

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS POR INDENTAÇÃO  
ASSOCIADA À HOLOGRAFIA ELETRÔNICA**

*por:*

**RICARDO SUTERIO**

Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC,  
Florianópolis, SC, Brasil, para a obtenção do grau de  
**DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Florianópolis, 23 de março de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de Doutorado

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS POR INDENTAÇÃO ASSOCIADA À  
HOLOGRAFIA ELETRÔNICA**

**RICARDO SUTERIO**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

**DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Especialidade: Engenharia Mecânica / Metrologia e Instrumentação

Sendo aprovada em sua forma final.

Orientador:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC / SC

Coordenador do Curso:

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC / SC

**BANCA EXAMINADORA:**

Presidente:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC / SC

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro, Ph.D.  
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC / RJ

Prof. Marcos Roberto Rodacoski, Dr. Eng.  
Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET / UNICENP / PR

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Ph.D.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC / SC

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.  
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC / SC

*Pede ser que um dia deixemos de nos falar...  
Mas, enquanto houver amizade,  
Faremos as pazes de novo.*

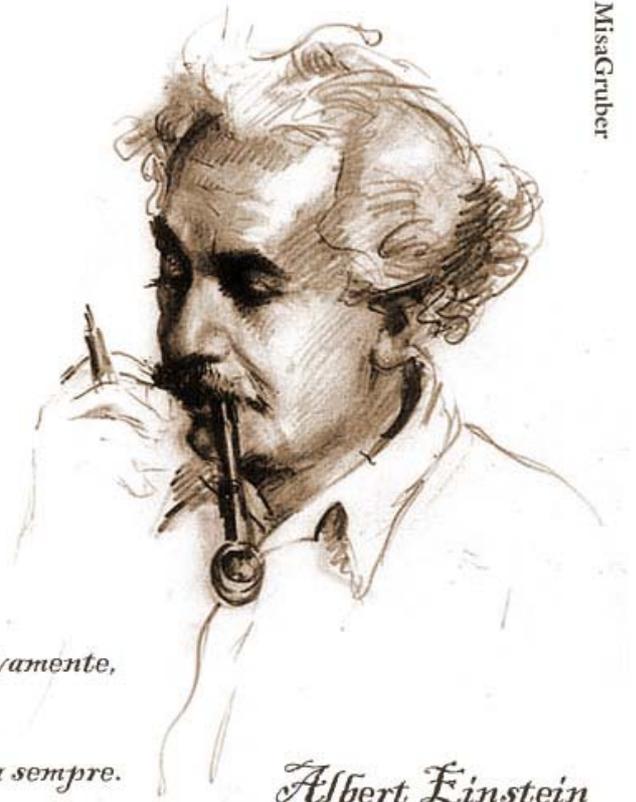
*Pede ser que um dia o tempo passe...  
Mas, se a amizade permanecer,  
Um do outro há de se lembrar.*

*Pede ser que um dia nos afastemos...  
Mas, se formos amigos de verdade,  
A amizade nos reaproximará.*

*Pede ser que um dia não mais existamos...  
Mas, se ainda sobrar amizade,  
Nasceremos de novo, um para o outro.*

*Pede ser que um dia tudo acabe...  
Mas, com a amizade construiremos tudo novamente,  
Cada vez de forma diferente,  
Sendo único e inesquecíveis cada momento  
Que juntos viveremos e nos lembraremos pra sempre.*

*Há duas formas para viver sua vida:  
Uma é acreditar que não existe milagre.  
A outra é acreditar que todas as coisas são um milagre.*



MisaGruber

*Albert Einstein*  
1879 • 1955

# Resumo

Este trabalho desenvolve e avalia um novo caminho para medir tensões residuais combinando a holografia eletrônica (*ESPI*- “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*”), e a indentação. Utilizando-se de um novo conceito de interferômetro, o interferômetro radial, torna-se possível medir o campo de deslocamentos radiais no plano da região de interesse. Ao invés de se produzir um alívio de tensões para quantificar as tensões residuais, o caminho da indução é utilizado, ou seja, são introduzidas deformações plásticas localizadas. O campo de deslocamentos radial resultante ao redor da indentação é medido e, através de um modelo apropriado, o estado de tensões residuais presente na região de interesse é quantificado.

O trabalho envolve o desenvolvimento da técnica, englobando o aparato experimental para simulação de tensões residuais, o aparato para aplicação da indentação de forma controlada, as formulações analítico-empíricas obtidas através de experimentos controlados e o programa de computador desenvolvido e usado para quantificar tensões residuais na superfície do material. Uma análise das incertezas envolvidas nos sistemas de medição e de simulação de tensões residuais é apresentada e avaliada.

**Palavras-chaves:** *tensões residuais, indentação, metrologia óptica, análise experimental de tensões, holografia eletrônica, ESPI, interferometria.*

# Abstract

This work develops a new way to measure residual stresses combining the electronic holography (ESPI- "Electronic Speckle Pattern Interferometry"), and the indentation method. Using a new concept of interferometer, the radial interferometer, it becomes possible to measure the radial in-plane displacement field in the region of interest. Instead of releasing the stress field to quantify residual stresses, new stresses are introduced through the indentation that produces a local plastic deformation. The radial displacement field around the indentation print is measured; fitted to an appropriate mathematic model and the state of residual stresses present in the material surface is quantified.

The work involves the development of the technique, including the experimental apparatus for residual stresses simulation, the apparatus for applying a well controlled indentation, the analytic-empirical formulation using controlled experiments, and the software to quantify residual surface stresses in material. An uncertainty analysis for the measurement system and the residual stresses simulation system is developed and evaluated.

**Key words:** *residual stress, indentation, optical metrology, experimental stress analyzes, electronic holography, ESPI, interferometry.*

# Publicações

- [1] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; AMARAL, F. K., PACHECO, A. - ***"Residual Stress Measurement Using Indentation and a Radial In-plane ESPI Interferometer"*** – Laser Metrology 2005, 8th International Symposium on Laser Metrology, Macro, Micro, and Nano-Technologies applied in Science, Engineering, and Industry, Merida, Mexico, 14-18 Feb., 2005.  
Artigo premiado: pelo **IMEKO**: *"FOR EXCELENT PAPER"*, e pelo **SPIE**: *"SECOND PRIZE – BEST STUDENT PAPER"*
- [2] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; AMARAL, F. K. - ***"Residual Stress Measurement Using Indentation and a Radial ESPI Interferometer – Recent Progress"*** – ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics, Politécnico di Bari, Italy, August 29th - 2nd September, 2004
- [3] VIOTTI, M. R.; SUTERIO, R; ALBERTAZZI JR., A. G.; KAUFMANN, G. H. – ***"Residual Stress Measurement Using a Radial In-Plane Speckle Interferometer and Laser Annealing: Preliminary Results"***- Optics and Lasers in Engineering, v. 42, n. 1, p. 71-84, July 2004.
- [4] ALBERTAZZI JR., A. G.; PEIXOTO FILHO, F. T.; SUTERIO, R; AMARAL, F. K. – ***"Evaluation of a Residual Stresses Measurement Device Combining a Radial In-Plane ESPI and the Blind Hole Drilling Method"*** – SPIE - The International Society for Optical Engineering, Europe International Symposium Photonics, Strasbourg, France, 26-30 April, 2004.
- [5] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; PACHECO, A.; FERREIRA, R. P. - ***"Análise Metrológica de um Dispositivo de Simulação de Tensões Residuais"*** - METROLOGIA 2003 - Congresso Internacional de Metrologia, SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, PB, 1 a 5 de setembro, 2003
- [6] PEIXOTO FILHO, F. T.; BIGARELLA, ALBERTAZZI JR., A. G.;SUTERIO, R. - ***"Desenvolvimento de um Dispositivo para Simulação de Tensões Residuais em Dutos"*** - METROLOGIA 2003 - Congresso Internacional de Metrologia, SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, PB, 1 a 5 de setembro, 2003

- [7] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; PEIXOTO FILHO, F. T.; PACHECO, A. - ***"Avaliação de um Simulador de Tensões Residuais"*** - 7o. Coteq - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos / VIII SAET - Seminário de Análise Experimental de Tensões, Florianópolis, SC, 9 a 12 de setembro, 2003.
- [8] VIOTTI, M. R.; SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; KAUFMANN, G. H. - ***"Residual Stress Measurement Using a Radial In-Plane Speckle Interferometer and Laser Annealing"*** - SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, Wolfgang Osten, Malgorzata Kujawinska, Katherine Creath; Eds., Munich, Germany, Proc. SPIE v. 5144, p. 571-577, 23-26 June, 2003.
- [9] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; CAVACO, M. A. M. - ***"Preliminary Evaluation: The Indentation Method Combined with a Radial Interferometer for Residual Stress Measurement"*** - SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, SEM - Society for Experimental Mechanics, Charlotte, North Carolina, USA, June 2-4, 2003.
- [10] SUTERIO, R.; VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; KAUFMANN, G. H. - ***"Avaliação Preliminar de Métodos Alternativos de Medição de Tensões Residuais por Indentação e por Aquecimento Localizado, combinados à Holografia Eletrônica"*** - 6o. Coteq - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos / VII SAET - Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Salvador – BA, 19 a 21 de agosto, 2002.

*Dedico este trabalho para as mulheres da minha vida:  
minha esposa Elaine e minhas filhas Dalila e Natália.*

# Agradecimentos

A *DEUS* pela oportunidade de realizar este trabalho com dedicação, discernimento e humildade para compreender que o conhecimento é uma fonte inesgotável do saber e entender que conhecimento que não se divide, abafa o talento.

Ao INPE / LIT – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Laboratório de Integração e Testes pela a oportunidade de realizar um programa externo de doutorado.

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar uma valiosa infra-estrutura e corpo docente de excelência.

Aos patrocinadores do projeto: em especial o programa CTPETRO que através da FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos do MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia deu todo o suporte financeiro desde a concepção, projeto, fabricação até a aquisição de equipamentos e instrumentos necessários para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais, Osvaldo e Olézia que sempre acreditaram em mim, todo meu carinho, amor e respeito.

À Elaine, esposa, sempre presente nas minhas principais conquistas, companheira, mãe dedicada e paciente nas horas difíceis.

À Dalila e Natália, filhas adoráveis e razão do meu viver. Estivemos sempre juntos nesta caminhada.

A todos os familiares e amigos que sempre torceram pelo sucesso desta conquista. Em especial a família Gianini.

Aos colegas do Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização, que juntos unidos por um mesmo objetivo, apoiaram e incentivaram a realização deste trabalho.

A todos alunos de iniciação científica, mestrandos, dotourandos e profissionais que trabalharam no projeto, pois sem suas valiosas contribuições, transpiração e dedicação, não seria possível alcançar os resultados desejados, em especial: Felipe Kleber Amaral, Anderson Pacheco, Matías Viotti, Flávio Tito, Felipe Engelkes, Prof. Gustavo

Donatelli, Rafael Peixoto, Tiago Bigarela, Daniel Willemann, Milton Pereira, César Kanda, dentre outros.

Aos professores e colaboradores do Labmetro, da Fundação CERTI e do GRANTE. Em especial: Rosana, Olga, Danilo, Fabrício, Prof. Fancello, Prof. Paulo de Tarso, dentre outros.

Em especial ao Orientador e Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr., pelo apoio, dedicação, incentivo e amizade, durante todos estes anos de convívio e respeito.

Ao Professor Carlos Alberto Schneider pelas horas dedicadas em reuniões e discussões metrológicas, repassando muito de sua experiência profissional e gerencial.

Aos grandes amigos formados neste período, em especial: Tiago Leite Rolim, Maurício Lobão, Luiz Francisco Marcon Ribeiro, José Ricardo de Menezes, Alex Dal Pont, Gustavo Puchalski.

Aos grandes vizinhos e amigos que deram todo apoio à nossa família neste período em Florianópolis: Paulo e Delfina, Jorge e Marli, Escovar e Berenice.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

# Prefácio

O sonho de se tornar um Doutor: na época de estudante parecia um sonho impossível, onde imaginava “grandes gênios e malucos” e eu não me encaixava nos pré-requisitos, mas era uma idéia adorável. Talvez um status de vida, não sei dizer. Mas com o passar dos anos parecia ser um objetivo natural, não simples, mas certamente viável para qualquer um que tenha paciência e dedicação.

Já trabalhava no Inpe desde 1982 quando da formação no curso técnico mecânico na ETEP e estudava a noite no curso de engenharia industrial mecânica da Universidade Braz Cubas. Após quase dez anos de formado e trabalhando há oito com metrologia, especificamente nas áreas de calibração, instrumentação e ensaios (vibração, vácuo, temperatura e umidade), resolvi voltar estudar e buscar um sonho que talvez estava adormecido há muito tempo.

Como voltar a estudar e onde estudar? Pergunta que na época era difícil de ser respondida. Após muita pesquisa, tinha uma certeza: a de continuar na área de metrologia. Daí em diante, escolher a UFSC foi um processo natural. Próxima etapa era conseguir entrar numa universidade tão conceituada e concorrida. Mas felizmente tudo conspirou para o meu sucesso.

Escolher trabalhar com o Professor Armando foi a princípio somente à vontade de trabalhar em uma área diferente na qual estava acostumado. Depois de certo tempo, percebi que foi a decisão mais acertada da minha vida. Pessoa séria e dedicada, paciente e formadora do conhecimento, amigo e profissional. Um orientador no bom sentido da palavra, capaz de fazer com que os alunos atinjam o grau de conhecimento necessário para trabalhar e ajudar na continuidade das suas linhas de pesquisas.

Foram dois anos de mestrado, que pessoalmente considero o maior ganho tanto em conhecimento quanto profissional. Mais dois anos de retorno ao INPE onde continuei meu trabalho desenvolvendo toda a documentação para que o laboratório fosse acreditado junto ao INMETRO. Depois, mais quatro anos no doutorado, onde somados, são praticamente oito anos de Florianópolis. Uma vida e uma certeza, cidade ideal para

se morar e criar os filhos. Se possível fosse, ficaria por aqui, vivendo nesta terra adorável e trabalhando com pessoas impares no que faz. Uma excelente condição de contorno...

Os meus agradecimentos neste trabalho, são os mais sinceros, pois neste período, tanto eu quanto minha família, fomos felizes!

Já no mestrado, ouvi duas frases que me chamaram muita atenção: A primeira foi na época da defesa de seu doutorado, hoje professor da UNICENP / PR, o Prof. Marcos Rodacoski, disse: *“Uma Tese de Doutorado nunca se termina, ela deve ser interrompida, se não nunca chegaríamos no dia da defesa. Pois novidades e novos caminhos para a solução de um problema, aparecem sempre...”*. Esta frase, representa muito bem o que hoje está acontecendo comigo. No ápice da pesquisa, onde sucessos consecutivos começam a aparecer, chega a hora de colocar um ponto final, espero que temporário, para o dia da defesa. A segunda frase, veio de Aristóteles 384-322 a.C., que diz: *“Excelência é uma habilidade conquistada através de treinamento e prática. Nós somos aquilo que fazemos repetidamente. Excelência então, não é um ato, mas um hábito”*. Durante todos estes anos trabalhando em um assunto, anteriormente completamente novo para mim, posso dizer que aprendi pelo menos uma molécula do conhecimento.

Agradeço a *DEUS* este momento da minha vida e espero que este trabalho possa contribuir com outros que certamente virão...

**RICARDO SUTERIO**

Florianópolis, 23 de março de 2005

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Publicações</b>	<b>vi</b>
<b>Prefácio</b>	<b>xi</b>
<b>Sumário</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxv</b>

## Capítulo 1

<b>Contextualização do Problema</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Motivação e Justificativas .....	3
1.2.1 Extensometria.....	3
1.2.2 Medição de tensões residuais com extensometria.....	4
1.2.3 Indentação.....	5
1.3 Objetivos do Trabalho.....	5
1.4 Estrutura do Trabalho.....	6

## Capítulo 2

<b>Tensões Residuais</b>	<b>7</b>
2.1 Tipos de Tensões Residuais .....	8
2.2 Efeitos das Tensões Residuais.....	9
2.3 Medição de Tensões Residuais .....	9
2.4 Método do Furo .....	16

**Capítulo 3**

<b>A Indentação</b>	<b>17</b>
3.1 O Estado da Arte.....	17
3.2 Base Teórica da Indentação .....	20
3.2.1 A Técnica do Deslocamento.....	20
3.2.2 A Técnica da Energia.....	21
3.2.3 A Técnica da Força Pontual .....	22
3.3 Medição de Tensões Residuais por Indentação .....	24

**Capítulo 4**

<b>Holografia Eletrônica</b>	<b>29</b>
4.1 Princípios da Holografia Eletrônica.....	29
4.1.1 O Speckle.....	30
4.1.2 A Formação das Franjas.....	31
4.1.3 Deslocamento de Fase ou " <i>Phase Shifting</i> " .....	32
4.1.4 Quantificação do Deslocamento .....	33
4.2 Princípios da Interferometria Radial.....	34

**Capítulo 5**

<b>O Sistema de Medição</b>	<b>37</b>
5.1 O Sistema de Medição de Tensões Residuais .....	37
5.1.1 O Sistema de Indentação.....	40
5.2 O Corpo de Prova .....	43
5.2.1 Material Ensaiado .....	44
5.3 O Dispositivo de Simulação de Tensões Residuais.....	45
5.3.1 Fatores de Influência na Medição de Deformação .....	47
5.4 Planejamento dos Ensaios Experimentais .....	48
5.5 Procedimento de Medição .....	49

**Capítulo 6**

<b>Modelo Matemático</b>	<b>51</b>
6.1 Mecânica do Processo de Indentação .....	51
6.2 Formulação do Método do Furo.....	54
6.2.1 Furo Passante .....	55
6.2.2 Furo Cego.....	57

6.3	Modelo Analítico Aproximado para a Indentação .....	58
6.4	Determinação da Direção Principal das Tensões e dos Parâmetros Matemáticos .....	62
6.4.1	Modelo para Regressão Linear.....	62
6.5	Software de Análise .....	64
6.5.1	Configurações Iniciais e Região de Análise .....	65

## Capítulo 7

	<b>Ensaaios de Avaliação</b> .....	<b>68</b>
7.1	Identificação dos Modelos Matemáticos de Cálculos.....	68
7.2	Medidas em Material Livre de Tensões residuais.....	69
7.3	Medidas em Material com Tensões residuais Controlada .....	71
7.4	Resultados com Indentador Cônico em Aço.....	74
7.4.1	Modelo: “ <i>Set_Indent</i> ” .....	74
7.4.2	Modelos: “ <i>Set_02Par</i> ” e “ <i>Set_03Par</i> ” .....	74
7.4.3	Modelos: “ <i>Set_02Par_Indent</i> ” e “ <i>Set_03Par_Indent</i> ” .....	78
7.5	Resultados com Indentador Esférico em Aço.....	82
7.5.1	Modelo: “ <i>Set_Indent</i> ” .....	82
7.5.2	Modelos: “ <i>Set_02Par</i> ” e “ <i>Set_03Par</i> ” .....	82
7.5.3	Modelos: “ <i>Set_02Par_Indent</i> ” e “ <i>Set_03Par_Indent</i> ” .....	85
7.6	Análise dos Resultados em Aço .....	89
7.6.1	Determinação das Tensões Residuais.....	91
7.6.2	Resumo dos Resultados Obtidos em Aço .....	94
7.7	Resultados e Análise em Alumínio .....	95

## Capítulo 8

	<b>Análise de Incertezas</b> .....	<b>99</b>
8.1	Fontes de Incertezas na Medição de Tensões Residuais.....	100
8.1.1	Fontes de Incertezas da Tensão de Referência .....	102
8.1.2	Fontes de Incertezas do Sistema de Medição.....	102
8.2	Análise Metrológica .....	103

**Capítulo 9**

<b>Conclusões</b>	<b>108</b>
-------------------	------------

<b>Referências</b>	<b>114</b>
--------------------	------------

**Apêndice A**

<b>Conceitos Básicos do Comportamento dos Materiais</b>	<b>122</b>
---	------------

A.1 Relações Elásticas Tensão-Deformação para um Estado Bidimensional .....	122
A.2 Plasticidade .....	124
A.3 Dureza .....	125

**Apêndice B**

<b>Propriedades Mecânicas dos Materiais Ensaados</b>	<b>129</b>
--	------------

**Apêndice C**

<b>Modelamento Numérico do Processo de Indentação Esférica sobre um Material Elasto-Plástico Ideal.</b>	<b>132</b>
---	------------

C.1 Descrição do Modelo.....	132
C.2 Propriedades e Dimensões usadas no Modelo .....	132
C.3 Malha de Descritização.....	133
C.4 Simulações.....	133
C.4.1 Caso 1: Material Indentado sem Tensões Residuais .....	133
C.4.2 Caso 2: Material Indentado com Tensões Residuais.....	134
C.4.3 Caso 0: Material apenas com tensões residuais.....	134
C.5 Resultados .....	135

**Apêndice D**

<b>Regressão Linear e Incertezas para Ajuste de Modelos pelo Método dos Mínimos Quadrados</b>	<b>137</b>
---	------------

D.1 Modelos de Ajuste de Regressão .....	137
D.2 Modelo de Regressão Linear.....	137
D.3 Estimativa dos Parâmetros de Regressão Linear .....	138

D.3.1 Estimativa da Variância do Modelo de Regressão Linear.....	139
D.3.2 Estimativa da Incerteza do Modelo de Regressão Linear .....	140
D.3.3 Estimativa da Incerteza dos Coeficientes de Regressão.....	140

**Apêndice E**

<b>Fotos: Aplicação em Campo</b>	<b>141</b>
----------------------------------	------------

# Lista de Figuras

Figura 1.1	O Sino da Liberdade.....	3
Figura 2.1	Esquema do comportamento das tensões residuais nas proximidades de união por soldagem de chapas <sup>[73]</sup> .....	8
Figura 3.1	Curva P-h de carregamento e descarregamento.....	20
Figura 3.2	Distribuição de forças no contorno de um entalhe semi-circular em um sólido semi-infinito.....	22
Figura 3.3	Processo de indentação e resultado causado por uma indentação superficial <sup>[1]</sup> .....	25
Figura 3.4	Representa�o esquemática de acúmulo de material (“piling-up”), e de afastamento de material (“sink-in”), em torno de um indentador.....	27
Figura 3.5	Método da indentação para determina�o de tensões residuais pela análise da curva carga-profundidade.....	27
Figura 3.6	Representa�o esquemática da característica de rela�o tensão-deforma�o para cada curva carga-deslocamento de indenta�o para alguns materiais idealizados.....	28
Figura 4.1	Configura�o esquemática do princípio da holografia eletrônica.....	30
Figura 4.2	O “speckle” sobre uma superfície rugosa <sup>[101]</sup> .....	31
Figura 4.3	Mapa de fases originados por ESPI.....	33
Figura 4.4	Configura�o básica para obter-se sensibilidade radial no plano.....	35
Figura 4.5	Realiza�o prática do interfer�metro radial.....	36
Figura 5.1	Vers�es anteriores dos sistemas de medi�o de tens�es residuais e de tens�es mec�nicas.....	38
Figura 5.2	MTRES Modular ou M2TRES - Dispositivo para medi�o de tens�es mec�nicas e tens�es residuais por holografia eletr�nica.....	38
Figura 5.3	Cabeçote de medi�o.....	39
Figura 5.4	Base universal.....	40
Figura 5.5	Módulos para medi�o de tensões residuais.....	40
Figura 5.6	Protótipo estudado para aplica�o de carga de indenta�o.....	41
Figura 5.7	Sistema de aplica�o de carga de indenta�o por impacto.....	42

Figura 5.8	Esquema do corpo de prova. Configuração e identificação de instalação dos extensômetros. ....	43
Figura 5.9	Sistema de medição de deformação dos extensômetros instalados nos corpos de prova. ....	44
Figura 5.10	Dispositivo de simulação de tensões residuais 1-D. ....	46
Figura 5.11	Ajuste e nivelamento do corpo de prova com calços ajustáveis e atual procedimento de zeragem dos extensômetros do corpo de prova ....	46
Figura 5.12	Procedimento de medição de tensões residuais por indentação.....	50
Figura 6.1	Simulação numérica por elementos finitos (FEM). ....	52
Figura 6.2	Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica após indentação cônica em um material de aço ABNT 1020. ....	53
Figura 6.3	Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica após indentação esférica em um material de aço ABNT 1020.....	54
Figura 6.4	Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica e o método do furo. ....	55
Figura 6.5	Gráfico do campo de deslocamentos radiais na superfície do material em função do raio de afastamento de uma indentação cônica de 120°, em um aço AISI 1020 livre de tensões residuais. ....	61
Figura 6.6	Software de medição desenvolvido. ....	65
Figura 6.7	Configurações iniciais ....	66
Figura 6.8	Área de Processamento da análise, círculo de amostragem e direção das tensões principais. ....	67
Figura 7.1	Gráfico de medição do diâmetro da marca da indentação em função de diferentes tipos de indentadores cônicos e da posição da mola do indentador.....	70
Figura 7.2	Indentação em aço com ponta cônica 120°. Material livre de tensões residuais.....	70
Figura 7.3	Indentação em aço com ponta esférica $\phi$ 2,5 mm. Material livre de tensões residuais. ....	71
Figura 7.4	Imagens obtidas da indentação cônica em função das tensões residuais.....	72
Figura 7.5	Imagens obtidas da indentação esférica em função das tensões residuais.....	72
Figura 7.6	Diferença entre o campo de deslocamento do material com tensão e o campo de deslocamento do material livre de tensões residuais para indentação cônica ....	73

