

ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS INDUZIDAS EM UM COMPONENTE MECÂNICO

Rosa I. T. Pinto, Eng^a Msc

Liane Roldo, Eng^a Msc

Telmo R. Strohaecker, Prof. Dr.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, PPGEM/LAMEF

Av. Osvaldo Aranha, 99/610 - Centro

CEP 90035-190 - Porto Alegre, RS

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo investigar o emprego de tensões residuais no projeto de componentes mecânicos visando melhorar o desempenho e prolongar a vida em fadiga. Para a realização do trabalho foram construídos corpos de prova semelhantes a um gancho em aço SAE 4340. Estes foram submetidos a ensaio de tração até plastificar uma camada no raio interno. Assim foi possível induzir tensões residuais na peça de forma controlada. A carga aplicada foi previamente calculada pelo método de elementos finitos. Na análise numérica foi construído um modelo tridimensional e simulado a aplicação e a retirada do carregamento, obtendo o campo de tensões residuais induzido. As tensões residuais foram então medidas pelo método do juro. Os resultados foram comparados com os da simulação. A utilização de sobrecargas para induzir tensões residuais mostrou-se bastante eficiente uma vez que permite aumentar significativamente a carga efetiva sem comprometer as condições de segurança.*

Palavras-chave: *Tensões residuais, Método do furo, Elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

As tensões residuais existentes em componentes mecânicos tanto podem trazer problemas a sua utilização como apresentar efeitos benéficos, dependendo apenas de apresentarem sinal oposto ao da tensão aplicada nas regiões de tensão máxima. Isto faz com que as tensões residuais figurem como uma das mais modernas ferramentas disponíveis para otimizar o projeto de componentes mecânicos, através da indução de pré-tensão ou tensão residual nos mesmos. Uma técnica já bastante conhecida e utilizada há muito tempo pela indústria é a fretagem e autofretagem de tubos.

O grande problema reside no fato de que dificilmente as tensões residuais podem ser quantificadas com precisão e controladas e, por isso, permanecem sendo incorporadas na maioria dos projetos como uma fonte de incertezas. Porém, o recente desenvolvimento dos recursos computacionais, permitindo a utilização de programas poderosos de simulação numérica tornou possível a realização de análises mais complexas.

Por outro lado, a medição das tensões residuais vem sendo estudada e aperfeiçoada desde a década de 30, quando Mathar apresentou a primeira medição de tensões residuais por meio da perfuração de uma superfície e generalizando sua aplicação para diversos tipos de materiais. Na década de 50, Soete e Ripardelli utilizaram extensômetros resistivos para obter as relaxações em campos uniformes de tensões e Kelsey trabalhou sobre campos de tensão não-uniforme. Em 1966, Rendler e Vigness conseguiram desvincular os resultados do tamanho do furo, reduzindo significativamente as suas dimensões. Desde então, a maior parte das publicações tratam do refinamento da técnica a fim de reduzir o erro dos resultados, como os mais recentes trabalhos de Schajer (1988).

Hoje, com a possibilidade de comparar os resultados das medições com resultados de análises por elementos finitos pode-se obter resultados bastante confiáveis inclusive quando há plasticidade, segundo Beghini e Bertini demonstraram em 1997.

Neste trabalho pretende-se induzir um campo de tensões residuais num componente e depois medi-lo pelo método do furo, calculá-lo pelo método de elementos finitos e comparar os resultados. O objetivo é tornar claro a possibilidade de utilizar os efeitos benéficos das tensões residuais para aumentar o valor da carga efetiva em serviço.

2. PROCEDIMENTO

2.1. Preparação dos corpos de prova

O material utilizado para construir os corpos de prova foi o aço SAE 4340. O limite de escoamento foi determinado a partir do ensaio de tração de corpos de prova convencionais. A curva tensão deformação é apresentada na Fig. 1 e as propriedades empregadas nas demais análises são mostradas na Tabela 1.

