



## **AVALIAÇÃO INICIAL DA APLICAÇÃO DE FOTOELASTICIDADE E SOLDAGEM DE PLÁSTICOS NO ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS EM PLACAS SOLDADAS**

### **Alberto B. Vieira Jr.**

Universidade Federal de Uberlândia – Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
Campus Santa Mônica – cep 38400-902 – Uberlândia, MG – abvieira@mecanica.ufu.br

### **Américo Scotti**

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica - Campus Santa Mônica  
cep 38400-902 – Uberlândia, MG – ascotti@mecanica.ufu.br

### **Domingos A. Rade**

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica - Campus Santa Mônica  
cep 38400-902 – Uberlândia, MG – domingos@ufu.br

***Resumo.** Neste trabalho é apresentada uma avaliação de uma abordagem pouco usual para estudar tensões residuais resultantes da soldagem de placas metálicas. Esta abordagem se baseia na soldagem de plásticos, análise fotoelástica das placas soldadas e uso de modelos dimensionais para se chegar, a partir dos valores de tensões residuais obtidos com fotoelasticidade, às tensões residuais relativas à soldagem de placas metálicas. Investigou-se o comportamento das tensões residuais, tanto no caso da soldagem de placas de policarbonato (PC), como de placas de aço, usando-se simulações numéricas de soldagem. A imagem fotoelástica obtida a partir de uma soldagem de plástico mostrou-se bastante coerente com o aspecto previsto para a distribuição das tensões residuais. Os resultados obtidos com simulações numéricas de soldagem, no entanto, indicam restrições ao uso de modelos de dimensionais (para obtenção de dados quantitativos de tensões residuais em placas metálicas) correlacionando os dois materiais.*

***Palavras-chave:** tensões residuais, fotoelasticidade, soldagem, modelamento, soldagem de plásticos.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A determinação do estado de tensões residuais em peças metálicas soldadas é, ao mesmo tempo, um problema importante e de difícil resolução. Parlane et al. (1981) classificam os métodos de medição de tensões residuais, a partir do princípio físico em que cada método se baseia, em cinco grupos principais: mecânicos, ópticos, raios-X e analíticos.

No caso da medição de tensões residuais em peças metálicas, a maioria das técnicas experimentais citadas acima permite, nas aplicações práticas, apenas a obtenção de valores em um número relativamente pequeno de pontos. Tais técnicas também são, muitas vezes, destrutivas ou dispendiosas. A fotoelasticidade de reflexão, na qual adere-se um filme de material fotoelástico na

superfície metálica antes de se iniciar o processo de soldagem, poderia ser um processo de medição mais abrangente e menos oneroso. No entanto, as altas temperaturas que ocorrem junto ao cordão de solda inviabilizam o uso desta técnica em tais regiões. Uma outra limitação das técnicas experimentais é que poucas destas técnicas são apropriadas para a determinação de tensões residuais em regiões que não estejam na superfície das peças metálicas. Uma das poucas opções, nestes casos, a difração de nêutrons, pode fornecer resultados com desvios-padrão de 30 a 60 MPa (e até de 100 MPa nos piores casos) (Oddy et al., 1998).

Devido às dificuldades encontradas no uso das técnicas mencionadas anteriormente, muitas vezes se recorre a simulações numéricas de soldagem, ou mesmo a fórmulas empíricas. Sekhar et al. (1998) afirmam que programas de elementos finitos são o meio mais completo de se obter a previsão de tensões residuais em estruturas soldadas, vencendo a limitação das formulações empíricas. No entanto, devido à dificuldade em se incluir todas as variáveis influentes no processo de formação de tensões residuais na soldagem, Papazoglou e Masubuchi (1982) reconhecem que uma previsão numérica mais abrangente também é dispendiosa e impraticável para uso cotidiano. Geralmente, também é desejável poder-se contar com alguma técnica experimental que torne possível a validação de simulações numéricas de soldagem.

Devido às razões mencionadas, considera-se bastante desejável poder-se contar com uma técnica de estudo de tensões residuais em soldagem, que não seja destrutiva, que seja menos onerosa e que possa ser usada em toda as regiões da placa soldada. A fotoelasticidade de transmissão oferece estas características, mas seu uso é restrito aos materiais amorfos e transparentes que apresetam propriedades fotoelásticas. Surge a perspectiva de se usar a soldagem de materiais fotoelásticos tais como o policarbonato (PC) como modelo válido (ao menos, qualitativamente) para a soldagem de outros materiais. Neste trabalho propõe-se, então, estudar a possibilidade do modelamento da soldagem de placas de aço a partir da soldagem de PC por ar quente (“hot air” ou “hot gas welding”).

