

# Avaliação Preliminar de Métodos Alternativos de Medição de Tensões Residuais por Indentação e por Aquecimento Localizado, combinados à Holografia Eletrônica

**Ricardo Suterio** <sup>(a), (1)</sup>

suterio@lit.inpe.br

**Matías R. Viotti** <sup>(c), (2)</sup>

viotti@ifir.edu.ar

**Armando Albertazzi Gonçalves Jr.** <sup>(b),</sup>

albertazzi@labmetro.ufsc.br

**Guillermo Héctor Kaufmann** <sup>(c), (d)</sup>

guille@ifir.edu.ar

(a) INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / LIT - Laboratório de Integração e Testes, São José dos Campos - SP - Brasil

(b) UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina / Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automação, Florianópolis - SC - Brasil

(c) UNR - Universidad Nacional de Rosario / Instituto de Física Rosario (CONICET), Rosario - Argentina

(d) UNR - Universidad Nacional de Rosario / Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Rosario - Argentina

## SINOPSE

*Uma nova metodologia está sendo desenvolvida para a determinação de tensões residuais em superfícies. O elemento central é um interferômetro radial que, usando holografia eletrônica, mede o campo de deslocamentos radiais em torno de uma região de interesse sobre a qual provoca-se o alívio das tensões residuais. Através de modelos analíticos e numéricos, pretende-se correlacionar o campo de deslocamentos medidos com o nível de tensões residuais. Duas formas alternativas de "alívio" de tensões estão sendo investigadas no momento: indentação e aquecimento localizado por intermédio de um Laser de alta potência. Este trabalho apresenta os conceitos envolvidos e os primeiros resultados experimentais obtidos.*

**Palavras-chave:** *tensões residuais, indentação, aquecimento localizado, holografia eletrônica, interferômetro radial.*

## 1. INTRODUÇÃO

A medição "in loco" de tensões é hoje largamente utilizada para monitorar a confiabilidade operacional de estruturas e componente mecânicos, principalmente em situações de elevada complexidade e quando há presença de tensões residuais. A determinação das tensões residuais por métodos analíticos é muito difícil por exigir o conhecimento de toda a história de carregamento do material. Esta informação raramente é conhecida com o rigor necessário.

A medição das tensões e tensões residuais que agem em estruturas e componentes é uma operação de grande importância para o correto gerenciamento e

---

1 Doutorando do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

2 Doutorando "Sandwich", Instituto de Física Rosario / UFSC.

análise de riscos, bem como avaliar a reabilitação e o desempenho de novas técnicas de projeto, construção e montagem.

Vários métodos de medições de tensões residuais têm sido desenvolvidos e utilizados por várias décadas. Boa parte destes determinam indiretamente as tensões residuais através dos efeitos que o alívio das tensões residuais provoca sobre o material. Dentre as formas mais comuns de provocar o alívio, cita-se as técnicas do seccionamento e do furo. A medição dos efeitos do alívio de tensões sobre o material remanescente normalmente é feita por meio de extensômetros de resistência (“strain gauges”).

Neste trabalho, investiga-se duas formas alternativas para a determinação de tensões residuais em superfícies. Como técnica de “alívio” pretende-se utilizar a indentação e o aquecimento localizado na superfície de um corpo por meio de um laser de alta potência. Em ambos os casos medem-se o campo de deslocamentos superficial na direção do raio por meio de um interferômetro radial que utiliza holografia eletrônica.

No desenvolvimento de novas técnicas, algumas perguntas surgem: (1) Qual o modelo matemático mais conveniente para determinar as tensões residuais para cada forma de alívio de tensões? (2) Com que incerteza é possível medir as tensões residuais em cada caso? (3) Qual a gama e o campo de aplicação para cada metodologia?

Este trabalho não traz as respostas para as questões acima, mas ele reporta alguns progressos atingidos e os primeiros resultados experimentais.

## **2. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSÕES**

Dois métodos para quantificar tensões residuais presentes em peças, são apresentados. O primeiro através da indução de uma tensão plástica residual por meio de um indentador e, o segundo, por meio de alívio de tensão pontual com um aquecimento térmico localizado.

### **2.1. O INTERFERÔMETRO RADIAL**

O interferômetro radial empregado está esquematizado na (Figura 2-1). Este interferômetro foi projetado e desenvolvido na UFSC, ora incorporado em um dispositivo portátil para medição de tensões residuais, denominado MTRES.