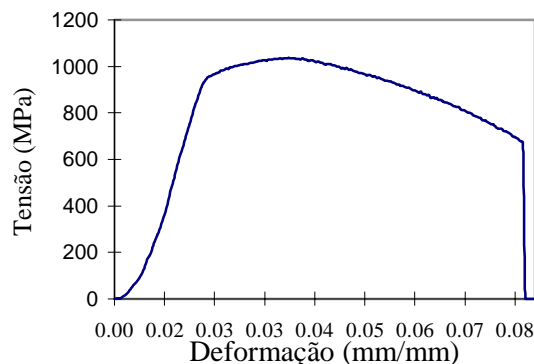


Figura 1 - Curva tensão-deformação do material utilizado, aço SAE4340.

Tabela 1 - Propriedades do aço SAE4340

Propriedade	Valor
Tensão de escoamento:	962MPa
Módulo de elasticidade:	210000MPa*
Coefficiente de Poisson:	0,3*

* valores encontrados no *Metals Handbook*.

Após a obtenção do limite de escoamento, foi feita uma análise preliminar por elementos finitos a fim de verificar a relação entre a carga que deveria ser aplicada aos corpos de prova em C e as suas dimensões. As dimensões são representadas na Fig. 3, a carga

calculada foi de 35kN e a camada onde deveria ocorrer o escoamento tem uma profundidade calculada de aproximadamente 4mm na região de solitação máxima.

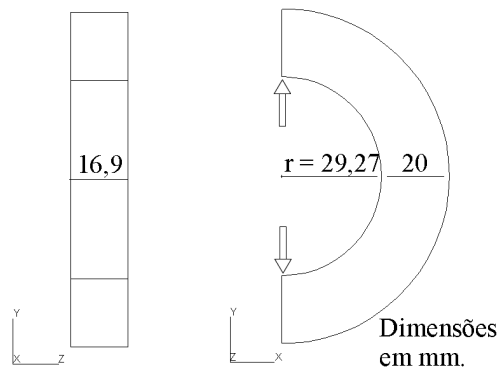


Figura 2 - Geometria e dimensões dos corpos de prova. As setas indicam o sentido de aplicação da carga.

A aplicação deste carregamento foi feito em uma máquina servo-hidráulica MTS 810, segundo a indicação das setas na Fig. 2. A Figura 3 mostra como foi feita a aplicação e retirada do carregamento ao longo do tempo. Nota-se que há um deslocamento residual após a retirada do carregamento de aproximadamente 0,7mm.

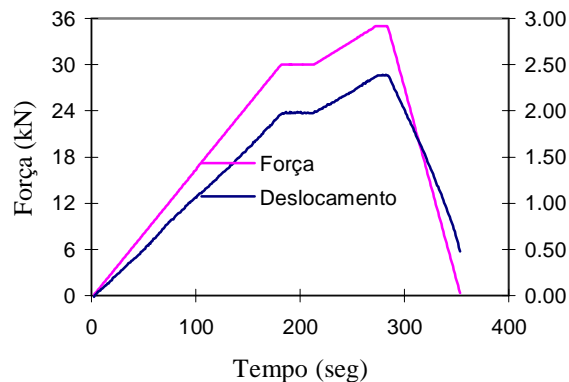


Figura 3 - Abertura do corpo de prova e aplicação da carga em função do tempo.

2.2. Medição das tensões residuais

A utilização do método do furo consistiu na colagem de uma de uma roseta com 3 extensômetros elétricos resistivos, modelo CEA-XX-062UM-120 (Fig. 4). No centro da roseta foi feito o furo e os extensômetros mediram então o alívio da deformação devido à retirada do material. As tensões principais na região foram calculadas a partir das deformações medidas. A profundidade máxima analisada neste ensaio foi de 2,032mm.

O procedimento foi executado conforme a TN-503-4 da MicroMeasurements^{MR}.

A superfície dos corpos de prova foi preparada conforme procedimentos padrões de lixamento, desengraxe, colagem e soldagem de extensômetros.

