

ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS EM GANCHOS DIN 012 ¹

Éverton Pizzio²

Roberto Marques Strohaecker³

Carlos Otávio Damas Martins⁴

Rodrigo André Hoppe⁵

Telmo Roberto Strohaecker⁶

Resumo

Com o intuito de facilitar o processo de montagem das amarras de plataformas semi-submersíveis, foi projetado um sistema de engate constituído principalmente em um gancho DIN com algumas modificações. Como o gancho é de grande dimensão para a situação real de ancoragem de uma plataforma flutuante, dificultando assim o seu estudo e experimentação, utilizou-se um gancho em menor escala para análise e possível extrapolação dos resultados. O processo de qualificação do gancho exige que este resista à aplicação de uma carga de teste. Tal carga de teste implica em um esforço de tração que ultrapassa o limite elástico do material. A região da superfície do gancho que sofreu deformação plástica fica comprimida pelo restante do material carregado no regime elástico que tenta retornar, gerando desta forma tensões residuais compressivas. A existência de tensões residuais afeta a vida em fadiga do componente, permitindo que o seu estudo possa quantificar esse efeito. O objetivo do trabalho consiste na avaliação do prolongamento da vida em fadiga ocasionada pela introdução de tensões residuais na zona de maior sollicitação do gancho. As tensões residuais compressivas induzidas pelo teste de carga tiveram grande influência nos testes de fadiga, aumentando a performance dos ganchos e assegurando sua integridade estrutural.

Palavras chave: Gancho; Pré-carga; Tensões residuais; Fadiga.

RESIDUAL STRESS ANALYSIS IN A DIN 012 OIL PLATFORM HOOK

Abstract

With the intention of making the process of assembly of semi-underwater platforms easier, a fixing system that is constituted mainly of a DIN hook with some adjustments was designed. The actual hook is of very large dimensions, because of the real fixing conditions of a floating platform, so a hook in minor scale was used for analysis and possible extrapolation of the results. The qualification process of the use of the hook requires the use of a proof loading. This proof load causes a plastic deformation, which can originate residual stresses. These residual stresses affect the fatigue life of the mechanical component, since this, study of those stresses makes it possible to quantify this effect. This work aims the analysis of the residual stress effect in the fatigue limit in the most solicited zone of the platform hook.

Key words: Platform hook; Proof-load; Residual stress; Fatigue.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Mecânico, M. Sc. – PPGEM – UFRGS.

³ Engenheiro Metalúrgico – PPGEM – UFRGS.

⁴ Engenheiro de Materiais, M. Sc – PPGEM – UFRGS.

⁵ Engenheiro Mecânico, M. Sc. – atualmente Petrobrás S/A.

⁶ Engenheiro Metalúrgico, Prof. Dr. PPGEM – UFRGS.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o gancho de ancoragem utilizado no processo de montagem das estacas de fundo de plataformas flutuantes (Figura 1), encontra-se no processo de qualificação e possível homologação.



Figura 1. Ilustração esquemática das conexões de fundo de plataformas flutuantes.

Inicialmente o seu projeto consistia no forjamento do gancho, sendo qualificado pela sua adequada resistência mecânica. Porém, o processo de fabricação tornou-se pouco viável devido aos elevados custos da matriz e necessidade de prensas de grande robustez. Além disso, para cada projeto de plataforma, deve-se produzir ganchos de tamanhos diferentes e em pequenas quantidades, o que reforça a inviabilidade econômica do processo.

Portanto, a necessidade de adequar o processo de fabricação ao projeto em questão, levou os engenheiros da Petrobrás a estudarem o desenvolvimento de um componente fundido. Para tal, uma parceria com o LAMEF – UFRGS foi firmada para o desenvolvimento dos experimentos e caracterização dos mesmos.⁽¹⁾

Em estudos preliminares, constatou-se que o mar da Bacia de Campos e do Brasil, em geral, é caracterizado por um espectro bi-modal, com dois picos distintos. O pico de baixa frequência está associado às ondas de *swell* vindas predominantemente do sudoeste. O pico de alta frequência, denominado ondas de *seas*, tem direção predominante do nordeste. Esta combinação explica a severidade das condições para uma análise do comportamento em fadiga do componente.⁽²⁾ O gancho DIN 012 é adequado à tarefa, pois é de fácil manuseio e não exige equipamentos servo-hidráulicos de grande capacidade para os ensaios mecânicos.

