



## QUANTIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS

### **Tereza Cristina Gomes Maia**

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG,  
e-mail: [tcgomes@ufu.br](mailto:tcgomes@ufu.br)

### **Edna Lúcia Flores**

Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG,  
e-mail: [edna@ufu.br](mailto:edna@ufu.br)

### **Américo Scotti**

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG,  
e-mail: [ascotti@mecanica.ufu.br](mailto:ascotti@mecanica.ufu.br)

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um método automatizado desenvolvido para a identificação e medição geométrica de objetos presentes em imagens de transferência metálica em soldagem a arco voltaico (obtidas pela técnica de filmagem em altas velocidades), fornecendo como resposta a avaliação quantitativa dos parâmetros geométricos (comprimento do arco, comprimento do eletrodo e diâmetro das gotas) e a frequência de destacamento das gotas em transferência sob diversas condições. Este método baseia-se em um programa computacional, composto de um programa principal e módulos para calibração, tratamento e análise de imagens e armazenamento de dados. O programa computacional foi testado sob vários modos de transferência metálica em soldagem MIG/MAG em diferentes tamanhos de amostragem (até 26000 quadros por amostra, a uma taxa de aquisição de 2000 quadros por segundo). Os resultados obtidos mostraram-se adequados quando comparados com o processo de medição manual convencional, ressaltando-se uma economia significativa de tempo e uma maior precisão dos resultados, devido ao tamanho maior da amostragem.*

**Palavras-chave:** *Processamento de imagem, Processo de soldagem MIG/MAG, Física do arco.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A soldagem a arco voltaico com eletrodo consumível e proteção gasosa (conhecida pelas siglas MIG/MAG ou GMAW) é um processo amplamente utilizado e um método eficiente de união permanente de peças metálicas nas indústrias de estruturas soldadas. A forma mais efetiva de otimizar o desempenho deste processo, e aumentar sua versatilidade e produtividade, é através do estudo dos fenômenos que ocorrem durante a transferência do metal fundente do eletrodo para a peça a ser soldada.

O comportamento do eletrodo e das gotas - comprimento do arco, diâmetro da gota e frequência de destacamento das gotas - durante a transferência metálica no processo MIG/MAG vem sendo estudado e avaliado por vários pesquisadores (Scotti, 1998; Bálamo et al., 1999; Costa et al., 2001) do Laboratório para o Desenvolvimento dos Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) da Universidade Federal de Uberlândia, como fator importante na melhoria de consumíveis (arames e gases) e de equipamentos. Para a observação dos aspectos geométricos e dinâmicos nos diversos modos de transferência têm sido utilizados equipamentos complexos para a visualização e a

gravação do fenômeno. Entretanto, a medição dos parâmetros geométricos e dinâmicos desejados demanda bastante tempo quando feita manualmente, como tradicionalmente é feito, já que cada quadro de uma imagem de transferência metálica tem de ser digitalizado e medido individualmente em um sistema não automatizado de tratamento de imagens. O critério de definição das formas e a fadiga decorrente do trabalho repetitivo, podem fazer com que os valores se diferenciem, dependendo do operador ou mesmo durante a medição (erros sistemáticos). Além disto, considerando o caráter errático de um arco, a forma de amostragem precisa ser representativa e o tamanho da amostra elevado. Estes fatores aumentam os custos da análise, além de possibilitar erros aleatórios.

A possibilidade de se fazer esta análise de forma automatizada (sem a interferência ou dependência do operador) apresenta-se como um grande avanço para os pesquisadores desta área. Técnicas de processamento digital de imagens surgem como meios de aprimorar a qualidade análise. A escolha adequada de técnicas de segmentação, filtragem, identificação e descrição de formas possibilita uma avaliação quantitativa automatizada e rápida, otimizando a tarefa dos pesquisadores.

Desta forma, este trabalho propõe-se a validar um programa computacional projetado e desenvolvido pelos autores, dedicado para a identificação e a medição geométrica de objetos presentes (eletrodo, gota e poça de fusão) em imagens de transferência metálica em soldagem a arco voltaico (obtidas pela técnica de filmagem em altas velocidades), fornecendo como resposta a avaliação quantitativa dos parâmetros geométricos (comprimento do arco, comprimento do eletrodo e diâmetro das gotas) e a frequência de destacamento das gotas em transferência do tipo globular e goticular (“spray”).