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1. Soldagem de plásticos por ar quente**

A soldagem de plásticos por ar quente é um processo semelhante aos processos de soldagem a arco de materiais metálicos em que a solda é conseguida com a fusão de uma vareta de material de adição dentro de uma junta (AWS, 1991). Usa como fonte de calor um jato de ar aquecido por resistência elétrica, num aparelho semelhante a um secador de cabelo. A Figura 1 mostra o processo de soldagem de plásticos por ar quente. Pode-se usar a alimentação manual do material de adição (o material, neste caso, também é pressionado manualmente contra as faces da junta). Uma outra opção é o uso de um bocal especial que permite a passagem, aquecimento e pressão do material contra as faces da junta (bocal de solda rápida).

A semelhança entre a soldagem de plástico por ar quente e a soldagem a arco de metais só não é completa porque, no caso da soldagem de plásticos por ar quente, a vareta de material de adição não chega a se fundir completamente. O que ocorre é a interpenetração das cadeias poliméricas da vareta e da junta da placa de base, por efeito de temperatura e pressão, produzindo a soldagem (a necessidade de pressão é outra diferença entre a soldagem por ar quente e processos que usam arco voltaico).

Na soldagem de materiais poliméricos, o uso da temperatura adequada é de grande importância. Temperaturas excessivas podem provocar a decomposição do material. Além da temperatura de fusão ( $T_f$ ), os polímeros apresentam uma outra temperatura de referência importante, que é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), onde ocorre, dentre outras alterações, a mudança de estrutura, de amorfa para cristalina. No caso do PC,  $T_f = 267\text{ °C}$  e  $T_g = 145\text{ °C}$  (Nielsen e Landel, 1994). Gumbleton (1989) indica, como temperatura do ar que sai do aparelho de ar quente, para soldagem de policarbonato, aproximadamente  $350\text{ °C}$ .

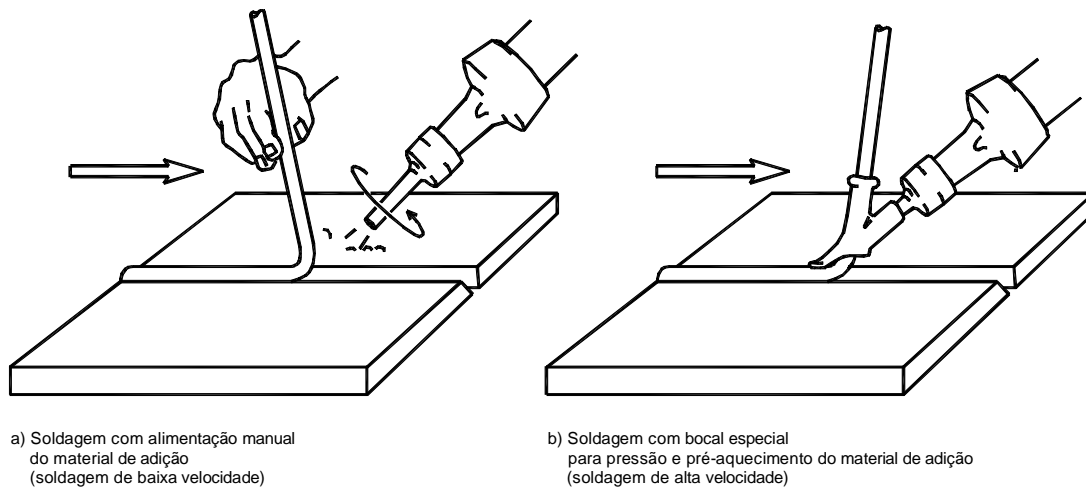


Figura 1. Soldagem por ar quente com alimentação manual do material de adição (a) e com uso de bocal especial para soldagem rápida (b)

## 2.2. Fotoelasticidade

A fotoelasticidade de transmissão é uma técnica experimental de determinação de tensões residuais cujo emprego é possível em se tratando de materiais com propriedades fotoelásticas. Nestes materiais, a presença de tensões provoca modificações nos índices de refração do material. Tais modificações são analisadas quando o material é colocado em um polariscópio, aparelho constituído de uma fonte de luz e de um conjunto de filmes que produzem polarização da luz. Estes filmes (juntamente com o material analisado) selecionam, em determinadas direções, intensidades ou comprimentos de onda do feixe de luz original, permitindo a visualização de franjas, cuja análise permite a obtenção de informações sobre o estado de tensões em cada ponto da peça. As franjas podem ser isoclínicas (conjunto de pontos com mesma direção de atuação de uma das tensões principais) ou isocromáticas (pontos com mesma diferença entre os valores das tensões principais).