O MTRES foi inicialmente desenvolvido para medições de tensões residuais pelo método do furo com holografia eletrônica<sup>[3]</sup>. Utiliza-se da iluminação dupla de modo a conferir uma sensibilidade de medição radial no plano e perpendicular ao eixo dos espelhos. Com esta configuração, mede-se apenas a componente radial do deslocamento na superfície do objeto<sup>[2]</sup>. A Figura 2-2 esquematiza, em corte, o par de espelhos que orienta as duas frações do raio sobre um ponto “P” da peça. Estes raios incidem neste ponto segundo direções simétricas em relação à normal, fornecendo

sensibilidade radial e no plano da peça. O interferômetro é insensível aos deslocamentos tangenciais e que ocorrem fora deste plano.

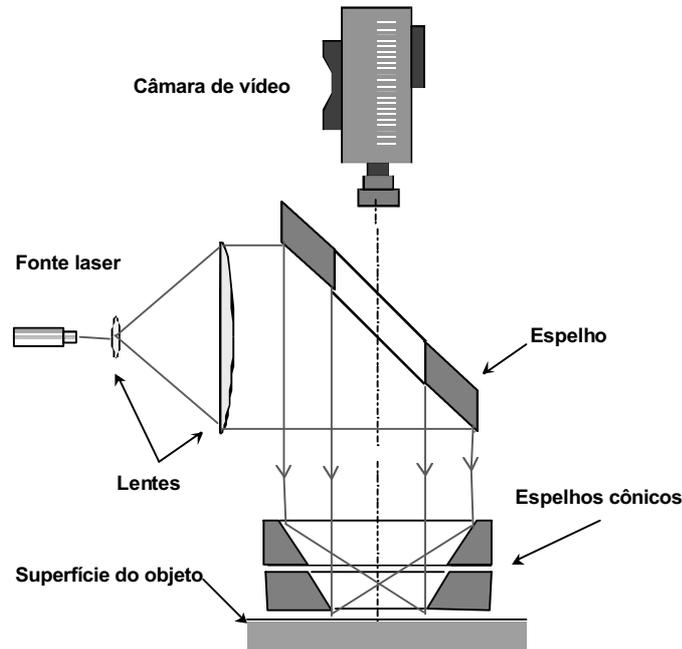


Figura 2-1: Interferômetro radial configurado para os experimentos

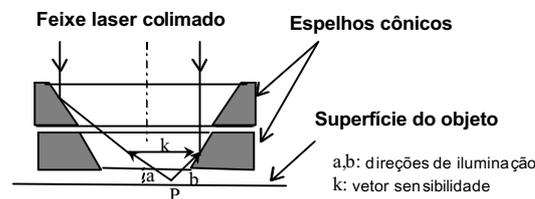


Figura 2-2: Iluminação dupla através do interferômetro radial

## 2.2. O MÉTODO DA INDENTAÇÃO

O método da indentação, basicamente, consiste na aplicação de uma pressão ou carga sobre a superfície da peça que se pretende analisar através de uma ponta aguda. A tensão localizada que é localmente exercida sobre a superfície da peça é em torno de três vezes maior que a tensão de escoamento do material, causando uma deformação plástica localizada<sup>[12]</sup>. O estado de tensões residuais pode ser qualitativamente identificado pela holografia eletrônica. A indentação é realizada por intermédio de pontas cônicas, esféricas, ou piramidais, tais como as utilizadas em ensaios de dureza<sup>[8]</sup>. Com esta perturbação provocada no estado de tensões do corpo, há uma alteração do campo de deslocamento em torno da indentação, sendo possível correlacioná-lo com as tensões residuais existentes. A Figura 2-3 esquematiza um processo de indentação em uma peça.