O equipamento utilizado foi o RS-200 da MicroMeasurements^{MR} e um condicionador de sinais UPM-100 (Multipoint Measuring Unit) da HBM capta os sinais elétricos emitidos pelos extensômetros que são convertidos em deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$). A montagem está mostrada na Fig. 5.

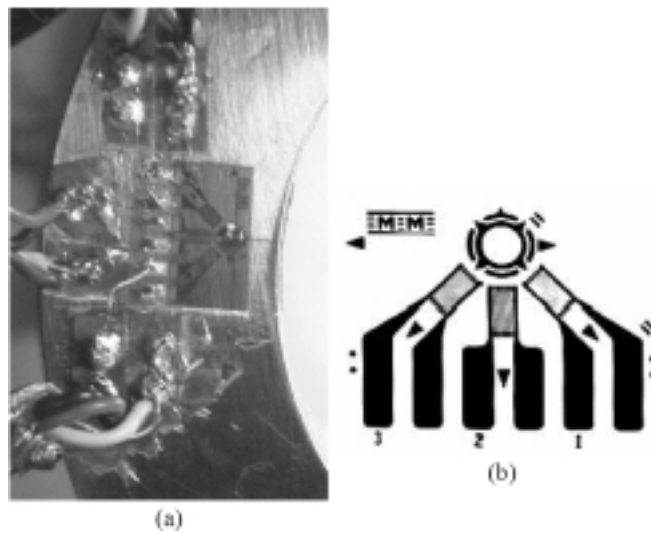


Figura 4 - Roseta CEA-XX-062UM-120, (a) montagem para o ensaio, (b) esquema dos extensômetros segundo TN-503-4.



Figura 5 - Montagem do ensaio: Base e os equipamentos RS200 da MicroMeasurements^{MR} UPM100 da HBM.

2.3. Análise por elementos finitos

Foi realizada uma análise prévia do corpo de prova, utilizando as propriedades da Tabela1, para determinar a carga máxima do ensaio em função da profundidade da camada onde haveria escoamento. Para tanto foi construído um modelo tri-dimensional com elementos sólidos lineares de 8 nós considerando a condição de simetria em relação ao eixo yy. Nesta mesma análise, já foi possível obter valores iniciais das tensões residuais, que, no entanto, precisavam de um maior refinamento no modelo. A carga do ensaio foi de 35kN para uma camada plastificada de aproximadamente 4mm. O modelo finito é mostrado na Fig. 6.

Após a realização dos ensaios de tensões residuais, foram realizadas 2 novas análises a fim de se obter valores que pudessem ser comparados diretamente. Estas consistiram de um modelo semelhante ao anterior, apenas utilizando uma malhas com diferentes graus de refinamento e elementos sólidos isoparamétricos com 20nós. O objetivo foi excluir a dependência entre os resultados e a malha utilizada.

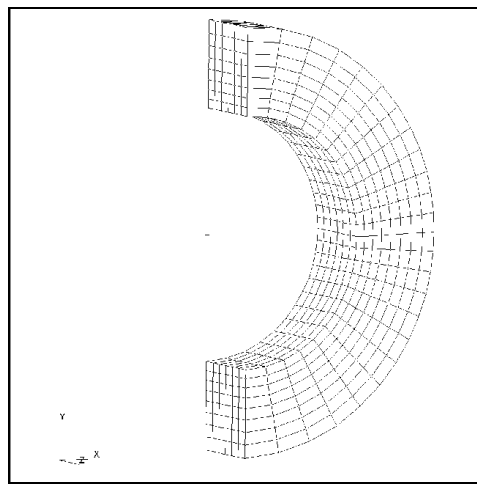


Figura 6 - Malha do corpo de prova inteiro construída com o Programa Patran 7.5.

Todas as análises foram feitas no Programa de análise geral por elementos finitos Abaqus no Centro de Supercomputação da UFRGS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo são apresentados os resultados obtidos pela análise por elementos finitos. Na Fig. 7a está um mapa com a distribuição da deformação plástica equivalente resultante da aplicação de uma carga de 35kN e na Fig. 7b está mostrada a deformação total equivalente de von Mises, sendo este o campo de deformações residuais remanescente. Qualquer carregamento posterior que venha a ser aplicado no componente acarretará uma redistribuição neste campo de deformações.

