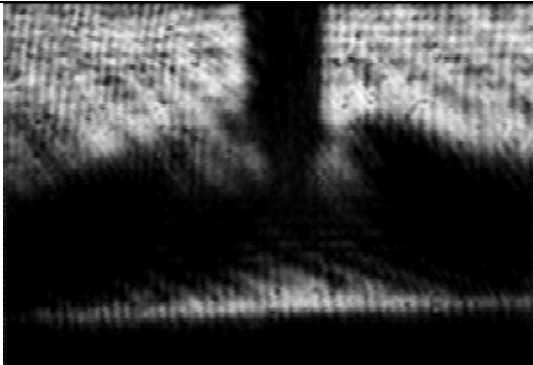
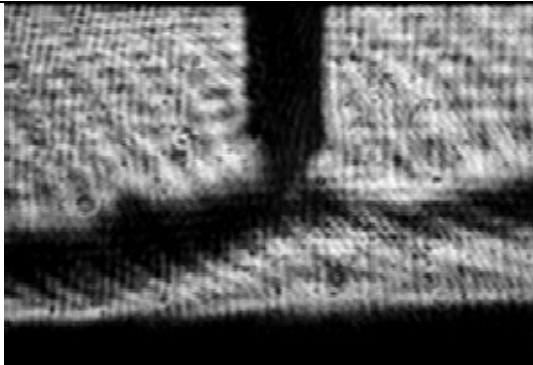
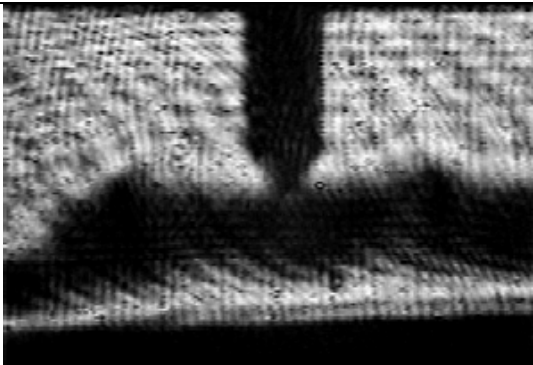
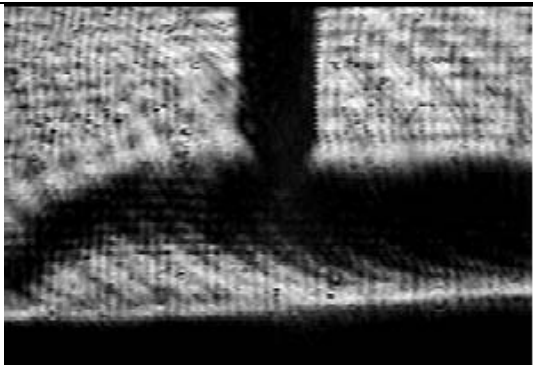
Figura 8 – Imagem obtida sem aresta de corte (shadowgrafia).

Na Tabela 2 estão apresentadas exemplos de imagens obtidas para os demais ensaios. Pelas imagens obtidas, pode-se afirmar que quanto menor o diâmetro da aresta de corte, menores serão os gradientes observados, pois as imagens da coluna para $d = 0.5$ mm apresentam uma região de gradientes maior que as imagens da coluna $d = 1.0$ mm.

Com relação ao efeito da corrente, nota-se que de 40 A para 70 A, os gradientes observados foram muito maiores, uma vez que o aumento da corrente de soldagem aumenta a temperatura do arco. Já ao aumentar-se a corrente de 70 A para 100 A, nota-se que a região enegrecida foi reduzida, aparecendo uma região mais clara próxima à chapa. Esta grande alteração de tons de cinza indica que os gradientes térmicos são maiores nesta região, do que para 70 A (a região clara próxima à chapa é pequena para 70 A). Estes resultados eram esperados, uma vez que maiores gradientes (maiores alterações da tonalidade cinza) foram obtidos ao ser aumentar a corrente de soldagem.