Figura 7.7	Diferença entre o campo de deslocamento do material com tensão e o campo de deslocamento do material livre de tensões residuais para indentação esférica .....	73
Figura 7.8	Gráfico dos parâmetros $K_1$ e $K_2$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_02Par” (indentador cônico em aço) .....	75
Figura 7.9	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ e $K_3$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_03Par”(indentador cônico em aço) .....	77
Figura 7.10	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ e $K_4$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_02Par_Indent” (indentador cônico em aço).....	79
Figura 7.11	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ e $K_4$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_03Par_Indent” (indentador cônico em aço).....	81
Figura 7.12	Gráfico dos parâmetros $K_1$ e $K_2$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_02Par” (indentador esférico em aço) .....	83
Figura 7.13	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ e $K_3$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_03Par” (indentador esférico em aço).....	85
Figura 7.14	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ e $K_4$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_02Par_Indent” (indentador esférico em aço) .....	86
Figura 7.15	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ e $K_4$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: Set_03Par_Indent (indentador esférico em Aço).....	88
Figura 7.16	Imagens obtidas de indentação esférica em função das tensões residuais simuladas para corpo de prova de alumínio. ....	95
Figura 7.17	Gráfico dos parâmetros $K_1$ , $K_2$ e $K_4$ em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set_02Par_Indent” (indentador esférico em alumínio).....	97
Figura 8.1	Principais fontes de incertezas na medição de tensões residuais. ....	100
Figura 8.2	Imagem obtida de ensaio e imagem simulada a partir de $K_1$ , $K_2$ e $K_4$ . ....	103
Figura 8.3	Contribuição das incertezas de entrada na determinação das tensões residuais. Modelo: Set_02Par_Indent, indentador esférico em aço. ....	105

Figura 8.4	Contribuição das incertezas na determinação das tensões residuais. Modelo: Set_02Par_Indent, indentador: Esférico em Aço. ....	106
Figura A.1	Diagrama tensão-deformação .....	123
Figura A.2	Curvas tensão-deformação uniaxial, representando o comportamento idealizado para materiais dúcteis.....	125
Figura A.3	Comparação de escalas de durezas <sup>[16]</sup> .....	128
Figura B.1	Especificação técnica do Aço AISI 1020, recosido – MatWeb-2005 <sup>[62]</sup> .....	130
Figura B.2	Especificação técnica do Alumínio 1100-H18 – MatWeb-2005 <sup>[62]</sup> . ....	131
Figura C.3	Malha construída para a análise.....	133
Figura C.4	Campo de deslocamentos radiais (vista em perspectiva). ....	134
Figura C.5	Gráfico de deslocamentos radiais no plano da face de indentação sem tensões residuais. ....	134
Figura C.6	Gráfico comparativo dos deslocamentos radiais na direção “x” do plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa. ....	135
Figura C.7	Gráfico comparativo dos deslocamentos radiais na direção “y” do plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa. ....	136
Figura C.8	Gráfico da razão de deslocamentos radiais ( $U_{ry} / U_{rx}$ ) no plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa.....	136
Figura E.1	Módulo de Medição de Tensões Residuais Labmetro / UFSC - Roseta Óptica e detalhes de fixação.....	141
Figura E.2	Módulo de Medição de Tensões Residuais Labmetro / UFSC - Detalhe do módulo de furação.....	141
Figura E.3	Módulo de indentação – detalhes do indentador .....	141
Figura E.4	Módulo de indentação sobre a superfície de medição .....	141
Figura E.5	Área de medição. Superfície iluminada.....	142
Figura E.6	Detalhe do furo. ....	142
Figura E.7	Detalhe da indentação cônica 120° .....	142
Figura E.8	Detalhes de instalação de “strain gages” para utilização do método do furo .....	142
Figura E.9	Vista do sistema de medição óptico (MTRES Modular) e o sistema de medição por “strain gages” (RS200) .....	142
Figura E.10	Sistema de medição apresentado em feira de tecnologia .....	142
Figura E.11	Sistema de simulação de tensões residuais. Detalhe da aplicação de carga no corpo de prova.....	143
Figura E.12	Medição em laboratório com o MTRES Modular. ....	143

Figura E.13 Medição em laboratório com MTRES Modular em bloco de motor .....143

Figura E.14 Medição em campo do MTRES Modular em dutos .....143

Figura E.15 Medição em campo com o MTRES Modular. Detalhe da medição de  
tensões residuais em dutos .....143

Figura E.16 Medição em campo com o MTRES Modular. Detalhe do sistema de  
aquisição de imagens.....143

# Lista de Tabelas

Tabela 2-1	Principais métodos de medição de tensões residuais <sup>[24],[102],[103]</sup> .....	10
Tabela 2-2	Comparação geral de diferentes técnicas de medição de tensões residuais <sup>[55]</sup> .....	11
Tabela 2-3	Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais considerando os problemas do material e os problemas geométricos da região a ser analisada <sup>[55]</sup> . .....	12
Tabela 2-4	Aplicabilidade de cada técnica de medição de tensões residuais para materiais freqüentemente encontrados na indústria <sup>[55]</sup> .....	13
Tabela 3-1	Aplicação da técnica de indentação. ....	19
Tabela 5.1	Identificação dos corpos de provas ensaiados, material, propriedades mecânicas e nível de carregamento dos ensaios. ....	45
Tabela 5.2	Fontes de incerteza na medição com extensômetros .....	47
Tabela 5.3	Planejamento dos experimentos para a validação do modelo. ....	49
Tabela 6.1	Coeficientes adimensionais de correção de análise de elementos finitos do furo cego para medidas de tensões residuais em função do deslocamento radial, segundo MAKINO & NELSON - 1994 <sup>[58]</sup> .....	58
Tabela 7.1	Identificação dos modelos matemáticos utilizados .....	68
Tabela 7.2	Medidas do diâmetro da marca de indentação cônica em função da força de impacto.....	69
Tabela 7.3	Parâmetros médios calculados do material livre de tensões residuais para indentador cônico em aço (“Set_Indent”) .....	74
Tabela 7.4	Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set_02Par”) .....	75
Tabela 7.5	Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set_03Par”) .....	76
Tabela 7.6	Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set_02Par_Indent”).....	78
Tabela 7.7	Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set_03Par_Indent”).....	80

Tabela 7.8	Parâmetros médios calculados de material sem tensões residuais para indentador esférico em aço (“Set_Indent”) .....	82
Tabela 7.9	Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set_02Par”) .....	83
Tabela 7.10	Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set_03Par”) .....	84
Tabela 7.11	Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set_02Par_Indent”).....	86
Tabela 7.12	Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set_03Par_Indent”).....	87
Tabela 7.13	Coefficientes de interpolação dos parâmetros avaliados pelos modelos “Set_02Par” e ”Set_03Par”, indentadores cônico e esférico para o aço. ....	89
Tabela 7.14	Coefficientes de interpolação dos parâmetros estudados pelos modelos “Set_02Par_Indent” e ”Set_03Par_Indent”, indentadores cônico e esférico para o aço. ....	91
Tabela 7.15	Valores de tensão calculados para o indentador cônico em aço “Set_02Par” .....	93
Tabela 7.16	Valores de tensão calculados para o indentador esférico em aço “Set_02Par” .....	93
Tabela 7.17	Valores de tensão calculados para o indentador cônico em aço “Set_02Par_Indent” .....	94
Tabela 7.18	Valores de tensão calculados para o indentador esférico em aço “Set_02Par_Indent” .....	94
Tabela 7.19	Resumo das funções encontradas para o aço em termos do tipo do indentador e dos modelos utilizados.....	95
Tabela 7.20	Parâmetros médios calculados para indentador esférico em alumínio (“Set_02Par_Indent”).....	96
Tabela 7.21	Coefficientes de interpolação dos parâmetros analisados em função das tensões principais, indentação esférica em alumínio. Método: “Set_02Par_Indent” .....	98
Tabela 8.1	Balanço de incerteza do sistema de medição de tensões residuais por indentação em aço e indentador esférico.....	104
Tabela A-1	Estado plano de tensão e estado plano de deformação no regime elástico. ....	123
Tabela A-2	Ensaio de Dureza (CALLISTER JR.-1997) <sup>[16]</sup> .....	127

# Lista de Símbolos

$\vec{p}$	Vetor sensibilidade.
$\vec{d}$	Vetor deslocamento.
$OF$	Ordem de franja.
$\alpha$	Constante característica do indentedor e do material.
$\beta$	Ângulo da direção principal de tensão [°] ou parâmetros calculados pelo método dos mínimos quadrados.
$\gamma$	Ângulo entre o eixo do espelho cônico e sua superfície em qualquer secção transversal.
$\theta$	Ângulo em coordenada polar de qualquer dos pontos de deslocamento medidos na região circular de medição ou diferença de fase.
$\theta_{(x,y)}$	Diferença de fase entre os feixes $A$ e $B$ no ponto $(x,y)$ , ou seja: $\theta_{(x,y)} = \theta_A - \theta_B$
$(r, \theta)$	Coordenadas polares.
$\sigma$	Tensão uniaxial [MPa].
$\varepsilon$	Deformação uniaxial [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ].
$\sigma_{ref}$	Tensão de referência, obtida através de carregamento uniaxial [MPa].
$\varepsilon_{ref}$	Deformação média de referência. [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ].
$\sigma_{\theta}$	Tensão tangencial.
$\varepsilon_{\theta}$	Deformação tangencial.
$\sigma_r$	Tensão radial.
$\varepsilon_r$	Deformação radial.
$\sigma_{res}$	Tensões residuais do material ensaiado.
$\sigma_y$	Tensão de escoamento.
$\tau_{r\theta}$	Tensão cisalhante.
$\gamma_{r\theta}$	Deformação angular.
$I_{(x,y)}$	Intensidade do padrão de “speckle” resultante.
$\lambda$	Comprimento de onda do laser [ $\mu\text{m}$ ].
$\Delta\phi$	Varição de fase entre os estados do objeto deformado e em repouso.
$A_0$	Área projetada da indentação.

$A_{max}$	Área máxima de contato.
$C$	Constante que depende da geometria do indentador ou curvatura de indentação.
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young [GPa].
$G$	Módulo de elasticidade transversal ou módulo de torção [GPa].
$\nu$	Coefficiente de Poisson.
$H$	Dureza do material.
$h$	Profundidade da indentação.
$h_{max}$	Profundidade máxima da indentação.
$h_r$	Profundidade residual da indentação.
$K$	Coefficiente de resistência plástico.
$n$	Coefficiente de encruamento ou número de medidas repetidas realizadas no material numa mesma condição de carregamento.
$K_1, K_2, K_3$	Constantes de indentação a determinar.
$K_4$	Constante da carga aplicada de indentação.
$P$	Carga de indentação.
$P_{max}$	Carga máxima de indentação.
$P_{res}$	Carga residual de indentação entre o material com tensões residuais existente e o material livre de tensões residuais.
$r$	Raio.
$r_0$	Raio do furo.
$T(\theta)$	Função de $\theta$ que representa os deslocamentos de corpo rígido dos pontos medidos
$u$	Deslocamento na direção longitudinal ou radial
$v$	Deslocamento na direção transversal ou tangencial
$W_e$	Trabalho elástico de indentação.
$W_p$	Trabalho plástico de indentação.
$W_t$	Trabalho total de indentação.
$x1$ a $x25$	Identificação das fontes de incertezas

# Capítulo 1

## Contextualização do Problema

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 elevadas.

A medição das solicitações externas e internas, tensões que agem em estruturas e componentes é uma operação de grande importância para o correto gerenciamento e análise de riscos<sup>[50],[55]</sup>.

Muitas falhas estruturais ou de componentes mecânicos ocorrem não apenas pelo elevado nível de tensões devido ao carregamento de serviço, mas da combinação destas com as tensões residuais, que freqüentemente se formam durante operações de fabricação como: fundição, laminação, soldagem, estampagem ou forjamento. Então, medir tensões residuais é importante para:

- ✓ monitorar a confiabilidade operacional de estruturas e componente mecânicos;
- ✓ analisar riscos;
- ✓ avaliar a reabilitação e o desempenho de novas técnicas de projeto, construção e montagem.

A determinação das tensões residuais por métodos analíticos e numéricos é muito difícil por exigir o conhecimento de toda a história de carregamento do material. Esta informação raramente é conhecida com o rigor necessário.

Vários métodos de medição 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 provocam sobre o material, normalmente feita por meio de extensômetros de resistência (“*strain*

gages”)<sup>[25],[50]</sup>.

Neste trabalho, investiga-se uma forma alternativa para a determinação de tensões residuais em superfícies. Ao invés do uso de técnica de alívio, pretende-se utilizar uma técnica de indução de tensão, através da indentação aplicada na superfície de um corpo, medindo-se o campo radial de deslocamentos superficial por meio de um interferômetro que utiliza a holografia eletrônica.

## 1.1 Antecedentes

Existe hoje em andamento na UFSC um projeto denominado TENDUTO: Sistemas Ópticos para Medição de Tensões em Dutos, financiado pelo CTPETRO - Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor Petróleo e Gás Natural, através da FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos. Este projeto visa desenvolver meios para aumentar a confiabilidade operacional, monitorar a integridade e efetuar a análise de risco de dutos metálicos e de materiais compostos, através da medição dos níveis de tensões mecânicas de serviço, tensões residuais e tensões combinadas presentes.

Neste projeto estão sendo desenvolvidos dois novos sistemas: um para medição de tensões de serviço e outro para medição de tensões combinadas (tensões residuais somadas às tensões de serviço). São sistemas baseados num novo tipo de interferômetro radial completamente inédito no cenário mundial. Possuem um grande potencial, tanto do ponto de vista de desempenho metrológico, quanto do ponto de vista prático e operacional, para substituir com vantagens os atuais sistemas baseados em extensometria. Permitirão que medições sejam efetuadas em 10% do tempo tipicamente usado com extensometria, e sem gasto de materiais de consumo<sup>[6],[9],[101]</sup>.

Os objetivos principais do referido projeto são os seguintes:

- ✓ Desenvolver, construir e validar um sistema denominado “Roseta Óptica”. Este sistema será baseado em um novo tipo de interferômetro com sensibilidade radial, com o objetivo de medir em campo, de forma rápida e prática, o estado de tensões mecânicas em corpos, juntas e conexões de dutos metálicos e de materiais compostos, bem como nas suas estruturas de fixação<sup>[101]</sup>.
- ✓ Desenvolver e validar uma técnica para medição de tensões residuais em materiais metálicos usando o método da indentação combinada com o interferômetro radial (objeto deste trabalho).

- ✓ Desenvolver, construir e validar um dispositivo portátil para medição de tensões residuais em campo usando a técnica desenvolvida que combina a indentação com o interferômetro radial.

## 1.2 Motivação e Justificativas

Na literatura encontram-se vários estudos sobre a presença de tensões residuais em componentes metálicos. Um exemplo clássico e bem documentado da presença maléfica das tensões residuais é a do “*Sino da Liberdade*” - figura 1.1.



*Figura 1.1 O Sino da Liberdade*

O “*Sino da Liberdade*” está localizado na Filadélfia, Pensilvânia (EUA). Sua massa é de aproximadamente 9.000 kg e trincou na primeira vez em que foi tocado em 1753. Foi retrabalhado e vezes nova trinca foi reportada em 1828<sup>[50]</sup>. Várias ações foram realizadas para evitar o crescimento da trinca, no entanto todas as ações foram mal sucedidas e a trinca continuou crescendo. A causa da trinca foi devido à presença de tensões residuais originadas do processo de fundição. Após nova tentativa frustrada de controle da trinca em 1846, com o passar do tempo, o sino foi retirado de serviço, estando atualmente em exposição no “*Independence Hall*”.

### 1.2.1 Extensometria

A técnica mais empregada para a medição de tensões de serviço é a

extensometria. Basicamente utiliza-se de extensômetros de resistência elétrica conhecidos como “*strain gages*”, para medição de deformações superficiais<sup>[25],[50]</sup>. Após cerca de 60 anos de uso, a extensometria é uma técnica consolidada e largamente utilizada nos meios acadêmico, científico e industrial. Porém, a sua confiabilidade depende fortemente das habilidades manuais do seu executor. A instalação do extensômetro na peça a medir, não é trivial: a superfície deve ser preparada (lixada, limpada e marcada), o extensômetro deve ser cuidadosamente alinhado, colado e eletricamente conectado a uma ponte amplificadora. Uma vez instalado, um extensômetro não pode ser reutilizado em outro local.

A informação obtida de um extensômetro é localizada e parcial. O sinal indicado corresponde ao valor médio das deformações que agem na direção do eixo do extensômetro. Para a plena caracterização do estado de tensões, é necessário o uso de uma roseta - um conjunto formado por pelo menos três extensômetros, com ângulos e posições predefinidas, cujos sinais são usados para caracterizar o estado de tensões médio na região onde foi instalada.

### 1.2.2 Medição de tensões residuais com extensometria

A medição de tensões residuais com extensômetros é realizada com frequência através do método do furo cego<sup>[12],[55]</sup>. Para tal, uma roseta extensométrica especial é instalada na região onde se pretende medir as tensões residuais. Após a zeragem da ponte amplificadora é um pequeno furo, tipicamente de 1,8 mm de diâmetro e 2 mm de profundidade, na posição central dos extensômetros. As tensões combinadas, perpendiculares à nova superfície criada pelo furo, são aliviadas, gerando um campo de deformações que é detectado pelos extensômetros. O processo de furação pode ser realizado numa única etapa ou de forma incremental com medições intermediárias.

Embora o método do furo seja descrito na literatura como um método de medição de tensões residuais, este método, na verdade, mede todas as tensões que agem no material, o que é ainda mais interessante quando são feitas medições com as peças sendo utilizadas nas condições de serviço<sup>[25],[94]</sup>.

Algumas das limitações dos extensômetros são: (a) requerer habilidade do executor para sua correta instalação, (b) envolver elevado tempo de instalação (tipicamente de 30 a 60 minutos), (c) inviabilidade de reaproveitamento de um mesmo extensômetro, (d) necessário combinar informações de três extensômetros (roseta) para caracterizar plenamente o estado de tensões, (e) o valor indicado pelo extensômetro

reflete a média de deformação abaixo de sua grade extensométrica, (f) incapacidade de medir gradientes de tensões com um único extensômetro. Em função destas limitações, o número de vezes em que as tensões são efetivamente medidas é uma pequena fração da demanda.

### 1.2.3 Indentação

A literatura é muito rica na quantificação de tensões residuais, utilizando-se do método do furo-cego com extensômetros<sup>[25],[55],[102],[103]</sup>. Por outro lado, mostra ser possível obter informações quantitativas sobre o estado de tensões residuais através da indentação<sup>[73],[89],[95]</sup>. Para tal, um punção normalizado com cabeça semi-esférica, cônica ou piramidal, é firmemente pressionado sobre o ponto da superfície do material onde se pretende medir as tensões residuais<sup>[36]</sup>. Em torno deste ponto, forma-se uma região plastificada; cuja forma e extensão são influenciadas pelo nível de tensões combinadas que o material apresenta.

O interferômetro radial permite que o campo de deslocamentos radial provocado pela indentação seja medido. Através de um modelo analítico-numérico, pode-se determinar o estado de tensões combinadas (tensões de serviço combinadas com as tensões residuais), que agem naquela região<sup>[9],[97]</sup>.

Este caminho apresenta uma série de vantagens, tais como: (a) redução significativa do tempo de medição, pois a indentação é muito mais rápida que a furação, (b) ausência de cavacos que poderiam gerar problemas de contaminação na região de medição, (c) redução de riscos de introdução de trincas na superfície do material. Há também desvantagens que serão discutidas ao longo do trabalho.

## 1.3 Objetivos do Trabalho

A proposta deste trabalho é desenvolver e avaliar uma técnica de medição de tensões residuais a partir do campo de deslocamentos medido por um interferômetro óptico com sensibilidade radial ao redor de uma região indentada na superfície de um material. A técnica de medição envolve o desenvolvimento de um modelo analítico-empírico de cálculos, onde, a validação e a verificação da confiabilidade metrológica do modelo, são realizadas através de investigações experimentais planejadas e controladas, visando aprimorar a técnica e tornando-a simples de aplicar com incertezas compatíveis às necessidades de ordem prática.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

No segundo capítulo é apresentada uma revisão sobre tensões residuais: tipos de tensões residuais, efeitos causados por elas, e uma descrição dos métodos de medição existentes. O terceiro capítulo trata da indentação, onde se apresentam o estado da arte do método e as técnicas utilizadas para medição de tensões residuais e os conceitos básicos de mecânica dos sólidos que serão utilizados no transcorrer do trabalho. Um modelo matemático analítico da indentação também é abordado.

Uma síntese dos princípios da holografia eletrônica e do interferômetro radial é apresentada no quarto capítulo. O quinto capítulo apresenta o sistema de medição utilizado, o dispositivo de simulação de tensões residuais e o corpo de prova. O plano experimental adotado e o procedimento de medição do método da indentação proposto, são abordados.

No sexto capítulo estão apresentados os modelos matemáticos propostos e a metodologia empregada para quantificar tensões residuais pelo método da indentação. Neste capítulo são apresentados também, o software de cálculo desenvolvido e as configurações iniciais para realização dos cálculos.

O capítulo sete apresenta os ensaios de avaliação realizados e analisa o desempenho dos modelos matemáticos propostos. Discute a viabilidade, limitações de cada modelo e propõe os modelos para quantificação de tensões residuais. No oitavo capítulo está concentrada a análise metrológica do desempenho do sistema de medição, composto pelo interferômetro radial, o sistema de indentação e o sistema de simulação de tensões residuais. Mostra os níveis de incertezas obtidos e a confiabilidade do sistema na medição de tensões residuais.

Finalmente, o nono capítulo apresenta as conclusões e discussões sobre o trabalho, considerando os objetivos iniciais, os resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Tensões Residuais

As *tensões residuais* são tensões internas que se desenvolvem em componentes que apresentam um estado de equilíbrio macroscópico no material. Os campos de tensões residuais ocorrem no material mesmo sem a existência de carregamentos externos, gradientes de temperatura, forças de corpo ou influência da gravidade. Muitas falhas em serviço de componentes de máquinas e estruturas resultam da superposição das tensões resultantes das cargas aplicadas com as tensões residuais na peça, muitas vezes causando falha<sup>[24],[55],[73]</sup>.

As tensões residuais dificilmente podem ser previstas com exatidão, pois para isto é necessário conhecer a história do material da peça, desde o processo de fabricação da matéria prima até o processo de fabricação e montagem do produto final em serviço. A maneira mais utilizada para a determinação do nível de tensões residuais existentes num material é a utilização de métodos experimentais, com a inspeção direta na estrutura.

Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto benéficos quanto prejudiciais, dependendo do sinal, da intensidade, da distribuição e da relação destes fatores com as características das tensões aplicadas pelo carregamento de serviço. Geralmente são consideradas tensões inoportunas pela dificuldade em prognosticar sua magnitude (sinal e direção); e pela adversa habilidade de se combinarem com tensões devido à corrosão e com tensões presentes nas situações de fadiga<sup>[24]</sup>.

As operações de manufatura são os principais processos geradores de tensões residuais em vários graus, por exemplo, fundição, laminação, estampagem, usinagem, tratamentos térmicos e termo-químicos, soldagem, trefilação e dobramento, entre outras. Em alguns casos as tensões residuais podem ser introduzidas mais tarde na vida do material, durante procedimentos de instalação, montagem, eventuais sobrecargas, ou ainda, por reparos e modificações em serviço.

## 2.1 Tipos de Tensões Residuais

As tensões residuais podem ser classificadas em três tipos principais: (1) tensões residuais macroscópicas; (2) tensões residuais microscópicas e; (3) tensões residuais sub-microscópicas. Tal classificação é feita de acordo com a distância em que as tensões podem ser observadas<sup>[55]</sup>.

O principal tipo de tensões residuais é chamado de tensões residuais *macroscópicas*. São naturalmente de longo alcance, se estendendo no mínimo por vários grãos do material. As deformações originadas por elas são praticamente uniformes para alguns grãos. As tensões residuais macroscópicas assumem um estado de equilíbrio e qualquer alteração, como a retirada do material ou surgimento de uma nova superfície, exige que as tensões se re-arranjam para que uma nova configuração de equilíbrio seja atingida. Tais tensões são quantidades tensoriais, com magnitudes e direções principais que variam em diferentes regiões do material.

Um padrão típico de tensões residuais macroscópicas é encontrado em união por processo de soldagem de chapas finas, esquematizado na figura 2.1. Considerando que as tensões são constantes ao longo da espessura, é apresentado o comportamento das tensões residuais no plano da chapa no eixo perpendicular e ao longo do eixo do cordão da solda. O valor máximo de tensão trativa, ocorre sobre o cordão de solda, diminuindo a medida que se afasta, até que numa determinada distância, o campo de tensão inverte o sinal de forma a satisfazer o equilíbrio das tensões internas<sup>[19],[55],[73]</sup>.

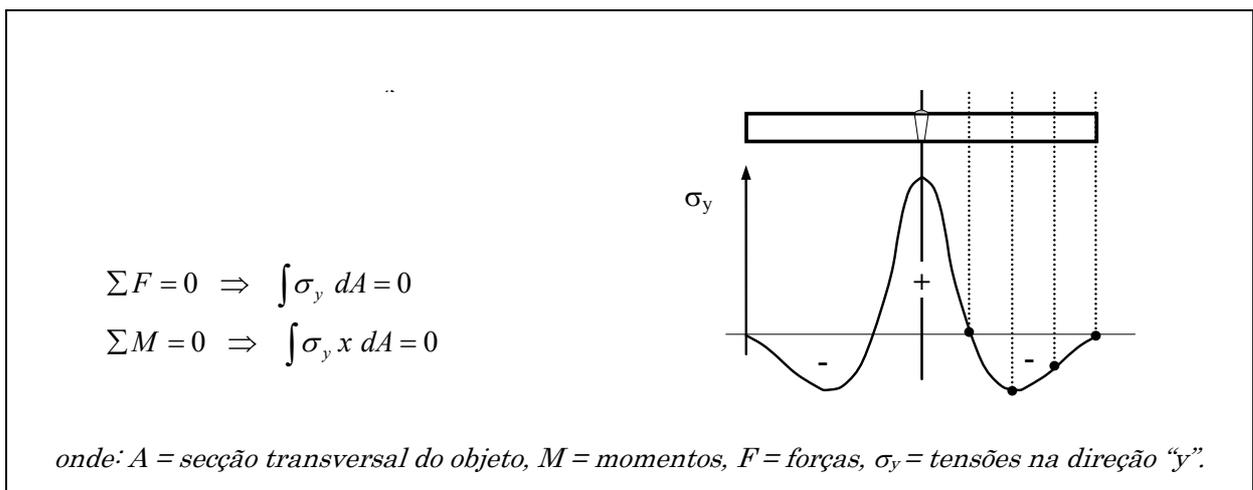


Figura 2.1 Esquema do comportamento das tensões residuais nas proximidades de união por soldagem de chapas<sup>[73]</sup>.