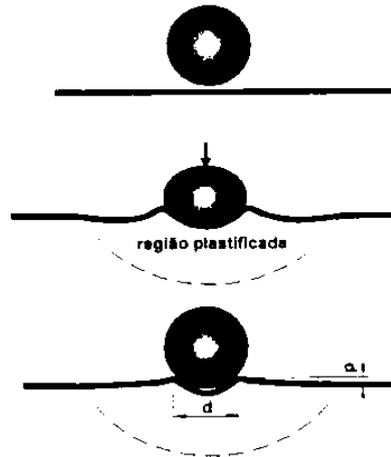


Figura 2-3: Método da indentação<sup>[12]</sup>

Rodacoski-1997<sup>[12]</sup>, descreve que a deformação plástica local devido a indentação é função das características geométricas do indentador, das propriedades do material e da magnitude e direção das tensões residuais inicialmente presentes no material. Teoricamente, a determinação das tensões residuais pode ser realizada através das seguintes formas:

- medição da variação da dureza;
- medição da relação entre força e profundidade de indentação;
- medição da forma geométrica de indentação;
- medição da deformação ou deslocamento ao redor da indentação.

O método que utiliza a variação de dureza não é apropriado para materiais que apresentam variação de tensão na superfície.

O método da indentação, que provém de uma gravação contínua da variação da carga “p” em função da profundidade de penetração “h”, tem sido tópico de considerável interesse nos últimos anos, sendo estudado por Giannakopoulos & Suresh<sup>[1],[5],[6]</sup>. Este interesse pode ser atribuído às seguintes aplicações que este método proporciona:

- Determinação de propriedades dos materiais tais como o módulo de elasticidade (módulo de Young), tensão de escoamento e o coeficiente de deformação ao encruamento, assim como a resistência à fratura, determinada através de sucessivas indentações contínuas.
- Determinação da amplitude de tensão residual pré-existente através da indentação superficial.
- Determinação de gradientes no módulo de elasticidade e da tensão de escoamento em materiais que apresentam variações espaciais em sua composição, microestrutura ou densidade.

Muitas destas aplicações ainda apresentam limitações, principalmente pelas complicações na interpretação clara dos resultados da indentação, que são afetados pelas propriedades plásticas do material<sup>[5]</sup>. Por exemplo: em uma liga com baixa deformação de encruamento, o material deslocado plasticamente tende a fluir e

acumular-se nas faces do indentador devido a incompressibilidade do material no regime de deformação plástica (acúmulo de material ou “piling-up”). Por outro lado em ligas com alta deformação de encruamento, a região plasticamente deformada é empurrada para fora do indentador mantendo a impressão abaixo do nível da superfície inicial (afastamento de material ou “sink-in”). A consequência do acúmulo ou não de material entorno do indentador, causa grandes diferenças na área de contato real em relação à área de contato aparente, observada após a indentação.

O método de medição da forma geométrica de indentação consiste no conhecimento da relação entre a carga de indentação e a área verdadeira de contato (projetada). É essencial na extração das propriedades mecânicas do material, contudo apresenta dificuldades na relação entre a verdadeira área de contato “A” pela profundidade de penetração do indentador “h” no material a ser testado.

O método de medição do campo de deformação ou de deslocamento ao redor da indentação apresenta-se como o mais indicado para a análise quantitativa, embora ainda não exista, um estudo que aponte um modelo matemático apropriado, simples e de fácil implementação. A sensibilidade deste método é maior quanto maior for o diâmetro da esfera e quanto maior for a força de indentação. Tem como grande vantagem a determinação do sinal e da direção da tensão residual, quando presente na superfície da peça. Por outro lado, tem como desvantagem a necessidade de se conhecer as propriedades mecânicas do material da peça a ser medida.

Atualmente é possível, com certa facilidade, medir o campo de deslocamentos radiais em torno da região indentada da superfície através do interferômetro radial e da holografia eletrônica<sup>[2],[3],[12]</sup>. As características dos mapas de franjas, sua repetitividade para diferentes condições de carregamento e para diferentes materiais, está sendo investigada. Os experimentos iniciais descritos neste trabalho serão de grande valia para melhor definir o modelo matemático mais adequado e o rigor com que a indentação deve ser produzida. Na ausência de um modelo matemático pré-existente, dois modelos numéricos estão sendo desenvolvidos em paralelo com a parte experimental para descrever o campo de tensões combinadas em função do campo de deslocamentos radiais, tais como: estudos por meio de elementos finitos e algoritmos genéticos. Este último está sendo validado inicialmente para o método do furo, para uma posterior implementação em função de resultados de ensaios previamente controlados.