Como resultados iniciais, pode-se dizer que apesar das imagens obtidas estarem num estágio inicial, é possível visualizar os gradientes térmicos. Entretanto, há bastante ruído no fundo da imagem e a sensibilidade do sistema ainda não está satisfatória.

Tabela 2 – Imagens para técnica Schliren

Corrente	Imagem para d = 0.5 mm	Imagem para d = 1.0 mm
40 A	 Ensaio T02	 Ensaio T03
70 A	 Ensaio T04	 Ensaio T05
100 A	 Ensaio T06	 Ensaio T07

5. CONCLUSÕES

As imagens obtidas por esta técnica estão fisicamente coerentes, ou seja, quanto maior o gradiente térmico do arco, obtido a partir de uma maior corrente de soldagem, maior a diferença entre tons de cinza na imagem. O diâmetro do orifício utilizado como aresta de corte altera a sensibilidade da técnica, onde uma maior sensibilidade é conseguida com a redução deste diâmetro. Entretanto, há um diâmetro mínimo, onde abaixo deste há a deterioração da imagem.

6. REFERÊNCIAS

Davidhazy, A., 1998 - “Basics of Focusing Schlieren System”, School of Photographic Arts and Sciences, Rochester Institute of Technology,

- Davidhazy, A., 1998 – “Schlieren Photography Principles”, School of Photographic Arts and Sciences, Rochester Institute of Technology,
- Jeronimo, A. & Van Der Haegen V., 2002 – “Schlieren Technique – Lab Notes”, EUROAVIA Symposium - Mission to Mars - November - Von Karman Institute for Fluid Dynamics
- Merzkirch, W., 1987 – “Flow Visualization”, 2nd ed., Academic Press, , pp. 115-149.
- Okada, T., Yamamoto, H. and Harada, S., 1980 – “Observation of the Shielding Gas Flow Pattern During Arcing by Use of a Laser Light Source”, Arc Physics and Weld Pool Behavior, The Welding Institute, Cambridge, pp. 203-213.
- Okada, T., Wakino, Y. and Yamamoto, H., 1979 – “Shielding Gas Flow Characteristics of High Current MIG Welding With Double Shielding Nozzle, Osaka Transformer Co.,Ltd.
- Settles, G. S. , *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer, 2001, 369p.
- Vilarinho, L. O., 1998 - “Observações Importantes Sobre o Método Schlieren” – Anotações de visita ao SISEA (Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos da Escola Politécnica da USP), 4 p.
- Vilarinho, L. O., 2001 - “Avaliação de Gases de Proteção em Soldagem Através de Técnicas Experimentais e Numéricas”, Relatório de Qualificação, UFU.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa PBIIC FAPEMIG/UFU pela bolsa de iniciação científica, aos membros e colaboradores do Laprosolda/UFU (Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem) e a FEMEC/UFU pela infra-estrutura oferecida.

SCHLIEREN TECHNIQUE APPLIED TO FLOW VISUALIZATION IN WELDING NOZZLES

André Alves de Resende

Federal University of Uberlândia - Department of Mechanical Engineering, Laboratory for the Development of Welding Processes – Av. João Naves de Ávila, nº 2121 District Santa Mônica, Block O
e-mail, aaresende@gmail.com

Louriel Oliveira Vilarinho

e-mail, vilarinho@mecanica.com.br

Abstract: *In the TIG welding process, the gas flow plays an important role, once that its lack of protection in the welding pool and adjacent regions can cause problems of arc stability as well as geometrical and structural problems of the weld filet. Thus, it is important for the improvement of the process the study of the shielding gas and its flow during the welding. As it occurs in the majority of the flows, the shielding gas suffers from density variation due to the gradients of temperature and concentration, and consequently variation in the optical properties. Thus, in this paper it is proposed to visualize the shielding gas flow by using the technique known as Schlieren, which makes possible the light ray visualization that had suffered deviation (refraction) when passing through the arc welding due to variation in the optical properties. The sensitivity is an essential aspect since it characterizes the functionality of the method. Through this technique it is possible the visualization of the thermal gradients of the arc represented by variations in the gray tones of the images.*

Keywords: *welding, optic, schlieren, visualization, flow.*