## 2. O PROGRAMA “VÍDEO-ANALISADOR DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA EM SOLDAGEM”

As imagens de transferência metálica nos trabalhos desenvolvidos no LAPROSOLDA são adquiridas através da técnica “shadowgrafia” sincronizada (Vilarinho, 2000), a qual consiste de um sistema de visualização do arco de soldagem que utiliza uma fonte de luz laser, componentes ópticos para expandir e colimar o feixe laser, um filtro óptico passa-banda para “cortar” a luz do arco e uma câmera de vídeo de alta velocidade (2000 quadros/segundo). Estas imagens são consideradas de boa qualidade para a visão humana, ou seja, é possível distinguir com clareza formas, nuances de luz e textura. A Figura (1) mostra uma imagem típica de transferência metálica.



Figura 1. Exemplo de imagem típica de transferência metálica, destacando os elementos poça de fusão, gota e eletrodo

A abordagem do programa computacional resume-se em analisar quantitativamente estas imagens adquiridas e armazenadas, na forma digitalizada, cujas características principais são a

existência de 3 ou mais elementos que se movimentam e mudam de forma sequencialmente de quadro para quadro. O programa constitui das etapas de tratamento das imagens, calibração, identificação das características geométricas a serem medidas e seleção dos critérios de medição dos parâmetros geométricos. Este programa foi denominado Vídeo-analisador de Transferência Metálica em Soldagem, e foi desenvolvido para plataforma PC-Windows no ambiente LABVIEW™, da National Instruments, utilizando sua linguagem gráfica de programação. Os módulos referentes ao processamento das imagens foram projetados utilizando a biblioteca IMAQ™ Vision, também da National Instruments. A Figura (2) mostra a tela básica do programa principal do Vídeo-analisador com a área para entrada de dados, os módulos de calibração, tratamento de imagem, análise das imagens e armazenamento de dados; e a área de visualização dos resultados parciais e finais.

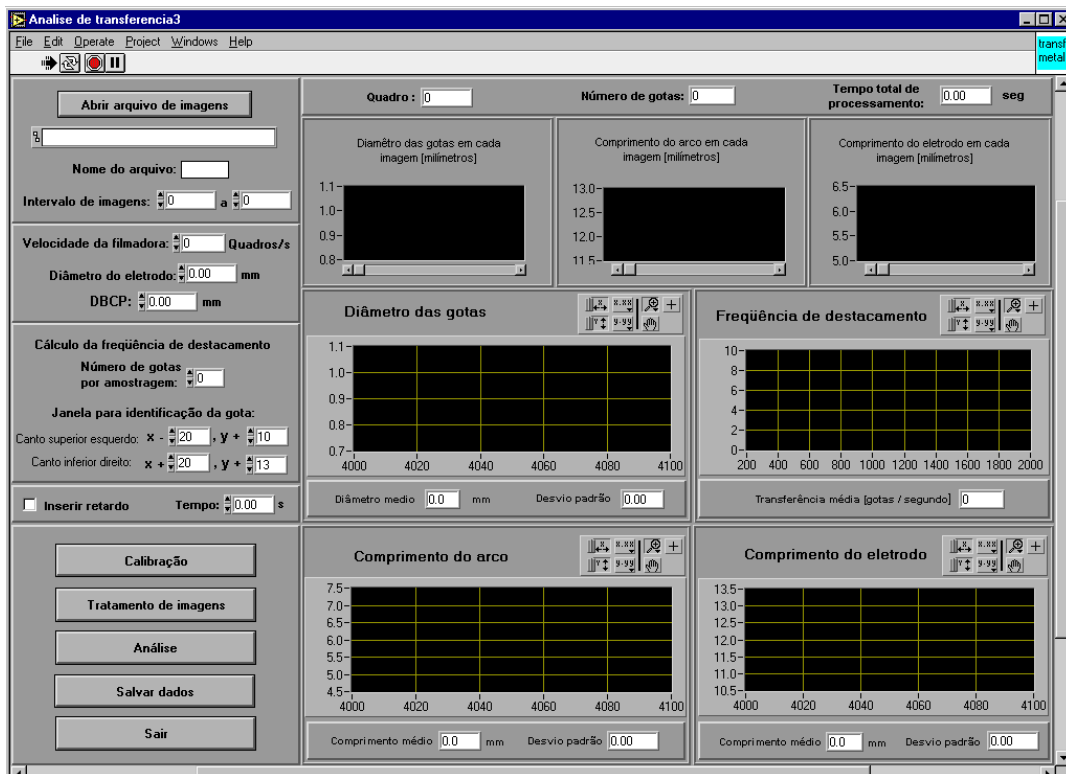


Figura 2. Tela básica do programa principal do Vídeo-analisador.