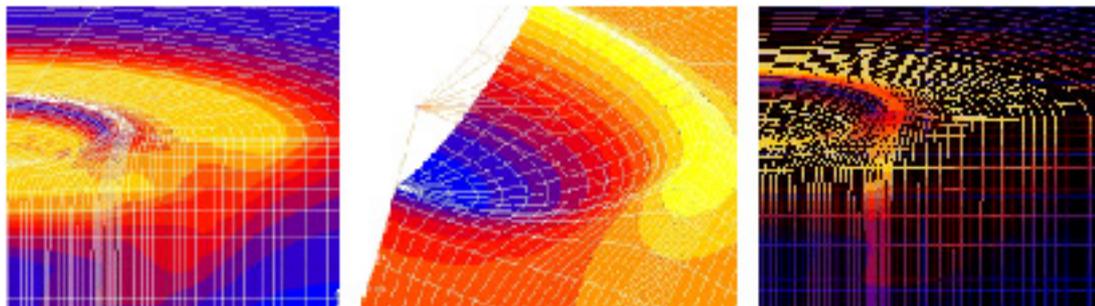


Figura 2-4: Simulação numérica por elementos finitos (FEM).

A Figura 2-4 representa uma simulação numérica de uma região indentada de um material elastoplástico por um indentador esférico. De forma ilustrativa, pode-se observar o campo de tensão causado pela a indentação.

### **2.3. O MÉTODO DO AQUECIMENTO LOCALIZADO**

O nível de tensões residuais presentes nas estruturas pode ser diminuído se estas forem submetidas a um tratamento térmico de alívio de tensões. O nível residual de tensões dependerá do tempo e da temperatura que se realizam tal tratamento. Seguindo esta idéia e os resultados obtidos por Pechersky-1995<sup>[10],[11]</sup>, é objeto da investigação descrita neste trabalho na implementação de uma técnica que combine o interferômetro radial com um dispositivo que produza um aquecimento localizado, de modo a gerar um alívio de tensão localizada.

Dentre as diferentes alternativas propostas de produzir tal aquecimento, optou-se por utilizar um laser infravermelho de CO<sub>2</sub> de 10 W. A maior parte da energia é usada para aquecer pontualmente uma área circular. Outros métodos de aquecimento, tais como corrente elétrica concentrada através de eletrodos ou resistências elétricas, acarretariam numa maior região afetada pelo calor, resultando dificuldades em distinguir a exata região que sofreu o alívio de tensão.

O procedimento básico adotado se resume no seguinte:

- aquisição da imagem inicial antes de produzir o aquecimento.
- aplicação do calor concentrado por um tempo de 20 segundos.
- aquisição da segunda imagem 10 segundos após o aquecimento ter sido encerrado
- subtração das imagens para a obtenção dos padrões de franjas.

Este processo se mostra altamente atraente por ser uma técnica totalmente não destrutiva do ponto de vista macroscópico, não havendo a necessidade de remoção de material comparado-se a outros métodos como o método do furo (“Hole-drilling”), o método de remoção de camadas, o método de alívio de tensões por seccionamento etc<sup>[7],[9]</sup>.

Alguns cuidados devem ser tomados no processo de aquecimento de tal forma que a resposta do material não esteja na região plástica. Se o aquecimento for demasiadamente rápido, a expansão térmica pode criar deformações plásticas compressivas podendo introduzir erros significativos na medição.

Deve-se destacar que a temperatura alcançada deve ser suficiente para produzir o alívio de tensão residual presentes, não superior a cinquenta por cento da temperatura do ponto de fusão do material<sup>[10]</sup>.

## **3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL**

O sistema básico de medição conta com uma fonte laser com comprimento de onda  $\lambda = 785,0$  nm, um espelho cônico com ângulo de 60° e uma câmara CCD. A região iluminada tem cerca de 10 mm de diâmetro.

### 3.1. DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Foi utilizado como corpo de prova (CDP), uma barra retangular em alumínio de aproximadamente 5 mm de espessura, esquematizada na Figura 3-1. As marcas na forma de meia lua na parte direita foram artificialmente produzidas por meio de esmagamento transversal, produzindo uma região com fortes tensões residuais. Cada processo de medição foi realizado em duas etapas: (1) Medições do campo de deslocamentos no CDP sem carregamento e numa região sem tensões residuais. (2) Medição do campo de deslocamentos no CDP sem carregamento e numa região deformada plasticamente, onde certamente existe alguma tensão residual.

