



ANÁLISE DE TENSÕES TÉRMICAS EM CHAPA DE POLICARBONATO SUBMETIDA A GRADIENTE DE TEMPERATURA

Marco Antônio Dutra Quinan

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: quinanm@urano.cdtm.br

Miguel Mattar Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas (IPEN/CNEN), São Paulo, SP, e-mail: mattar@net.ipen.br

Paulo de Tarso Vida Gomes

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gomespt@urano.cdtm.br

Julio Ricardo Barreto Cruz

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: jrbc@urano.cdtm.br

José Lúcio Terra

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: terrajl@urano.cdtm.br

***Resumo.** Utilizou-se, neste trabalho, a fotoelasticidade de transmissão para obter uma solução experimental das tensões resultantes do transiente térmico em uma chapa de policarbonato contendo um furo. O transiente térmico foi gerado por uma fonte de calor com temperatura constante em contato com uma das superfícies livres da chapa. Os campos de tensões ($S_1 - S_2$) resultantes foram monitorados através de uma câmara CCD interligada a um microcomputador. Foram realizadas, ainda, simulações através do método de elementos finitos para todas as situações estudadas, utilizando o software ANSYS[®]. Os resultados experimentais foram comparados com as soluções obtidas através dos cálculos numéricos.*

***Palavras-chave:** fotoelasticidade, análise por elementos finitos, análise de tensões, tensões térmicas*

1. INTRODUÇÃO

Nos mais variados campos de aplicação da engenharia, tais como os sistemas nucleares, aeronáuticos, petroquímicos, etc., muitos componentes mecânicos estão sujeitos a ambientes de altas temperaturas ou com bruscas variações de temperaturas. Como exemplo podemos citar tubulações de vapor, reatores nucleares, pressurizadores, trocadores de calor, componentes de aeronaves, etc. Em função da presença de concentradores de tensões, inclusive de defeitos, a análise de tensões térmicas pode ser complexa e demorada.

Existem, atualmente, muitos métodos analíticos e numéricos para analisar os campos de tensões provocados por gradientes térmicos em diferentes tipos de componentes. Entretanto, os métodos experimentais podem ser uma boa alternativa para se realizar estas análises servindo, muitas vezes, para calibrar ou mesmo validar os métodos numéricos.

Os materiais utilizados nos experimentos fotoelásticos possuem leis constitutivas e propriedades diferentes daqueles materiais utilizados na construção da maioria dos componentes mecânicos. Entretanto, através da utilização de condições de similaridade, pode-se estabelecer correlações adequadas entre os resultados dos experimentos fotoelásticos e o comportamento do componente a ser estudado (Monch, E., 1964; Mueller, R.K., 1978; Burger, P.C., 1972).

Nos últimos anos, têm surgido aplicações dos chamados métodos híbridos de análise de tensões, que combinam os métodos experimentais com os métodos numéricos (Lin and Rowlands, 1999; Hamdi and Rowlands, 1992; Gao and Rowlands, 2000). Outros autores (Ramesh and Pathak, 1999; Moon and Tyne, 2000), utilizam técnicas experimentais, como a fotoelasticidade, para validar e/ou calibrar modelamentos feitos por elementos finitos.

Neste trabalho, é utilizada a fotoelasticidade de transmissão para determinar as tensões de origem térmica em uma chapa de policarbonato com descontinuidade, quando submetida a um transiente térmico. A concepção dos experimentos foi baseada nos trabalhos de Chen and Wang (1992), Swinson and Davis (1968), Kobayashi et al (1966), Burguer (1969 e 1976) e Lin et al (1990). A principal finalidade deste experimento, que na realidade é de execução bastante simples, é a de servir de base para o desenvolvimento de uma metodologia para a análise experimental de transientes térmicos em vasos de pressão de reatores nucleares e compará-la com as soluções numéricas. Nestes casos, os carregamentos térmicos e a geometria envolvida seriam bem mais complexos e associados a outros carregamentos mecânicos.

Os resultados obtidos são comparados com soluções numéricas obtidas através do método de elementos finitos. Visou-se com isso avaliar a aplicabilidade dos métodos experimental e numérico a situações como a analisada no trabalho. Mais ainda, consolidar as metodologias de avaliação experimental (definição do material, fabricação do corpo-de-prova, montagem do sistema de avaliação, aplicação dos carregamentos térmicos, etc.) e de simulação numérica (discretização da estrutura e temporal, modelagem do material, pós-processamento, etc.).