As tensões residuais *microscópicas* ou micro-tensões estruturais cobrem uma distância de um grão ou uma parte de grão, assim, a região de influência no equilíbrio  
*Suterio, R.*

destas tensões se estende a um pequeno número de grãos. Ocorrem pelo simples processo de orientação dos grãos. As tensões residuais *sub-microscópicas* alcançam apenas algumas distâncias atômicas interiores ao grão. São resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo principalmente em regiões próximas às discordâncias. Estes dois tipos de tensões residuais podem variar de um ponto para outro da rede cristalina.

## 2.2 Efeitos das Tensões Residuais

As tensões residuais são normalmente perigosas e indesejáveis por sua superposição com as tensões de serviço ou cargas aplicadas. As tensões residuais *compressivas* geralmente possuem um efeito benéfico na vida de fadiga, propagação de trincas ou corrosão sob tensão. Enquanto que tensões residuais *trativas*, geralmente, reduzem a performance do material sob os mesmos efeitos, prejudicando o comportamento das estruturas.

Um efeito encontrado com frequência é a distorção de peças após processos de usinagem. As distorções dependem do nível e da distribuição das tensões residuais. Nestes casos, as tensões de tração podem ocasionar o surgimento de micro trincas superficiais que com a propagação podem determinar a falha do componente.

## 2.3 Medição de Tensões Residuais

Inicialmente as medições eram feitas por técnicas exclusivamente destrutivas e muitas vezes com a introdução de novas tensões durante o ensaio. Porém, as técnicas de medição vêm sendo aperfeiçoadas e o conceito de incerteza da medição está cada vez mais presente.

Existem várias técnicas para medição de tensões residuais que podem ser classificadas em métodos *semidestrutivos*, *destrutivos*, e *não-destrutivos*.

Os métodos semidestrutivos e destrutivos se baseiam na alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais, provocando alívio destas tensões no ponto ou na região de medição. As deformações causadas pelo alívio são medidas e, através de modelos matemáticos adequados, são determinadas as tensões residuais. Nestes dois métodos somente são analisadas as tensões residuais macroscópicas.

Os métodos não-destrutivos são baseados nas variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material em análise, relacionados com as tensões residuais que provocam estas alterações. Estes métodos determinam de forma combinada todas as  
*Suterio, R.*

tensões residuais existentes no material, sejam elas microscópicas, sub-microscópicas ou macroscópicas, sem a possibilidade de distinção entre elas.

Os principais métodos existentes classificados anteriormente, são apresentados na tabela 2-1, e comentados sucintamente. Estes métodos, bem como as suas variantes são apresentados em maiores detalhes nos “*Handbooks*” das referências [50], [55] e nas revisões de WITHERS - 2001<sup>[102],[103]</sup>, RODACOSKI - 1997<sup>[73]</sup> e BOETTGER - 1998<sup>[14]</sup>, também apresentam uma síntese de tais métodos, assim como o estado da arte relativo a outros métodos que vem sendo estudados nos últimos anos.

*Tabela 2-1 Principais métodos de medição de tensões residuais<sup>[24],[102],[103]</sup>*

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Semidestrutivos <sup>[65],[94]</sup>	Método do furo cego	Execução de um furo, $\phi$ 0,8 a 3,2 mm, Método normalizado pela ASTM-E-837 <sup>[12]</sup>
Destrutivos <sup>[21],[50],[55]</sup>	Método de remoção de camadas (Método da Deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método Difração de Raios X (método não-destrutivo)
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axisimétricas, ex.: cilindros
Não-destrutivos <sup>[50],[55]</sup>	Difração de raios X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE-J784a <sup>[24]</sup>
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, com inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen

Medidas de tensões residuais são de grande interesse na indústria e em laboratórios de pesquisas. Uma técnica que possa resolver todos os problemas de medição de tensões residuais é pouco provável até o momento; mas uma combinação entre elas pode atender a maioria das necessidades da indústria.

De modo a escolher de forma rápida uma técnica que resolva problemas específicos, LU - 1996<sup>[55]</sup> apresenta em seu livro uma análise comparativa resumida das principais técnicas consagradas de medição de tensões residuais. Tal análise está apresentada resumidamente nas tabelas 2-2, 2-3 e 2-4. Considerações quanto a níveis práticos, técnicos e econômicos, também são apresentados. A tabela 2-2 apresenta uma comparação geral das diferentes técnicas de medição de tensões residuais. A tabela 2-3 apresenta uma comparação das técnicas de medição, considerando os problemas do material e problemas geométricos da região a ser analisada. A tabela 2-4 apresenta a aplicabilidade de cada técnica, para materiais freqüentemente encontrados na indústria.

Tabela 2-2 *Comparação geral de diferentes técnicas de medição de tensões residuais [55]*

Descrição	Métodos						
	furo cego	Deflexão	Seccionamento	raios X	difração de nêutrons	ultra-som	magnético
<b>Hipóteses básicas</b>	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo de dimensões grandes em relação a espessura.	Campo de tensão 3-D	Padrão: material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e o receptor	Material ferromagnético
<b>Tipo de tensões residuais analisada</b>	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica Sub-microscópica	Macroscópica Microscópica Sub-microscópica
<b>Parâmetros medidos</b>	Deformação ou deslocamento superficial.	Deformação ou deflexão.	Deformação ou deslocamento superficial.	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrassônica.	Amplitude de ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
<b>Área de análise mínima (uso padrão)</b>	0,5 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup> 100 mm <sup>2</sup> ("strain gages")	100 mm <sup>2</sup>	0,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	0,1 mm <sup>2</sup> (método de alta frequência) 30 mm <sup>2</sup> (método convencional)	1 mm <sup>2</sup> (método Barkhausen) 100 mm <sup>2</sup> (método de permeabilidade magnética)
<b>Mínima profundidade de análise</b>	20 µm	20 µm	1 a 2 mm	Dezenas de micrometros	1 mm	15 µm a 300 µm	100 µm
<b>Custo do equipamento [US\$]</b>	10.000 a 50.000	1.000	15.000	100.000 a 200.000	Poucas centenas de milhões.	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000
<b>Sistema portátil de medição</b>	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
<b>Incerteza típica</b>	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 a 20 MPa	± 10 a 20 MPa
<b>Tempo de preparação</b>	2 horas	8 horas	5 a 200 horas	8 horas	1 semana	20 minutos	10 minutos
<b>Tempo de medição</b>	40 minutos	30 minutos	40 minutos	20 minutos	2 horas	Alguns minutos	Instantâneo
<b>Profundidade de inspeção.</b>	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas profundidades dentro de 1 mm	1 a 50 µm (medidas não-destrutivas). 10 mm (medidas destrutivas)	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm

*Tabela 2-3 Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais considerando os problemas do material e os problemas geométricos da região a ser analisada<sup>[55]</sup>.*

Descrição	Métodos						
	furo cego	deflexão	Seccionamento	raios X	difração de nêutrons	ultra-som	magnético
<b>Problemas para o caso de estrutura e grãos grandes</b>	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim
<b>Sensibilidade à deformação ao encruamento</b>	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
<b>Análise em material de múltipla fase</b>	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão em cada fases se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão em cada fases se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases ferromagnéticos
<b>Medidas de tensão em materiais amorfos</b>	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnéticos
<b>Medidas em partes com baixo raio de curvatura</b>	Possível, $r > 5$ mm	Possível com o método de "Sachs"	Difícil	Possível, $r > 0,5$ mm	Possível, medidas abaixo da superfície	Difícil, necessidade de sensor especial	Possível se $r > 5$ mm
<b>Medidas em camadas (espessuras da camada)</b>	Maior que 50 $\mu$ m	2 a 3 $\mu$ m	Maior que 2 mm	Todas as espessuras	Maior que 2 mm	0,1 a 3 mm (problemas de porosidade)	0,01 a 1 mm

*Tabela 2-4 Aplicabilidade de cada técnica de medição de tensões residuais para materiais freqüentemente encontrados na indústria<sup>[55]</sup>.*

Descrição	Métodos						
	furo cego	deflexão	Seccionamento	raios X	difração de nêutrons	ultra-som	magnético
<b>Aços-carbono</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Aços de baixa-liga</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Aços inox</b>	Sim	Sim	Sim	Sim, grãos não muito grandes	Sim	Baixa sensibilidade	Difícil
<b>Ligas de Alumínio</b>	Sim	Sim	Sim	Sim, problemas de tamanho dos grãos	Sim	Sim	Não
<b>Ligas de titânio</b>	Sim	Sim	Sim	Sim, problemas na fase $\beta$	Sim	Sim	Não
<b>Ligas de níquel</b>	Sim	Sim	Sim	Sim, problemas de tamanho dos grãos	Sim	Sim	Sim
<b>Cristais simples</b>	Sim, grãos grandes	Não	Não	Sim, algumas fibras	Sim, pequenos tamanhos	Difícil	Não
<b>Polímeros</b>	Sim	Sim	Sim	Sim, se cristalino	Sim, se cristalino	Não	Não
<b>Compósitos</b>	Sim	Não	Não	Sim, matriz cristalina	Sim, matriz cristalina	Difícil	Sim, matriz ferromagnético
<b>Estruturas soldadas</b>	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Partes montadas</b>	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Sim
<b>Superfície com encruamento mecânico</b>	Sim	Sim	Difícil	Sim	Sim, depende profundidade tratada (maior que 2 mm)	Sim	Sim
<b>Tratamentos térmicos ou químicos</b>	Sim, problemas camadas finas	Sim	Não	Sim	Não	Difícil para tensão superficial	Sim

Resumidamente, uma técnica de medição é escolhida de acordo com a natureza da parte a ser analisada e do tipo de medição a ser realizada. Estes parâmetros incluem o seguinte:

- (1) natureza do material: estrutura cristalográfica, textura, composição química e fase;
- (2) o tipo de tensões residuais (macro-tensão e micro-tensão);
- (3) o gradiente de tensões residuais na parte analisada (gradiente através da espessura ou da superfície);
- (4) a geometria e a região da parte analisada (profundidade, dimensão e forma da superfície);
- (5) onde a medida é realizada (em campo ou em laboratório).
- (6) o tipo de intervenção (destrutiva ou não-destrutiva);
- (7) o tempo (razão de medição), e a extensão da intervenção;
- (8) a incerteza e a repetitividade do método;
- (9) o custo da medição e dos equipamentos necessários.

Dentre os principais métodos de medição de tensões residuais, as técnicas de Difração de Raios X e o Método do Furo são os mais utilizados pela sua confiabilidade, principalmente quando comparados com métodos mecânicos destrutivos.

O método do furo apresenta a vantagem de envolver instrumentação portátil e de baixo custo e a limitação de ser aplicável em estruturas onde o furo executado não afete o seu funcionamento. Enquanto a técnica de difração de raios X é reconhecida pela sua natureza não-destrutiva, apesar da medição se limitar a camadas muito próximas à superfície, pelo equipamento ter custo elevado e pouca portabilidade.

A associação de métodos já existentes com outras técnicas de medição, vem se destacando nos últimos anos<sup>[42],[104]</sup>. Por exemplo, nos últimos 25 anos, muitos métodos para medição de tensões residuais tem sido descritos baseando-se em técnicas a laser. Segundo WU-1995<sup>[104]</sup>, desde 1984, “sherografia” interferométrica (“*shearing speckle interferometry*”), tem sido combinada com o método do furo, e a partir de 1988 tem sido utilizada como um meio rápido para detecção de tensões residuais. A partir de 1991 a “sherografia” eletrônica tem sido utilizada para medidas de tensões residuais. Possui algumas vantagens, como: (1) não requer isolamento especial à vibração, (2) configuração óptica muito simples, e (3) padrão de franjas simples para ser interpretado.

Estudos apontam o método do furo cego associado a instrumentação portátil da holografia eletrônica ou ESPI - “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*”, como grande potencial na substituição do método baseado na extensometria elétrica<sup>[5],[52],[58]</sup>. Tal portabilidade, grande sensibilidade na medição do campo de deslocamento na região de interesse, o não uso de materiais de consumo (como “*strain gages*”, por exemplo), e custos compatíveis à instrumentação existente no mercado; faz com que esta tecnologia apresente grande potencial. Esta técnica vem sendo estudada desde o início da década de 90 pelos pesquisadores da UFSC, tais como:

- ✓ ALBERTAZZI Jr. - 1993<sup>[4]</sup> e ALBERTAZZI Jr., KANDA *et al.* - 1995, 1999 e 2000<sup>[5],[8],[9],[10]</sup>.
- ✓ ALBERTAZZI Jr., RODACOSKI *et al.* - 1996<sup>[6]</sup> e RODACOSKI - 1997<sup>[73]</sup>.
- ✓ BOETTGER - 1998<sup>[14]</sup>.
- ✓ BORGES - 2000<sup>[15]</sup> e VEIGA & ALBERTAZZI Jr. - 2000<sup>[96]</sup>.
- ✓ CORDOVIL - 2001<sup>[24]</sup>.
- ✓ WILLEMANN - 2002<sup>[101]</sup> e SUTERIO, VIOTTI *et al.* - 2002<sup>[89]</sup>.
- ✓ VEIGA - 2003<sup>[97]</sup>.
- ✓ PEIXOTO FILHO - 2003 e 2004<sup>[68],[69]</sup>.
- ✓ SUTERIO, ALBERTAZZI Jr. *et al.* - 2003 a 2005<sup>[84],[85],[86],[87],[88]</sup>.

Outros trabalhos relevantes, envolvendo a holografia eletrônica, podem ser encontrados na literatura: GALANULIS & RITTER - 1993<sup>[33]</sup>, LIN, HSIEH *et al.* - 1994<sup>[52]</sup>, MAKINO & NELSON - 1994<sup>[58]</sup>, PISAREV, BALALOV *et al.* - 2001<sup>[71]</sup>, STEINZING, HAYMAN *et al.* - 2001<sup>[80],[81]</sup>, dentre outros.

Métodos alternativos envolvendo outras formas de alívio, como o caso de aquecimento localizado ao invés da realização do furo, também associando a holografia eletrônica, vêm sendo fruto de pesquisas nos últimos anos<sup>[66],[67],[89] [99] [100]</sup>. Por outro lado, técnicas de indução de tensão, ao invés de alívio de tensão vêm-se demonstrando como viáveis para a quantificação de tensões residuais, citando por exemplo, o método da indentação, que também causa alteração superficial no material<sup>[73],[89],[95]</sup>. O desenvolvimento desta técnica trará grande benefício de não geração de cavacos, como o que ocorre no método do furo, e maior rapidez na execução da medição.

Finalmente, novos métodos de medição de tensões residuais estão sendo desenvolvidos de modo a propiciar novas aplicações de uso, complementar os métodos

existentes, melhorar os níveis de incertezas, detectar e quantificar tensões residuais rapidamente e com vantagens econômicas.

## 2.4 Método do Furo

O Método do Furo para medição de tensões residuais consiste no alívio de tensões pela execução de um furo (diâmetro entre 0,8 e 3,2 mm) e o monitoramento das deformações nas regiões vizinhas ao furo. A solução analítica deste problema foi desenvolvida por Kirsch em 1898, sendo que o trabalho pioneiro sobre medições de tensões residuais pelo método do furo foi proposto por J. MATHAR em 1934<sup>[25],[50],[55],[94]</sup>. Atualmente este método é normalizado pela ASTM-E-837 - 2001<sup>[12]</sup> - "*Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*".

Diversos estudos tornaram esta técnica como sendo uma das mais confiáveis para a determinação de tensões residuais. Destaca-se vários estudos teóricos, experimentais e numéricos, como os de SCHAJER - 1981, 1988 e 1993<sup>[74],[75],[76],[77]</sup>, que contribui com estudos de elementos finitos no cálculo de tensões, procedimento de cálculo de tensões não-uniformes e uso de outros métodos de cálculo, como o método da integral. A grande contribuição de SCHAJER foi na introdução de constantes multiplicativas de correção no método do furo cego. FLAMAN *et al.* - 1985, 1987, 1990<sup>[29] [30] [31]</sup> comparam a variação da tensões residuais em função da profundidade do furo. LU & FLAVENOT - 1989<sup>[56]</sup> apresentam aplicação do método do furo incremental na verificação da distribuição da tensões residuais. PERRY - 1989<sup>[70]</sup> apresenta um algoritmo de cálculo para "*strain gages*" tipo roseta, na determinação de tensões residuais. BECHINI & BERTINE - 1990<sup>[13]</sup> modelam o método experimentalmente através de elementos finitos. KELSEY - 1995<sup>[49]</sup>, contribui com a utilização do método na quantificação de tensões residuais não-uniformes. Muitos destes trabalhos dentre outros, serviram de base no desenvolvimento da norma ASTM-E-837<sup>[12]</sup>.

Atualmente pode-se encontrar na literatura grandes trabalhos que resumem o método do furo, dentre eles destacam-se OETTEL - 2000<sup>[65]</sup>, que considera o cálculo de incertezas; e a nota técnica TN-503 - 2002<sup>[94]</sup> da "*Vishay Measurements Group.*", que apresenta uma metodologia de medição e cálculo.

## Capítulo 3

# A Indentação

A indentação ao invés de causar um alívio localizado, é uma técnica que induz novas tensões provocando uma alteração plástica localizada na superfície do material. O campo de deformações locais decorrentes da indentação é função da forma da ferramenta de indentação, das propriedades do material, da carga de indentação e da magnitude e direção das tensões residuais inicialmente presentes no material. Tais características, que serão apresentadas nos parágrafos a seguir, têm sido utilizadas para obter uma série de informações acerca do material analisado.

### 3.1 O Estado da Arte

Os ensaios de dureza em função do desenvolvimento e da inovação tecnológica, segundo ODO - 2001<sup>[64]</sup>, foram divididos em três classes: (1) nano indentação ou nano dureza, (2) micro indentação ou micro dureza, e (3) macro indentação ou macro dureza.

As escalas de durezas se distinguem pela intensidade da força aplicada e pelo tamanho da área deformada. Inicialmente foram desenvolvidos ensaios de dureza com forças variando de 100 N a 30.000 N, e área avaliada por meios ópticos. As mais conhecidas são: Brinell, Vickers e Rockwell<sup>[16],[26]</sup>. Com a necessidade de se estudar materiais em micro volumes, caso de materiais frágeis, componentes de superfícies tratadas, micro estruturas, ou filmes finos; surgiu o desenvolvimento de ensaios de micro durezas. Atualmente estes ensaios envolvem forças de 0,10 N, e as medidas das deformações são avaliadas através de microscópios ópticos. Os ensaios mais conhecidos são: Vickers e Knoop<sup>[27],[64]</sup>.

Os ensaios de nano durezas surgiram a partir da década de 90<sup>[64]</sup>, chegando a alguns micronewtons de força e penetrações da ordem de alguns nanômetros. Nestes

sistemas o deslocamento do penetrador é continuamente medido durante a aplicação e o alívio de forças, proporcionando mais informações do que a visualização da impressão. Esta técnica tem grande aplicação em determinar as propriedades mecânicas (dureza e módulo de elasticidade) de filmes finos, materiais com superfícies modificadas e revestimentos.

O método da indentação tem chamado atenção em diversas áreas de pesquisas devido a sua facilidade de manuseio e por ser um método não destrutivo. Dentre as diversas áreas de pesquisas, destacam-se as seguintes:

- determinação das propriedades elasto-plásticas de materiais como o módulo de elasticidade (módulo de Young) e a tensão de escoamento;
- determinação de dureza;
- caracterização de materiais compostos e de materiais porosos;
- determinação de tensões residuais;
- determinação de resistência à fratura.

A tabela 3-1 resume o estado da arte das principais aplicações que utilizam a técnica da indentação e associa aos tipos de indentadores mais utilizados.

Três formas são conhecidas para indentar um material:

- (1) **carga conhecida:** utilizada na medição de dureza, tensões residuais e extração das propriedades elasto-plásticas dos materiais<sup>[35],[36],[38]</sup>;
- (2) **deslocamento conhecido:** utilizada para medições de tensões residuais desde que se conheça as propriedades elásticas do material<sup>[38],[83]</sup>;
- (3) **impulso conhecido ou impacto:** mais utilizada na medição de dureza e recentemente na caracterização de propriedades elasto-plásticas<sup>[11]</sup>.

Três abordagens têm sido usadas para descrever o mecanismo da indentação e para extração das propriedades do material através da indentação, ou seja:

- (1) **técnica da profundidade-força:** que analisa a evolução da profundidade da indentação em função da carga aplicada (curva  $P-h$ )<sup>[35]</sup>;
- (2) **técnica da energia:** que fornece uma medição da componente de energia elástica e plástica de deformação abaixo da curva de profundidade da indentação em função da carga aplicada (curva  $P-h$ )<sup>[36],[37]</sup>;
- (3) **técnica da força pontual:** que analisa a evolução de tensões e deslocamentos devido à força e a profundidade de indentação<sup>[38],[39]</sup>.

Tabela 3-1 *Aplicação da técnica de indentação.*

<i>Descrição</i>	<i>Tipo de indentador</i>	<i>Referências</i>
(1) Medição de dureza. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinação da dureza Vickers através de ensaios de indentação.</li> <li>• Influência do tamanho da indentação na determinação da dureza.</li> <li>• Análise do perfil e da variação de dureza.</li> <li>• Avaliação da dureza de filmes finos através da análise da tensão elasto-plástica em testes de micro-indentação.</li> </ul>	Cilíndrico Cônico Esférico Piramidal	CALLISTER Jr. - 1997[16] DOWLING - 1993[26] ELMUSTAFA & STONE - 2002[27] HAY & HAY - 2000[41] HUNG, LONG <i>et al.</i> - 1997[42] JACQ, LORMAND <i>et al.</i> - 2002[45] NAYEBI, ABDI <i>et al.</i> - 2002[63] SWADENER, GEORGE <i>et al.</i> - 2002[91] SWADENER, MISRA <i>et al.</i> - 2002[92] ZENG & CHIU - 2001[105] ZHIYONG, CHENG <i>et al.</i> - 2002[106]
(2) Determinação de propriedades de materiais piezolétricos. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades mecânicas e elétricas.</li> </ul>	Cilíndrico Cônico Esférico	GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1997[37]
(3) Determinação da resistência à fratura, através de indentação recursiva e contínua. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades da fratura e tolerância ao risco.</li> </ul>	Cônico Esférico Piramidal	CIAVARELLA & HILLS - 1999[22]. FETT - 1995[28] GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1999[36]
(4) Determinação de propriedades elasto-plásticas em função da profundidade de indentação. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinação da tensão de escoamento.</li> <li>• Determinação do módulo de elasticidade.</li> <li>• Determinação do expoente de encruamento.</li> <li>• Análise da homogeneidade do escoamento.</li> <li>• Determinação da tensão de escoamento à elevadas temperaturas.</li> <li>• Determinação de gradientes de tensão de escoamento e do módulo de elasticidade em materiais que apresentam variações espaciais em sua composição, microestrutura ou densidade, tais como: <ol style="list-style-type: none"> <li>Peças com tratamento superficial (térmico ou tribológico).</li> <li>Materiais compostos e materiais porosos.</li> <li>Penetração em armaduras.</li> <li>Materiais geológicos (rochas, argilas e solos).</li> </ol> </li> </ul>	Cônico Esférico Piramidal	AHN, JEON <i>et al.</i> - 2002[1] ANDREWS, GIANNAKOPOULOS <i>et al.</i> - 2002[11] CIAVARELLA & HILLS - 1999[22]. ELMUSTAFA & STONE - 2002[27]. GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1997[38],[39] GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1999[36] GIANNAKOPOULOS - 2002[35] HAY & PHARR - 1999[40] JACQ, LORMAND <i>et al.</i> - 2002[45] JAYARAMAN, OLIVER <i>et al.</i> - 1998[46] NAYEBI, ABDI <i>et al.</i> - 2002[63] RABTCHEVICH & RUDNITSKY - 1998[72] SURESH & GIANNAKOPOULOS - 1997[83] VERLEENE, DUBAR <i>et al.</i> - 2002[98] ZENG & CHIU - 2001[105].
(5) Determinação do estado de tensões residuais. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Influência das tensões residuais na determinação da tensão de escoamento, através de sucessivas nano-indentações.</li> <li>• Amplitude e sinal das tensões residuais (casos limitados).</li> </ul>	Cilíndrico Cônico Esférico	CARLSSON & LARSSON - 2001[17],[18] CIAVARELLA & HILLS - 1999[22] ELMUSTAFA & STONE - 2002[27] FETT - 1995[28] GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1999[36] HUNG, LONG <i>et al.</i> - 1997[42] JACQ, LORMAND <i>et al.</i> - 2002[45] SURESH, & GIANNAKOPOULOS - 1998[82] SWADENER, TALJAT <i>et al.</i> - 2001[93] UNDERWOOD - 1973[95]

## 3.2 Base Teórica da Indentação

A solução fundamental da evolução de tensões e deslocamentos devido às trações superficiais em um meio espacial elástico e homogêneo, foi apresentada por BOUSSINESQ em 1885<sup>1</sup> e LOVE - 1927<sup>[53]</sup>. Revisões compreensivas podem ser encontradas em MALVERN - 1969<sup>[59]</sup> e JOHNSON<sup>2</sup>.

Algumas técnicas utilizadas para solucionar o problema da indentação são resumidas a seguir.