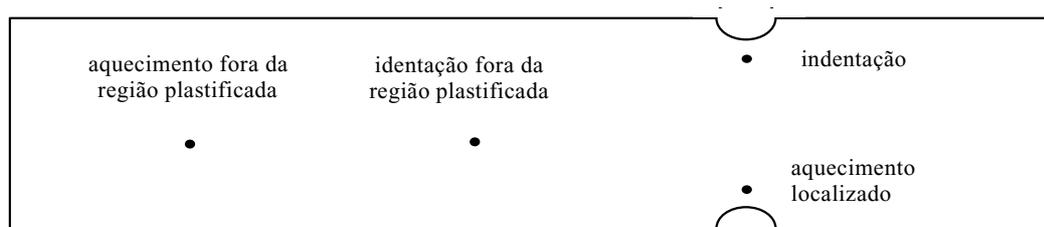


Figura 3-1: Esquema do corpo de prova utilizado e regiões de medição

O processo de indentação foi realizado nos dois casos com uma profundidade conhecida de 0,20 mm e indentador esférico de 2,50 mm. A profundidade de indentação foi controlada por intermédio de um relógio comparador, resolução 0,01 mm, para garantir a repetição dos ensaios. A Figura 3-2 mostra o sistema de indentação utilizado em conjunto com o interferômetro radial - MTRES.

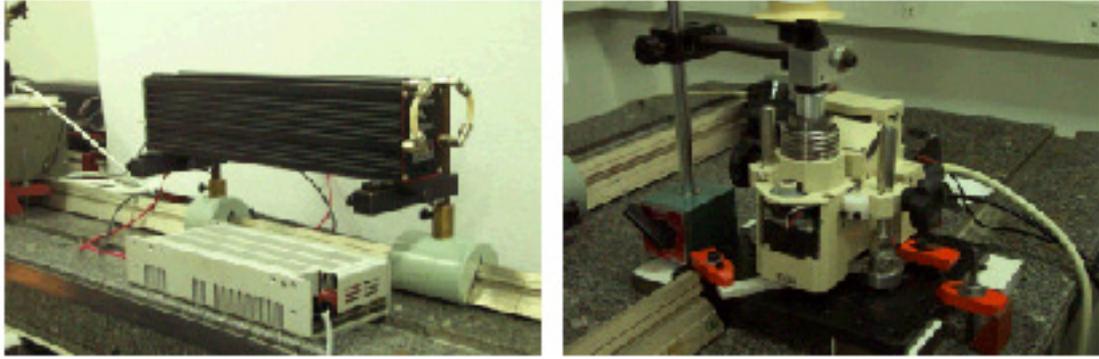


Figura 3-2: Sistema de indentação e interferômetro radial MTRES

O processo de alívio térmico foi realizado com um laser de CO<sub>2</sub>, potência de 10 W, por um período de 20 segundos, 50 % de potência e comprimento de onda  $\lambda = 10600$  nm. A região produzida de aquecimento foi dimensionada para um diâmetro de 1,6 mm<sup>[4]</sup>.

A densidade de potência foi de 258 W/cm<sup>2</sup>. A porcentagem de potência aplicada foi controlada conectando-se a saída da unidade de controle do laser, a um osciloscópio. O objetivo deste procedimento foi em garantir as mesmas condições de aplicações de energia sobre o material. A temperatura estimada para estas condições foi de 350 °C.

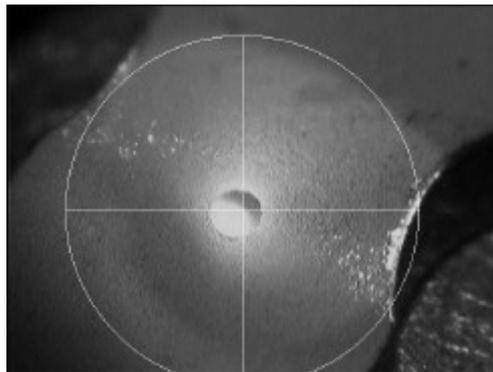
A Figura 3-3 mostra o sistema de aquecimento utilizado em conjunto com o interferômetro radial.