É sabido que a geração de tensões residuais de origem compressiva aumenta consideravelmente a vida em fadiga de componentes submetidos a solicitações cíclicas.⁽³⁻⁶⁾ Visando a melhoria do desempenho em fadiga do gancho, utilizou-se como método para gerar tensões residuais, a realização de uma carga de teste acima do limite de escoamento do material (*proof load*), gerando assim, uma zona de plastificação na região de maior solicitação. Esta zona plastificada, quando cessada a carga de tração, tende ao retorno elástico, produzindo tensões residuais compressivas.

Este trabalho buscou avaliar o nível de tensões residuais na zona de plastificação, bem como os benefícios destas na vida em fadiga do gancho.

2 Materiais e Métodos

Foram estudados ganchos de tamanho 012 segundo a norma DIN 15400,⁽⁷⁾ fundidos e temperados a partir do aço de composição semelhante ao AISI 9315.

Uma análise metalográfica, preliminar, mostrou que a microestrutura dos componentes é predominantemente martensítica apontando tamanho de grão tamanho 7 ASTM.⁽⁸⁾

Foi encontrado em média os seguintes constituintes principais: 0,12% C – 0,51% Cr – 0,19% Mo – 3,80% Ni – 94,15% Fe – entre outros teores muito baixos.⁽⁸⁾

A Figura 2 apresenta os ganchos utilizados no presente trabalho.

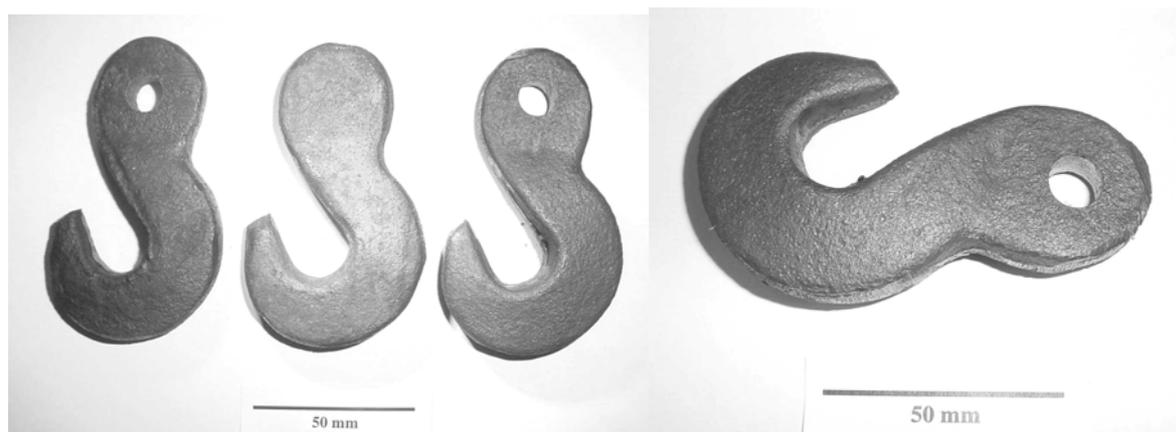


Figura 2. Ganchos DIN tamanho 012 utilizado nos testes.

Inicialmente, o gancho deve passar por um processo de qualificação do material e análise dos defeitos provenientes da fabricação por fundição. Tal processo de fabricação induz porosidades na região de maior volume, que também é a região de maior sollicitação. Estes defeitos podem atuar como concentradores de tensões, tornando assim os resultados dos testes dependentes desta análise. Para tal, realizou-se ensaios por ultra-som para detecção dos defeitos, sendo que os componentes que apresentaram defeitos não foram ensaiados. Em uma etapa seguinte, ensaios de caracterização mecânica são realizados e melhor detalhados nas próximas seções.