2. EXPERIMENTOS

2.1. Corpo-de-prova

Para a realização deste estudo, foi construído um corpo-de-prova de material fotoelástico comercial (chapa de policarbonato PSM-1), cujas propriedades térmicas e mecânicas foram determinadas por Miskioglu et al (1981). A Figura (1) apresenta as dimensões deste corpo-de-prova.

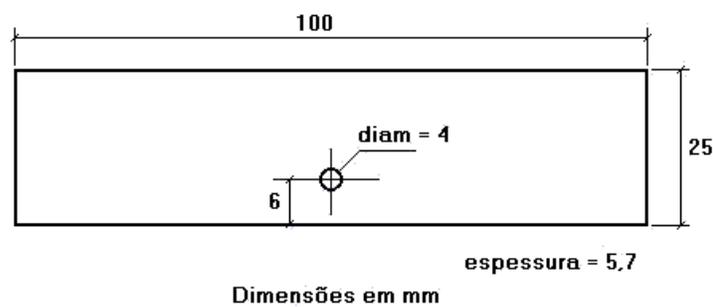


Figura 1. Dimensões do corpo-de-prova

Para se evitar o aparecimento de tensões residuais, tanto o corte quanto a furação do material foram realizados com a utilização de ferramentas de corte específicas, alta velocidade de corte e avanço lento, de acordo com as recomendações do fabricante (Photolastic Inc, 1974).

2.2. Montagem Experimental

O aparato experimental utilizado constou de um polariscópio de transmissão, cujas imagens foram captadas por uma câmara CCD e processadas em um microcomputador. A fonte de calor utilizada foi uma chapa aquecedora controlada por um sistema de controle de potência. A temperatura foi monitorada através de extensômetro elétrico específico para medidas de temperatura, ligado a um multímetro digital. Um desenho esquemático deste sistema pode ser visto na Fig. (2), sendo que a Fig. (3) mostra uma fotografia do sistema durante a realização de um ensaio.

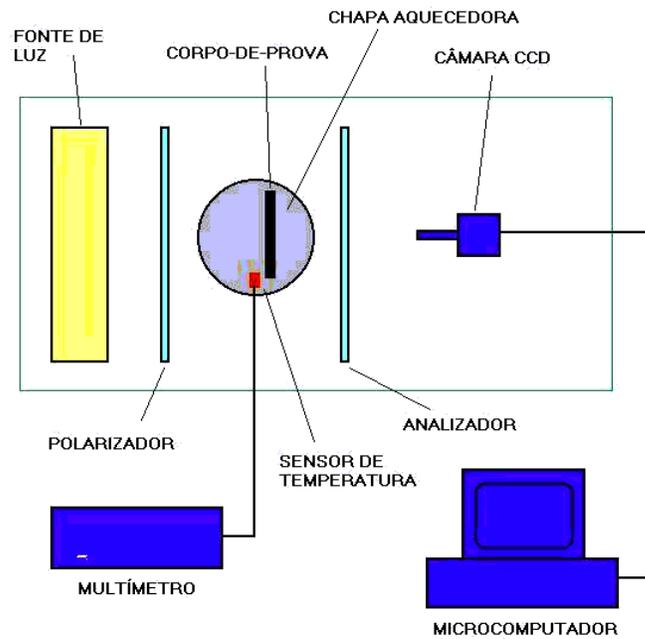


Figura 2. Diagrama esquemático da montagem utilizada para a realização do experimento



Figura 3. Montagem experimental utilizada para realizar as medidas fotoelásticas

2.3. Procedimento Experimental

Para a realização do experimento, o corpo-de-prova, à temperatura de 23°C, foi colocado, com o lado mais próximo ao furo para baixo, na chapa, mantida a 63°C, durante todo o experimento. Os campos de tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$) resultantes foram monitorados através da câmara CCD em intervalos de aproximadamente 4 segundos, durante cerca de 100 segundos.

3. ANÁLISE NUMÉRICA

Através do software de análise por elementos finitos ANSYS®, foi realizada a análise numérica correspondente ao experimento. Nesta análise, foram consideradas as seguintes propriedades do policarbonato PSM-1 em função da temperatura: módulo de Young, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão térmica, calor específico e condutividade térmica. Estas propriedades, como relatado anteriormente, foram obtidas através dos resultados apresentados por Miskioglu et al (1981).