*Figura 3-3: Sistema de aquecimento pontual e interferômetro radial MTRES*

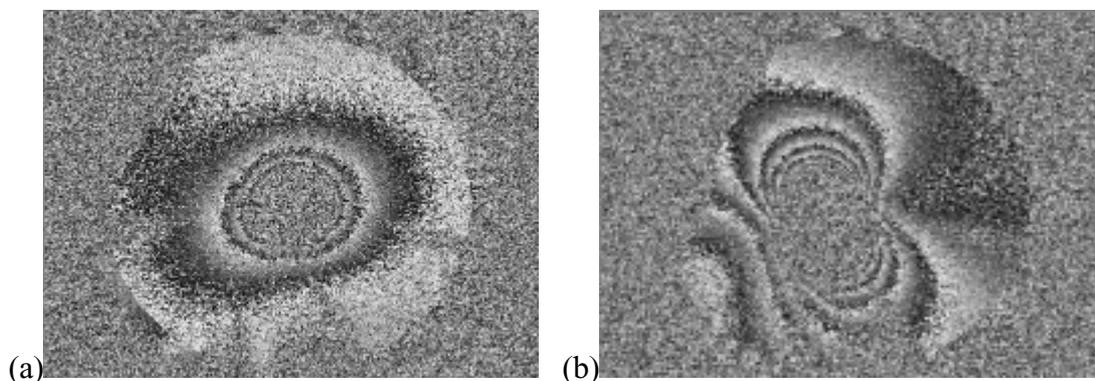
#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras a seguir. A Figura 4-1 apresenta a marca do indentador esférico deixado na peça, após o processo de indentação.



*Figura 4-1: Marca do indentador esférico após o processo de indentação.  
Profundidade:  $h = 0,20 \text{ mm}$*

A Figura 4-2 apresenta o mapa de fase do campo de deslocamento após a indentação.



*Figura 4-2: Mapas de fase do campo de deslocamento da indentação. (a) região sem tensão residual. (b) região com tensão residual (próxima à área plastificada).*

A Figura 4-3 apresenta o mapa de fase do campo de deslocamento 10 segundos após o aquecimento localizado.

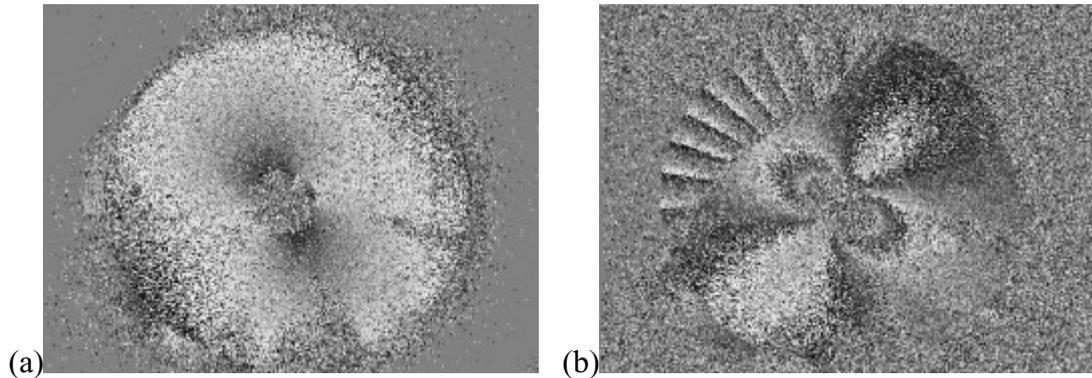


Figura 4-3: Mapas de fase do campo de deslocamento após 10 segundos do aquecimento localizado. (a) região sem tensão residual. (b) região com tensão residual (próxima à área plastificada).

## 5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Observa-se nas medidas próximas à região plastificada, Figura 4-2(b) e na Figura 4-3(b), que realmente existem tensões residuais no corpo de prova, podendo ser observadas por meio da holografia eletrônica. Naturalmente os resultados apresentados ainda não permitem quantificar o estado real de tensões na qual encontra-se o CDP, antes da indentação ou do aquecimento localizado. Entretanto, fica claro que, através da holografia eletrônica e as técnicas propostas, o sinal e a direção das tensões residuais podem ser visualmente identificados com facilidade. O sinal de medição está presente.