Os fundamentos da técnica podem ser encontrados em Dally e Riley (1978). A determinação ponto-a-ponto das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  a partir da análise das isoclínicas e isocromáticas pode ser bastante trabalhosa quando feita manualmente. No entanto, já existem programas computacionais que permitem o processamento das imagens obtidas, fornecendo as distribuições das tensões ao longo de toda a placa. Os materiais que podem ser empregados em fotoelasticidade são materiais amorfos e transparentes, tais como vidro, algumas resinas de epóxi ou poliéster, borrachas a base de uretano e policarbonato (PC). O PC é um dos materiais mais próprios para uso em fotoelasticidade, apresentando uma das maiores figuras de mérito  $Q$  ( $Q = E / f_\sigma$ ), relação entre o módulo de elasticidade e a constante óptica do material, a qual fornece uma indicação da quantidade de franjas que surgem quando o material é submetido a uma determinada deformação).

## 3. METODOLOGIA

Visando investigar a possibilidade do modelamento da soldagem de materiais metálicos a partir da soldagem de PC pelo processo de ar quente, propôs-se as seguintes atividades:

- Análise dimensional, buscando encontrar um termo adimensional que pudesse ser utilizado como referência comum ao PC e ao aço, englobando as características dos materiais, a geometria das placas e os parâmetros energéticos dos processos de soldagem;
- Simulações numéricas de soldagem em PC e em aço, visando comparar o comportamento das tensões residuais resultantes da soldagem de cada um dos materiais;
- Realização de testes experimentais de soldagem de topo em que placas de PC e obtenção de imagens fotoelásticas destas placas;

As atividades acima mencionadas são descritas a seguir.

### 3.1. Análise dimensional

Encontrou-se um termo adimensional termo-elasto-plástico,  $a_{tep}$ , que permite a consideração simultânea das características do material empregado na soldagem, da geometria das placas e dos parâmetros energéticos dos processos de soldagem:

$$a_{tep} = \frac{\alpha E (Q/v)}{f_y 2 C_p \rho b t_h} \quad (1)$$

onde

- $\alpha$  : expansão térmica;
- $E$  : módulo de elasticidade;
- $f_y$  : tensão de escoamento;
- $Q$  : calor efetivo;
- $v$  : velocidade de soldagem;
- $C_p$  : calor específico;
- $\rho$  : densidade;
- $b$  : semi-largura da placa soldada;
- $t_h$  : espessura da placa soldada.

Mantidas constantes as demais variáveis, o adimensional  $a_{tep}$  é diretamente proporcional à relação entre o calor efetivo (potência térmica transferida à placa) e a velocidade de soldagem.

### 3.2. Simulações numéricas de soldagem em aço e em PC

Foram conduzidas simulações numéricas de soldagem em placas de PC e de aço, variando a velocidade de soldagem  $v$  e o calor efetivo  $Q$ . Estas simulações também foram subdivididas conforme a condição de soldagem empregada: *simples passe de calor* ou *soldagem de topo*. Incluiu-se, no estudo, a condição *simples passe de calor* porque, no caso da soldagem por ar quente, a soldagem de topo mostrou-se não ser possível na prática para muitas das combinações de parâmetros desejadas. Nestes casos, tornar-se-ia difícil a comprovação experimental de vários dos resultados obtidos.

As simulações de soldagem foram conduzidas utilizando um programa numérico baseado na Técnica de Diferenças Finitas TDF (Vieira Jr. et al., 2001). Neste programa, adota-se uma malha de pontos sobre a metade da placa, aproveitando a simetria da mesma. Adota-se também uma sequência de tempos de análise relativamente pequenos. Para cada um destes tempos determina-se a distribuição da temperatura ao longo da placa e as correspondentes tensões de origem térmica. No caso de haver escoamento em algum ponto, passa-se a uma rotina em que as deformações plásticas são determinadas em um processo iterativo. No final do resfriamento, chega-se aos valores finais da função de tensão de Airy em cada ponto da malha e, a partir destes valores, às tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ .

A Figura 2 mostra a convenção adotada para as dimensões das placas admitidas nas simulações.

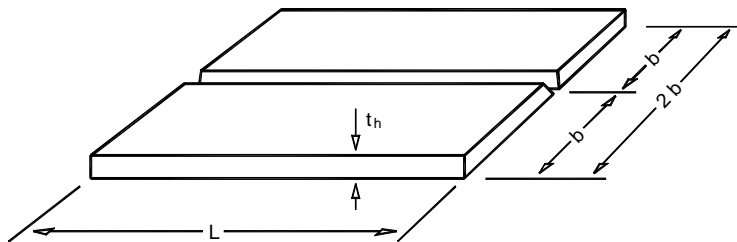


Figura 2. Convenção das dimensões das placas utilizadas nas simulações numéricas de soldagem

Na Tabela 1 podem ser vistos as características dos materiais e os parâmetros adotados nas simulações numéricas de soldagem.