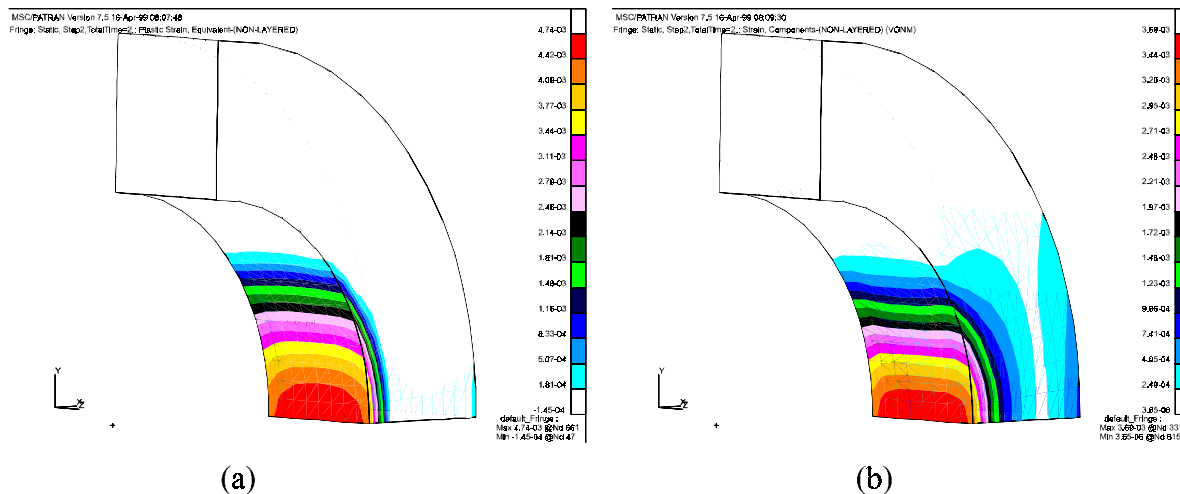


Figura 7 - Distribuição (a) da deformação plástica equivalente após a aplicação do carregamento de 35kN e (b) da deformação total equivalente de von Mises.

A distribuição das tensões residuais principais máxima e mínima é mostrada nas figuras 8a e 8b, respectivamente. O valor máximo de tensão residual calculado foi de -481Mpa para a tensão principal mínima, o que equivale a exatamente 50% do valor da tensão de escoamento dado na Tabela 1. Isto permite a utilização do método do furo para a obtenção das tensões residuais, pois segundo Beghini e Bertini, 1998 quando o valor máximo das tensões residuais

excede, em módulo, cerca de 50% da tensão de escoamento do material o emprego do método do furo não é recomendado a menos que se considere o efeito da plasticidade.