Ambas as técnicas de “alívio” de tensões apresentam-se promissoras e podem viabilizar a medição de tensões residuais. No momento estão sendo realizados estudos visando desenvolver um modelo matemático adequado com o qual seja possível quantificar o estado real de tensões do corpo. Em paralelo, está sendo desenvolvido um dispositivo para aplicação de um estado de tensões muito bem conhecido em corpos de prova, que será utilizado como referência para avaliar e calibrar o modelo que relaciona o campo de deslocamentos radiais na superfície provocado pela indentação e aquecimento localizado.

Com relação a indentação, está sendo construído um dispositivo que indente de forma controlada os corpos de prova por: (a) deslocamento conhecido, (b) com força conhecida e (c) com impulso conhecido. Ensaios deverão revelar qual a técnica de controle da indentação mais apropriada para fins de medição.

Com relação ao sistema de aquecimento, além dos modelos matemáticos apropriados, ainda falta implementar um meio que permita determinar, e manter dentro de níveis controlados, a temperatura atingida no CDP.

Este trabalho traz alguns exemplos que mostram o forte potencial de aplicação do interferômetro radial em combinação com as técnicas de “alívio” por indentação e por aquecimento localizado, o que abre caminho para o desenvolvimento de novos sistemas de medição de tensões residuais.

## AGRADECIMENTOS

Ao apoio dado pelas instituições: CT-PETRO, PADCT, CNPq/RHAE, CAPES e ao INPE / LIT - Brasil.

Pelo apoio financeiro ao doutorando Viotti, da “Multipurpose Optical Network” - Argentina, fundada pelo “The International Centre of Theoretical Physics” - Itália.

Ao doutorando Celso Luiz Nickel Veiga, M.Eng., ao aluno de iniciação científica Rodrigo Augusto Vidotto e ao técnico de laboratório Fabrício Luis Broering, todos da UFSC / Labmetro, pela preciosa ajuda no alinhamento ótico e na calibração do MTRES.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Andrews, E.W.; Giannakopoulos, A.E.; Plisson, E.; Suresh, A. - **"Analysis of the Impact of a Sharp Indenter"** - Elsevier Science Ltd., Journal of Solids and Structures, v.39, p.281-295, 2002
- [2] Albertazzi Jr, A.; Kanda, C; Borges, M. R.; Hrebabetzky, F. – **“A Radial in-Plane Interferometer for ESPI Measurement”** - International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, IMEKO/SPIE/SBM, Florianópolis, Brasil, Outubro, 1999.
- [3] Albertazzi Jr, A.; Kanda, C; Borges, M. R.; Hrebabetzky, F.; Pereira, M. – **“Residual Stresses Measurement using a Radial in-Plane Interferometer: Recent Advances and Perspectives”** – VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões, SAET 2000, Florianópolis, Brasil, Dezembro, 2000.
- [4] Coherent, Inc. Engineering Staff - **“Lasers: operation, equipment, application and design”** - Ed. Mc Graw Hill, USA, 1980.
- [5] Giannakopoulos, A.E.; Suresh, A. - **"Determination of Elastoplastic Properties by Instrumented Sharp Indentation"** - Elsevier Science Ltd., Scripta Materialia, v.40 n.10 p.21191-1198, 1999
- [6] Giannakopoulos, A.E.; Suresh, A. - **"Theory of Indentation of Piezoelectric Materials"** - Elsevier Science Ltd., Acta Materialia, v.47 n.7 p.2153-2164, 1997
- [7] Kobayashi, A.S. - **"Handbook on Experimental Mechanics"** - Prentice-Hall, SEM - Society for Experimental Mechanics, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1993.
- [8] Low, S.R. - **"Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials"** - NIST - National Institute of Standards and Technologies, Recommended Practice Guide, SP 960-5, Jan., 2001.
- [9] Lu, Jian - **"Handbook on Measurement of Residual Stresses"** - The Fairmont Press, SEM - Society for Experimental Mechanics, GA, USA, 1996.
- [10] Pechersky, M.J.; Miller, R.F.; Vikram, C.S. - **"Residual Stress Measurements with Laser Speckle Correlation Interferometry and Local Laser Heat Treating"** - Optical Engineering, v.34, n.10, pp 2964-2971, 1995.
- [11] Pechersky, M.J.; Estochen, E.G.; Vikram, C.S. - **“Enhanced measurement of residual stress by speckle correlation interferometry and local heat-treating for low stress levels”** - Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Atlanta, Georgia, July 22-26, 2001.
- [12] Rodacoski, M.R. - **"Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica"** - Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Outubro, 1997.