### 3.2.1 A Técnica do Deslocamento

A figura 3.1 esquematiza a curva de carga por profundidade de penetração ( $P-h$ ). Durante o carregamento a curva geralmente segue a relação:

$$P = C h^2 \quad (3.1)$$

onde:

$P$  = carga de indentação;

$C$  = curvatura de indentação, que é uma medida da “resistência” do material a indentação;

$h$  = profundidade da indentação.

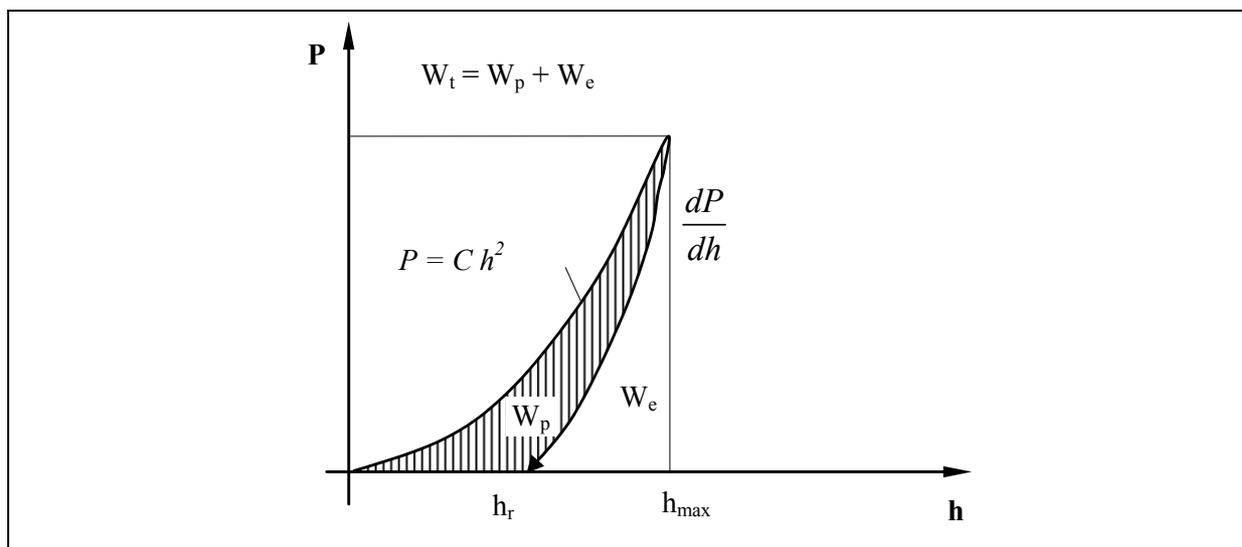


Figura 3.1 Curva  $P-h$  de carregamento e descarregamento.

<sup>1</sup> BOUSSINESQ, M. J. - *"Application des Potentials, a l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques"* – Cgauthier-Villars, Paris, 1885.

<sup>2</sup> JOHNSON, K. L. - *"Contact Mechanics"* – Cambridge University Press, Cambridge, 1985

A pressão de contato ( $p_{av}$ ) pode ser correlacionada com a dureza do material indentado:

$$p_{av} = \frac{P_{\max}}{A_{\max}} \quad (3.2)$$

onde:

$P_{\max}$  = carga máxima de indentação;

$A_{\max}$  = área máxima de contato.

A máxima carga de indentação cria uma área de contato projetada máxima na superfície indentada.

### 3.2.2 A Técnica da Energia

De um ponto de vista prático, a medição da profundidade residual  $h_r$  da indentação geralmente traz considerável erro experimental<sup>[36]</sup>, devido a uma variedade de fatores, como exemplo a rugosidade do material ou do indentador. No entanto a área abaixo da curva  $P-h$  fornece uma medição da componente de energia elástica e plástica de deformação durante a indentação, podendo ser utilizada como um método para extração de propriedades mecânicas.

GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1999<sup>[36]</sup>, apresenta em seu artigo uma equivalência direta entre a energia plástica de indentação e a profundidade residual  $h_r$ . A área abaixo da porção do carregamento da figura 3.1, é uma medida do trabalho total  $Wt$ , realizado pelo indentador na deformação do material, ou seja:

$$Wt = \int_0^{h_{\max}} P(h) dh = \int_0^{h_{\max}} C h^2 dh = \frac{C h_{\max}^3}{3} = \frac{P_{\max} h_{\max}}{3} = \frac{P_{\max}^{1.5}}{3\sqrt{C}} \quad (3.3)$$

O trabalho total pode ser decomposto em partes elástica e plástica,  $Wt = We + Wp$ , da seguinte forma:

$$\frac{We}{Wt} = 1 - \frac{Wp}{Wt} = 1 - \frac{h_r}{h_{\max}} \quad (3.4)$$

onde:

$We$  = trabalho elástico de indentação;

$Wp$  = trabalho plástico de indentação;

$Wt$  = trabalho total de indentação;

$h_r$  = profundidade residual da indentação.

### 3.2.3 A Técnica da Força Pontual

A solução dada por BOUSSINESQ (1885), está esquematizado na figura 3.2. O problema de uma carga concentrada normal ao contorno de um sólido foi demonstrado através da solução de deslocamento em termos das funções potenciais de PAPKOVICH-NEUBER<sup>[38],[50],[59]</sup>.

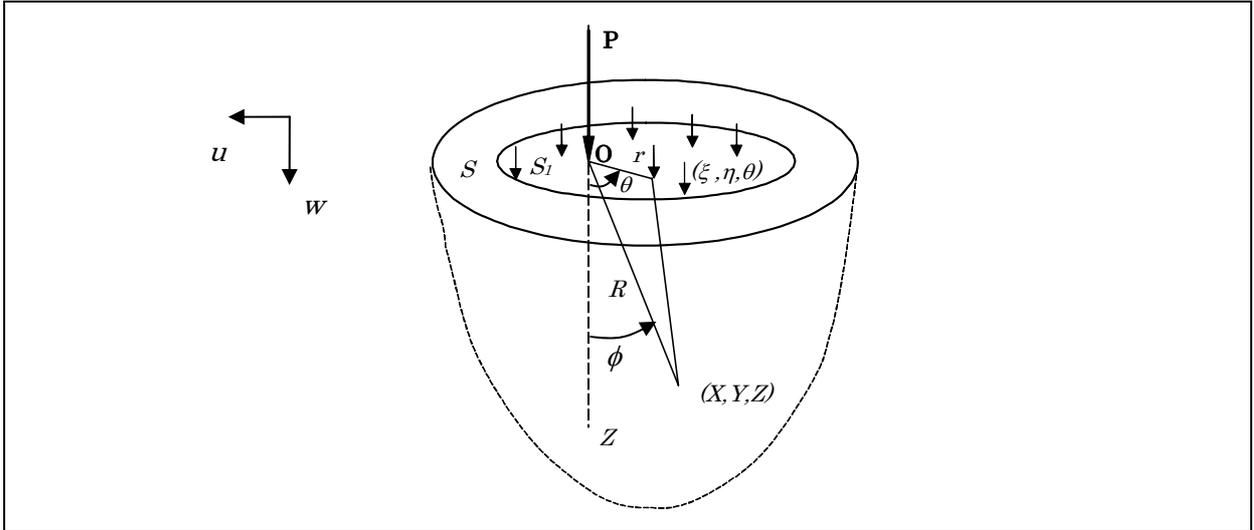


Figura 3.2 Distribuição de forças no contorno de um entalhe semi-circular em um sólido semi-infinito

A solução elástica das componentes de deslocamentos e tensão em coordenadas cilíndricas, é apresentada da seguinte forma:

Campo de deslocamentos:

$$R^2 = r^2 + z^2 \quad u_r = \frac{P r (1+\nu)}{2 \pi E R} \left[ \frac{z}{R^2} - \frac{1-2\nu}{R+z} \right] \quad (3.5)$$

$$u_\theta = 0 \quad u_z = \frac{P (1+\nu)}{2 \pi E R} \left[ 2(1-\nu) + \frac{z^2}{R^2} \right]$$

Campo de tensão:

$$\sigma_r = \frac{P}{2 \pi} \left[ \frac{1-2\nu}{R(R+z)} - \frac{3 r^2 z}{R^5} \right] \quad \sigma_\theta = \frac{P (1-2\nu)}{2 \pi} \left[ \frac{z}{R^3} - \frac{1}{R(R+z)} \right]$$

$$\sigma_z = -\frac{P}{2 \pi} \frac{3 z^3}{R^5} \quad \tau_{rz} = -\frac{P}{2 \pi} \frac{3 z^2}{R^5} \quad (3.6)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \tau_{\theta z} = 0$$

Considerando que deseja-se medir o campo de deslocamento e de tensão na superfície do corpo, as equações 3.5 e 3.6 podem ser reduzidas para a seguinte forma:

Deslocamentos:

$$R = r \quad z = 0 \quad u_{\theta} = 0 \quad (3.7)$$

$$u_r = -\frac{P(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E} \left(\frac{1}{r}\right) \quad u_z = \frac{P(1+\nu)(1-\nu)}{\pi E} \left(\frac{1}{r}\right)$$

Tensão:

$$\sigma_r = \frac{P(1-2\nu)}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2}\right) \quad \sigma_{\theta} = -\frac{P(1-2\nu)}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2}\right) \quad (3.8)$$

$$\sigma_z = 0 \quad \tau_{rz} = 0 \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \tau_{\theta z} = 0$$

A equação do deslocamento radial apresentado por BOUSSINESQ (equação 3.7), não se mostrou uma boa escolha de uso com o modelo proposto neste trabalho, por ter no seu denominador  $R$  na primeira potência. A combinação de tal equação com o modelo baseado no método do furo (discutido no Capítulo 6), faz com que haja migração numérica entre os parâmetros de cálculos.

GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1997<sup>[38]</sup> apresentam de forma analítica a distribuição da tensão radial num problema de força pontual sobre um material. Pode-se afirmar que existe uma solução radial única na qual está relacionada a um gradiente particular das propriedades elásticas ( $E$ ), e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). O gradiente considerado por Giannakopoulos & Suresh é um caso de potenciação nas propriedades do material ao longo da profundidade  $z$ , onde:  $E = E_0 z^k$  ( $E_0$  é o módulo de elasticidade na superfície do material e  $k$  é uma função do coeficiente de Poisson).

Considerando as coordenadas esféricas ( $r, \phi, \theta$ ) da figura 3.2 e assumindo que a tensão  $\sigma_r$  é a única tensão diferente de zero, do equilíbrio e simetria radial tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + 2\frac{\sigma_r}{R} = 0 \quad \sigma_r = \frac{S(\phi)}{R^2} \quad (3.9)$$

Onde  $S(\phi)$  é uma função que a *priori* é prescrita essencialmente radialmente à tensão, fazendo com que a equação 3.9 satisfaça automaticamente as condições de contorno livres na superfície ( $\phi=\pi/2$ ),  $\sigma_{\phi} = \sigma_{r\phi} = 0$ .

As deformações diferentes de zero são dadas por:

$$\varepsilon_r = \varepsilon \quad \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\phi} = -\nu \varepsilon \quad (3.10)$$

E as equações de deslocamento-deformação são dadas da seguinte forma:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \qquad \varepsilon_\phi = \frac{u_r}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{R} + \frac{u_\phi}{R} \cot(\phi) \qquad \gamma_{r\phi} = \frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_r}{\partial \phi}$$

( $u_r$  e  $u_\phi$ ) são os deslocamentos ao longo das coordenadas  $r$  e  $\phi$ . As equações 3.10 e 3.11 podendo ser reduzidas<sup>[38]</sup>, e de modo a respeitar as equações de compatibilidade, da seguinte forma:

$$\varepsilon_r = A R^{-\frac{1}{\nu}} \cos(\phi) + B R^{-1-\frac{1}{\nu}} \quad (3.12)$$

$A$  e  $B$  são constantes. Da lei de Hooke é válido dizer que:  $E = \sigma_r / \varepsilon_r$ ,  $B = 0$ ,  $A = C / Eo$  e  $k = (1/\nu) - 2$ . Desta forma o problema fica completo e a distribuição angular de tensão fica o seguinte:

$$S(\phi) = C [\cos(\phi)]^{\frac{1}{\nu}-1} \quad (3.13)$$

$C$  é uma constante função da força pontual e os campos de deslocamentos, podem ser definidos como:

$$u_r = \frac{C}{Eo} \frac{\nu}{(\nu-1)} \frac{1}{R^{\frac{1}{\nu}-1}} \cos(\phi) \quad (3.14)$$

$$u_\phi = -\frac{C}{Eo} \frac{\nu^2}{(\nu-1)} \frac{1}{R^{\frac{1}{\nu}-1}} \text{sen}(\phi)$$

Neste trabalho são utilizadas as equações apresentadas por Giannakopoulos & Suresh (acima), como ponto de partida no modelo proposto para quantificação das tensões residuais. A combinação da formulação do método do furo com as referidas equações, se apresenta como uma solução que atende o objetivo deste trabalho, esta solução será discutida no Capítulo 6.

### 3.3 Medição de Tensões Residuais por Indentação

A indentação causa um re-equilíbrio no estado de tensão do corpo o que provoca um campo de deslocamentos ao redor da indentação. Tais fatores foram observados qualitativamente através de métodos ópticos, por UNDERWOOD - 1973<sup>[95]</sup>, HUNG, LONG *et al.* - 1997<sup>[42]</sup> e por SUTERIO, VIOTTI *et al.* - 2002<sup>[89]</sup>. Assim com técnicas

apropriadas de medição de deslocamentos ou deformações, é possível estabelecer, através da indentação uma correlação com as tensões residuais existentes na peça e determiná-las quantitativamente.

Um processo e o resultado causado por uma indentação na superfície de um sólido estão esquematizados na figura 3.3. Dependendo da intensidade da força aplicada, o resultado pode ser elástico, elástico-plástico ou totalmente plástico.

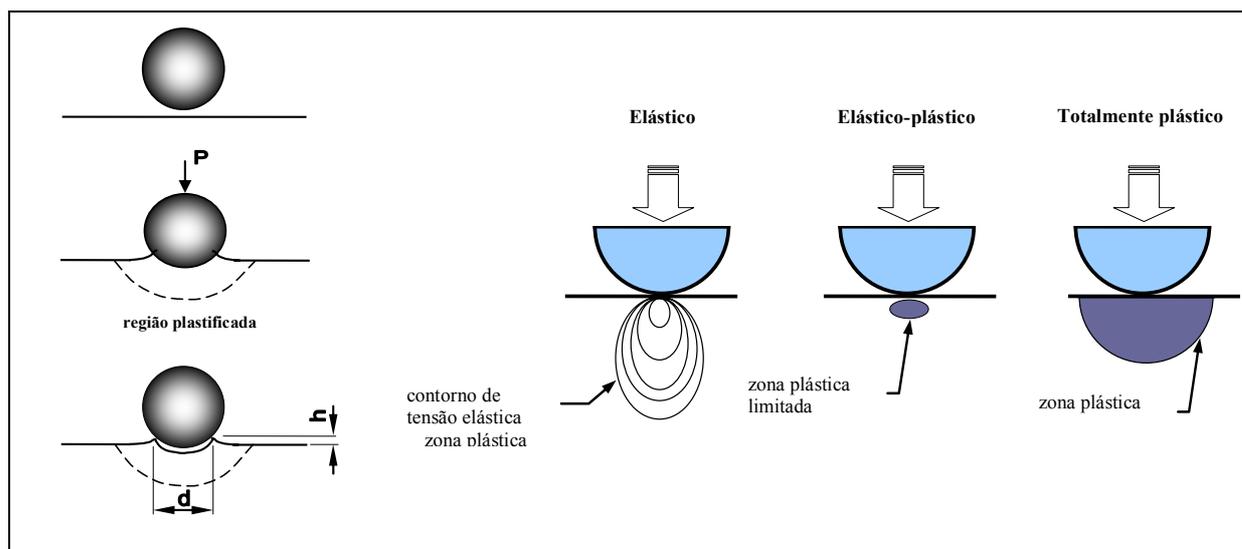


Figura 3.3 Processo de indentação e resultado causado por uma indentação superficial<sup>[1]</sup>.

Entre os estudos mais recentes sobre o processo de indentação pode-se citar os seguintes autores: Underwood, Hay e Swadener, descritos abaixo.

UNDERWOOD - 1973<sup>[95]</sup> descreve que a deformação plástica local devido a indentação, é função das suas características de forma, das propriedades do material e da magnitude e direção das tensões residuais inicialmente presentes no material. A tensão localizada que é 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.

HAY & PHARR - 1999<sup>[40]</sup> descrevem as relações entre a carga de indentação, a profundidade de contato e a rigidez de contato que estão condicionados à área de contato e à profundidade elástica do material.

SWADENER *et al.* - 2002<sup>[91],[92]</sup> apresentam uma descrição de modelos mecânicos baseados em deslocamentos geométricos sob a luz de experimentos que exibem o efeito do tratamento da indentação. Um método simples é desenvolvido para combinar o efeito de trabalho de encruamento e o efeito do tamanho da indentação. Estudos sobre nano-indentação exibem grande aumento na dureza para profundidades menores que  $1 \mu\text{m}$ .

Considerando os vários trabalhos já publicados pode-se afirmar que a determinação das tensões residuais pode ser correlacionada através dos seguintes efeitos: (1) variação de dureza no material, (2) relação entre força e a profundidade de indentação, (3) medição da forma geométrica da indentação, (4) medição da deformação ao redor da indentação.

**Medição de variação de dureza** é apropriada para materiais que não apresentam gradientes ou variações de tensões na superfície. Uma variedade de tensão na superfície pode causar uma mesma tendência do material escoar sob pressão e apresentar valores semelhantes de tensão<sup>[45],[73],[95]</sup>.

**Medição da relação entre força e a profundidade de indentação**, tem sido tópico de considerável interesse nos últimos anos<sup>[17],[36],[93]</sup>. Este método é baseado no registro, através de uma gravação contínua, da variação da carga  $P$  em função da profundidade de penetração  $h$ .

O interesse na medição da relação entre força e profundidade da indentação, é atribuído às aplicações descritas na tabela 3-1. 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>[36]</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*”), figura 3.4. 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*”), figura 3.4. 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. O fenômeno de “*piling-up*” e “*sink-in*” são fenômenos localizados de escoamento que dependem exclusivamente das propriedades mecânicas do material.

A quantificação de tensões residuais é realizada através da comparação de um material com tensões residuais e outro ou o mesmo, livre de tensões. A figura 3.5 esquematiza o método de medição baseada na relação força-profundidade. A tensões residuais é determinada da seguinte forma:

$$\sigma_{res} = \alpha \frac{P_{res}}{A_0} \quad (3.15)$$

onde:

$\sigma_{res}$  = Tensões residuais do material ensaiado.

$\alpha$  = Constante característica do indentador e do material.

$P_{res}$  = De acordo com a figura 3.5, é a carga residual de indentação entre o material com tensões residuais e o material livre de tensões residuais,  $(P_c - P_o)$  ou  $(P_t - P_o)$ .

$A_o$  = Área projetada da indentação.

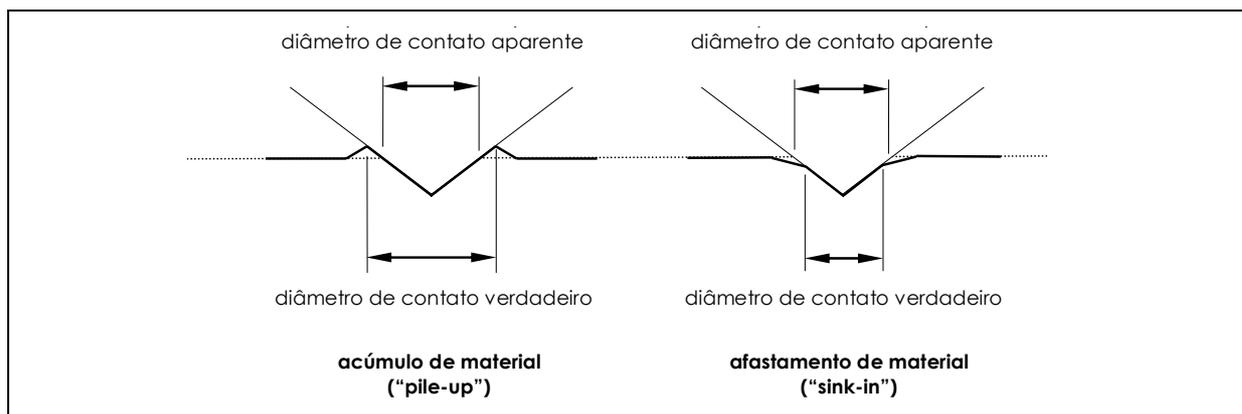


Figura 3.4 Representação esquemática de acúmulo de material (“piling-up”), e de afastamento de material (“sink-in”), em torno de um indentador.

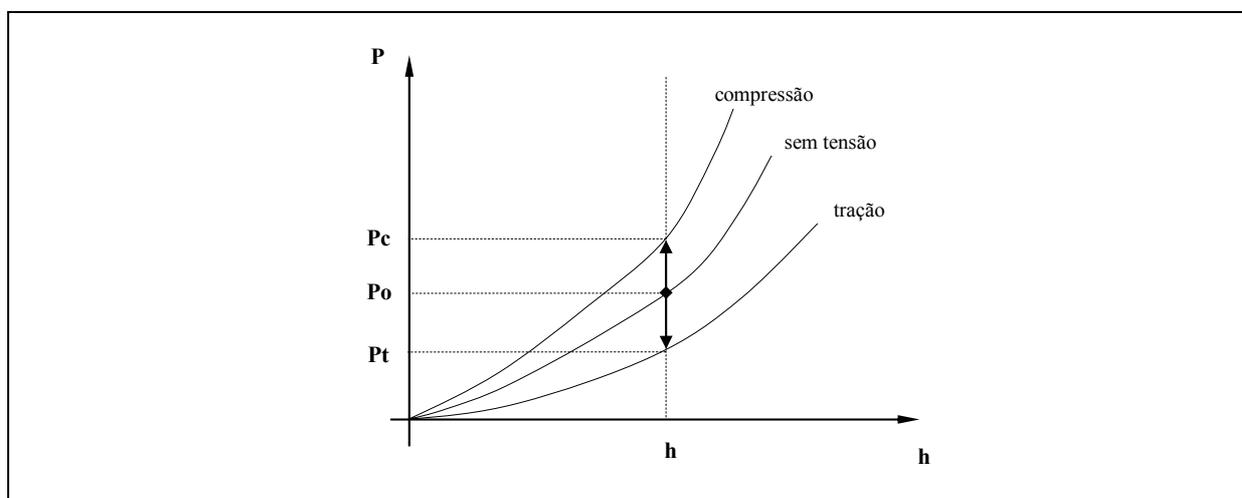


Figura 3.5 Método da indentação para determinação de tensões residuais pela análise da curva carga-profundidade.

A grande desvantagem deste método é que algumas questões sobre a constante “ $\alpha$ ” ainda não estão solucionadas, além de que, na condição uniaxial “ $\alpha$ ” é aproximadamente 3, e na condição biaxial isotrópica ( $\sigma_x = \sigma_y$ ), assume valor de aproximadamente 1,5. Outras desvantagens são: a necessidade de ter um material livre de tensões residuais para ser utilizado como referência; e o conhecimento da característica de relação tensão-deformação à curva carga-deslocamento de indentação (vide figura 3.6).

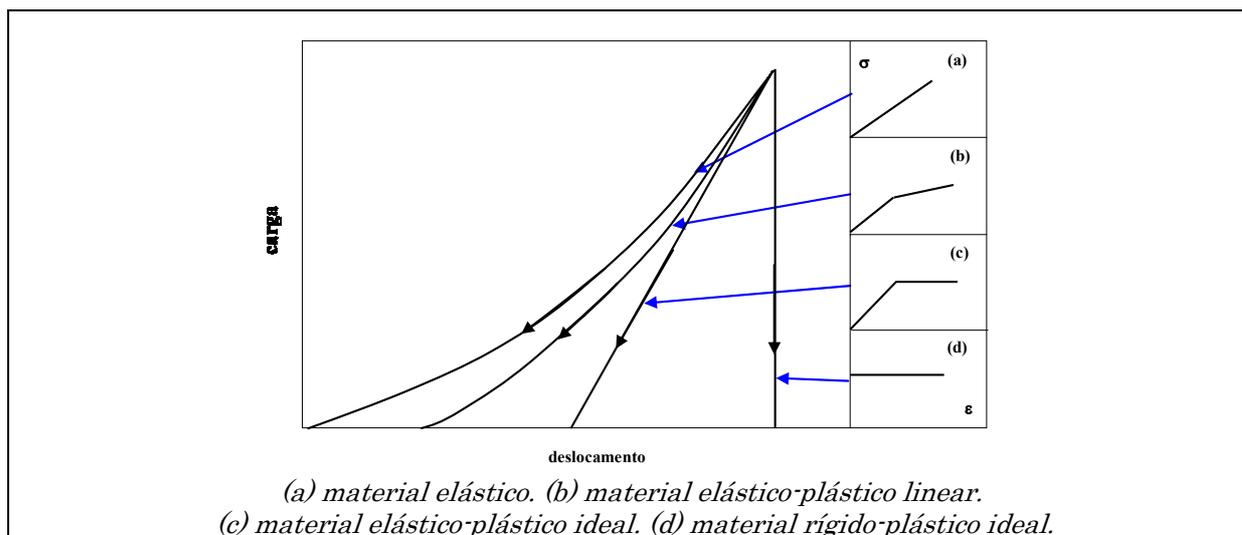


Figura 3.6 Representação esquemática da característica de relação tensão-deformação para cada curva carga-deslocamento de indentação para alguns materiais idealizados.

**Medição da forma geométrica** da indentação consiste na determinação 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 determinação da relação entre a verdadeira área de contato  $A$  e a profundidade de penetração do indentador  $h$  no material a ser testado<sup>[106]</sup>.