2.1 Teste de Carga

Para a realização do teste de carga e dos ensaios de fadiga foi construído um dispositivo para acoplar o gancho na máquina servo-hidráulica MTS 810, conforme a Figura 3. O dispositivo é constituído por dois suportes cilíndricos e pinos de fixação usinados em aço AISI 4340, temperados e revenidos. Buscando estabelecer um valor de referência, foram consultadas as normas NBR 13715 – Estruturas offshore – Amarras – Requisitos⁽⁹⁾ e *Certification of Offshore Mooring Chain - Certification Notes No 2.6.*⁽¹⁰⁾

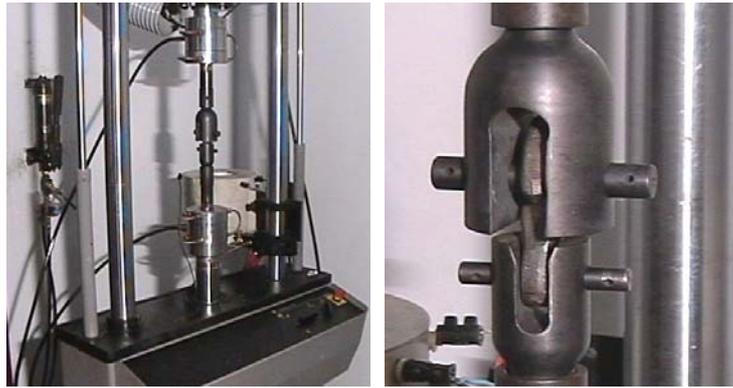


Figura 3. Disposição dos ensaios de tração - dispositivo para fixação do gancho instalado.

2.2 Análise das Tensões Residuais Através do Método do Furo Cego

A análise das tensões residuais foi realizada utilizando-se o equipamento RS 200 da Micromeritics, seguindo o procedimento descrito na literatura para a análise de perfis não uniformes de tensões residuais⁽¹¹⁾ e a norma ASTM E837/95.⁽¹²⁾ Foram utilizados extensômetros de resistência elétrica do tipo roseta HBM modelo 120RY61S, posicionados na seção mais solicitada dos ganchos. Devido ao difícil acesso à região, foi necessário seccionar parte do gancho para a realização do ensaio. Para a aquisição de dados, utilizou-se uma unidade de medição do tipo UPM-100, da HBM, que capta os sinais elétricos emitidos pelos extensômetros e os convertem em deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$). O equipamento realiza uma auto calibração a partir da especificação do valor do “gage factor” do extensômetro. A Figura 4B mostra a unidade de medição usado nos ensaios.

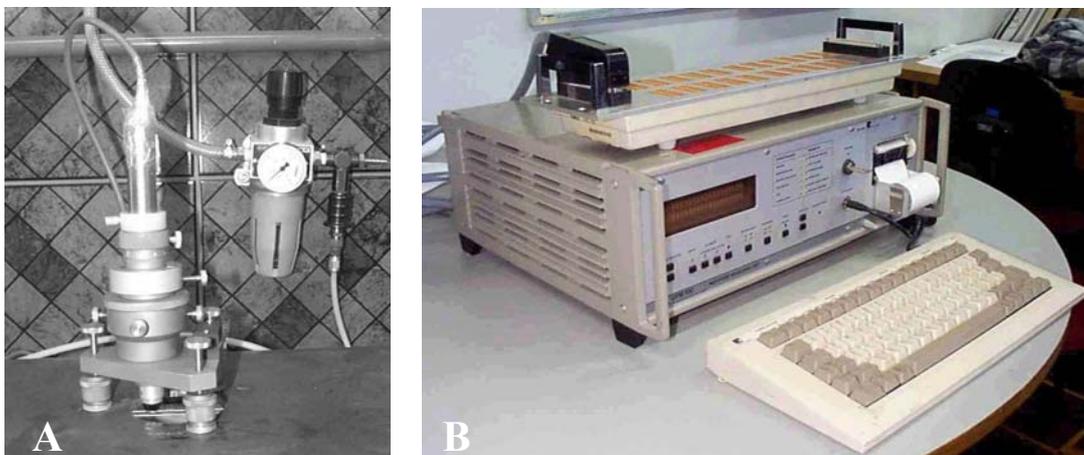


Figura 4. Em A, Milling Guide RS 200 da MicroMeasurements utilizado para a usinagem dos furos. Em B, unidade eletrônica de medição – Modelo UPM100 da HBM.