Para a análise quantitativa automatizada, a qualidade da imagem está relacionada à sua adequação para o processamento pela máquina. Com este objetivo, foi desenvolvido um módulo de tratamento de imagens no Vídeo-analisador. Neste módulo foram utilizadas técnicas de realce classificadas como métodos de pré-processamento como filtragem por mediana (redução de ruídos), algoritmos de descrição de fronteira (segmentação de objetos) e filtragem morfológica (eliminação de pontos isolados) (Rostampour et al., 1988; Jain, 1989; Gonzalez et al., 1992). Na etapa posterior ao realce utilizou-se técnicas para extração de informações de uma imagem onde é feita a identificação, a representação e a descrição de objetos e regiões de interesse na imagem digital. A Figura (3) mostra uma imagem típica de transferência metálica em diferentes etapas do pré-processamento.

A identificação do tipo de transferência e os critérios para a medição do comprimento do arco foram feitos a partir das características formais básicas e estudos sobre o comportamento do arco realizados pelos pesquisadores do LAPROSOLDA (Costa et al., 2001). A forma do eletrodo é a informação mais importante para a identificação do tipo de transferência metálica. Através de um algoritmo de identificação do tipo de transferência e medição desenvolvido por Maia (2001), a imagem do eletrodo é inserida em um retângulo e esta região é mapeada, obtendo-se várias

informações sobre o eletrodo tais como, a sua largura máxima e mínima, a identificação da formação da gota e do seu diâmetro, a identificação do início do estreitamento da gota e o cálculo do seu comprimento. A partir dessas informações, identifica-se o tipo de transferência e a posição para o cálculo do comprimento do arco. A Figura (4) mostra um exemplo de uma seqüência de imagens de transferência metálica durante a análise quantitativa.

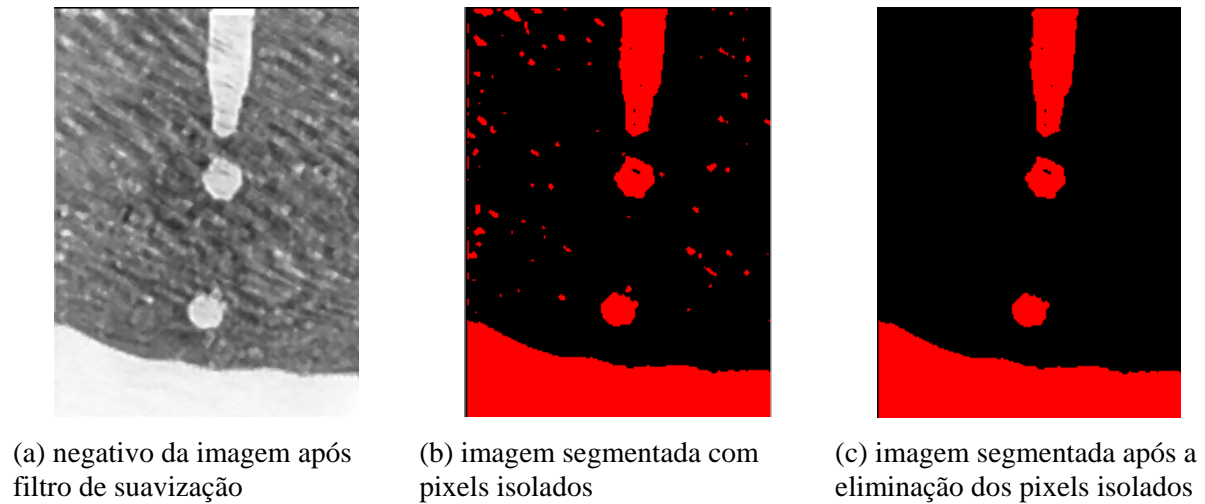


Figura 3. Exemplo das etapas do pré-processamento de uma imagem de transferência metálica.