**Medição da deformação ao redor da indentação**, consiste na medição do campo de deformações ou de deslocamentos ao redor da indentação. Apresenta-se como o mais indicado para a análise quantitativa. Até o momento não foi encontrado na literatura um estudo que aponte um modelo matemático analítico apropriado, simples e de fácil implementação. A sensibilidade deste método é maior quanto maior for o diâmetro da esfera e quanto maior a força de indentação. Tem como grande vantagem determinar o sinal e a direção das tensões residuais presente na superfície da peça. Por outro lado, tem como desvantagem as dificuldades em quantificar o valor de tensões residuais e necessidade de se conhecer as propriedades mecânicas do material da peça a ser medida<sup>[42],[89],[95]</sup>.

No Capítulo 6 será apresentado um novo caminho para quantificar tensões residuais pela medição da deformação ou deslocamentos radiais ao redor da indentação.

## Capítulo 4

# Holografia Eletrônica

A holografia eletrônica ou ESPI ("*Electronic Speckle Pattern Interferometry*") é a técnica utilizada neste trabalho para a medição do campo de deslocamentos radiais no plano da superfície de um material submetido a uma indentação localizada. Esta técnica utiliza-se da luz do laser para formar franjas de interferência e, com o uso de técnicas de processamento de imagens, o campo de deslocamentos na superfície do material é quantificado em toda a região iluminada<sup>[34]</sup>.

A holografia eletrônica tem sido aplicada como ferramenta na pesquisa e desenvolvimento na medição de micro-deslocamentos, de deformações e tensões<sup>[7],[20],[51],[78]</sup>, na medição de geometrias e na detecção de defeitos. A medição de deformações no interior de superfícies cilíndricas e a medição de tensões residuais localizadas são exemplos de trabalhos de grande interesse para o setor industrial e aeroespacial<sup>[9],[19]</sup>.

Este capítulo apresenta os conceitos básicos sobre a técnica empregada. Informações mais abrangentes sobre holografia na língua portuguesa, podem ser encontradas em outros trabalhos realizados na UFSC, tais como: BOETTGER - 1998<sup>[14]</sup>, BORGES - 2000<sup>[15]</sup>, KAPP - 1997<sup>[48]</sup>, RODACOSKI - 1997<sup>[73]</sup> e VEIGA - 2003<sup>[96]</sup>.

### 4.1 Princípios da Holografia Eletrônica

A figura 4.1 mostra uma configuração típica com iluminação dupla usada para medição de deslocamento com a holografia eletrônica. O feixe de laser é dividido em dois através de um espelho parcial (divisor de feixes). Os dois feixes de luz são direcionados para o objeto através dos espelhos *A* e *B*, de forma que a superfície do objeto seja simultaneamente iluminada por ambos os feixes, e, ao mesmo tempo, visualizada por

uma câmera de TV (CCD). A câmera captura o padrão de interferência da superfície, denominado na literatura por “*speckle*” que, pode ser traduzido como “*granulado óptico*”.

A configuração do interferômetro da figura 4.1, apresenta um padrão de franjas originário de deslocamentos do vetor sensibilidade (vetor  $\vec{p}$ ). O vetor sensibilidade é determinado pela diferença dos vetores unitários ( $\vec{n}_A$  e  $\vec{n}_B$ ), que apontam para as direções de iluminação.

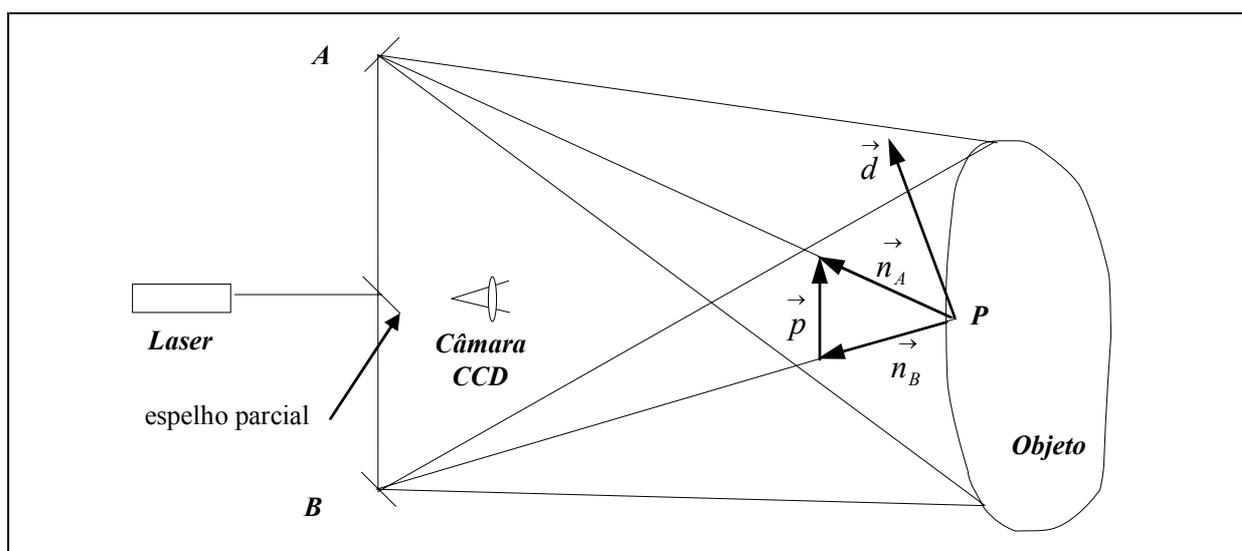


Figura 4.1 Configuração esquemática do princípio da holografia eletrônica.

O padrão de franjas é originado pela superposição óptica de dois padrões *speckle* distintos: o padrão de *speckle* do objeto em repouso e o padrão de *speckle* do objeto deformado.

#### 4.1.1 O Speckle

A imagem do material iluminado aparenta ter uma textura granular, composta por pontos claros e escuros, denominados *speckle*<sup>[14],[73],[96],[101]</sup>. O *speckle* resulta da interferência construtiva e destrutiva de múltiplas frentes de onda que são refletidas por uma superfície opticamente rugosa - figura 4.2(a), podendo ser visto tanto a olho nu quanto por instrumentos ópticos. A figura 4.2(b), apresenta um padrão de *speckle* típico visualizado através de uma câmera CCD. A luz que forma cada *speckle* é totalmente coerente, de forma que padrões de interferência podem ser observados, possuindo um valor de intensidade luminosa mensurável e com uma fase bem definida, que é diferente de seus *speckles* vizinhos.

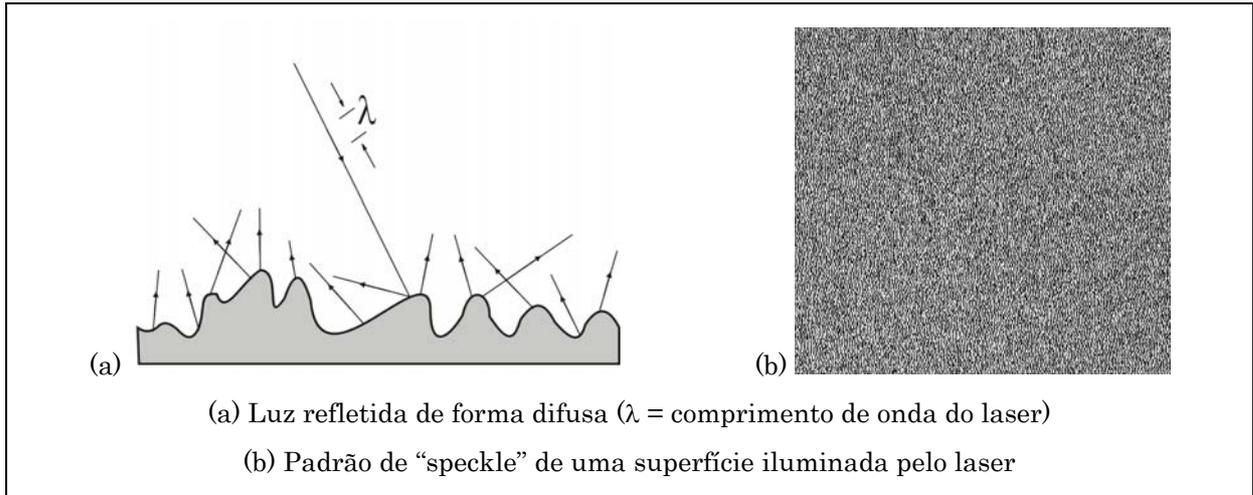


Figura 4.2 O “speckle” sobre uma superfície rugosa<sup>[101]</sup>

#### 4.1.2 A Formação das Franjas

A configuração do interferômetro da figura 4.1, é denominado de dupla iluminação pois a superfície é iluminada simultaneamente por dois feixes de luz que percorrem caminhos ópticos diferentes através dos espelhos *A* e *B*. A imagem observada é resultante da interferência dos dois padrões de *speckle*. Os dois feixes de laser coerentes entre si com intensidades  $I_A(x,y)$  e  $I_B(x,y)$ , fases  $\theta_A(x,y)$  e  $\theta_B(x,y)$ ; interferem entre si originando um novo padrão de *speckle* com intensidade resultante  $I(x,y)$  e fase  $\theta(x,y)$ , podendo ser captada por uma câmera CCD. A intensidade resultante é dada por:

$$I = I_A + I_B + 2 \sqrt{I_A I_B} \cos \theta \quad (4.1)$$

onde:

$I$  = Intensidade do padrão de “speckle” resultante no ponto  $(x,y)$ .

$\theta$  = Diferença de fase entre os feixes *A* e *B* no ponto  $(x,y)$ , ou seja:

$$\theta(x,y) = \theta_A(x,y) - \theta_B(x,y)$$

A intensidade luminosa captada pela câmera CCD é representada em tons de cinzas com escala entre 0 e 255. Quando  $\theta$  for igual a  $0^\circ$ , tem-se uma interferência construtiva, e quando  $\theta$  for igual a  $180^\circ$ , tem-se uma interferência destrutiva.

Quando o material se deforma ou se movimenta, há alteração nos caminhos ópticos, fazendo com que a fase e a intensidade dos *speckles* também variem. A medição por holografia é dada através da comparação de dois padrões de *speckles*, através da subtração de imagens de dois estados diferentes, ou seja: material deformado e material não deformado, ou estados de deformação diferentes. Esta subtração causa o aparecimento de franjas interferométricas, expressando a região do material que sofreu a

mesma quantidade de deslocamento na direção do vetor sensibilidade do interferômetro (vetor  $\vec{p}$  na figura 4.1).

As franjas resultantes da deformação do objeto são obtidas continuamente através da subtração das imagens que vão sendo adquiridas ( $I_d$ ), à medida que o objeto se deforma, da imagem de referência ( $I_0$ ). Esta diferença ( $I_f$ ), é dada por:

$$I_f = |I_d - I_0| = 4\sqrt{I_0 I_d} \left| \text{sen}\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right| \left| \text{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right| \quad (4.2)$$

onde:

- $\theta$  = Diferença de fase entre os feixes A e B.  
 $\theta(x,y) = \theta_A(x,y) - \theta_B(x,y)$
- $\Delta\phi$  = É a variação de fase entre os estados do objeto deformado e em repouso.  
 $\Delta\phi = \Delta\phi_d - \Delta\phi_0$
- $\left| \text{sen}\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right|$  = Representa o nível de ruído de fundo do padrão de interferência.
- $\left| \text{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right|$  = Termo modulador que descreve as franjas de interferência.

### 4.1.3 Deslocamento de Fase ou "*Phase Shifting*"

A técnica mais utilizada para determinar  $\Delta\phi$ , é através do deslocamento de fase de um dos feixes que interferem, pela alteração de seu caminho óptico em incrementos (por exemplo no espelho A - figura 4.1). O método dos quatros passos é o mais usual para a determinação da fase e é dado por<sup>[34]</sup>:

$$\Delta\phi = \arctan \left[ \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \right] \quad (4.3)$$

Onde:  $I_i$  é a intensidade registrada pelo pixel em cada passo  $i$ .

Sendo que  $I_1$  é a intensidade medida no primeiro passo de fase igual a  $0^\circ$ ,  $I_2$  é a intensidade medida no segundo passo de fase igual a  $90^\circ$ ,  $I_3$  é a intensidade medida no terceiro passo de fase igual a  $180^\circ$ , e  $I_4$  é a intensidade medida do quarto passo de fase igual a  $270^\circ$ .

Alternativamente, a equação de CARRÉ, adotada neste trabalho, pode ser usada para calcular a fase. Apresenta como vantagem: ser mais imune a erros e a não

necessitar de se conhecer as fases dos passos aplicados desde que o mesmo incremento de fase seja usado<sup>[34],[96]</sup>, ou seja:

$$\Delta\phi = \arctan \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \quad (4.4)$$

O mapa da diferença de fases da superfície analisada permite que ela seja calculada dentro do intervalo de  $-\pi$  a  $+\pi$ . A fase absoluta, ou contínua, é obtida pela integração dos valores fracionários da fase, onde múltiplos de  $2\pi$  devem ser somados nos pontos de transição de  $-\pi$  a  $+\pi$ . Esta operação é chamada de remoção do salto de fase ou "*phase unwrapping*". A figura 4.3 mostra um exemplo de mapa de fases após a subtração de duas imagens.

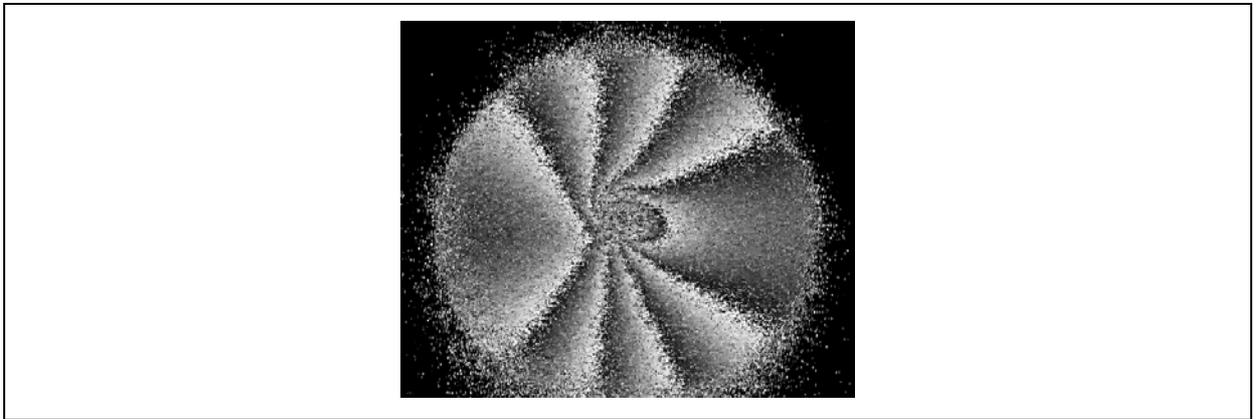


Figura 4.3 Mapa de fases originados por ESPI.

#### 4.1.4 Quantificação do Deslocamento

O número de franjas gerado depende, além do fenômeno físico estudado, do comprimento de onda do laser e do vetor sensibilidade. As componentes de deslocamentos são determinadas pela seguinte equação:

$$\frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi} = \vec{p} \cdot \vec{d} \quad \text{ou} \quad \lambda OF = \vec{p} \cdot \vec{d} \quad (4.5)$$

onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda do laser [ $\mu\text{m}$ ].

$\vec{p}$  = Vetor sensibilidade.

$\vec{d}$  = Vetor deslocamento.

$OF = \frac{\Delta\phi}{2\pi}$  = Ordem de franja, correspondentes às franjas escuras no ponto (x,y).

## 4.2 Princípios da Interferometria Radial

Albertazzi Jr. *et al.* - 1993 a 1999<sup>[5],[6],[8]</sup>, desenvolveram um interferômetro radial (figuras 4.4 e 4.5) cuja principal característica é a medição de deslocamentos radiais em uma superfície. Este dispositivo foi aplicado inicialmente para a medição de tensões residuais pelo método do furo<sup>[6],[14],[15][73]</sup>. O interferômetro radial é composto de dois espelhos cônicos para gerar iluminação dupla com sensibilidade radial em uma região circular.

A figura 4.4 apresenta a configuração básica para obter-se sensibilidade radial no plano<sup>[5],[14],[101]</sup>. O principal elemento do interferômetro é o espelho cônico, o qual é colocado próximo da superfície do objeto sob ensaio. A figura representa a secção transversal do espelho. São também representados dois raios de luz que chegam colimados da fonte de luz, que são refletidos pela superfície do espelho cônico em direção ao ponto  $P$  sobre a superfície do objeto. As direções da iluminação são indicadas pelos vetores unitários  $\vec{n}_A$  e  $\vec{n}_B$ , e a direção da sensibilidade é dada pelo vetor  $\vec{k}$ , obtido pela subtração de ambos vetores unitários. Ambos raios de luz atingem o ponto  $P$  simetricamente. O ângulo incidente é sempre o mesmo e simétrico ao eixo do espelho. Contudo, para cada ponto da superfície do objeto o vetor sensibilidade  $\vec{k}$  será paralelo à superfície do objeto, e uma sensibilidade radial no plano será obtida. O interferômetro é insensível aos deslocamentos tangenciais e aos que ocorrem fora do plano.

A sensibilidade radial completa de  $360^\circ$  é obtida para uma região circular sobre a superfície medida.

Uma configuração prática do interferômetro radial está apresentada na figura 4.5. A luz do laser é expandida e colimada por lentes. O feixe colimado é refletido em direção aos espelhos cônicos por intermédio do espelho  $45^\circ$ . O furo localizado sobre o espelho  $45^\circ$  tem duas funções: (a) evitar que a luz do laser atinja diretamente a superfície medida e prevenir tripla iluminação, (b) prover uma janela de visão para a câmera CCD.

A intensidade luminosa não é constante sobre toda a região iluminada na superfície do objeto, sendo particularmente alta na região do ponto central, pelo motivo que este ponto singular recebe contribuição de luz de todas as secções transversais. Neste caso, uma mancha muito brilhante seria visível na parte central da região de medição circular, conseqüentemente, ofuscaria a imagem adquirida. Para eliminar tal efeito, o espelho cônico é dividido em duas partes conforme a configuração apresentada

na figura 4.4. Na realidade o espelho cônico é formado por duas partes com um pequeno espaço entre eles. Este espaço é suficientemente pequeno de forma que os raios de luz refletidos para a região central da superfície são naturalmente bloqueados. Assim uma pequena sombra circular é criada no centro da área de iluminação.

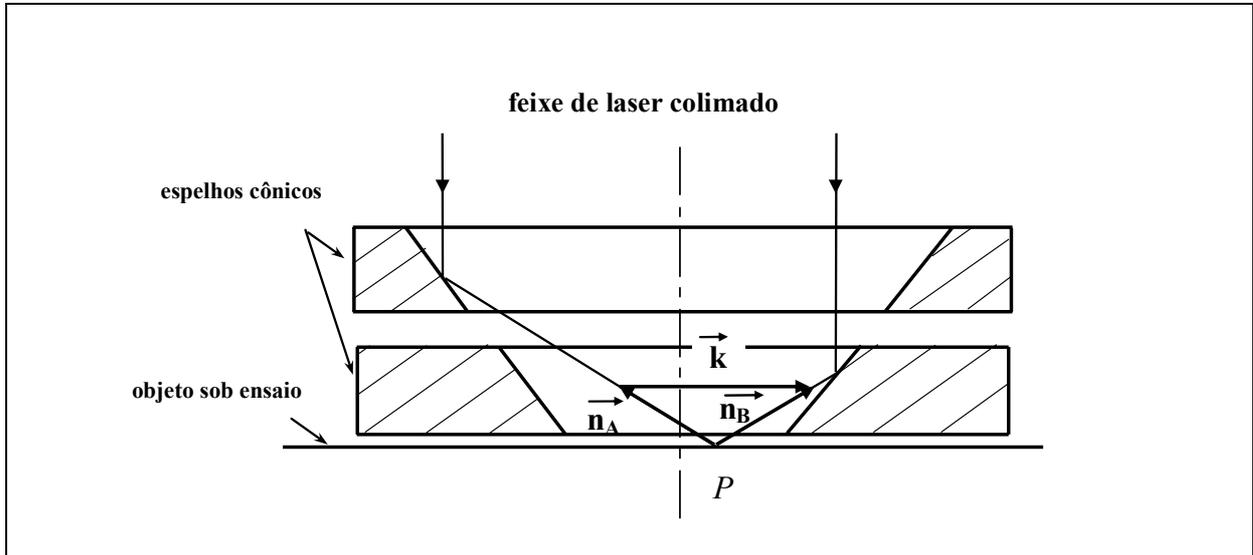


Figura 4.4 Configuração básica para obter-se sensibilidade radial no plano.

Ainda, como pode ser visto na figura 4.5, os raios da iluminação dupla para cada ponto sobre o objeto, são refletidos pela parte superior e inferior do espelho cônico. Um atuador piezoelétrico (PZT) é usado para deslocar a parte superior do espelho cônico de modo a permitir o deslocamento de fase, o que facilita o cálculo da fase do padrão de *speckle* pelo método do algoritmo de CARRÈ (1966)<sup>[23]</sup>, ou do algoritmo dos quatro passos<sup>[34]</sup>.

Devido ao uso de luz colimada, pode-se verificar que a mudança do caminho óptico é exatamente a mesma para cada ponto da superfície iluminada. A relação entre o deslocamento do atuador piezoelétrico ( $\Delta_{PZT}$ ), e a variação do caminho óptico ( $\Delta_{OPC}$ ), é dada pela seguinte equação<sup>[14],[15]</sup>:

$$\Delta_{OPC} = [1 - \cos(2\gamma)] \Delta_{PZT} \tag{4.6}$$

onde:

$\gamma$  = Ângulo entre o eixo do espelho cônico e sua superfície em qualquer secção transversal.

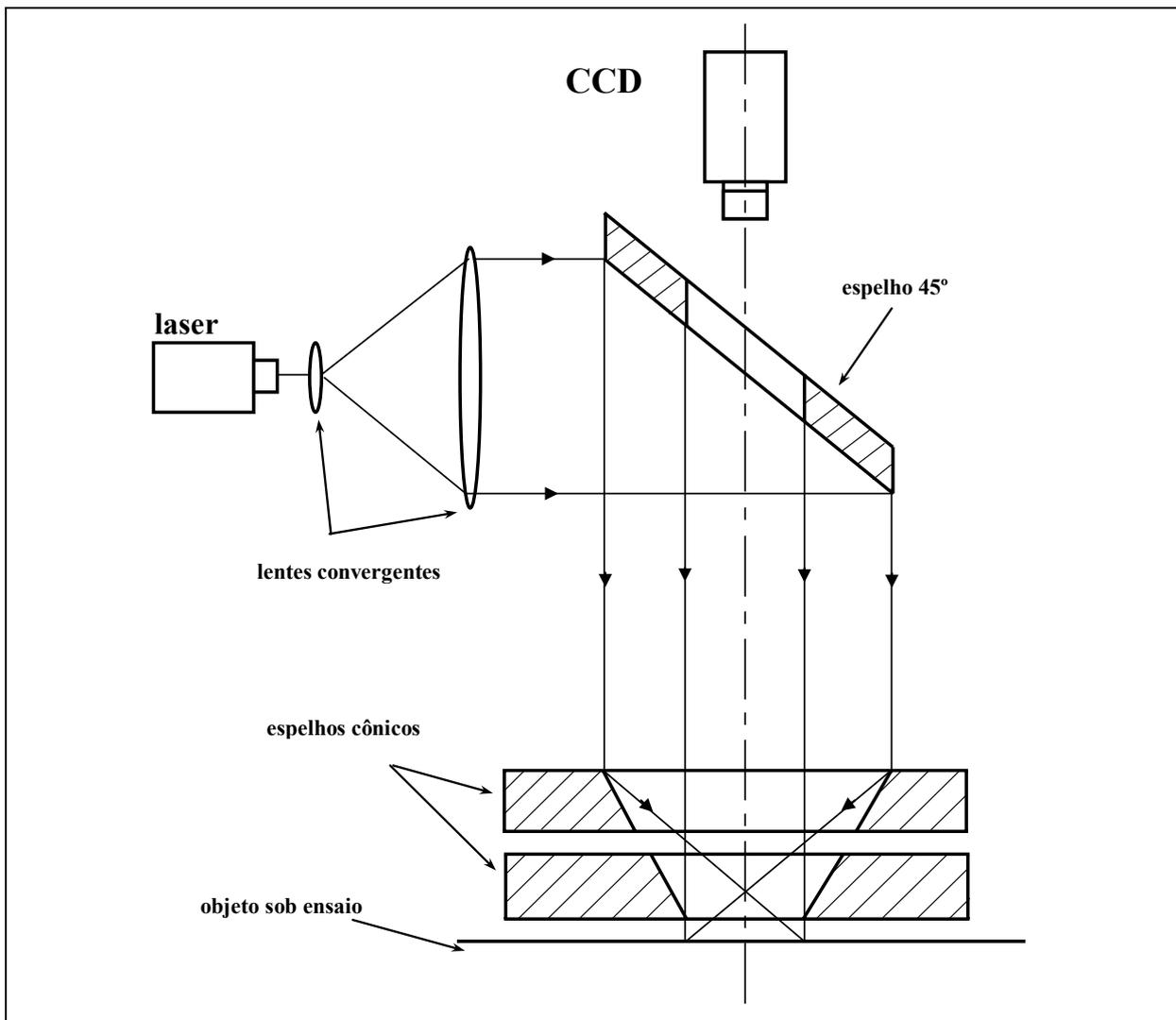


Figura 4.5 Realização prática do interferômetro radial.

## Capítulo 5

# O Sistema de Medição

Neste capítulo são apresentados: o sistema de medição, a bancada de medição, o corpo de prova e a configuração dos ensaios experimentais.