Tabela 1. Características dos materiais e parâmetros utilizados nas simulações numéricas de soldagem

Parâmetro	Simb.	Unidade	Material	
			PC	Aço
Condutividade térmica	k	J / (s mm °C)	$0,2 \times 10^{-3}$	$50 \times 10^{-3}$
Densidade	$\rho$	Kg / mm <sup>3</sup>	$1,2 \times 10^{-6}$	$7,85 \times 10^{-6}$
Calor específico	$C_p$	J / (Kg °C)	1256	420
Expansão térmica	$\alpha$	1 / °C	$70 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
Módulo de elasticidade	E	N / mm <sup>2</sup>	$2,4 \times 10^3$	$205 \times 10^3$
Coefficiente de Poisson	$\nu$		0,37	0,28
Tensão de escoamento	$f_y$	N / mm <sup>2</sup>	70	246
Temperatura de fusão	$T_f$	°C	150	1500
Comprimento da placa	L	mm	300	300
Semi-largura da placa	b	mm	100	100
Espessura da placa	$t_h$	mm	4,0	3,175

A partir dos valores de  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ , calculou-se a tensão equivalente  $\sigma_e$  em cada ponto da malha adotada sobre as placas. Empregou-se a tensão equivalente porque permite a consideração de todas as componentes de tensão (em alguns pontos da placa, não apenas  $\sigma_x$  assume valores significativos). No caso do estado plano de tensões,  $\sigma_e$  é dada por:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

A partir dos valores de  $\sigma_e$ , calculou-se o valor médio de  $\sigma_e$  ao longo da placa,  $\bar{\sigma}_e$ , para cada simulação de soldagem. Estes valores foram divididos pela tensão de escoamento de cada material,  $f_y$ , fornecendo a tensão equivalente adimensionalizada média ( $\bar{\sigma}_e / f_y$ ).

### 3.3. Testes experimentais

Nos testes experimentais utilizou-se o processo de soldagem por ar quente de placas de PC com uso do bocal de soldagem rápida. Foi utilizado também um dispositivo que permite uma certa mecanização do processo de soldagem. O aparelho de ar quente permanece fixo, enquanto a placa é movimentada na velocidade ajustada. Permite-se a variação do ângulo do aparelho em relação à placa, bem como a pressão exercida sobre a vareta do material de adição. Previamente, fez-se um ajuste entre os valores de controle de temperatura do aparelho de ar quente e as temperaturas efetivamente conseguidas na saída do bocal. Esta medição de temperaturas foi feita com o uso de termopares. Nos testes experimentais, o aparelho de ar quente foi ajustado para que a temperatura do ar fosse de, aproximadamente, 350 °C. Adotou-se também o ângulo de 45° para a inclinação do aparelho em relação à placa.

Foram adotadas as velocidades de soldagem de 2,5, 7,5 e 12,5 mm/s. Tem-se buscado determinar experimentalmente o calor efetivo Q para vários ajustes de potência do aparelho de ar quente e para o bocal utilizado na soldagem por ar quente. Esta determinação (em andamento) é feita utilizando técnicas de resolução de problemas inversos em condução de calor.

### 3.4. Análise fotoelástica

As placas soldadas de PC foram analisadas no polariscópio, permitindo a obtenção de imagens em que pode-se ver a distribuição das isocromáticas sobre as placas. Como estas imagens

representam pontos com mesma diferença entre as tensões principais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), as tensões principais (e a diferença entre elas) também foram calculadas para os valores obtidos nas simulações numéricas de soldagem. Com isto pode-se comparar as isocromáticas obtidas experimentalmente e a partir das simulações numéricas. A diferença entre as tensões principais é dada por:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = 2 \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

Nas Tabelas 2 e 3 podem ser vistos os valores obtidos para o termo adimensional termo-elasto-plástico  $a_{tep}$  nos casos das soldagens em policarbonato (PC) e em aço.