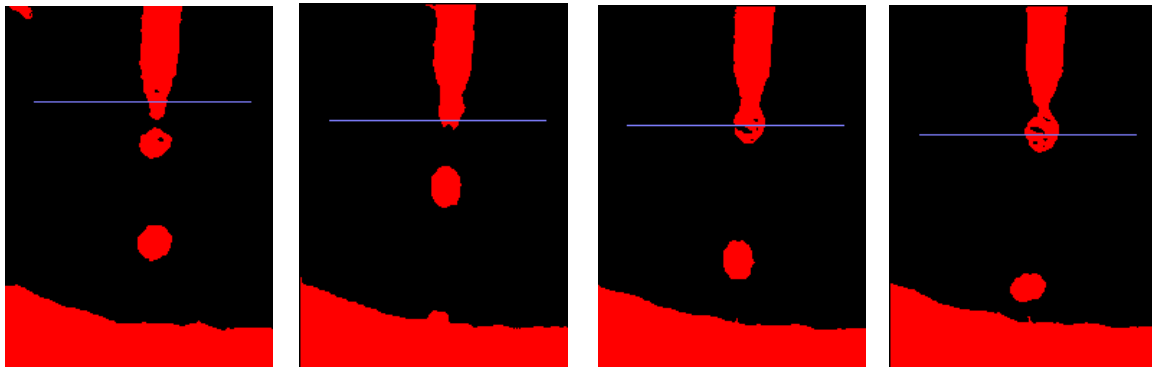


Figura 4 – Exemplo de uma seqüência de imagens de transferência metálica durante a análise quantitativa.

### 3. VALIDAÇÃO DO PROGRAMA “VÍDEO-ANALISADOR DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA EM SOLDAGEM”

Para avaliar o desempenho do Vídeo-analisador, e conseqüentemente validar sua aplicação, foram utilizadas imagens adquiridas durante ensaios de soldagem para vários tipos de transferência. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para a análise de imagens de transferência globular e goticular, definidos de acordo com a classificação de tipos de transferência proposta pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) para aços.

Dois métodos foram utilizados para medir os parâmetros geométricos desejados e foi, então, feita a comparação dos resultados obtidos nas medições. O primeiro é um método manual, onde o usuário utiliza um programa comercial (Global Lab Image®) de aquisição e análise de imagens e, selecionando cada imagem, mede os parâmetros desejados. O segundo é o método automático, utilizando o Vídeo-analisador. A análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos manual

e utilizando o Vídeo-analisador teve como objetivo verificar a confiabilidade das informações fornecidas pelo método automático e justificar a possível adoção deste como método padrão.

A escolha do tamanho da amostragem foi baseada em um procedimento adotado para a medição manual do comprimento do arco desenvolvido por Costa et al. (2001). Este procedimento consiste em selecionar quadros do banco de imagens de transferência metálica, tomando como base o comprimento do arco a ser medido. Como o objetivo é medir o comprimento médio, indistintamente do momento da transferência, esta seleção é realizada de uma forma aleatória. Para isso, determina-se um vetor com 100 elementos (quadros) randômicos nos quais deve-se realizar a medição.

Inicialmente, foram analisados 2 conjuntos de 100 imagens aleatórias, um com a transferência metálica do tipo globular e outro do tipo goticular. Estes dois conjuntos foram medidos manualmente por um único usuário e automaticamente pelo Vídeo-analisador, seguindo os critérios de medição do comprimento do arco elaborados pelos pesquisadores do LAPROSOLDA (Costa et al., 2001)

Os parâmetros geométricos medidos pelo Vídeo-analisador foram o diâmetro da gota, o comprimento do arco e o comprimento do eletrodo para cada conjunto de imagens de transferência metálica. O programa calculou ainda a frequência de destacamento para as transferências com gotas em vôo livre. Entretanto, os dois parâmetros geométricos adotados para verificar a adequação das técnicas de processamento das imagens escolhidas e da rotina de identificação do tipo de transferência metálica foram apenas o comprimento do arco e o diâmetro da gota. Por isso, a avaliação do desempenho do Vídeo-analisador foi realizada analisando os resultados desses dois parâmetros.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de soldagem dos quais se retirou imagens foram realizados pelo Processo MIG/MAG, na posição plana, com uma distância do bico de contato à peça (DBCP) igual a 18 mm e utilizando um arame eletrodo AWS ER70S-6 de diâmetro de 1,0mm e chapas de aço comum ao carbono. O gás de proteção utilizado foi o Argônio com 2% de O<sub>2</sub>, com uma vazão de 12,0 litros/min e a velocidade de soldagem de 40 cm/min. Esta velocidade foi ajustada de forma que o arco incidisse sempre sobre a chapa, ao invés de sobre a poça.