### 5.1 O Sistema de Medição de Tensões Residuais

O interferômetro radial esquematizado na figura 4.5 (seção 4.2), está atualmente incorporado a um dispositivo portátil para medição de tensões residuais, denominado *MTRES Modular* ou *M2TRES*. O MTRES Modular é uma concepção modular para medição de tensões de serviço e residuais, que utiliza o interferômetro radial. O MTRES Modular é o resultado de dois sistemas de medição desenvolvidos anteriormente, ou seja:

- MTRES – Medidor de Tensões Residuais por Holografia Eletrônica<sup>[14],[15]</sup>, figura 5.1(a), e
- Roseta Óptica – Medidor de Tensões Mecânicas por Holografia Eletrônica<sup>[96],[101]</sup>, figura 5.1(b).

O MTRES Modular apresentado na figura 5.2, pode ser empregado: (a) com o método do furo, e (b) com o método da indentação. Este dispositivo foi desenvolvido por uma equipe de profissionais, alunos e professores nos últimos três anos, sendo que os seus primeiros resultados foram apresentados por ALBERTAZZI, PEIXOTO FILHO e SUTERIO, referências: [2], [68], [69], [84], [85], [86] e [87].

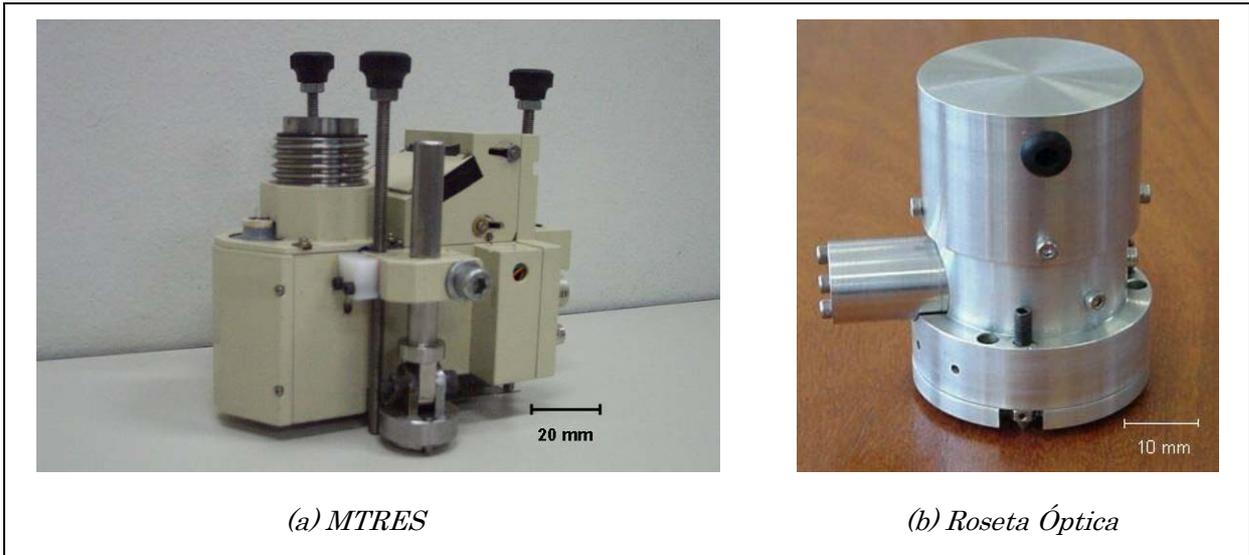


Figura 5.1 Versões anteriores dos sistemas de medição de tensões residuais e de tensões mecânicas.

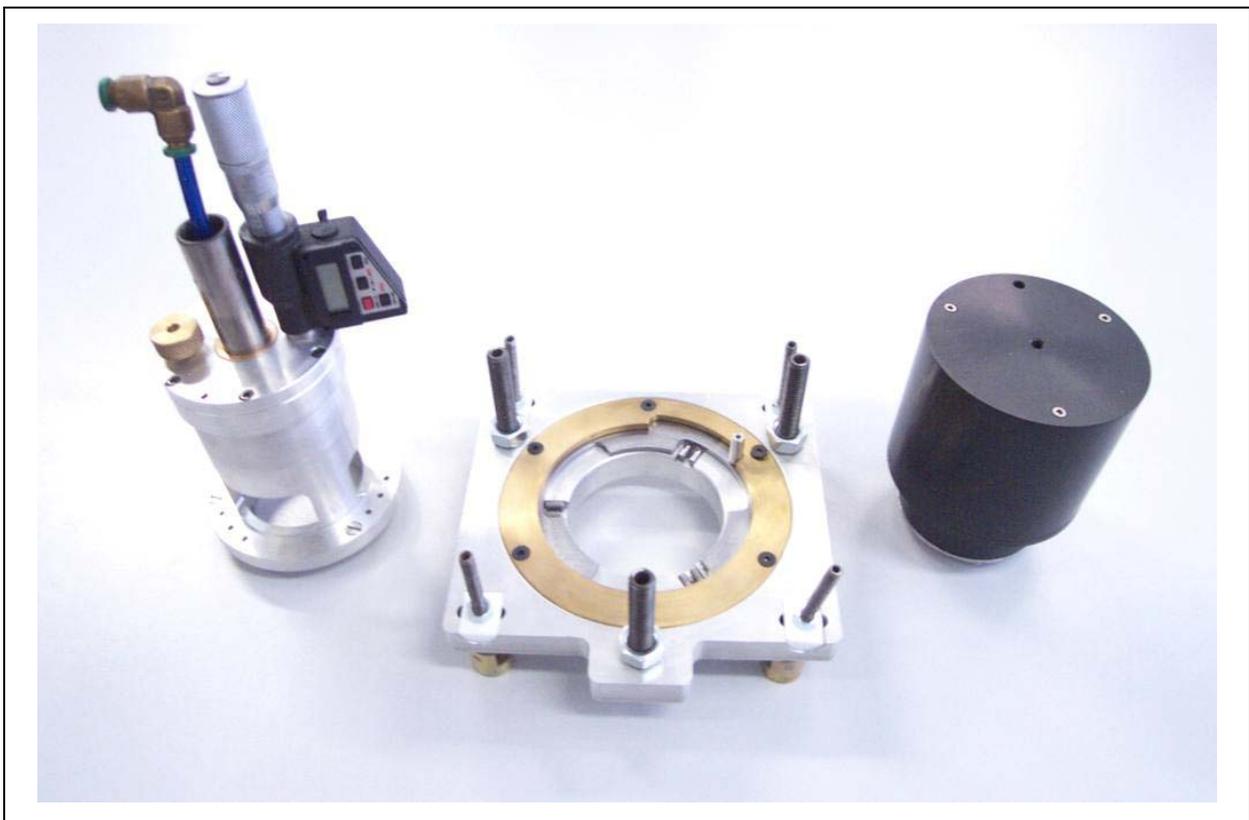
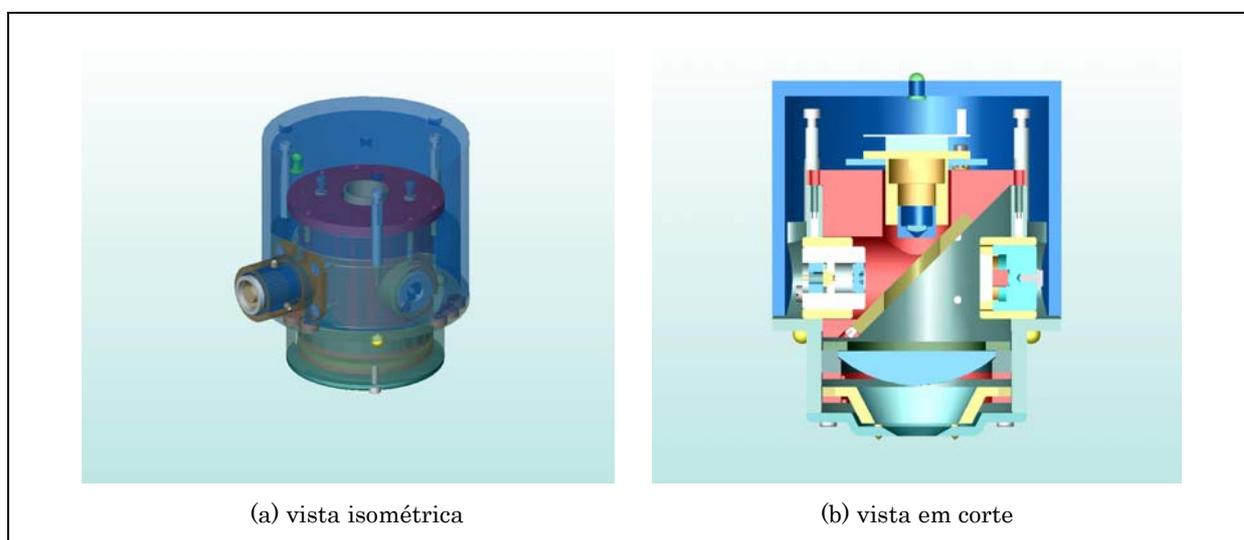


Figura 5.2 MTRES Modular ou M2TRES - Dispositivo para medição de tensões mecânicas e tensões residuais por holografia eletrônica.

Basicamente o medidor traz melhorias no sistema de visualização da superfície do material, melhorias no sistema de deslocamento de fase, e melhorias no sistema de interface de fixação entre a peça e o sistema de medição.

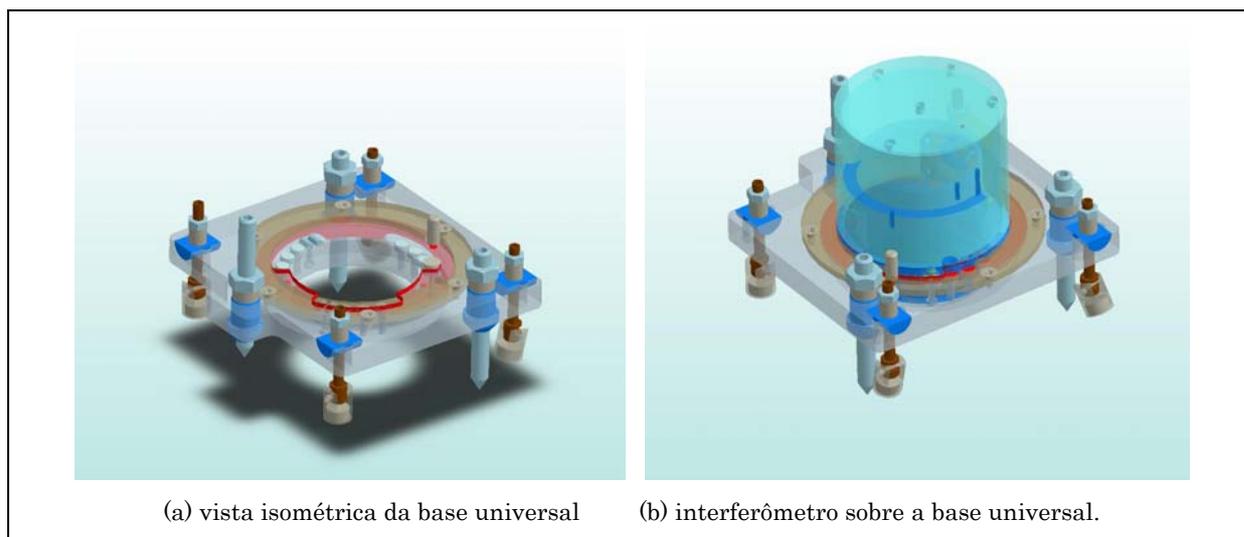
Neste dispositivo optou-se por uma concepção modular de funções, subdividida da seguinte forma:

- **Cabeçote de Medição:** interferômetro radial sendo o responsável pela medição do campo de deslocamentos radiais por holografia eletrônica (figura 5.3);
- **Base Universal:** responsável pela interface de fixação entre os módulos e a superfície a ser ensaiada (figura 5.4);
- **Módulo de Furação:** responsável pela furação para medidas de tensões residuais (figura 5.5 a), para emprego do método do furo;
- **Módulo de Indentação:** responsável pela indentação para medidas de tensões residuais (figura 5.5 b), para emprego do método da indentação.

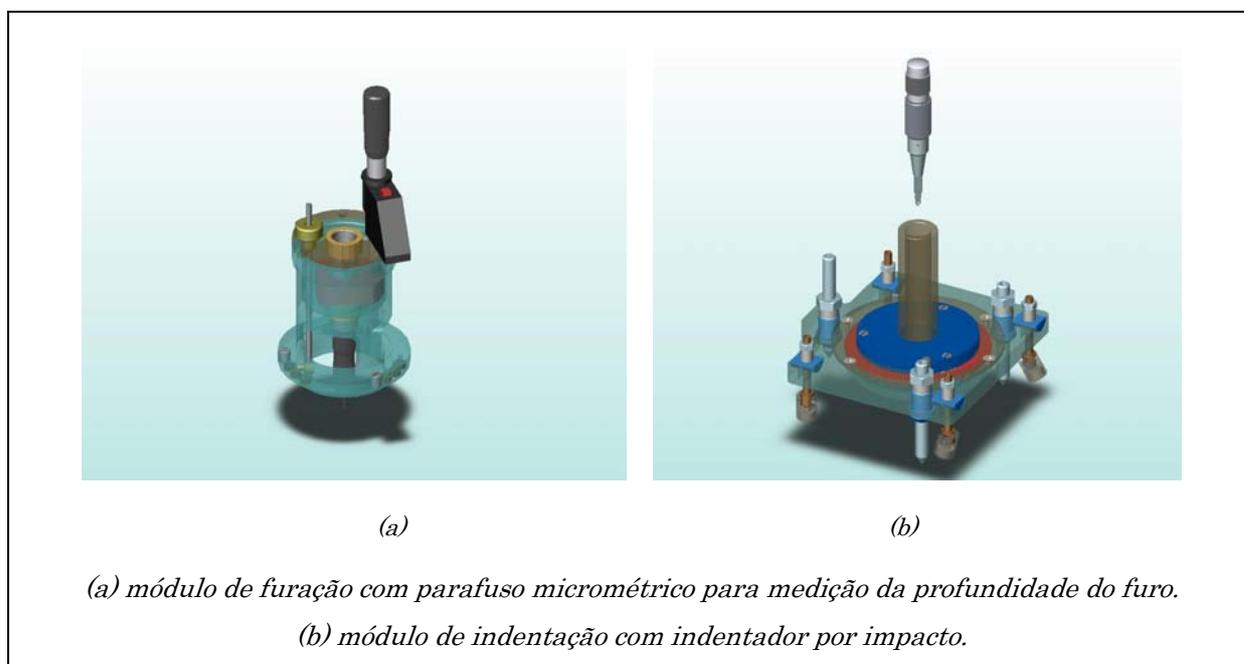


*Figura 5.3 Cabeçote de medição.*

Com esta concepção modular por funções, o sistema pode ainda adquirir novas funções específicas, bastando o desenvolvimento de um novo módulo, como, por exemplo, um módulo para determinação de tensões residuais pelo método do aquecimento localizado<sup>[89],[99],[100]</sup>. Maiores detalhes de funcionamento e concepção dos módulos são abordados no trabalho de PEIXOTO FILHO – 2004<sup>[68]</sup>.



*Figura 5.4 Base universal.*



*Figura 5.5 Módulos para medição de tensões residuais.*

### 5.1.1 O Sistema de Indentação

As formas de indentação ou aplicação de carga para indentar um material, são identificadas como: (a) carga conhecida, (b) deslocamento ou profundidade conhecida, e (c) energia de impacto constante.

Para aplicar carga e deslocamento conhecidos é necessário envolver pelo menos mais um sistema robusto para ser utilizado em conjunto com o sistema de medição por holografia eletrônica. Seria necessário um sistema de aplicação de carga associado a um

medidor de carga e/ou um sistema de aplicação de carga associado a um sistema para quantificar a profundidade atingida da indentação. Ensaios realizados na tentativa de se encontrar uma concepção de projeto eficiente não deram resultados satisfatórios pelos seguintes motivos:

- geração de movimento de corpo rígido excessivo entre o sistema de medição e objeto a ser medido;
- necessidade de uma fixação mais rígida entre o sistema de aplicação de carga e o objeto, de forma que a carga fosse devidamente transmitida ao objeto;

Por exemplo, a figura 5.6 apresenta um protótipo preliminar para aplicação de carga de indentação. Basicamente o sistema estudado consistiu de um indentador e um suporte para aplicação de cargas, ambos, desenvolvidos para poderem realizar experimentos em conjunto com o MTRES - figura 5.6(a). O objetivo foi em medir o campo de deslocamentos radiais da superfície do material indentado submetido a uma tensão previamente conhecida. A grande dificuldade foi em aplicar a carga de modo a se ter uma fixação rígida do sistema de carga ao objeto.

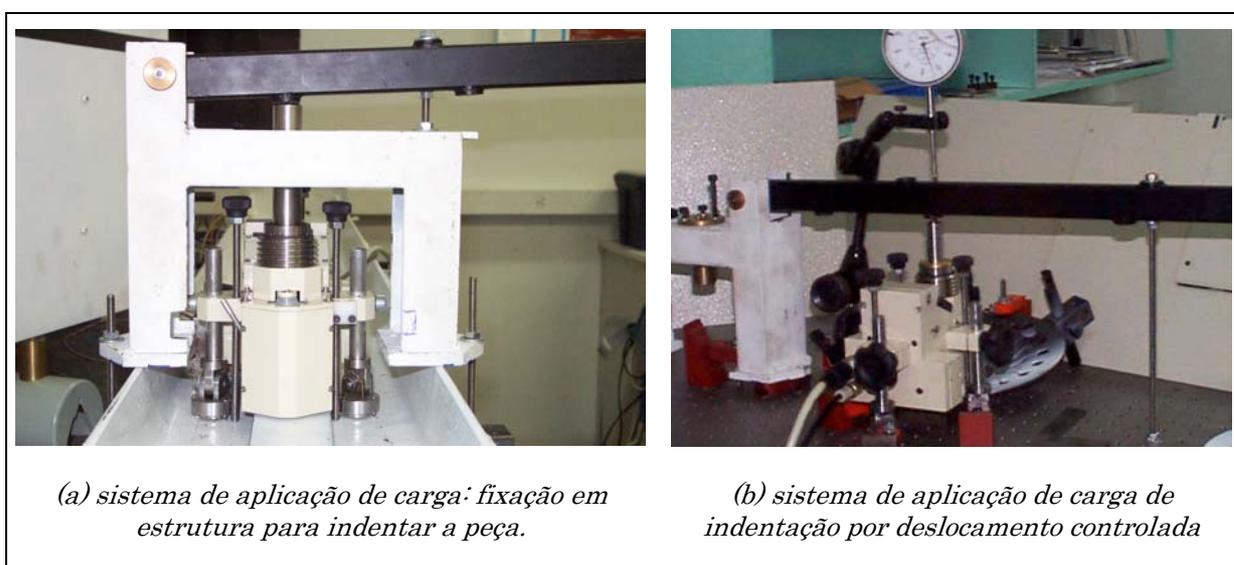


Figura 5.6 Protótipo estudado para aplicação de carga de indentação.

No caso de aplicação de deslocamento conhecido, um relógio controlado de medição de deslocamentos linear com resolução de 0,001 mm foi utilizado para determinar a profundidade de indentação e, por intermédio de um parafuso, o braço de alavanca foi pressionado contra o indentador, e este sobre superfície do material, figura 5.6(b). Para o caso de aplicação de carga conhecida, massas-padrão foram acrescentadas no braço de alavanca do sistema, com possibilidade de aplicar cargas de

até 1875 N. O sistema foi projetado para se ter um fator de amplificação em torno de seis, ou seja: para obter-se 1875 N no indentador, necessita-se aplicar (pendurar), uma carga de 310 N na extremidade do braço de alavanca. Alternativamente, bastaria acrescentar ao circuito uma célula de carga para a monitoração da carga aplicada através do parafuso.

Embora um sistema de aplicação de carga traga benefícios, devido a um conhecimento maior das variáveis no processo com relação ao modelo matemático, optou-se na aplicação de carga de indentação por impacto, trazendo os seguinte benefícios:

- sistema de aplicação de carga portátil;
- pouca geração de deslocamento de corpo rígido;
- não exige grande rigidez entre o sistema de aplicação de carga e o objeto.



(a) base de indentação, indentadores e pontas de indentação.



(b) sistema de indentação sobre a base universal do medidor de tensões residuais.

Figura 5.7 Sistema de aplicação de carga de indentação por impacto.

A figura 5.7 apresenta o sistema de aplicação de carga de indentação por impacto. Basicamente consiste de um sistema de mola com ponteiras removíveis e com regulagem da força de impacto, tipo punção automático com pressão de mola ajustável, freqüentemente utilizada para marcação de centros na realização de usinagens de furos. No indentador podem-se adaptar vários tipos de pontas de indentação. Neste trabalho utilizou-se uma ponta de indentação esférica de carboneto de tungstênio com 2,5 mm de diâmetro, e uma ponta de indentação cônica de diamante com ângulo de 120°, tipicamente utilizadas em ensaios de dureza.

## 5.2 O Corpo de Prova

O corpo de prova utilizado foi padronizado em função do dispositivo de simulação de tensões, abordado na seção 5.3 a seguir. Basicamente é uma barra retangular com as seguintes dimensões: 3,2 mm x 50,8 mm x 3 m (1/8" x 2" x 3 m), esquematizada na figura 5.8.

Nos corpos de provas ensaiados, dez extensômetros de resistência foram instalados em suas superfícies, cinco na inferior e cinco na superior, com o objetivo de monitorarem as deformações elásticas a qual a barra foi submetida. Os extensômetros foram numerados de 1 a 10, conforme apresentado na figura 5.8. Para a monitoração dos extensômetros, utilizou-se uma ponte amplificadora de dezesseis canais, modelo AB22A, HBM – apresentada na figura 5.9.

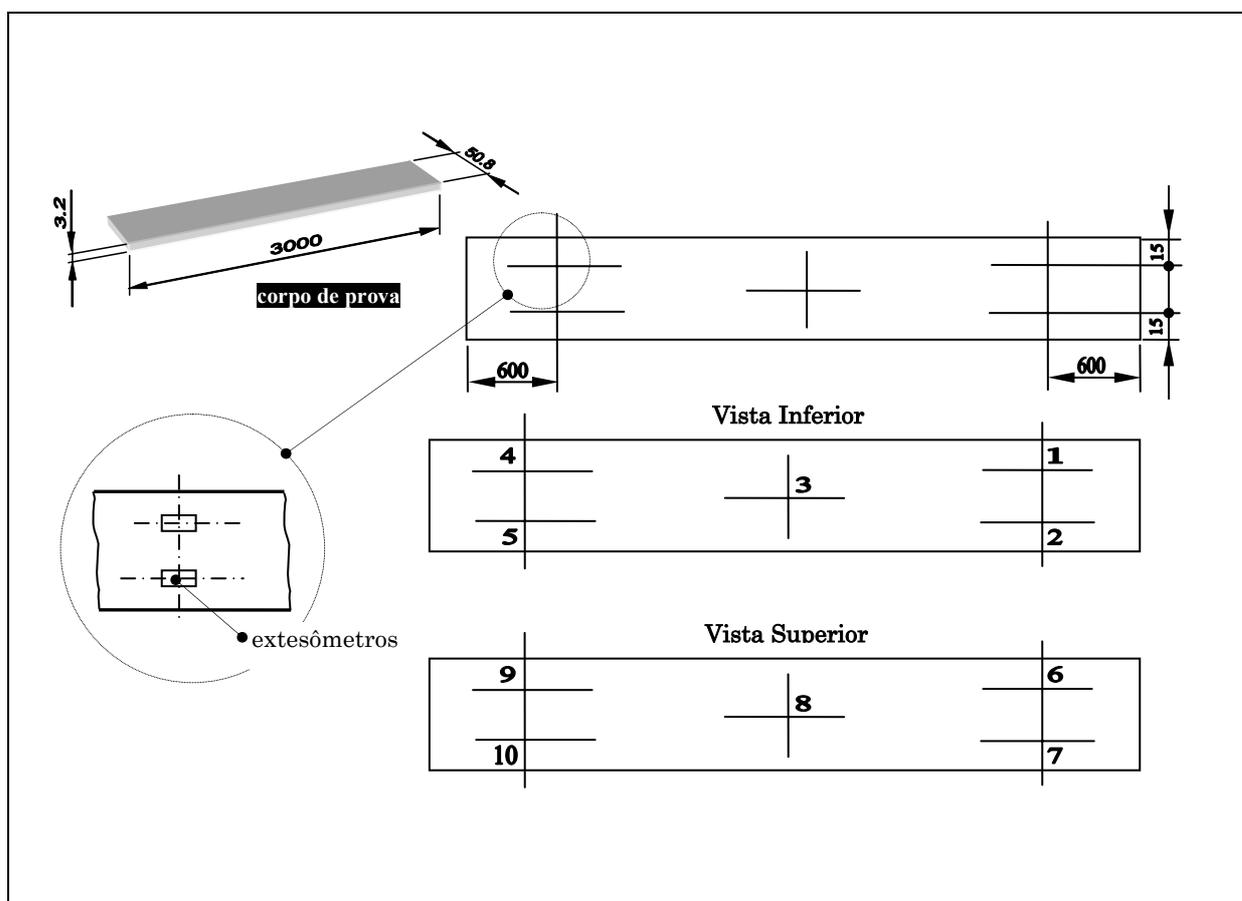


Figura 5.8 Esquema do corpo de prova. Configuração e identificação de instalação dos extensômetros.



*Figura 5.9 Sistema de medição de deformação dos extensômetros instalados nos corpos de prova.*

### 5.2.1 Material Ensaiado

Dois tipos de materiais foram utilizados nos ensaios de indentação dos corpos de prova: aço e alumínio. Para minimizar as tensões residuais macroscópicas, o corpo de prova de aço, especificado como AISI 1020, foi tratado termicamente, tendo sofrido um recozimento pleno a 870 °C por três horas, resfriamento até 700 °C a uma taxa de 17 °C por hora, seguido de resfriamento ao ar livre, até a temperatura ambiente. O corpo de prova de alumínio, especificado como 1100-H18, não sofreu tratamento térmico após o seu recebimento.