Primeiramente, foi realizada uma análise térmica de transiente, considerando que no instante $t = 0$ todo o corpo-de-prova estava a 23°C e a partir deste instante impôs-se, bruscamente, à base do corpo-de-prova a temperatura de 65°C. Em seguida, foi realizada a análise de tensões decorrentes das distribuições de temperatura obtidas nos primeiros 100 s. Nesta análise foram obtidas as diferenças entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) para cada instante de tempo, de maneira que pudessem ser comparadas aos resultados obtidos experimentalmente.

A Figura (4) apresenta a malha gerada pelo software ANSYS®. Para a análise térmica foi utilizado o elemento PLANE 55 e para a análise estrutural, o elemento PLANE 42. Ambas as análises foram do tipo não linear, uma vez que foram levadas em conta as propriedades do material (policarbonato PSM-1) como função da temperatura.

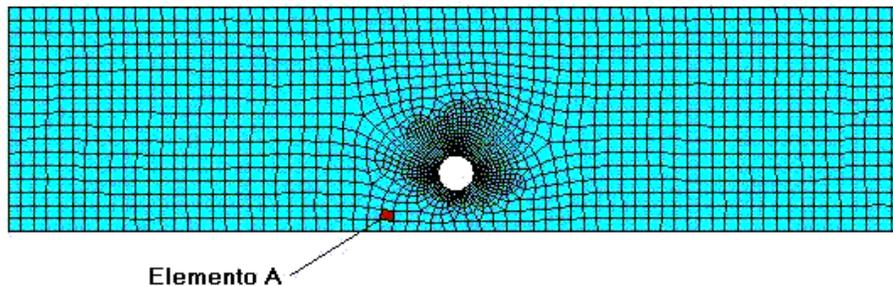


Figura 4. Malha gerada pelo programa de elementos finitos

4. RESULTADOS

4.1. Resultados Experimentais

As isocromáticas obtidas, que representam $\sigma_1 - \sigma_2$, para diversos tempos a partir do tempo $t = 0$ são apresentadas na Fig. (5). Os números 0, 1 e 2 que aparecem nas figuras se referem ao nº de franja observado.

Na Figura (6) são mostrados detalhes do campo de tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$) perto do furo, para cada um dos instantes considerados anteriormente. Da mesma maneira que na figura anterior, os números 0, 1, 2 e 3 que aparecem nas figuras se referem ao nº de franja observado. Para o material utilizado, cada franja inteira corresponde a $1,23 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