Tabela 2. Adimensionais termo-elasto-plásticos ( $a_{tep}$ ) correspondentes às simulações numéricas de soldagem em policarbonato (PC), com variação do calor efetivo Q e da velocidade de soldagem v

		Q (Calor efetivo) ( J / s )				
		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
Velocidade de soldagem v ( mm / s )	2,5	0,0040	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199
	5,0	0,0020	0,0040	0,0060	0,0080	0,0100
	7,5	0,0013	0,0027	0,0040	0,0053	0,0066
	10,0	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0050
	12,5	0,0008	0,0016	0,0024	0,0032	0,0040

Tabela 3. Adimensionais termo-elasto-plásticos ( $a_{tep}$ ) correspondentes às simulações numéricas de soldagem em aço, com variação da potência térmica efetivamente transferida à placa e da velocidade de soldagem

		Q (Calor efetivo) ( J / s )				
		150,0	300,0	450,0	600,0	750,0
Velocidade de soldagem v ( mm / s )	2,5	0,2936	0,5872	0,8807	1,1743	1,4679
	5,0	0,1468	0,2936	0,4404	0,5872	0,7339
	7,5	0,0979	0,1957	0,2936	0,3914	0,4893
	10,0	0,0734	0,1468	0,2202	0,2936	0,3670
	12,5	0,0587	0,1174	0,1761	0,2349	0,2936

Na Figura 3 apresenta-se os resultados da tensão equivalente adimensionalizada média  $\bar{\sigma}_e / f_y$ , em função do adimensional termo-elasto-plástico  $a_{tep}$ , para cada material (PC e aço) e cada condição usada nas simulações numéricas de soldagem (simplex passe de calor sobre placa e soldagem de topo). Inicialmente, pode-se notar que as duas condições de soldagem produzem resultados aproximadamente semelhantes. Uma das poucas diferenças é que, no caso da soldagem de topo de aço, a tensão média  $\bar{\sigma}_e / f_y$  passa a crescer ligeiramente menos com o adimensional  $a_{tep}$  (para maiores valores deste adimensional), quando se compara com a condição de simplex passagem de calor. Isto não condiz perfeitamente com a realidade no caso da soldagem de PC. Nas simulações numéricas, admite-se fluxo de calor bidimensional (constante com a espessura), o que pode ser uma aproximação grosseira no caso do PC, que possui baixa condutividade térmica.

Pode-se verificar que os resultados obtidos para a soldagem de aço apresentam o comportamento esperado, isto é,  $\bar{\sigma}_e / f_y$  cresce com o adimensional  $a_{tep}$  (proporcional à maior

relação entre o calor efetivo e a velocidade de soldagem). Isto não ocorre no caso das soldagens de PC, para as quais  $\bar{\sigma}_e / f_y$  passa a manter-se aproximadamente constante para adimensionais  $a_{tep}$  acima de um determinado valor. Uma implicação disto é que, pretendendo-se usar fotoelasticidade no estudo da influência da energia de soldagem sobre tensões residuais, o valor do adimensional  $a_{tep}$  deve estar abaixo de um determinado limite. Até este limite,  $\bar{\sigma}_e / f_y$  cresce com  $a_{tep}$ , tal como ocorre no caso da soldagem de aço.

No entanto, pode ser difícil conseguir-se, na prática, realizar a soldagem de topo de PC com tais valores de  $a_{tep}$ , principalmente quando se trabalha com a soldagem rápida por ar quente (uso do bocal especial - Fig. 1 b). Neste tipo de soldagem, o calor fornecido deve ser suficiente para reduzir a resistência à flexão da vareta de material de adição. Neste trabalho, esta soldagem foi conseguida com  $a_{tep}$  da ordem de 0,004 ( $Q = 5 \text{ J/s}$ ;  $v = 2,5 \text{ mm/s}$ ), acima do limite de aproximadamente 0,003. Deve-se, neste caso, investigar a possibilidade de se conseguir a soldagem variando o ângulo do aparelho, a pressão exercida sobre o bocal, ou, então, utilizar a simples passagem de calor (usando-se placas mais finas, devido à baixa condutividade térmica do PC) ao invés da soldagem de topo. Um dos inconvenientes da utilização da simples passagem de calor, além da já mencionada discrepância em relação aos modelos teóricos e ao comportamento do aço, é que o estado de tensões conseguido com esta condição de soldagem pode produzir menos franjas e menos nitidez nas imagens fotoelásticas.