As especificações das propriedades mecânicas dos materiais utilizados, foram baseadas nas especificações técnicas nominais apresentadas nas figuras B.1 (Aço AISI 1020) e B.2 (Alumínio 1100-H18), versão em inglês - Apêndice B. Tais especificações foram obtidas através de um site especializado na Internet de propriedades físicas de materiais - MatWeb<sup>[62]</sup>.

Resumidamente, as propriedades utilizadas dos materiais, a identificação do material dos corpos de provas, o nível de carregamento nominal dos ensaios e o nível de carregamento relativo dos ensaios relativo à tensão de escoamento do material, estão apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Identificação dos corpos de provas ensaiados, material, propriedades mecânicas e nível de carregamento dos ensaios.

Deformação [μm/m]	Material	Tensão de Escoamento [MPa]	Módulo Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Espessura [mm]	Tensão [MPa]	Porcentagem $\sigma_e$ [%]
0	Aço AISI 1020	295	200	0.29	2	0	0.0
295						59	20.0
590						118	40.0
885						177	60.0
1180						236	80.0
0	Alumínio 1100-H18	152	68.9	0.33	2	0	0.0
441						30	20.0
882						61	40.0
1324						91	60.0
1765						122	80.0

### 5.3 O Dispositivo de Simulação de Tensões Residuais

O dispositivo de simulação de tensões residuais desenvolvido, está apresentado na figura 5.10(a). Basicamente este dispositivo é composto por um perfil “U” em aço e um sistema de parafusos para aplicação de carregamento nas extremidades de corpos de prova, de barra chata de 3 m de comprimento - figura 5.10 (b); larguras e espessuras máximas de 70 x 5 mm respectivamente. A aplicação de carga é realizada através do aperto de três parafusos em cada extremidade como forma de assegurar a aplicação de deformações uniformes à tração no sentido longitudinal do corpo de prova (carregamento 1-D).

As características metrológicas do dispositivo de simulação de tensões residuais foram obtidas por SUTERIO *et al.* - 2003<sup>[86],[87]</sup>, que propoz um procedimento para obtenção de tensão uniforme e as incertezas envolvidas nas simulações de tensões mecânicas. O procedimento proposto basicamente pode ser resumido no nivelamento do corpo de prova descarregado em relação ao dispositivo, zeragem dos extensômetros e aplicação de carga no corpo de prova. O procedimento de nivelamento proposto está representado na figura 5.11(a), onde pode ser utilizado calços ajustáveis para nivelamento e posicionamento do corpo de prova. No transcorrer dos experimentos, uma nova forma de zeragem dos extensômetros foi proposta, trazendo resultados significativamente melhores. Basicamente consiste em pendurar o corpo de prova, o mais nivelado possível, com a sua seção transversal orientada na posição vertical, zerar a ponte dos extensômetros, instalar o corpo de prova no dispositivo de simulação e aplicar o carregamento com monitoração através dos extensômetros. A figura 5.11(b) representa o novo procedimento de zeragem dos extensômetros do corpo de prova.

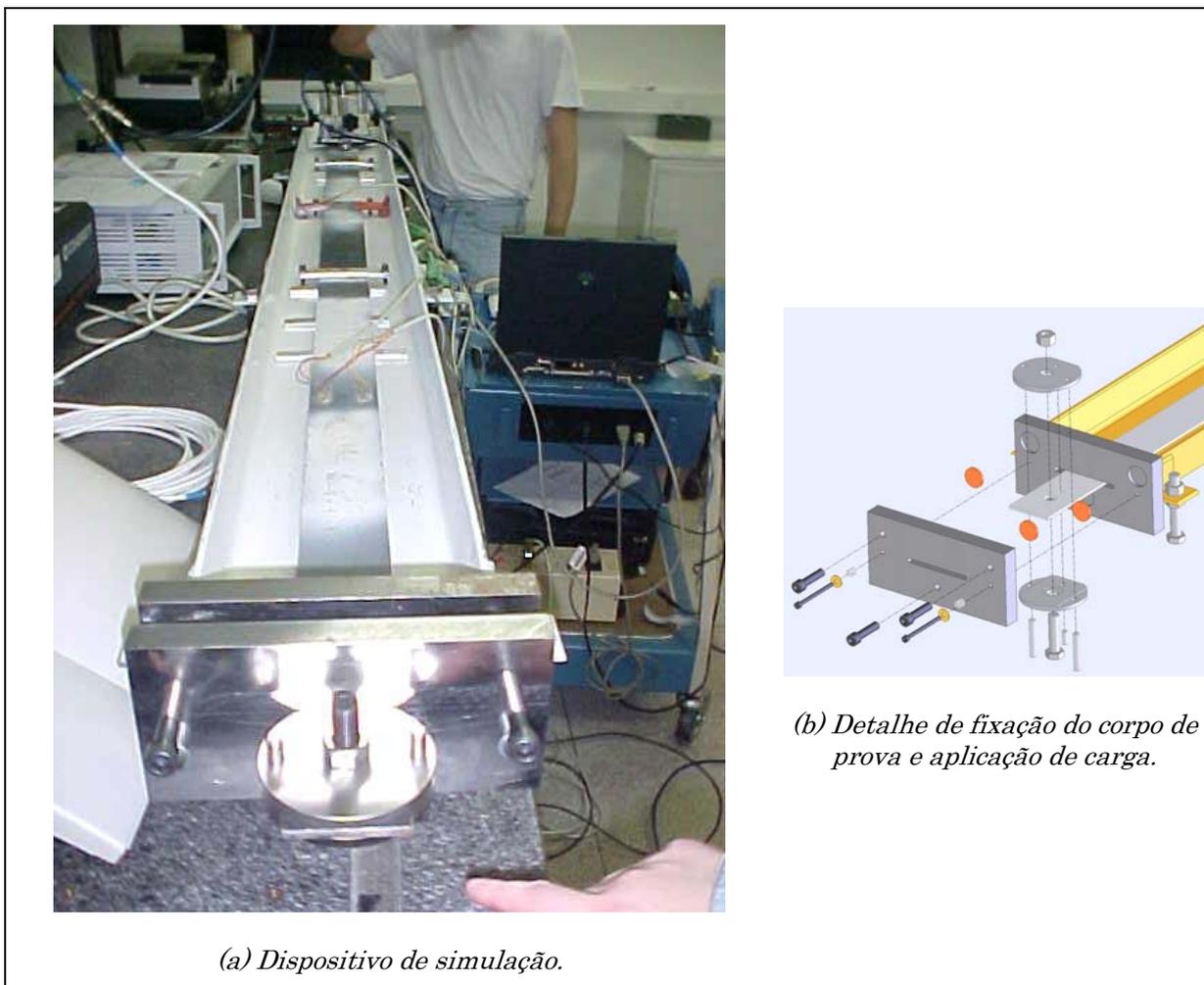


Figura 5.10 Dispositivo de simulação de tensões residuais 1-D.

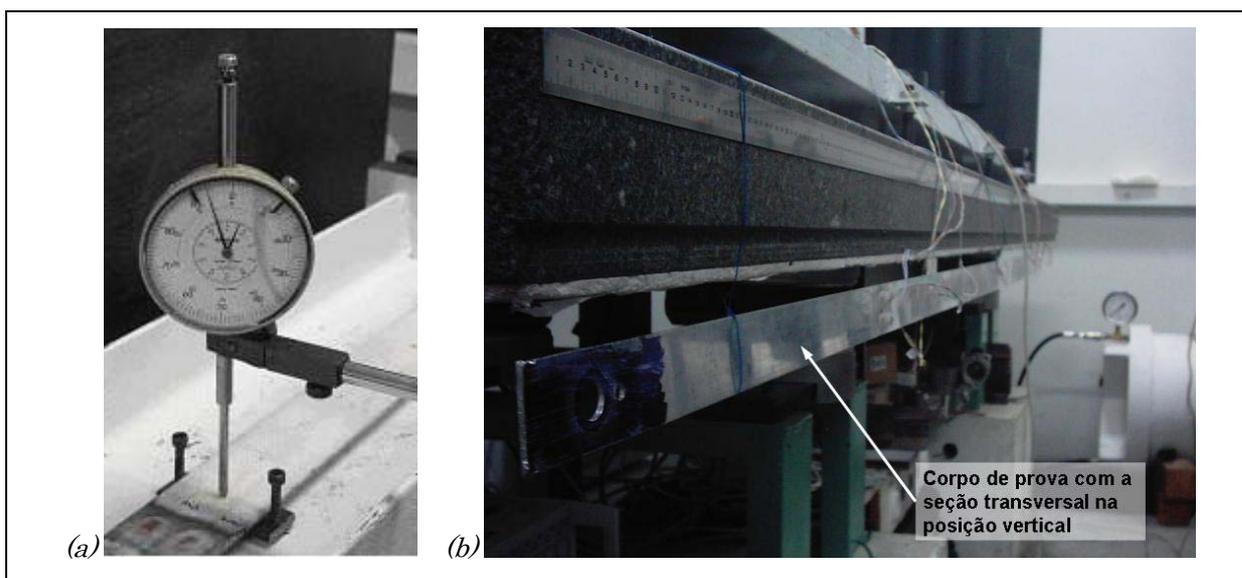


Figura 5.11 Ajuste e nivelamento do corpo de prova com calços ajustáveis e atual procedimento de zeragem dos extensômetros do corpo de prova

Os resultados iniciais apresentaram incertezas entre 10 e 20 % do valor indicado da medida de deformação (nível de confiança de 95%)<sup>[87]</sup>, com algumas melhorias, as incertezas baixaram para os níveis de 7 a 15 %<sup>[86]</sup>, respectivamente para uma faixa de medição entre 100 e 1000  $\mu\text{m/m}$ . Com o atual procedimento, é possível obter incertezas da ordem de 3 a 8 % nas medidas de deformações.

### 5.3.1 Fatores de Influência na Medição de Deformação

Algumas fontes de incerteza foram identificadas na medição das deformações do corpo de prova. Estas fontes, foram divididas em três grupos<sup>[25]</sup>:

- (1) incertezas devido à ponte amplificadora;
- (2) incertezas devido aos extensômetros;
- (3) incertezas devido ao corpo de prova.

As fontes de incertezas estão apresentadas e detalhadas na tabela 5.2. A influência de cada uma das fontes de incerteza foi estimada a partir dos dados de ensaio, das especificações técnicas dos fabricantes e minimizada através de procedimentos específicos. Por exemplo, para minimizar as tensões residuais macroscópicas pré-existentes e homogeneizar as propriedades mecânicas do material, o corpo de prova foi tratado termicamente. A disposição dos extensômetros nas faces superior e inferior do corpo de prova visaram manter a uniformidade do campo de tensões.

*Tabela 5.2 Fontes de incerteza na medição com extensômetros*

<b>Ponte Amplificadora</b>	<b>Extensômetros de Resistência Elétrica</b>	<b>Corpo de Prova</b>
Erro de zero.	Fator do extensômetro (“gage factor”).	Tensões residuais pré-existentes.
Erro de leitura.	Erro de posicionamento dos extensômetros.	Variações nas propriedades mecânicas.
Incerteza da ponte:		Erros geométricos.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinal de alimentação dos extensômetros.</li> <li>• Erro devido à variação de temperatura.</li> <li>• Erro devido à instabilidade das conexões.</li> <li>• Linearidade do sistema de medição.</li> </ul>		Erros na aplicação da força.

## 5.4 Planejamento dos Ensaios Experimentais

Os ensaios foram planejados para investigar as relações entre as tensões residuais que agem em um corpo de prova e o campo de deslocamentos radiais que se desenvolvem em torno da região indentada. Diferentes níveis de tensões residuais foram simulados e diferentes parâmetros da indentação foram avaliados.

Para cada ensaio foi produzida uma tensão pré-definida, conhecida e uniforme, monitorada por intermédio de extensômetros instalados no corpo de prova. Após esta etapa, o corpo de prova foi indentado, medindo-se o campo de deslocamentos radiais por holografia eletrônica correlacionando-o com a tensão pré-existente. Os níveis de carregamento e os parâmetros de indentação foram registrados em tabelas semelhantes a tabela 5.3. Procurou-se identificar em cada ensaio, variação de fatores e níveis estatísticos, de modo a fundamentar e dar credibilidade aos resultados experimentais obtidos<sup>[61]</sup>. O plano experimental inicial de 180 ensaios, buscou um escopo abrangente através de:

- 03 repetições;
- 02 tipos de indentadores;
- 03 profundidades ou 03 cargas ou 03 impactos de indentação;
- 02 tipos de materiais;
- 05 simulações de tensões residuais.

Otimizações foram feitas, objetivando limitar inicialmente a quantidade dos ensaios. Por exemplo: identificação do melhor tipo de indentador para realizar a medição (cônico ou esférico), melhor forma de aplicação da indentação (carga, deslocamento ou impacto); variáveis a serem medidas para melhor quantificar a tensões residuais do material. Com estas otimizações houve uma redução considerável do número de ensaios realizados. Por outro lado, houve a necessidade de aumentar o número de simulações de campos de tensões residuais, para garantir a robustez do modelo proposto.

Os resultados deste conjunto de experimentos foram correlacionados com o fenômeno físico através dos modelos propostos na seção 6.3, permitindo determinar a tensões residuais existente no material.

Tabela 5.3 Planejamento dos experimentos para a validação do modelo.

Identificação do ensaio	Ensaio:	# 1	# 2	# 3	...	...
	Data:	...	...	...	...	...
	Arquivo da imagem:	ensaio1.tif	ensaio2.tif	...	...	...
Variáveis do ensaio	Tipo de indentedor:	esférico	cônico	—	—	—
	Profundidade de Indentação [mm]:	0.10	0.20	0.30	—	—
	Carga de indentação [N]:	200	600	1200	—	—
	Impacto:	baixo	médio	alto	—	—
	Material:	Aço	Alumínio	—	—	—
	Tensão de referência [MPa]:	0	50	100	150	200
Variáveis medidas	Profundidade de indentação [mm]:	...	...	...	...	...
	Retorno Elástico [mm]:	...	...	...	...	...
	Profundidade Residual [mm]:	...	...	...	...	...
	Diâmetro da indentação [mm]:	...	...	...	...	...
Variáveis calculadas	Carga de indentação [N]:	...	...	...	...	...
	Tensões principais [MPa]:	...	...	...	...	...
	Direção das Tensões Principais [°]:	...	...	...	...	...

## 5.5 Procedimento de Medição

O procedimento de medição básico para medição de tensões residuais por indentação com o MTRES Modular, está detalhado na figura 5.12. O procedimento pode ser resumido em cinco etapas:

- (1) aquisição da imagem de referência;
- (2) posicionamento do sistema de indentação;
- (3) indentação ou puncionamento da peça a ser medida;
- (4) reposicionamento do sistema de medição;
- (5) aquisição da imagem e processamento.

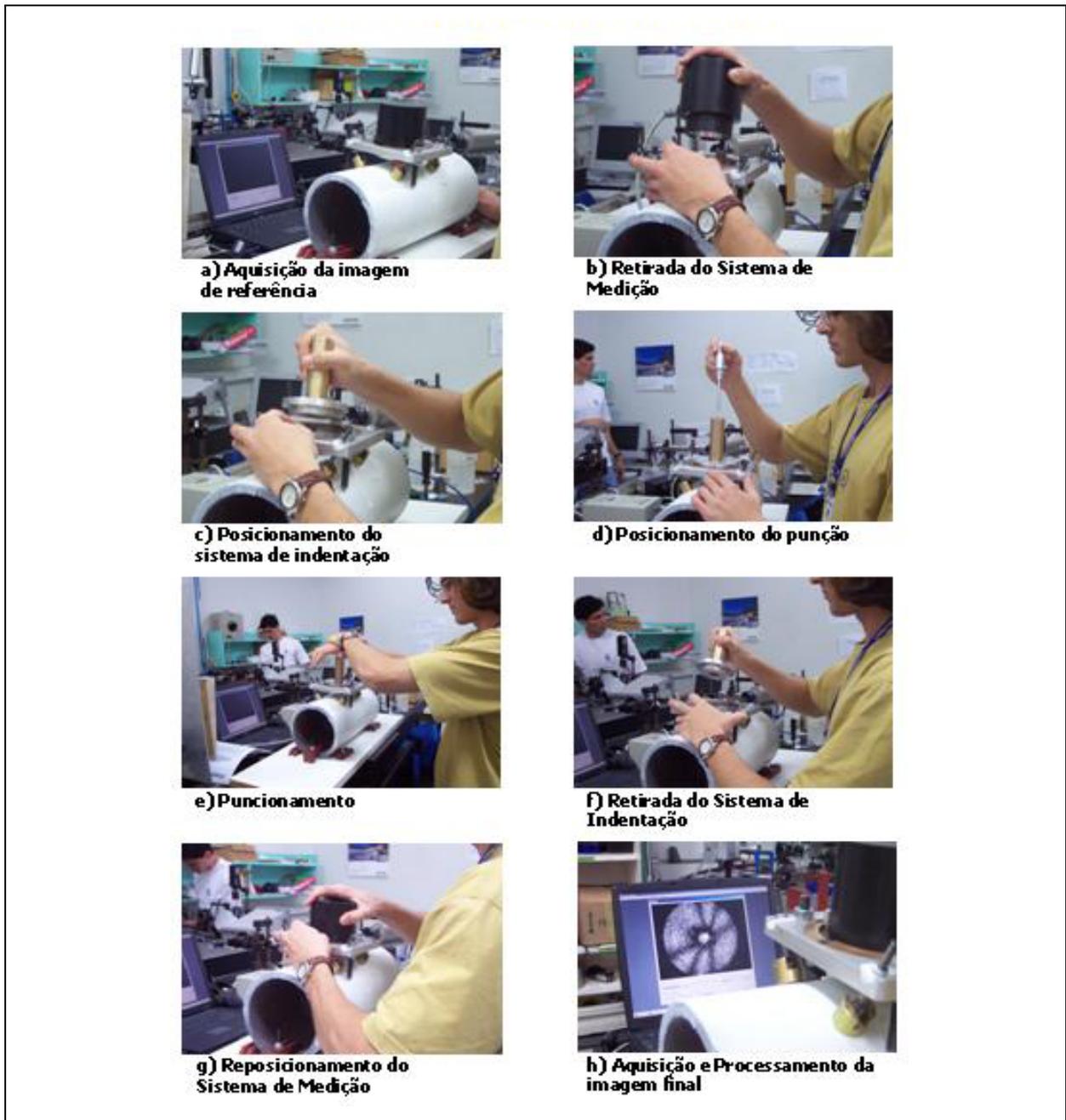


Figura 5.12 Procedimento de medição de tensões residuais por indentação

# Capítulo 6

## Modelo Matemático

Este capítulo apresenta vários aspectos que levaram à formulação do modelo matemático para quantificação de tensões residuais.

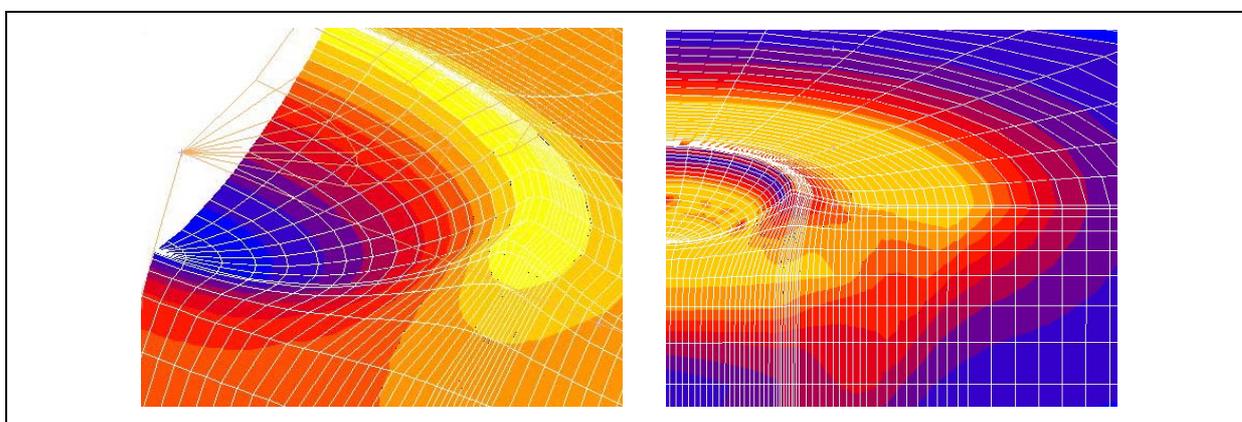
### 6.1 Mecânica do Processo de Indentação

A mecânica do fenômeno físico que ocorre em um material que contenha tensões residuais quando está submetido a uma indentação localizada pode ser resumido da seguinte maneira:

- (1) o material apresenta um estado de tensões residuais inicial antes da indentação;
- (2) a indentação provoca uma tensão compressiva intensa na região indentada e nas suas vizinhanças;
- (3) as tensões induzidas pela indentação se combinam com as tensões residuais preexistentes levando o material ao escoamento de forma diversa em distintas regiões. As tensões residuais preexistentes são influenciadas pelas regiões que escoam, e sofrem modificações tanto em direção quanto em intensidade;
- (4) após a remoção da ferramenta de indentação, uma deformação plástica residual permanece na superfície indentada, contendo duas componentes: (a) uma decorrente da indentação apenas e (b) outra decorrente dos efeitos das tensões residuais combinadas com a indentação;
- (5) o efeito das tensões residuais pré-existentes pode ser isolado subtraindo o campo de deslocamentos radiais total da superfície indentada pelo campo de deslocamentos radiais resultante de uma indentação que o mesmo material apresentaria se não tivesse tensões residuais iniciais. Esta operação elimina o efeito da tensão induzida pelo indentador.

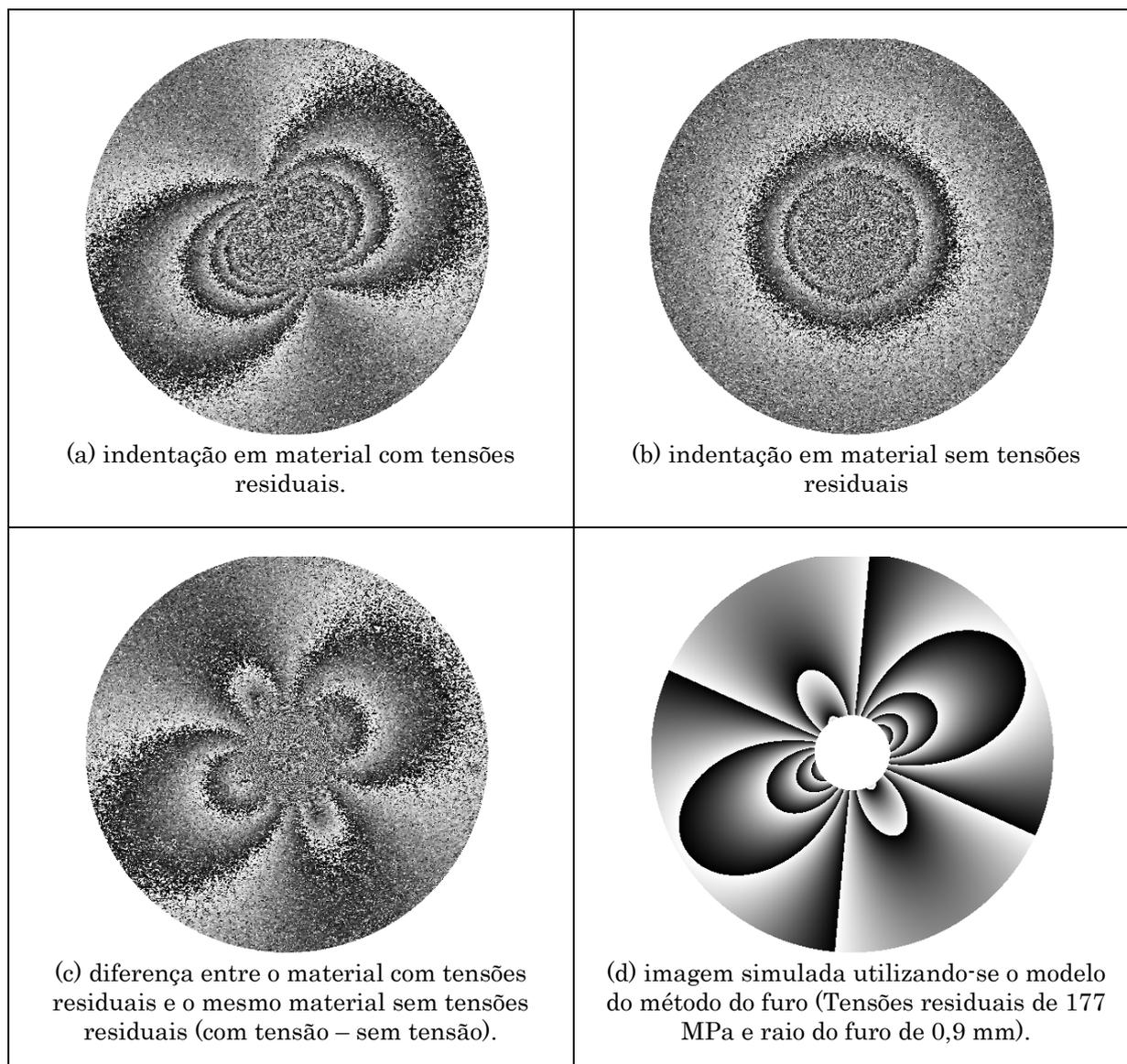
Este fenômeno foi numericamente modelado pelo GRANTE - Grupo de Análise e Projeto Mecânico do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC ([www.grante.ufsc.br](http://www.grante.ufsc.br)), usando elementos finitos. Dentre as diversas simulações realizadas, destaca-se o relatório apresentado no Apêndice C, que corresponde ao processo de indentação sobre um material elasto-plástico ideal com uma indentação esférica, utilizando-se de software comercial<sup>[60]</sup>.