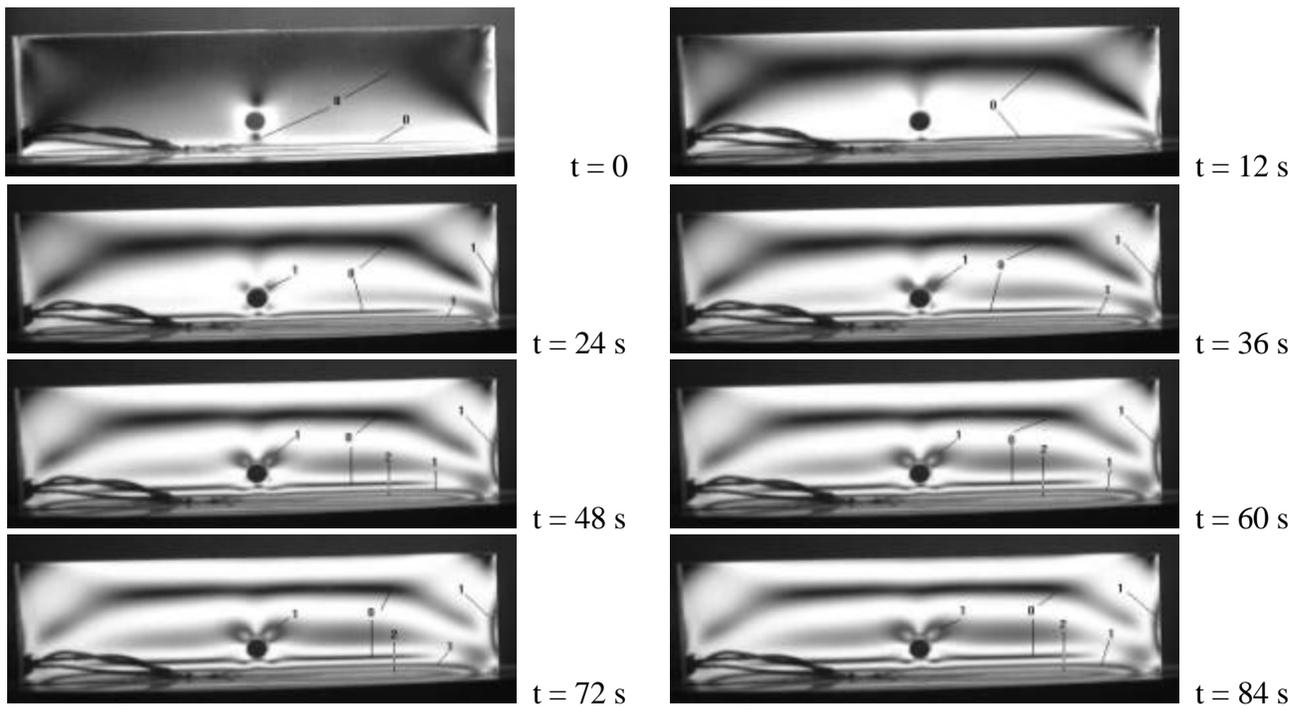


Figura 5. Padrão de franjas fotoelásticas para diversos instantes de tempo a partir de $t = 0$