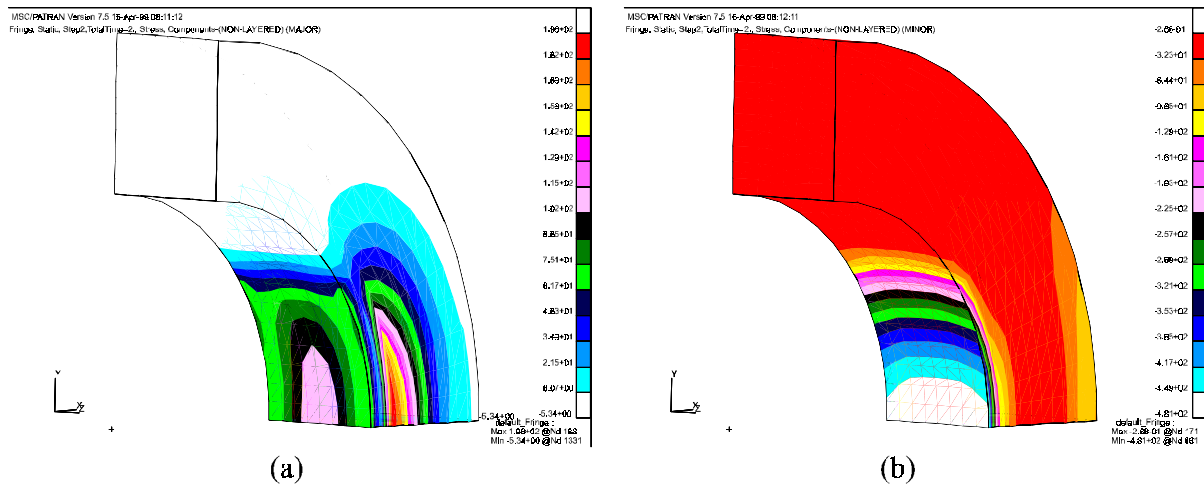


Figura 8 - Distribuição (a) da tensão residual principal máxima e (b) da tensão residual principal mínima.

Os resultados dos ensaios de tensões residuais são apresentados a seguir. As figuras 9 e 10 apresentam os valores medidos do alívio de deformações na lateral dos corpos de prova e na parte central dos mesmos, respectivamente.

Devido ao forte gradiente de tensões existente ao longo do raio e mostrado na Fig. 8, não foi possível obter a necessária repetibilidade nas medidas feitas na lateral dos corpos de prova como pode-se notar pela comparação entre as figuras 9a e 9b, as quais referem-se a mesma medição em corpos de prova diferentes. Esta diferença pode ser atribuída aos fatores geométricos de posicionamento das rosetas em cada um dos corpos de prova, isto é, as rosetas não foram posicionadas exatamente no mesmo lugar, não permitindo a medição do mesmo intervalo de tensão. Por esta razão, os valores de tensão calculados para estes ensaios não foram usados para efeito de comparação.

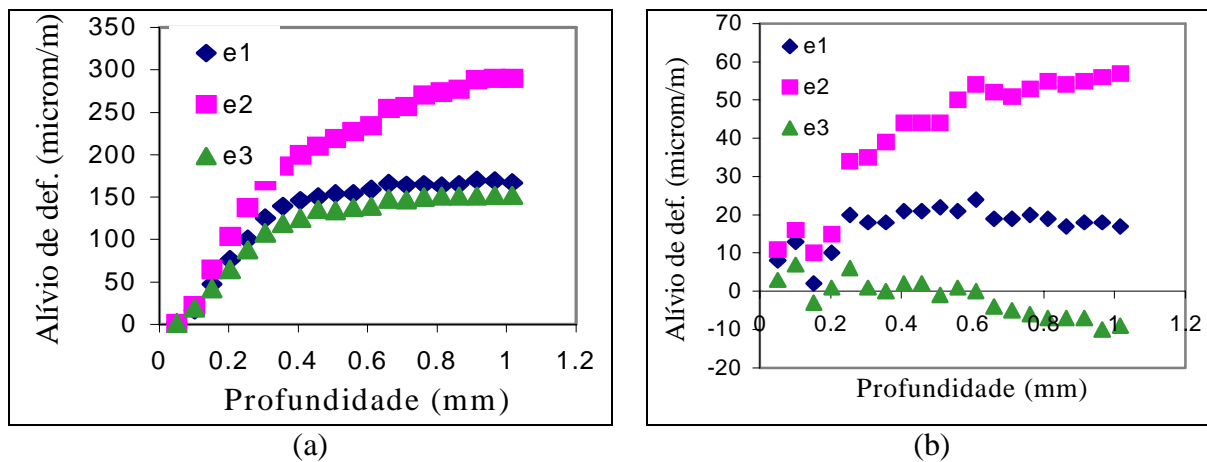


Figura 9 - Deformações medidas na parte lateral de dois corpos de prova.

Nas medições feitas no raio interno dos corpos de prova houve uma boa repetibilidade nos resultado, que estão mostrados na Fig. 10. A tensão calculada para estes ensaios é mostrada na Fig. 11b.