2.3 Ensaio de Fadiga

Foram ensaiados ganchos com e sem pré-carregamento, a fim de comparar a vida em fadiga obtida por ambos. O carregamento em fadiga foi estabelecido sempre de forma senoidal, com frequência de 30 Hz e carga variando com uma razão $R=0,1$ para determinar a curva de Wöhler do componente. Com isso foi determinado o número de ciclos necessários para a ruptura dos ganchos sem tensões residuais e dos plastificados. A partir desses resultados foi avaliada a influência das tensões residuais na vida em fadiga dos ganchos.

3 Resultados

3.1 Análise das Tensões Residuais

Conforme ensaio de ruptura do gancho, onde foi obtido uma média de 74kN, avaliou-se a pré-carga em 60kN, 80% da carga de ruptura, segundo a carga de pré-teste especificada na norma NBR 13715, conforme registro típico da Figura 5.

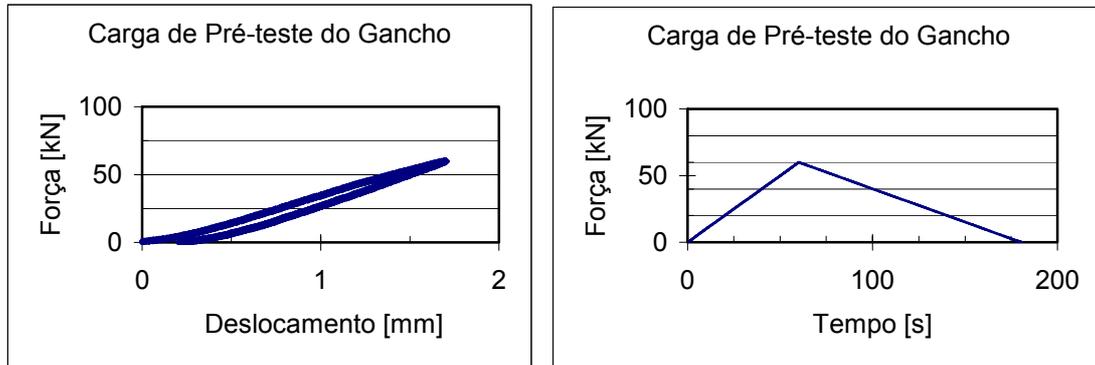


Figura 5. Registro típico da pré-carga de teste.

Dois ganchos foram ensaiados através do método do furo cego para a avaliação do nível de tensões residuais. A Figura 6 ilustra a execução do ensaio.



Figura 6. Usinagem do furo no gancho

Os resultados das medições indicaram que a variação da deformação com a profundidade do furo é uniforme. O cálculo das tensões residuais em função das direções principais σ_1 e σ_2 permitiram inferir a boa repetibilidade dos resultados obtidos. Na Figura 7 estão indicados os valores das tensões residuais em função da profundidade do furo. Na Figura 8 é indicada a orientação da roseta utilizada em relação ao gancho. Sendo que a direção principal apresentou uma variação menor que 3° em relação à direção do extensômetro 1 (ERE1).