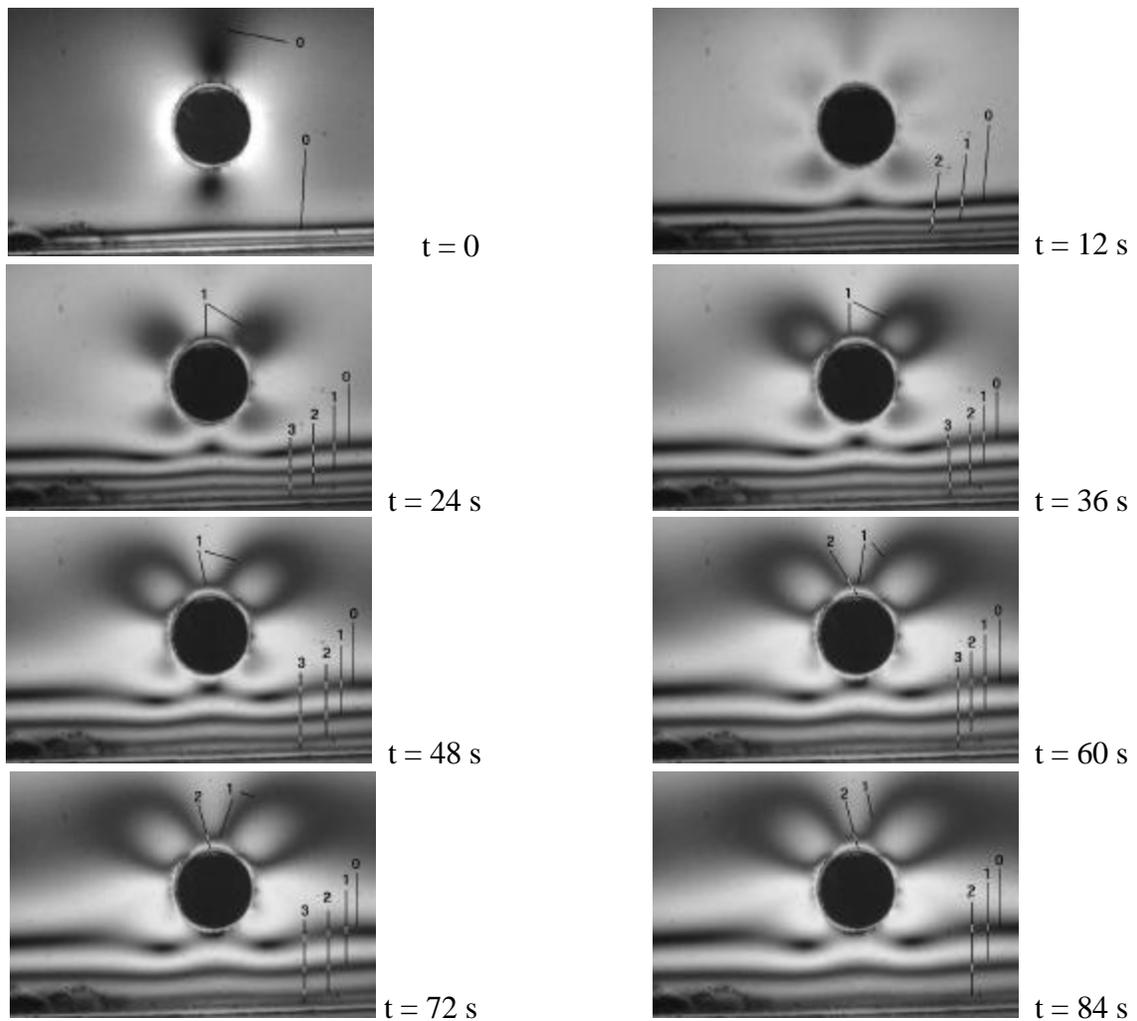
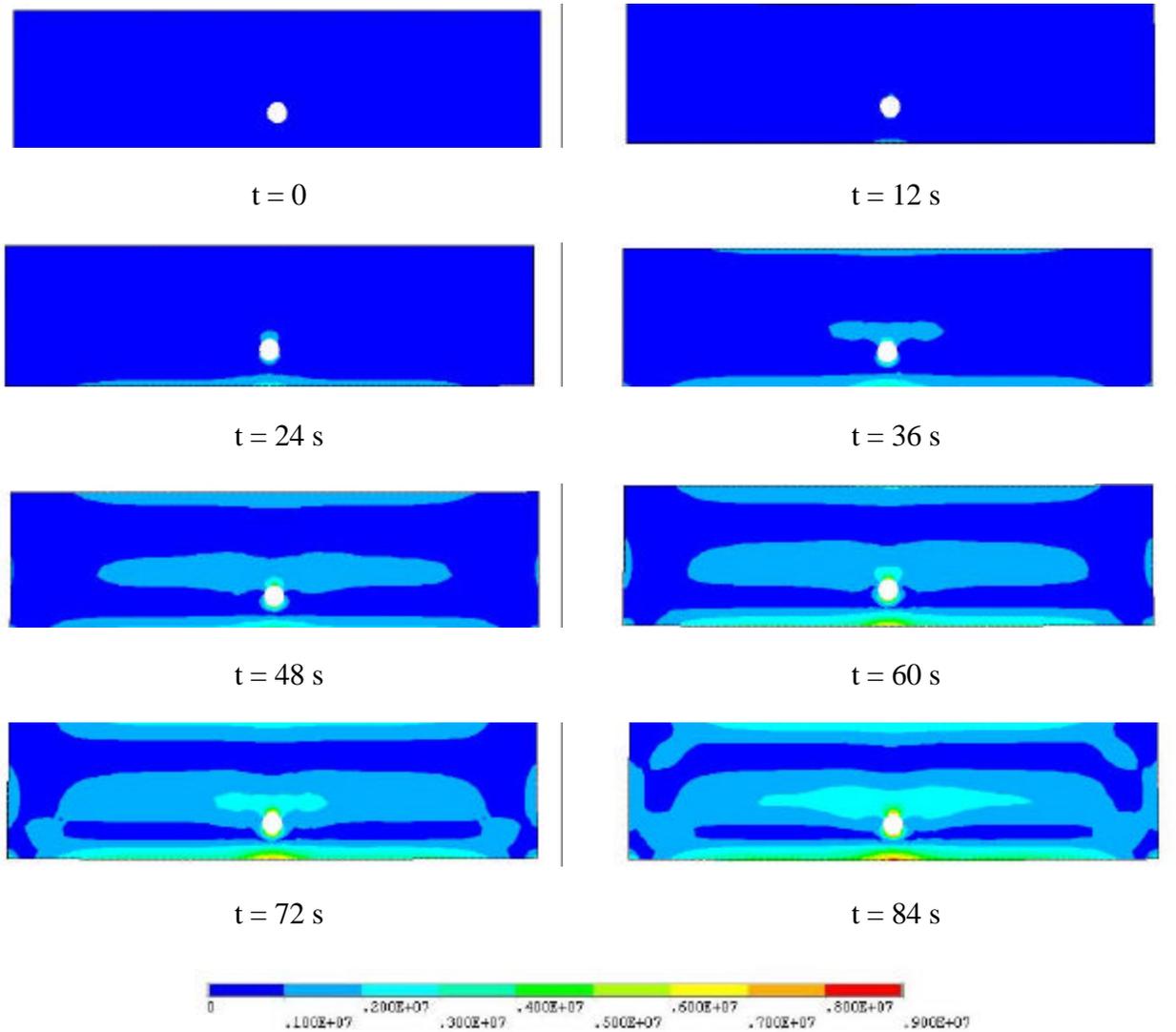