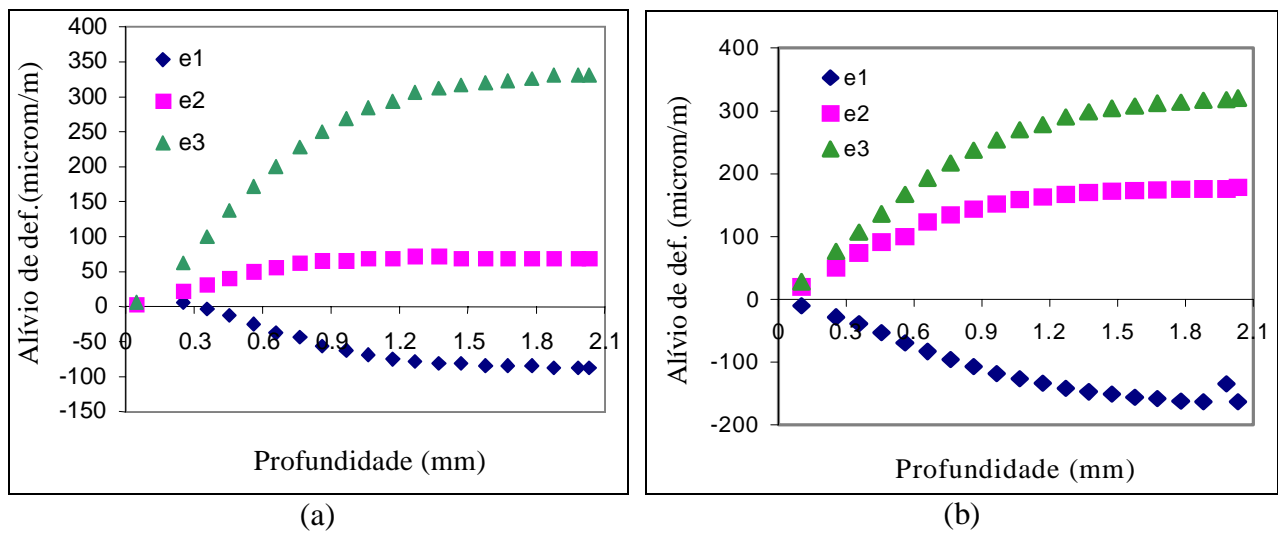


Figura 10 - Deformações medidas no raio interno de dois corpos de prova, com os extensômetros na mesma posição.

A Figura 11a mostra os resultados das tensões residuais principais máxima e mínima da análise por elementos finitos em função da profundidade na região em que foi feito o furo. Pode-se fazer uma comparação direta com os resultados dos ensaios da Fig. 11b. Os valores máximos das tensões residuais principais máxima e mínima calculados por elementos finitos foram, respectivamente, 115MPa e -481MPa. Os valores correspondentes calculados pelo método do furo foram 168MPa e -510MPa.