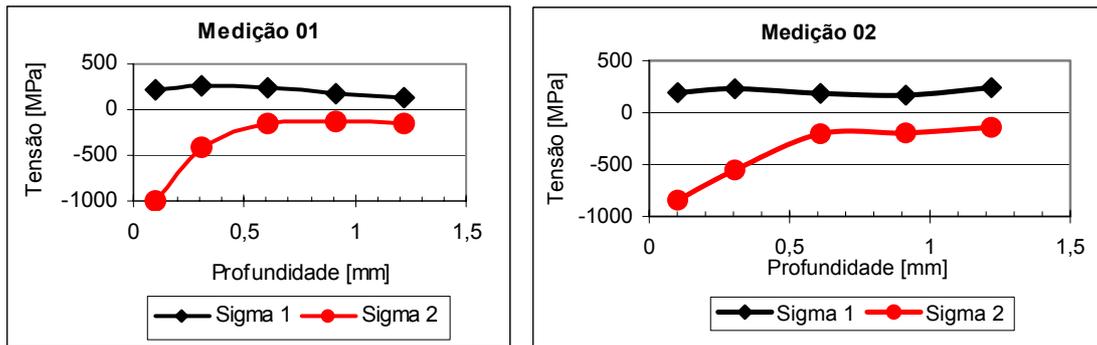


Figura 7. Resultados para as tensões residuais medidas através do método do furo cego.

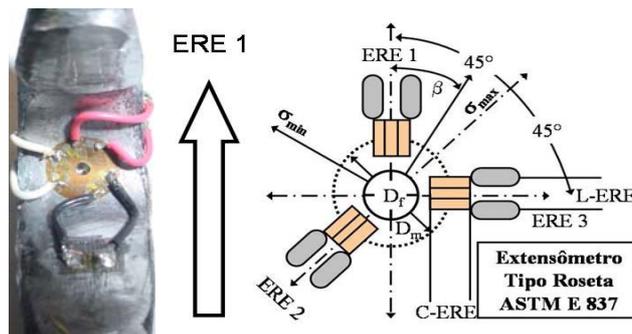


Figura 8. Disposição da roseta extensométrica para a determinação das tensões residuais através do método do furo cego.

Na camada superficial da curvatura do gancho, a uma profundidade de 0,1mm, foram encontrados os maiores níveis de tensões residuais, 200MPa para σ_1 , e -900MPa para σ_2 .

3.2 Testes de Fadiga

Foram ensaiados ganchos com e sem pré-carregamento, assim podendo avaliar o decréscimo da curva para o gancho sem pré-carga, ou seja, a diminuição de sua vida em fadiga.

Os ganchos submetidos a pré-carga atingiram 1000000 de ciclos para uma carga senoidal entre 2,4 e 24kN sem romper. Já os ganchos que não sofreram pré-carga atingiram 585833 ciclos para uma carga senoidal entre 1 e 10kN sem romper, como mostrado na Figura 9.

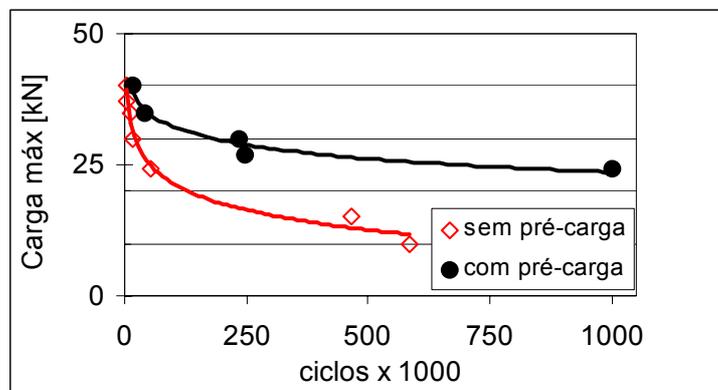


Figura 9. Curva de Wöhler para os ganchos analisados.

4 DISCUSSÃO

O gancho fundido DIN 012, após os devidos tratamentos térmicos exigidos, apresentou resistência mecânica satisfatória. A resistência máxima atinge aproximadamente 74kN.^(1,8) No entanto, o gancho pode apresentar resistência mais elevada. O processo de fundição provoca defeitos no material como rechupes e porosidades agrupadas. Houve a preocupação em realizar ensaios por ultra-som para detecção de tais defeitos.

Após o ensaio do método do furo cego, as amostras foram seccionadas observando-se que a região de plastificação mais próxima à superfície, onde foram medidas as deformações residuais, não apresentou sinais de porosidades. Em geral, os defeitos de fundição ocorrem na região de maior volume na parte mais interna do componente.