Figura 6. Detalhe do padrão de franjas fotoelástico para diversos instantes de tempo a partir de $t = 0$

4.2. Resultados numéricos

Os resultados obtidos a partir da simulação numérica são apresentados da mesma forma que os resultados experimentais. Desta forma, a Fig. (7) mostra os campos de tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$) para cada instante de tempo a partir de $t = 0$ e a Fig. (8) o detalhe deste campo de tensões na vizinhança do furo. As figuras mostram, também, uma legenda com os valores de tensões para cada cor, sendo que a unidade destes valores é N/m^2 .



Legenda

Figura 7. Campos de tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$), obtidos numericamente, para cada instante de tempo a partir de $t = 0$

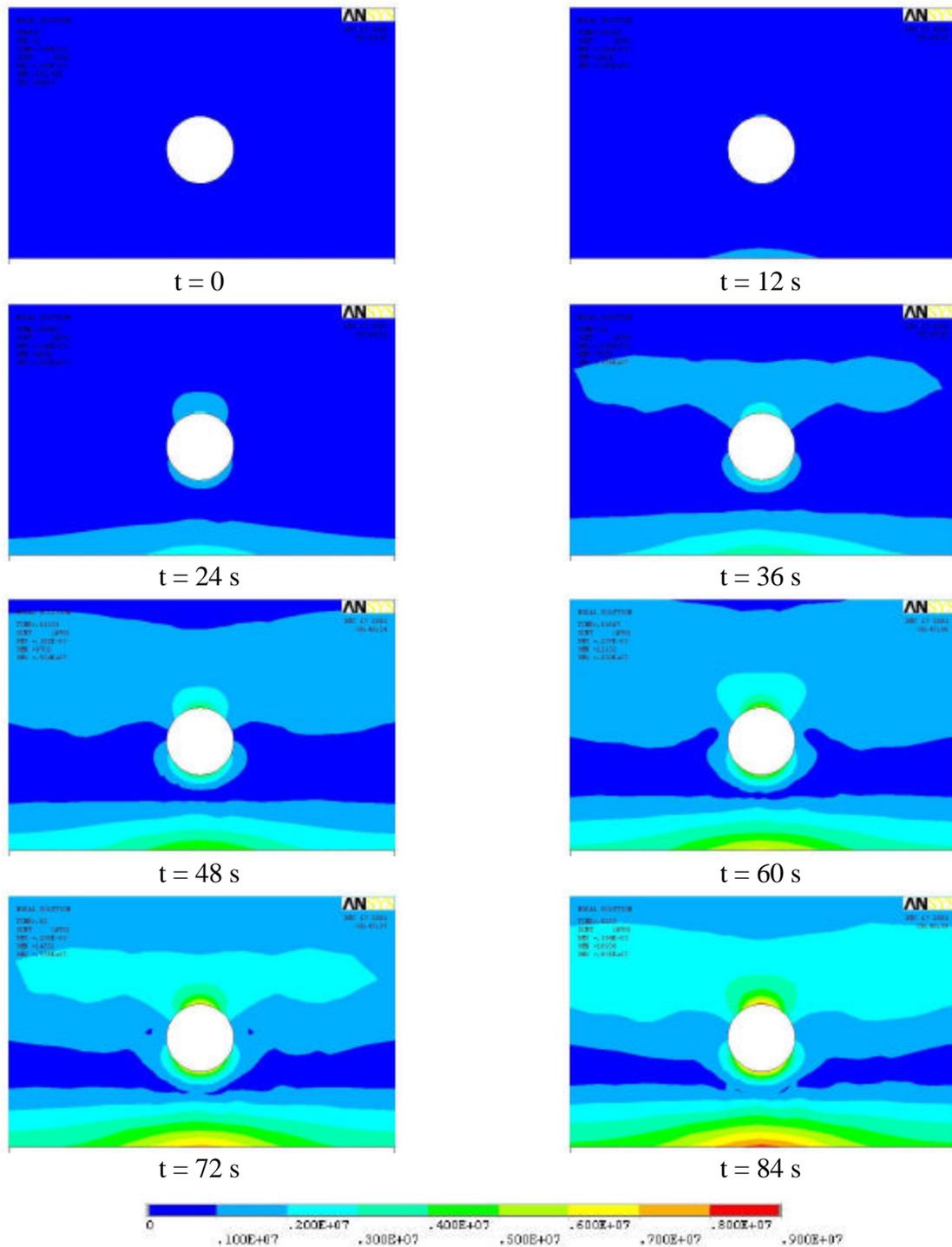


Figura 8. Detalhe dos campos de tensões ($\sigma_1 - \sigma_2$), obtidos numericamente, para cada instante de tempo a partir de $t = 0$