As medições manual e automática do diâmetro da gota foram realizadas a partir da determinação de sua área, utilizando as técnicas de segmentação e classificação dos objetos em uma imagem citadas anteriormente. Os valores médios obtidos nas medições do diâmetro das gotas pelos dois métodos nas transferências globular e goticular são mostrados na Tab. (1).

Tabela 1. Resultados das medições do diâmetro das gotas realizadas pelo método manual e pelo Vídeo-analisador

Transferência	Medições realizadas pelo método manual (valores médios em mm)		Medições realizadas pelo Vídeo-analisador (valores médios em mm)	
	Diâmetro da gota	Desvio padrão	Diâmetro da gota	Desvio padrão
Globular	2.1	0.15	2.3	0.11
Goticular	0.8	0.09	0.9	0.07

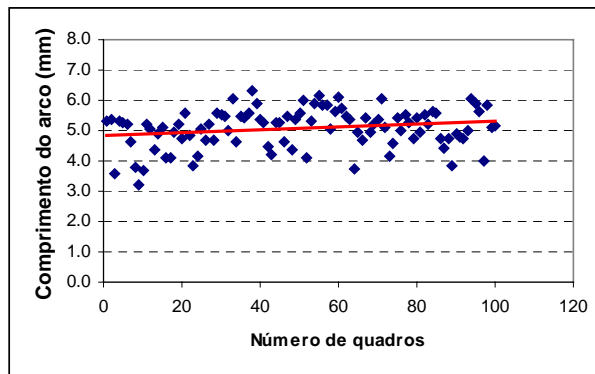
A medição manual do comprimento do arco foi realizada sem a utilização de qualquer técnica de pré-processamento, dependeu apenas dos critérios definidos pelos pesquisadores e da acuidade visual do usuário. A medição utilizando o Vídeo-analisador foi realizada após o pré-processamento. A Tabela (2) mostra os valores médios obtidos na medição do comprimento do arco para cada tipo de transferência metálica.

Tabela 2. Resultados das medições do comprimento do arco pelo método manual e pelo Vídeo-analisador

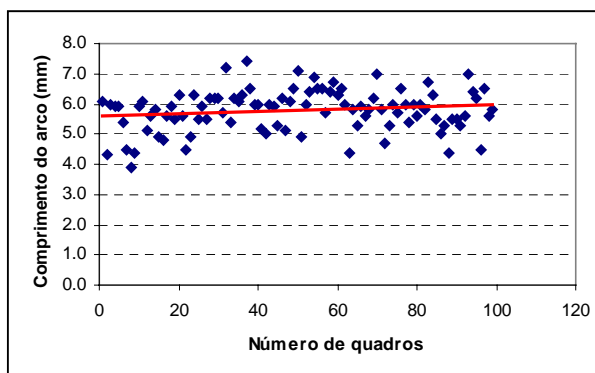
Transferência	Medições realizadas pelo método manual (valores médios em mm)		Medições realizadas pelo Vídeo-analisador (valores médios em mm)	
	Comp. Do arco	Desvio padrão	Comp. do arco	Desvio padrão
Globular	5.1	0.64	5.8	0.67
Goticular	5.0	0.38	5.4	0.41

As diferenças observadas nas Tab. (1) e Tab. (2) indicam que os dois métodos de medição, devido às suas características distintas, utilizam procedimentos que levam a resultados diferentes, considerando como referência a medição realizada pelo usuário.