Como esperado, a introdução de tensões residuais compressivas aumentou notavelmente a vida em fadiga do componente. Para um ciclo de fadiga em carregamento constante, os ganchos submetidos à carga de pré-teste suportaram um carregamento quatro vezes maior para atingir a vida infinita do que os correspondentes sem carga de pré-teste, mostrado pela diferença das curvas de Wöhler, conforme Figura 9. Esse campo diminuiu a tensão média em 200MPa, fazendo com que as solicitações variassem apenas dentro de uma faixa de carregamento compressivo. Com isso o processo de nucleação de trincas e a taxa de propagação são retardados. Através do método do furo cego, podemos qualificar o nível de tensões residuais para a pré-carga de teste, resultando em uma tensão residual compressiva na direção longitudinal de aplicação da carga da ordem de -900MPa. Considerando-se as incertezas nos métodos de medição e cálculos das tensões residuais, temos que a principal informação obtida neste ensaio, no caso dos ganchos, foi o perfil de tensões residuais, ao longo da profundidade do furo, o qual nos indicou uma variação não uniforme de tensões, apresentando tensões residuais compressivas de alta magnitude na superfície do material, as quais decaem em direção interna, seguindo o princípio de equilíbrio de tensões. O trabalho apresentou o desenvolvimento de metodologias confiáveis para a caracterização de protótipos de ganchos para ancoragem fundidos DIN 012, contudo a completa homologação do componente, depende da completa caracterização deste em dimensões e condições operacionais reais.

5 CONCLUSÃO

A integridade estrutural do componente foi assegurada tendo em vista que as solicitações impostas foram superiores às especificadas por normas nacionais e internacionais.

As tensões residuais compressivas induzidas pela pré-carga de teste no gancho, proporcionaram o aumento de sua capacidade de carga em solicitações dinâmicas.

As curvas de Wöhler traçadas mostraram os benefícios adquiridos pela presença de um campo de tensões residuais compressivas na região de maior solicitação. As curvas de Wöhler mostraram que os ganchos que sofreram carga de pré-teste suportaram um carregamento quatro vezes superior de limite de fadiga do que os sem carga de pré-teste.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF / UFRGS), pela oportunidade e infra-estrutura para a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo incentivo à iniciação científica e tecnológica e apoio ao projeto de pesquisa deste trabalho.

Ao MSc. Engenheiro Rodrigo André Hoppe, o qual desenvolveu sua Dissertação de Mestrado junto ao PPGEM-UFRGS com o apoio CNPq/Petrobrás, atualmente Engenheiro da Petrobrás S/A.

Ao Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pelo apoio à elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 HOPPE, R. A., Avaliação da Vida em Fadiga de Ganchos. Dissertação de Mestrado, PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- 2 <http://www.clickmacae.com.br/?sec=359&pag=pagina&cod=225>, acessado em 01/02/2006.
- 3 Fuchs, H. O., et al, “Metal Fatigue in Engineering”, Wiley–Interscience Publication 2ª Edição, 2000, 496 p.
- 4 Hauk, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods...” ELSEVIER, 1997.
- 5 Torres, M. A. S., Voorwald, H. J. C., “An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel.” International Journal of fatigue, Vol. 24, 2002, p. 877–886.
- 6 Martins, et al, “Application of X-ray Diffraction, Micromagnetic and Hole Drilling Methods for Residual Stress Determination in a Ball Bearing Steel Ring”, Journal of Experimental Mechanics, Vol. 45, No. 4, August 2005, p 344 – 350.
- 7 Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 15400 – Lifting Hooks, Materials, Mechanical Properties, Lifting Capacity and Stresses, Germany, 1990.
- 8 PIZZIO, E., Análise das Tensões Residuais em Ganchos DIN 012. Trabalho de Diplomação, DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- 9 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13715 – Estruturas offshore – Amarras – Requisitos, Rio de Janeiro, 1996.
- 10 DNV – Det Norske Veritas Classification AS, Certification of Offshore Mooring Chain – Certification Notes No.2.6, Norway, 1995.
- 11 Fry, T., “Measurement Good Practice Guide No. 52 “ National Physical Laboratory, UK, 2000.
- 12 American Society for Testing Materials - ASTM E 837/95. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Method, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 and 12.02, 1995.