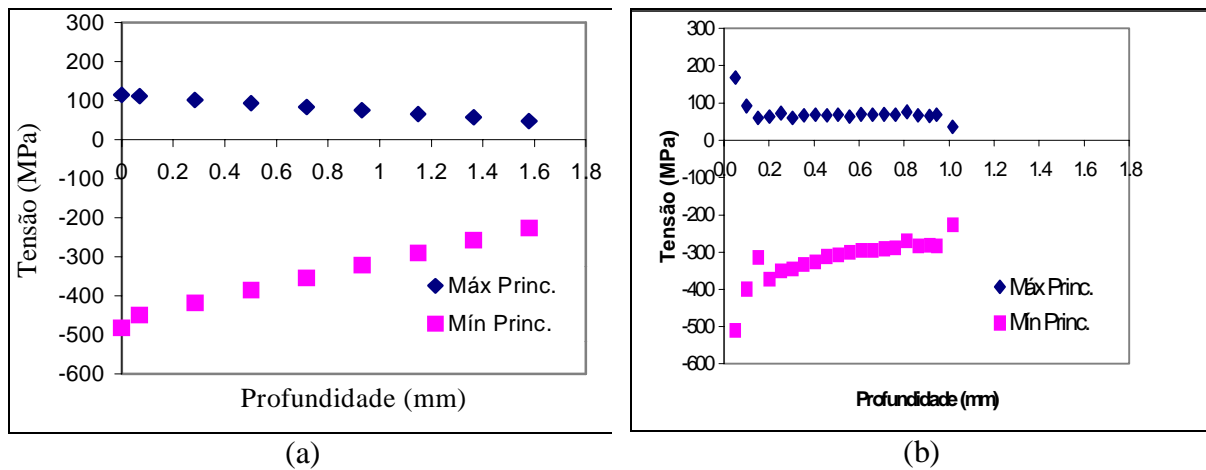


Figura 11 - Resultados (a) da análise por elementos finitos e (b) calculados a partir das deformações medidas pelo método do furo.

Outro resultado importante para comparação é a abertura residual do corpo de prova em C que foi mencionado no item 2.1. Essa abertura devido à deformação plástica localizada foi de cerca de 0,7mm como pode ser visto na Fig. 2. O valor obtido pela análise por elementos finitos foi aproximadamente o mesmo, ou seja, 0,714mm.

4. CONCLUSÃO

Considerando-se que a margem de erro pode superar 30% no método do furo segundo Beghini e Bertini (1998), e que a análise por elementos finitos não incorpora as fontes de erro do método experimental, pode-se dizer que os resultados da análise por elementos finitos e das medições pelo método furo concordaram bastante bem. No entanto, uma melhor aproximação seria possível caso fossem empregadas técnicas de modelamento e análise mais avançadas, que permitissem a simulação do ensaio, ou seja, da introdução do furo no material e o monitoramento do alívio das deformações decorrente.

Apesar disso, o objetivo do trabalho foi atingido, uma vez que ficou comprovada a possibilidade de introduzir localmente tensões residuais em um componente de forma controlada a fim de obter somente efeitos benéficos quando em serviço.

BIBLIOGRAFIA:

- Beaney, E.M., Procter, 1974, E. A Critical Evaluation of the Centre Hole Technique for the Measurement of Residual Stresses. *Strain*, p. 7-14.
- Beghini, M., Bertini, 1998, L. Recent Advances in the Hole-Drilling Method for Residual Stresses Measurement. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 7(2), p. 163-172.
- Kelsey, R.A., 1955, Measuring Non-Uniform Residual Stresses of by the Hole-Drilling Method. *S/ origem*.
- Mathar, J., 1933, Determination of Initial Stresses by Measuring the deformations Around Drilled Holes. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*.
- Rendler, N.J., Vigness, 1966, I. Hole-Drilling Method of Measuring Residual Stresses. *Experimental Mechanics*, p. 577-586.
- Riparbelli, C., 1950, A Method for the Determination of Initial Stresses. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analyses*, vol. 8(1).
- Schajer, G.S., 1981, Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements. *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 103, p. 157-163.
- Schajer, G.S., 1988, Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I – Stress Calculation Procedures. *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 110 p. 338 – 343.
- Shaw, D., Chen, H.Y., 1990, A Finite-Element Technique to Analyze the Data Measured by the Hole-Drilling Method. *Experimental Mechanics*, p. 120-123.
- Soete, W., Vancrombrugge, R., 1950, An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analyses*, vol. 8(1).
- Measurements Group Tech Note - TN-503-4, 1993. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method.

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES INDUCED IN A MECHANICAL COMPONENT

***Abstract.** This report presents a investigation about the employment of the residual stress in the mechanical components design to improve the performance and the fatigue life. A residual stress field has been induced in steel specimens of SAE 4340 through controlled tension tests. FEM analysis have been performed for the stress field evaluation and the results was compared with the results of the experimental tests. These tests have used the hole method for residual stress measurement. The results show that residual stress can be induced in mechanical components through a overload increasing the peformance with safety.*

Key words: Residual stress, Hole method, Finite elements.