Para observar as tendências nos dois métodos utilizados, foram feitos gráficos de dispersão dos valores e as curvas de tendência das medidas do comprimento do arco nos dois conjuntos de imagens de transferência metálica. A Figura. (5) e Figura (6) mostram os gráficos da dispersão das medidas do comprimento do arco realizadas pelo método manual e utilizando-se o Vídeo-analisador para as transferências metálicas do tipo globular e goticular. Os resultados mostram, como era esperado, que não existe um padrão para o comprimento do arco, ou seja, o comprimento do arco altera-se durante o tempo como consequência intrínseca do fenômeno de crescimento e destacamento das gotas.

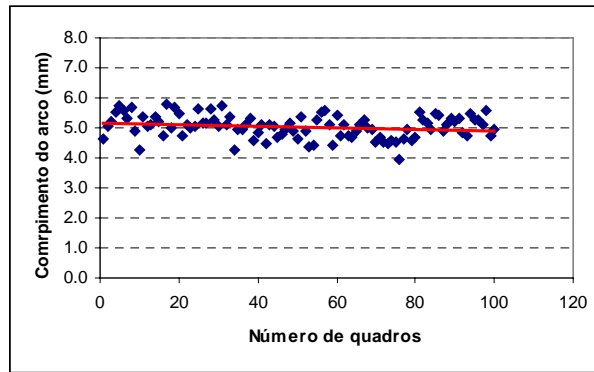


(a) medidas obtidas pelo usuário

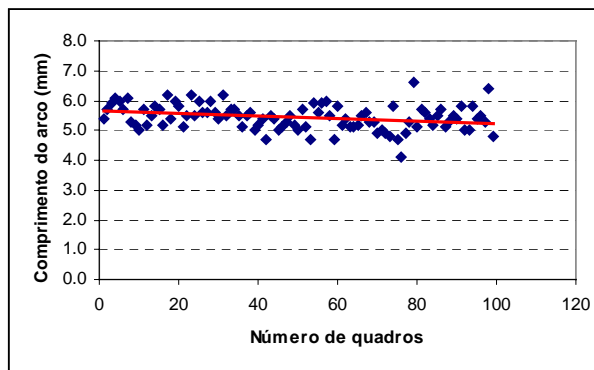


(b) medidas obtidas pelo Vídeo-analisador.

Figura 5. Dispersão das medidas de comprimento do arco na transferência globular.



(a) medidas obtidas pelo usuário



(b) medidas obtidas pelo Vídeo-analisador.

Figura 6. Dispersão das medidas de comprimento do arco na transferência goticular.

É importante observar que, tanto a dispersão, como a curva de tendência, são muito semelhantes nas medidas obtidas pelo método manual e pelo método automático para cada tipo de transferência metálica analisada. Isto indica que a etapa de pré-processamento e o algoritmo de identificação do tipo de transferência e medição dos parâmetros escolhidos estão adequados, caso contrário a dispersão observada teria um configuração diferenciada. Apesar dessas pequenas diferenças mostradas nas Fig. (5) e Fig. (6), a análise comparativa das dispersões indica a ocorrência de um erro sistemático e não aleatório.

Para averiguar as hipóteses de erro nos métodos manual e no método utilizando o Vídeo-analisador foram realizadas novas medições. Nesta nova análise comparativa, foi medido o comprimento do arco em um conjunto de 20 imagens aleatórias retirado do conjunto de 100 imagens de transferência metálica do tipo goticular. O número de imagens para esta avaliação foi reduzido pois o objetivo foi evidenciar a influência da experiência e acuidade visual do usuário na medição do parâmetro geométrico mencionado. O mesmo conjunto de 20 imagens foi medido uma vez por 5 usuários diferentes, assim como pelo Vídeo-analisador. A Figura (7) mostra o gráfico das médias do diâmetro das gotas obtidas pelos usuários utilizando o método manual e pelo Vídeo-analisador.

Neste gráfico, observa-se que o desvio-padrão das medidas obtidas pelos usuários é muito pequeno e que a média obtida pelo Vídeo-analisador coincide com as médias obtidas por três usuários. Este resultado era esperado, pois o procedimento para medir o diâmetro das gotas é o mesmo para os dois métodos, ou seja, escolher um valor de limiar para a segmentação, determinar a área da gota e calcular seu diâmetro.