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Comparando-se visualmente os resultados apresentados pelo procedimento experimental e pela simulação numérica pode-se notar que estes resultados estão bastante coerentes entre si. A título de exemplo, foi selecionado o elemento A, Fig. (4), e para este elemento foi obtido o valor de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ em cada instante de tempo utilizando-se tanto os resultados experimentais quanto os da análise

numérica. Os resultados obtidos são mostrados no gráfico da Fig. (9). Pode-se notar que os resultados obtidos pela fotoelasticidade estão com valores ligeiramente abaixo dos obtidos pela análise numérica. Esta diferença pode ser atribuída à uma dificuldade de medição experimental em função de, neste caso, não se conseguir obter frações de franjas. O erro estimado pelo software ANSYS® para o tempo de 84 segundos é de cerca de 10%.

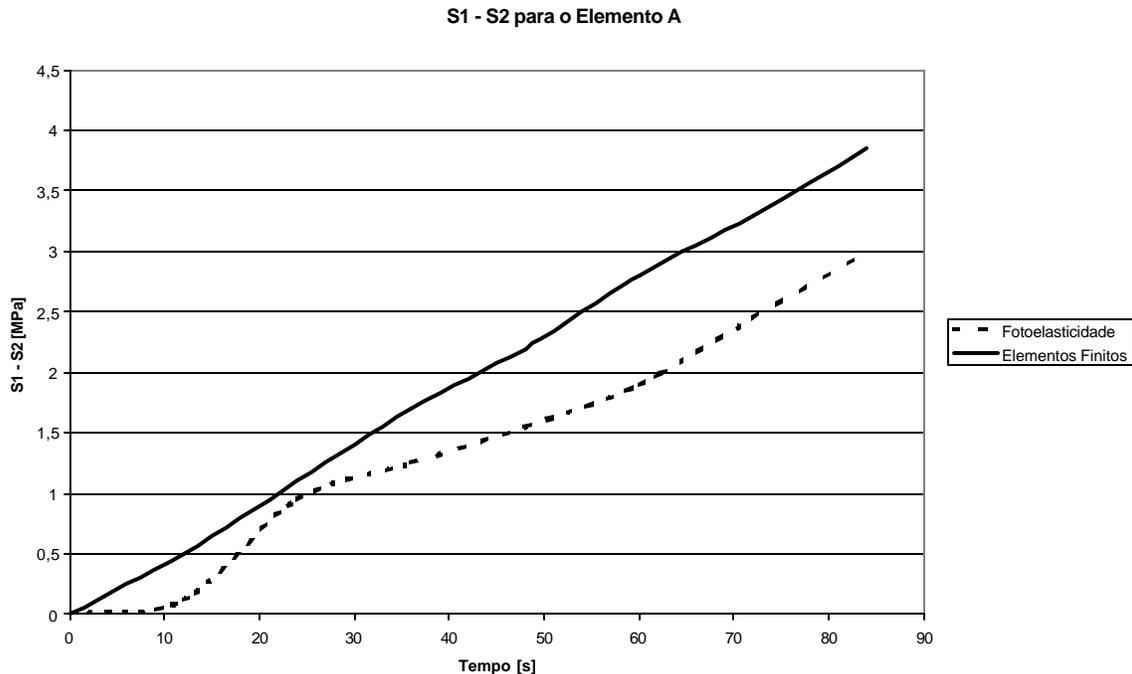


Figura 9. Gráfico de $(\sigma_1 - \sigma_2)$, para o elemento A, versus tempo, obtidos através de fotoelasticidade e do método de elementos finitos

Deve-se ressaltar, que, por uma característica própria dos experimentos fotoelásticos, a linha neutra (franja de ordem 0) sempre se destaca. Isto pode ser visto claramente em todas as figuras que mostram os padrões de franjas fotoelásticos. Para se obter o mesmo resultado com a simulação numérica, deveria ser feita uma maior discretização dos níveis de tensões.