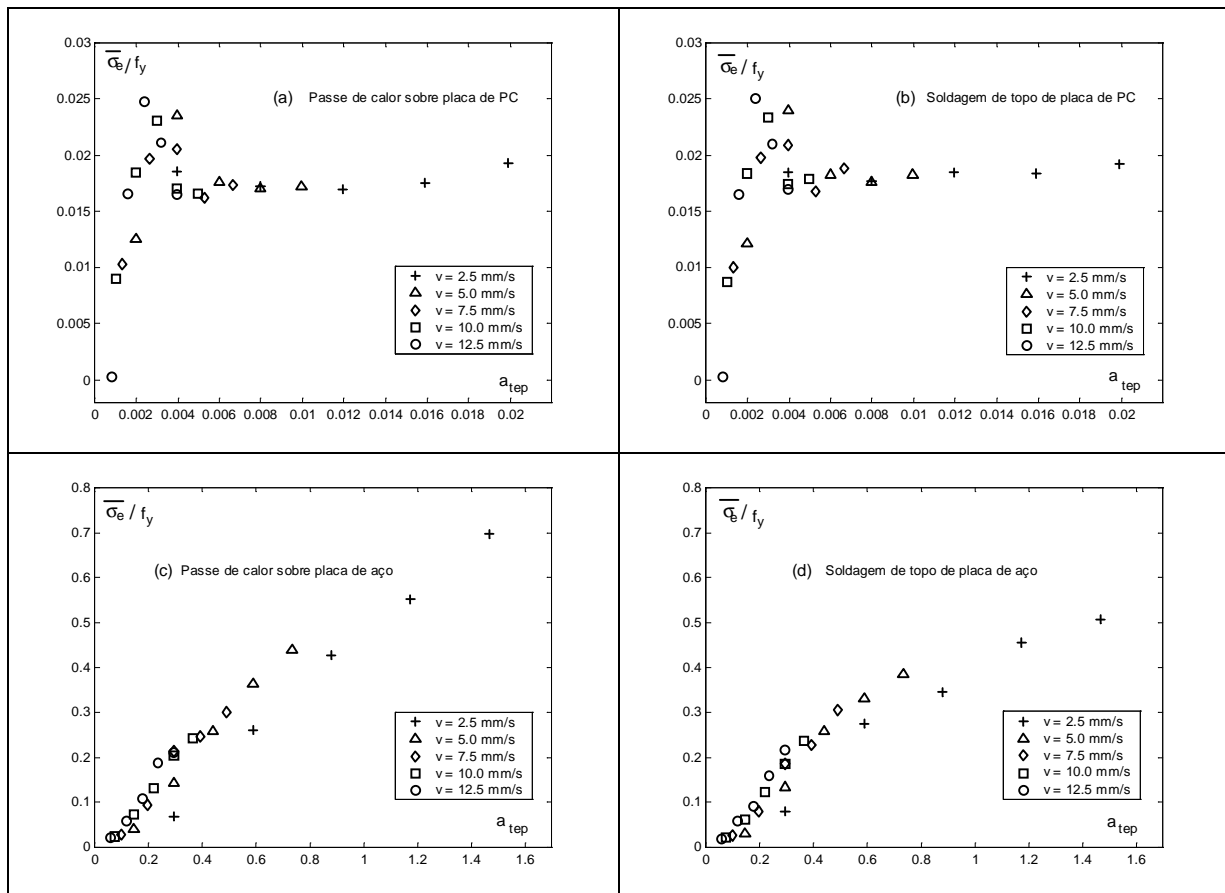


Figura 3. Valores da tensão equivalente adimensionalizada média ( $\bar{\sigma}_e / f_y$ ) em função do adimensional termo-elasto-plástico  $a_{tep}$ , para cada material (policarbonato e aço) e cada condição de soldagem (simples passe de calor sobre placa e soldagem de topo) utilizada nas simulações numéricas.

Na Figura 4 podem ser vistos, para comparação, aspectos de curvas de mesma diferença entre tensões principais (isocromáticas, em fotoelasticidade) relativas a soldagens de topo de placas de aço e de policarbonato (PC). No caso da soldagem de aço (Fig. 4.a), os resultados referem-se a simulação numérica, enquanto que, para a placa de policarbonato (soldagem por ar quente, Fig. 4.b), apresenta-se um padrão de franjas obtido experimentalmente, com fotoelasticidade, tal como pode ser encontrado em Lai et al. (1991). Pode-se ver que as figuras apresentam aspectos semelhantes, indicando que, ao menos, qualitativamente, a soldagem de policarbonato e a fotoelasticidade podem ser empregadas no estudo das tensões residuais decorrentes da soldagem de materiais metálicos.