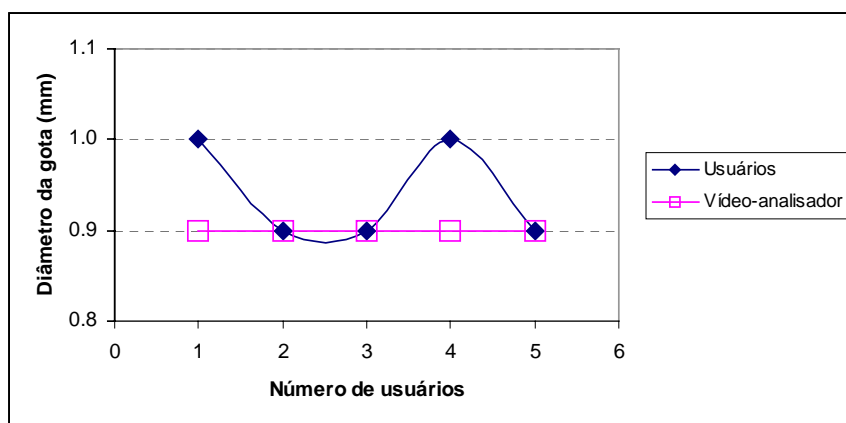


Figura 7. Médias do diâmetro da gota obtidas pelos usuários utilizando o método manual e pelo Vídeo-analisador.

A Figura (8) mostra o gráfico das médias do comprimento do arco obtidas pelos usuários e pelo Vídeo-analisador. A diferença observada entre as medidas obtidas pelos usuários neste gráfico indica uma variação significativa entre as medidas do comprimento do arco realizadas pelos cinco usuários e que este intervalo de variação contém a média obtida pelo Vídeo-analisador. Ou seja, a média obtida utilizando o Vídeo-analisador também pode ser considerada correta tomando como referência os resultados obtidos pela medição manual. Pode-se observar, portanto, que as medições que dependem da experiência e acuidade visual do usuário estão mais sujeitas a erros e a repetibilidade dos resultados torna-se difícil. Esta observação permite questionar a adoção do método manual como padrão, o correto seria o mesmo ser utilizado apenas como um indicativo.

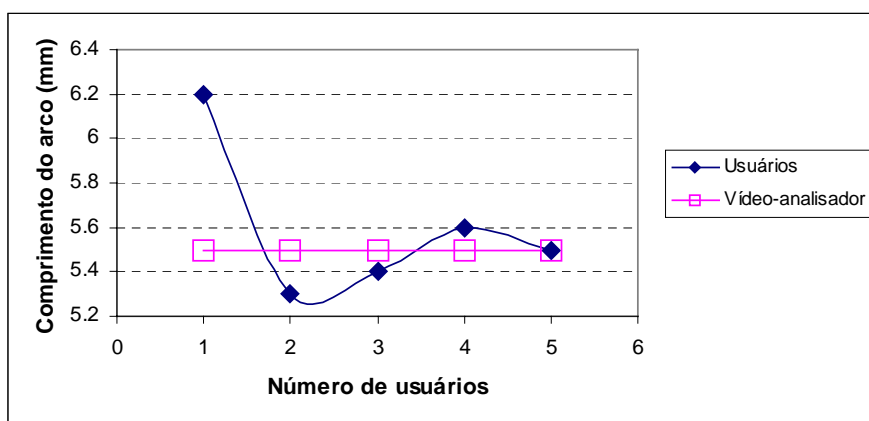


Figura 8. Médias do comprimento do arco obtidas pelos usuários utilizando o método manual e pelo Vídeo-analisador.

Um problema observado durante a análise quantitativa, utilizando o Vídeo-analisador, refere-se ao nível de ruído presente nas imagens adquiridas através da “shadowgrafia”. O sistema óptico-laser produz um ruído espacial nestas imagens devido à variação de intensidade das partículas espalhadas no ar, a defeitos ópticos do sistema e à vibração causada por outros equipamentos próximos ao sistema. A remoção ineficaz desse ruído dificulta o procedimento de segmentação e a filtragem para remoção de pixels isolados.