Por outro lado, para os níveis mais altos de tensões, a simulação numérica apresenta uma facilidade maior de visualização, ressaltando, entretanto, que o equipamento utilizado permitiria a incorporação de um microscópio que melhoraria esta visualização.

Baseado na aderência entre os resultados, pode-se concluir que o método fotoelástico se aplica a solução de problemas de transientes térmicos de tensões. Casos com geometria e carregamentos mais complexos poderiam ser estudados, utilizando-se a mesma metodologia. Pode-se também utilizar os resultados experimentais para auxiliar em modelamentos numéricos e vice-versa.

6. REFERÊNCIAS

- Monch, E., 1964, "Similarity and Model Laws in Photoelastic Experiments", *Experimental Mechanics*, p. 141-150.
- Mueller, R.K., 1978, "Mathematical and Physical Models", *Experimental Mechanics*, vol. 18 p. 241-245.
- Burger, P. C., 1972, "Thermal modeling", *Experimental Mechanics*, November, p. 430-442, 1972.
- Lin, S.T. and Rowlands, R.E., 1999, "Hybrid stress analysis", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 32, pp. 257-298.

- Hamdi, A. M. and Rowlands, R.E., 1992, "Hybrid stress analysis of flexed isotropic and composite plates", *Comput. Struct.*, vol. 44(5), pp. 474-480.
- Gao, X.L. and Rowlands, R.E., 2000, "Hybrid method for stress analysis of finite three-dimensional elastic components", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, pp. 2727-2751.
- Ramesh, K. and Pathak, P.M., 1999, "Validation of finite element modeling through photoelastic fringe contours", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 15, pp. 229-238.
- Moon, Y.H. and Tyne, C.J., 2000, "Validation via FEM and plasticine modeling of upper bound criteria of a process-induced side-surface defect in forgings", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 99, pp. 185-196.
- Chen, T.L. and Wang, W.C., 1992, "Transient thermal stress analysis of interacting surface defects by digital photoelasticity", *Optical Engineering*, Vol. 31(1), pp. 144-155.
- Swinson, W.F. and Davis, J.B., 1968, "Experimental Investigation of Transient Thermal Stresses in a Solid Sphere", *Experimental Mechanics*, September 1968, pp. 424-428.
- Kobayashi, A.S., Barret, C.F., Emery, A.S., 1966, "Temperature distributions and thermal stresses in a partially filled annulus", *Experimental Mechanics*, December 1966, pp. 602-608.
- Burguer, C.P., 1969, "A generalized method for photoelastic studies of transient thermal stresses", *Experimental Mechanics*, December 1969, pp. 529-537.
- Burguer, C.P., 1976, "Photoelastic modeling of stresses caused by thermal shock", *Experimental Mechanics*, March 1976, pp. 95-99.
- Lin, S.H., Wang, W.C. and Chen, T.L., 1990, "Digital photoelastic investigation of transient thermal stresses of two interacting defects", *Journal of Strain Analysis*, vol. 25(4), pp. 215-228.
- Miskioglu, I., Gryzagorides, J. and Burguer, C.P., 1981, "Material properties in thermal-stress analysis", *Experimental Mechanics*, August 1981, pp. 295-301.
- Photolastic Inc, 1974, "Instructions for Machining Two-Dimensional Models from PSM-1", *Technical Bulletin*, pp. 1-2.

THERMAL STRESS ANALYSIS IN A POLYCARBONATE SHEET UNDER A TEMPERATURE GRADIENT

Marco Antônio Dutra Quinan

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: quinanm@urano.cdtb.br

Miguel Mattar Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas (IPEN/CNEN) São Paulo, SP, e-mail: mattar@net.ipen.br

Paulo de Tarso Vida Gomes

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gomespt@urano.cdtb.br

Julio Ricardo Barreto Cruz

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: jrbc@urano.cdtb.br

José Lúcio Terra

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: terrajl@urano.cdtb.br

***Abstract.** It was used, in this work, the transmission photoelasticity to obtain an experimental stress distribution due to a thermal transient in a polycarbonate sheet containing a hole. The thermal transient was generated by a heat source with constant temperature in contact with one of the free surfaces of the sheet. The resultant stress fields (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) were monitored through a CCD camera*

linked to a microcomputer. It was also performed finite elements simulations using the software ANSYS[®] for the studied situations. The experimental results were compared with the solutions obtained through the numerical calculations.

Keywords: *photoelasticity, finite elements analysis, stress analysis, thermal stress*