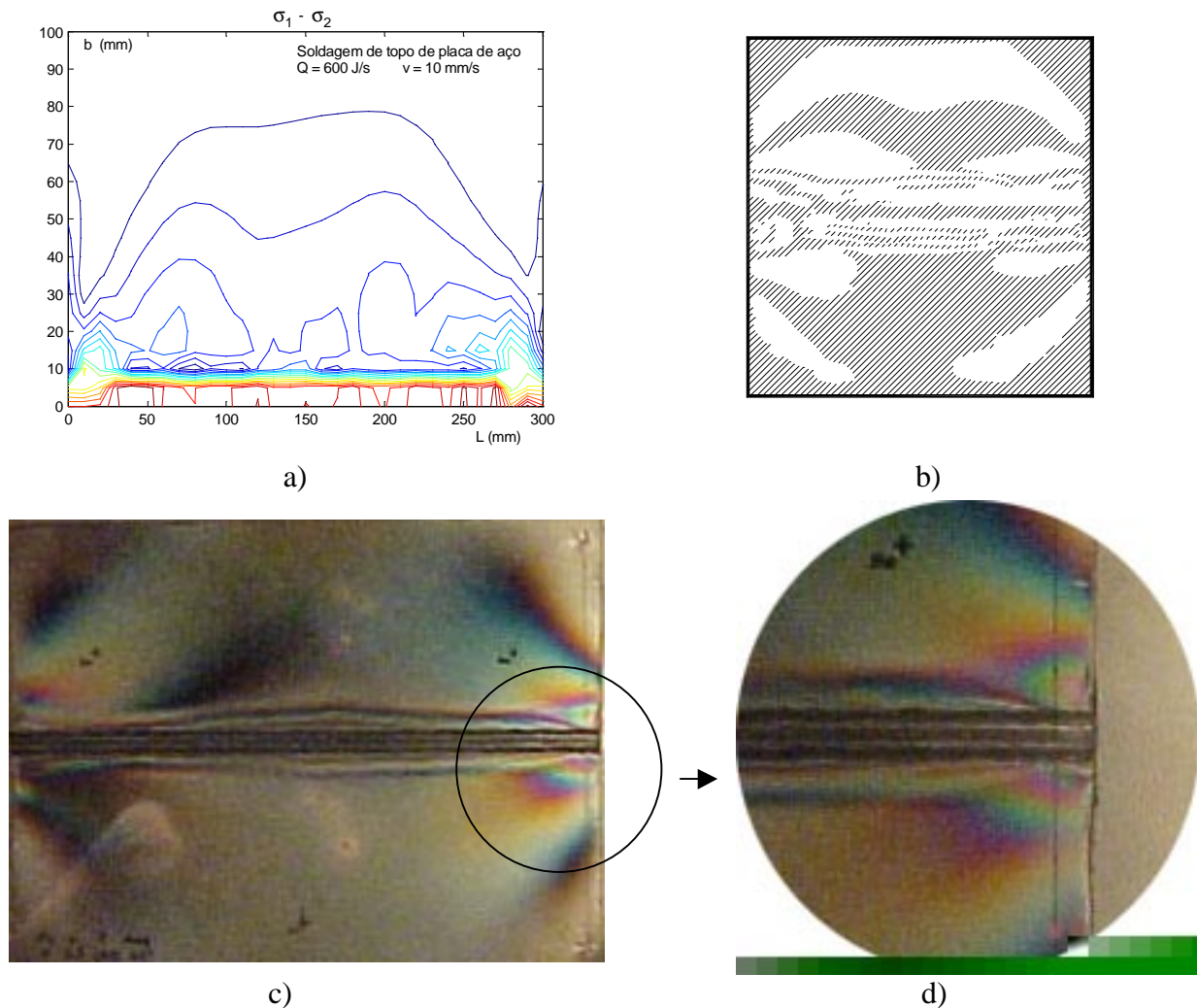


Figura 4. Gráficos e imagens das curvas de mesma diferença entre tensões principais (isocromáticas): a) Obtido através de simulação numérica de soldagem de topo de placa de aço ( o gráfico refere-se à metade da placa, ou seja, um dos lados do cordão de solda); b) Padrão de franjas típico de uma soldagem de topo de placa de PC (Lai et al., 1991) ; c) e d) Imagens fotoelásticas relativas à soldagem de topo de PC de placa com 150 x 200 x 4 mm.

Na Figura 4.c mostra-se uma imagem de fotoelasticidade relativa à soldagem de topo compondo uma placa de PC de 150 x 200 x 4 mm. Empregou-se calor efetivo Q de aproximadamente 5 J/s e velocidade de soldagem de 2,5 mm/s. Pode-se notar, no detalhe à direita (Fig. 4.d), que o padrão de distribuição das franjas isocromáticas no final do cordão de solda é bastante coerente com aquele obtido com simulação numérica (Fig. 4 a). Isto indica a adequação (mais uma vez, ao menos, qualitativa) das simulações numéricas no estudo das tensões residuais



quando se quer estudar um maior número de casos ou quando a análise experimental da placa toda é difícil (caso da soldagem de materiais metálicos, onde a fotoelasticidade de transmissão não é possível).