Resumindo, o Vídeo-analisador foi sistematicamente testado para os modos de transferência globular e goticular em soldagem MIG/MAG, identificando o tipo de transferência e realizando os cálculos dos parâmetros desejados. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios quando comparados com os resultados da medição manual sobre as mesmas imagens. É importante ressaltar



a economia significativa de tempo e a maior precisão dos resultados ao utilizar o Vídeo-analisador. O tempo gasto para analisar 100 imagens através da medição manual foi de aproximadamente 5 horas enquanto que para um experimento com 2.000 imagens, utilizando o Vídeo-analisador, foi em torno de 6 minutos usando-se um computador com processador Pentium II 350 MHz.

#### 4. CONCLUSÕES

O método automatizado desenvolvido neste trabalho mostrou-se capaz de identificar adequadamente os tipos de transferências selecionados e os resultados obtidos foram considerados confiáveis pelos pesquisadores do LAPROSOLDA.

O Vídeo-analisador desenvolvido proporciona ao usuário grande facilidade na sua utilização, oferecendo opções de realce e remoção de ruídos nas imagens digitais obtidas pela técnica de “shadowgrafia” e possibilitando uma grande economia de tempo na análise quantitativa de parâmetros geométricos em imagens de transferência metálica.

A análise de um grande número de amostras permite ao usuário a observação do fenômeno da transferência metálica em diversos momentos dos ensaios realizados e possibilita a ele selecionar intervalos para uma avaliação mais detalhada.

A adoção do Vídeo-analisador para a análise quantitativa de parâmetros geométricos como comprimento do arco e o diâmetro de gotas pode otimizar a tarefa dos pesquisadores da área de soldagem a arco voltaico do ponto de vista técnico e econômico.

#### 5. AGRADECIMENTOS

A equipe do LAPROSOLDA pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho. Ao programa PADCT III CEMAT, que através do projeto nº 662.0094/97 – 4, deu suporte financeiro para a aquisição e operacionalidade de todos os equipamentos utilizados neste projeto. E finalmente à White Martins, pelo fornecimento dos gases de proteção para os ensaios.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Bálsamo, P.S.S., Vilarinho, L.O. & Scotti, A., 1999, “Determinação Criteriosa dos Parâmetros de Pulso para Soldagem MIG Pulsada em Alumínio e Aço Inoxidável”, Revista Soldagem & Inspeção, V. 6, Maio, 2000, pp. SP1-SP9.
- Costa, A. V., Scotti, A., 2001, “Uma Metodologia para a Medição do Comprimento de Arcos de Soldagem.” In: XVI COBEM, Uberlândia, Brasil. Anais... , 6p.
- Jain, A.K., 1989, “Fundamentals of Digital Image Processing”. New Jersey: Prentice Hall, 569p.
- Gonzalez, R. C., Woods. R. E., 1992, “Digital Image Processing”. Massachusetts: Addison Wesley, 716p.
- Maia, T. C. G., 2001, “Utilização de Técnicas de Processamento Digital de Imagens no Estudo de Transferência Metálica em Soldagem a Arco Voltaico”, Uberlândia, FEELT – UFU, 124p.
- Rostampour, A. R., Reeves A. P., 1988, “2-D Median Filtering and Pseudo Median Filtering”. Proceedings of Twentieth Southeastern Symposium. pp.554 – 557.
- Scotti, A., 1998, “A Review on Special Metal Transfer Modes in Gas Metal Arc Welding”, In: Journal of Braz. Soc. Mechanical Science, RBCM, vol. 20, nº 3, Brasil, pp. 465 – 478.
- Vilarinho, L. O., 2000, “Desenvolvimento e Avaliação de um algoritmo Alternativo para soldagem MIG Sinérgica de Alumínio”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, 111p.

## Metal Transfer Quantification in GMAW using Digital Image Processing Techniques

**Abstract.** *This paper presents an automatic method developed for geometrical measurements and identification of objects present in metal transfer images (high-speed filming) from arc welding. This method provides a quantitative evaluation of the geometric parameters (i.e., arc and electrode length and droplet diameter) and of the droplet detachment frequencies. This method is based on a dedicated interactive software, composed of a main program and modules for calibration, image enhancement, segmentation and filtering and data storage. The program was tested on several metal transfer modes, at different sample sizes (up to 26000 frames per sample, at a acquisition rate of 2000 fps). The results were considered more reliable and less susceptible to random errors in comparison to the manual method. It can be assumed an optimization of the researcher's task from the economic and technical point of view.*

**Key words:** *Digital Image Processing, GMA Welding, Arc Physics*