## 5. CONCLUSÃO

Os estudos conduzidos através de simulações numéricas para verificação da possibilidade de se usar soldagem de plásticos e fotoelasticidade na simulação da soldagem de materiais metálicos indicam que esta técnica de modelamento apresenta-se mais válida qualitativamente (no sentido de mostrar a distribuição das tensões residuais em estruturas mais complexas) que quantitativamente. Desejando-se esta análise quantitativa, deve-se trabalhar com pequenos valores para o adimensional termo-elasto-plástico  $a_{tep}$ , no caso da soldagem de PC, o que equivale a menores relações entre o calor efetivo e a velocidade de soldagem. A soldagem de topo, no entanto, pode ser difícil, na prática, nestas condições. Os resultados obtidos através de simulações numéricas deverão ser comparados, futuramente, com mais resultados experimentais, no caso da soldagem de PC pelo processo de ar quente ("hot air" ou "hot gas welding").

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CNPq (Programa PADCT III - Processo 620094/97-4 CEMAT e Programa de bolsa de doutorado), pelo suporte financeiro a este trabalho, e aos laboratórios de Sistemas Mecânicos e de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia pelo uso dos equipamentos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWS, 1991, Welding Handbook, 8<sup>th</sup> ed., American welding Society, USA, Vol. 3, 526 p.
- Dally, J.W. e Riley, W.F., 1978, Experimental Stress Analysis, McGraw Hill, Japan, 570 p.
- Gumbleton, H., 1989, "Hot Gas Welding of Thermoplastics - An Introduction", Joining and Materials, UK, pp. 215-218.
- Lai, Z-M., Zhang, H-Q. e Tang, X-C., 1991, "Photoelastic Simulation Analysis on Residual Stress of Weldment", Third International Conference on Residual Stresses (ICRS III), Tokushima, Japan, pp. 352-358.
- Nielsen, L.E. e Landel, R.F., 1994, Mechanical Properties of Polymers and Composites, Marcel Dekker, USA, 557 p.
- Oddy, A.S., McDill, J.M.J., Braid, J.E.M., Root, J.H. e Marsiglio, F., 1998,a, "Measurement and Variability of Residual Stresses in Weaved Repair Welds", Trends in Welding Research, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference, AWS, USA, pp. 925-930.
- Papazoglou, V.J. e Masubuchi, K. (1982), "Numerical Analysis of Thermal Stresses During Welding Including Phase Transformation Effects", Transactions of the ASME, USA, Vol. 104, Agosto/1982, pp.198-203.
- Parlane, A.J.A., Allen, J.S., Harrison, J.D., Leggatt, R.H., Dwight, J.B., Bailey, N., Procter, E. and Saunders, G.G., 1981, "Residual Stresses and their Effect", The Welding Institute, UK, 55p.
- Sekhar, N.C., Roberts, S.M., Robinson, J.M. e Reed, R.C., 1998, "Characterization of Distortion During the Laser Welding of Waspaloy: Modeling and In-Situ Process Monitoring", Trends in Welding Research, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference, AWS, USA, pp. 976-981.
- Vieira Jr., A.B., Rade, D.A. e Ribeiro, C.R., (2001), "Previsão Numérica de Tensões Residuais em c Placas Soldadas", XVI COBEM (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica), Uberlândia, MG, 11p.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho

# INITIAL EVALUATION OF PHOTOELASTICITY AND WELDING OF PLASTICS APPLICATIONS ON THE STUDY OF RESIDUAL STRESS IN WELDED PLATES

## **Alberto B. Vieira Jr.**

Federal University of Uberlândia - School of Mechanical Engineering - Campus Santa Mônica ,  
38400-902 – Uberlândia, MG – abvieira@mecanica.ufu.br

## **Américo Scotti**

Federal University of Uberlândia - School of Mechanical Engineering - Campus Santa Mônica ,  
38400-902 – Uberlândia, MG – abvieira@mecanica.ufu.br

## **Domingos A. Rade**

Federal University of Uberlândia - School of Mechanical Engineering - Campus Santa Mônica ,  
38400-902 – Uberlândia, MG – abvieira@mecanica.ufu.br

***Abstract.** In this work it is presented an evaluation of an unusual approach to study residual stresses in metallic welded plates. This approach is based on welding of plastics, photoelastic analysis of the welded plates and dimensional models to assess welding-related residual stresses at different materials of plates. Through numerical simulations, the residual stress behavior was investigated for both polycarbonate (PC) and steel plates. The photoelastic image obtained from the welding of the plastic is quite coherent with the predicted welding residual stress distribution. However, results from the numerical welding simulation indicate limitations to the use of the dimensional models for assessing residual stress quantitatively, concerning metallic plates.*

***Keywords.** residual stresses, photoelasticity, welding, modeling, plastics welding.*