Os resultados apresentam o comportamento do campo de deslocamentos sobre a superfície do material, com tensões residual pré-definidas e representam qualitativamente bem o fenômeno físico. A figura 6.1 apresenta o campo de deformações localizado ao redor da indentação.



*Figura 6.1 Simulação numérica por elementos finitos (FEM).*

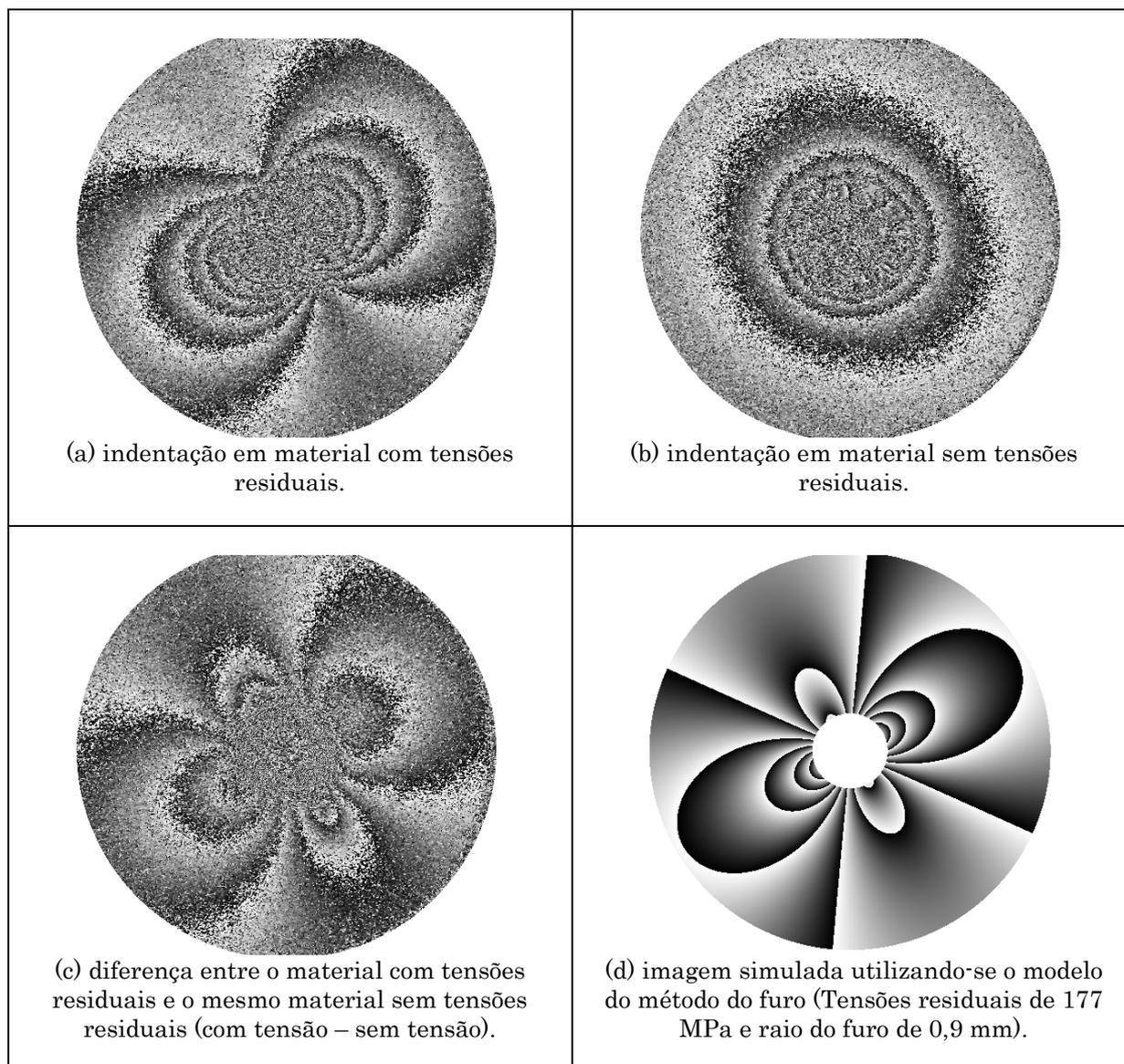
A figura 6.2 apresenta alguns resultados experimentais. Observa-se o padrão da diferenças de fase que correspondem aos campos de deslocamentos radiais medidos com o interferômetro radial por holografia eletrônica e o método da indentação em um corpo de prova de Aço AISI 1020. A figura 6.2(a) corresponde ao corpo de prova com tensões residuais mecanicamente simulada em torno de 177 MPa (correspondendo à deformações de 886  $\mu\text{m/m}$ ), com direção principal em torno 30° em relação ao eixo horizontal das imagens. A figura 6.2(b) corresponde ao corpo de prova livre de tensões residuais iniciais. Em ambos os casos foi utilizado um indentador cônico de diamante de 120° com profundidade de indentação em torno de 0,30 mm. Ao subtrair os campos de deslocamentos das figuras 6.2(a) e 6.2(b) a figura resultante, 6.2(c), é muito semelhante à que seria obtida se o método do furo fosse aplicado para este mesmo carregamento, figura 6.2(d).



*Figura 6.2* Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica após indentação cônica em um material de aço ABNT 1020.

O mesmo fato pode ser observado nas figuras 6.3(a) a 6.3(d), onde utilizou-se um indentedor esférico de aço de  $\phi$  2,5 mm e profundidade de indentação em torno de 0,10 mm. As mesmas condições de carregamento foram mantidas no material.

Não foi identificado na literatura um modelo analítico que descreva de forma suficientemente completa o fenômeno da superposição da carga induzida pela indentação com as tensões residuais pré-existentes na superfície do material. Para correlacionar o campo de deslocamentos radiais medidos com as tensões principais, um modelo semi-empírico é aqui proposto e experimentalmente avaliado através de experimentos controlados.



*Figura 6.3* Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica após indentação esférica em um material de aço ABNT 1020.

Baseando-se na relativa semelhança entre as figuras 6.2(c) e 6.2(d) e entre 6.3(c) e 6.3(d), o modelo analítico aproximado para o método da indentação foi fortemente influenciado pelo mesmo modelo do método do furo, com algumas considerações e fatores de correção que serão descritos a seguir:

## 6.2 Formulação do Método do Furo

O Método do Furo para medição de tensões residuais está apresentado no capítulo 2, seção 2.4. Basicamente o método do furo consiste na execução de um furo na superfície de um material que contenha tensões residuais, o que causa um alívio de tensões localizado. O reequilíbrio destas tensões nas imediações da região furada causa

alterações do campo de deformações superficiais do material, que são medidas e correlacionadas com o estado de tensões iniciais.

Para a maioria das aplicações que utilizam o método do furo, a usinagem resulta em furo não passante (furo cego), sendo realizado com profundidade aproximadamente igual ao diâmetro da ferramenta de usinagem, geralmente pequena quando comparada com a espessura do material a ser testado.

A figura 6.4 apresenta resultados de uma medição utilizando o método do furo medida com o interferômetro radial por holografia eletrônica. A figura 6.4(a) representa a diferença do mapa de fase do campo de deslocamentos radiais sofrido pelo material, antes e após a usinagem do furo. A figura 6.4(b) representa a imagem reconstruída pelo modelo do furo utilizando os parâmetros calculados com base na imagem anterior.

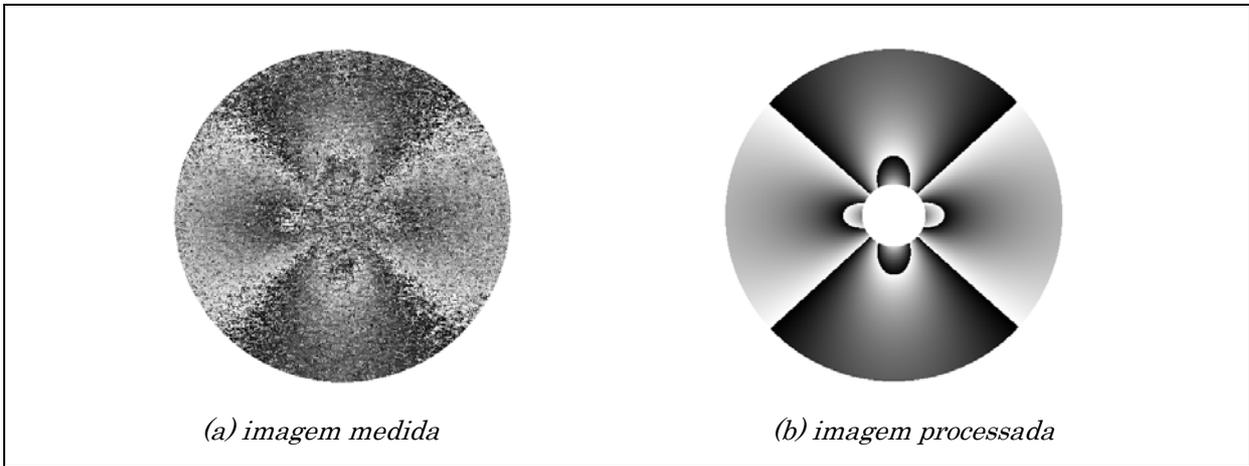


Figura 6.4 Campo de deslocamentos radiais medido por holografia eletrônica e o método do furo.

### 6.2.1 Furo Passante

Os deslocamentos  $u$  e  $v$  em coordenadas polares nas direções radial e tangencial respectivamente, estão relacionados com as deformações e tensões elásticas no estado plano de tensão pela lei de Hooke por<sup>[25],[53],[59]</sup>:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) \qquad \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \qquad (a)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \qquad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \qquad (b) \qquad (6.1)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{G} \tau_{r\theta} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{r\theta} \qquad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \qquad (c)$$

onde:

$\varepsilon_r$	=	deformação radial;
$\varepsilon_\theta$	=	deformação tangencial;
$\gamma_{r\theta}$	=	deformação angular;
$\sigma_r$	=	tensão radial;
$\sigma_\theta$	=	tensão tangencial;
$\tau_{r\theta}$	=	tensão cisalhante;
$E$	=	módulo de elasticidade;
$G$	=	módulo de torção;
$\nu$	=	coeficiente de Poisson;
$r$	=	raio;
$\theta$	=	ângulo (coordenada polar).

Deve-se ressaltar que, devido à sensibilidade do sistema de medição utilizado neste trabalho (interferômetro radial), só são medidas as componentes radiais de deformação e deslocamento. A solução elástica para o método do furo passante, a deformação radial em termos de tensões principais é dada da seguinte forma<sup>[25],[94]</sup>:

$$\varepsilon_r(r, \theta) = A(r) (\sigma_1 + \sigma_2) + B(r) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.2)$$

onde:

$$A(r) = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2; \quad B(r) = -\frac{1}{2E} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \left[ -3(1+\nu) \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 4 \right]$$

$r_0$	=	raio do furo;
$\beta$	=	direção das tensões principais;
$(r, \theta)$	=	coordenadas polares.

$A(r)$  e  $B(r)$  são funções dependentes do raio, das propriedades do material e da forma geométrica do furo.

A componente de deslocamento radial pode ser obtida, substituindo  $A(r)$  e  $B(r)$  na equação 6.2 e integrando a deformação radial da equação 6.1(a), em relação ao raio, ou seja:

$$u_r(r, \theta) = \int_{r=r_0}^{r=\infty} \varepsilon_r(r, \theta) dr \quad (6.3)$$

Obtendo-se assim a seguinte expressão:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{1}{r} r_0^2 (\sigma_1 + \sigma_2) + \left( \frac{1}{2E} \right) \frac{1}{r} r_0^2 \left[ 4 - \frac{(1+\nu)}{r^2} r_0^2 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) + T(\theta) \quad (6.4)$$

onde:

$T(\theta)$  = função de  $\theta$  que representa os deslocamentos de corpo rígido dos pontos medidos, relativos à peça e/ou ao interferômetro, onde<sup>[5],[6],[96],[97]</sup>:

$$T(\theta) = Tx \cos(\theta) + Ty \sin(\theta)$$

Na prática as componentes de deslocamentos de corpo rígidos podem ser facilmente eliminadas através de processamento de imagens. Assim a equação 6.4 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \bar{A}(r) (\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B}(r) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.5)$$

onde:

$$\bar{A}(r) = \frac{1+\nu}{2E} \left( \frac{1}{r} \right) r_0^2 \quad \bar{B}(r) = \frac{1}{2E} \left( \frac{1}{r} \right) r_0^2 \left[ 4 - \frac{(1+\nu)}{r^2} r_0^2 \right]$$

Nota-se que  $\bar{A}(r)$  e  $\bar{B}(r)$  também são funções dependentes do raio, das propriedades do material e da geometria do furo.

### 6.2.2 Furo Cego

Analogamente para medição de tensões residuais utilizando-se o método do furo cego, fatores de correção experimental, ou calculados por elementos finitos, são acrescentados ao modelo analítico do furo passante. O método do furo cego apresenta certa complexidade, sendo que nenhuma forma fechada de solução analítica foi encontrada para o cálculo direto das tensões residuais para medição de deformações. Frequentemente são introduzidos coeficientes de correção empíricos<sup>[24],[49],[54],[94]</sup>. Estes coeficientes empíricos foram propostos por SCHAJER-1988<sup>[75],[76]</sup>, sendo aceitos e adotados pela ASTM - "*American Society for Testing and Materials*", por apresentarem excelente concordância com resultados experimentais<sup>[12]</sup>.

Para medidas de deslocamentos, MAKINO & NELSON - 1994<sup>[58]</sup>, também verificaram a necessidade de levar em conta os limites de profundidade do furo cego, calculando coeficientes de correção por elementos finitos e apresentando uma alteração da equação 6.5, reescrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = A r_0 \bar{a}\left(\frac{r_0}{r}\right) (\sigma_1 + \sigma_2) + B r_0 \bar{b}\left(\frac{r_0}{r}\right) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.6)$$

onde  $A$  e  $B$ , são constantes dadas por:

$$A = \frac{1 + \nu}{2E} \quad B = \frac{1}{2E}$$

$\bar{a}\left(\frac{r_0}{r}\right)$  e  $\bar{b}\left(\frac{r_0}{r}\right)$ , são funções retiradas do artigo de MAKINO & NELSON - 1994<sup>[58]</sup>, apresentadas na tabela 6.1, a seguir:

*Tabela 6.1 Coeficientes adimensionais de correção de análise de elementos finitos do furo cego para medidas de tensões residuais em função do deslocamento radial, segundo MAKINO & NELSON - 1994<sup>[58]</sup>*

$\frac{r}{r_0}$	$\bar{a}\left(\frac{r_0}{r}\right)$	$\bar{b}\left(\frac{r_0}{r}\right)$
1.5	0.6808	1.8626
2.0	0.5073	1.4170
2.5	0.3943	1.0870
3.0	0.3136	0.8517
3.5	0.2534	0.6792
4.0	0.2073	0.5512
5.0	0.1456	0.3854
6.0	0.1069	0.2865

### 6.3 Modelo Analítico Aproximado para a Indentação

Dois modelos analíticos aproximados estão sendo propostos neste trabalho inspirados no método do furo, onde coeficientes e fatores de correção são empiricamente determinados através de conjuntos de experimentos controlados. O primeiro modelo proposto é inspirado na formulação do furo passante. O segundo, na formulação do furo cego.

Em oposição ao método do furo, a indentação não causa alívio de tensão, mas adiciona mais tensão produzida por um escoamento localizado no material. Como consequência, um campo de deslocamentos permanente é produzido ao seu redor. Em um material livre de tensões residuais, este campo de deslocamentos permanente é axi-simétrico e repetitivo, caso, a geometria da ponteira, o carregamento de indentação e as propriedades do material, se mantenham constantes. Se uma tensão mecânica ou tensões residuais estiverem presentes no material antes da indentação, o campo de deslocamento

permanente é afetado de modo a depender dos níveis de tensões residuais pré-existentes<sup>[84],[85]</sup>.

Partindo-se do princípio que o campo de deslocamentos resultante da subtração entre a indentação de um material com tensões residuais pré-existentes menos a de um material sem tensões residuais iniciais tem comportamento que guarda certa semelhança com o da equação 6.5, novas funções  $\bar{A}(r)$  e  $\bar{B}(r)$ , podem ser determinadas. Neste caso as novas funções  $\bar{A}(r)$  e  $\bar{B}(r)$ , dependem do raio, das propriedades do material, da forma geométrica da ferramenta de indentação (esférica ou cônica), da carga, da profundidade (elástica e plástica) e do diâmetro da marca da indentação.

De modo a encontrar um modelo para medir a tensões residuais presente no material, tal similaridade é empregada. Assim um modelo derivado é apresentado partindo-se da equação 6.5, onde observa-se que o termo que depende de  $\cos(2\theta)$  está correlacionado à diferença da tensões principais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) e o termo independente de  $\theta$  está correlacionado à soma das tensões principais ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ). Assim, a componente radial do campo de deslocamento ( $u_r$ ), em termos de coordenadas polares, é aqui modelada pela seguinte equação:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_1}{r} + \left[ \left( \frac{2}{E} \right) \frac{K_2}{r} - \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_3}{r^3} \right] \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.7)$$

onde  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são funções desconhecidas, dadas por:

$$\begin{aligned} K_1 &= H[(\sigma_1 + \sigma_2), \psi_1] \\ K_2 &= \Gamma[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_2] \\ K_3 &= \Omega[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_3] \end{aligned} \quad (6.8)$$

Os termos  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  e  $\psi_3$  nas funções da equação 6.7 são definidos neste trabalho como sendo os raios equivalentes de indentação (" $r_o$  equivalente"). São parâmetros de indentação que dependem das propriedades de deformação plástica localizada do material, da geometria do indentador e da força de indentação.

Em todos os experimentos realizados o campo de deslocamentos ao redor da indentação foi sempre medido suficientemente longe da marca de indentação para garantir que o campo medido não contenha contribuições da região com plastificação localizada, mas apenas da região do material em regime elástico. Este cuidado também é tomado no método do furo, onde existe uma distância mínima recomendada pela norma ASTM-E-837 - 2001<sup>[12]</sup>, acima da qual deve-se realizar as medidas do campo de

deformação (ou deslocamentos, quando medição por holografia), para evitar influências indesejadas da borda do furo ou plastificação localizada na borda do furo.

GIANNAKOPOULOS & SURESH - 1997<sup>[38]</sup>, propuseram uma equação que descreve o campo de deslocamento radial de um material livre de tensões residuais, abaixo da indentação. Tal formulação foi baseada na solução da tensão produzida pela ação de uma carga concentrada atuando na borda de um corpo semi-infinito apresentada por Boussinesq em 1885 (seção 3.2.3). Adaptando e aplicando a equação de Giannakopoulos & Suresh para o campo de deslocamento na superfície do material em torno da indentação, pôde-se observar experimentalmente que a equação apresentada a seguir representa bem o fenômeno físico estudado:

$$u_r(r) = C \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu-1}}} \quad (6.9)$$

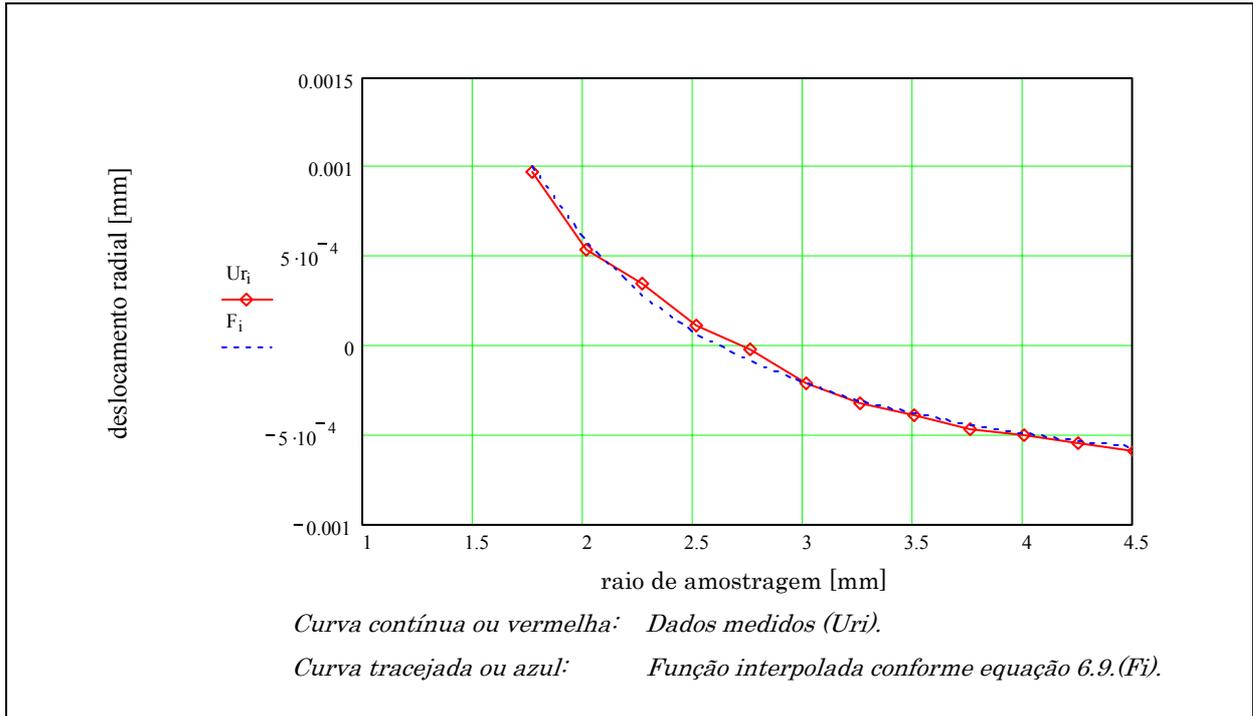
Onde  $C$  é a constante que depende da força da indentação, da geometria da ponta do indentador e das propriedades do material. Esta constante pode ser determinada pelo método dos mínimos quadrados através de dados experimentais do campo de deslocamentos radiais após a indentação de um material inicialmente livre de tensões residuais.

A figura 6.5 representa a curva do deslocamento radial em função do raio em torno da marca da indentação para um ângulo  $\theta$  qualquer (curva contínua ou vermelha -  $U_{r_i}$ ), referente a imagem medida por holografia eletrônica da figura 6.2(b). Os dados experimentais foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, tomando-se como base a equação 6.9 (curva tracejada ou azul -  $F_i$ ). Pode-se observar que a equação 6.9 representa bem o fenômeno físico observado. Tal fenômeno foi também observado para o campo de deslocamento da figura 6.3(b). Outras verificações experimentais foram realizadas no alumínio, com indentações cônicas e esféricas, chegando às mesmas conclusões apresentadas na figura 6.5.

Desta forma pode-se propor um modelo completo, relacionando a tensões residuais ao campo de deslocamentos radiais, conforme segue:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_1}{r} + \left[ \left( \frac{2}{E} \right) \frac{K_2}{r} - \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_3}{r^3} \right] \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu-1}}} \quad (6.10)$$

Onde  $K_4$  é equivalente à constante  $C$  na equação 6.7, determinada a priori em um material livre de tensões residuais.



*Figura 6.5 Gráfico do campo de deslocamentos radiais na superfície do material em função do raio de afastamento de uma indentação cônica de 120°, em um aço AISI 1020 livre de tensões residuais.*

O segundo modelo proposto parte do modelo do método do furo cego. Observando-se a equação 6.6, a mesma analogia utilizada anteriormente pode ser aplicada. Assim o modelo derivado é apresentado. Mais uma vez, pode-se observar que o termo que depende de  $\cos(2\theta)$  está correlacionado à diferença das tensões principais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) e o termo independente de  $\theta$ , está correlacionado à soma das tensões principais ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ), do mesmo modo apresentado na equação 6.7. A componente radial do campo de deslocamento ( $u_r$ ), em termos de coordenadas polares, pode ser escrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_1}{r} + \left( \frac{2}{E} \right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) \quad (6.11)$$

Onde  $K_1$  e  $K_2$  são funções desconhecidas, dadas por:

$$\begin{aligned} K_1 &= H[(\sigma_1 + \sigma_2), \psi_1] \\ K_3 &= \Gamma[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_3] \end{aligned} \quad (6.12)$$

Os termos  $\psi_1$  e  $\psi_2$  nas funções da equação 6.12 são definidos neste trabalho como sendo os raios equivalentes de indentação (" $r_o$  equivalente"), correlacionados às funções  $K_1$  e  $K_2$ , respectivamente. São parâmetros de indentação que dependem das propriedades de deformação plástica localizada do material, da geometria do indentador e da força de indentação.

Aplicando a equação modificada de Giannakopoulos & Suresh<sup>[38]</sup> (equação 6.9), a equação 6.11 pode ser reescrita de uma forma mais completa, ou seja:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_1}{r} + \left( \frac{2}{E} \right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^\nu} \quad (6.13)$$

As equações 6.7, 6.10, 6.11 e 6.13, são as equações que serão estudadas e analisadas no Capítulo 7 a seguir. Sendo que as equações 6.7 e 6.11 são propostas para representar o resultado da subtração dos campos de deslocamentos radiais da indentação em um material originalmente livre de tensões residuais com os do material que contenha tensões residuais pré-existentes. Já as equações 6.10 e 6.13 são propostas para aplicação direta sem a necessidade de subtrair o campo de deslocamentos radiais da indentação em um material originalmente livre de tensões residuais.

## 6.4 Determinação da Direção Principal das Tensões e dos Parâmetros Matemáticos

Nesta seção pretende-se mostrar o procedimento dos cálculos matemáticos, para a determinação dos parâmetros dos modelos matemáticos que estão sendo estudados neste trabalho. Como exemplo será analisada a equação 6.10.

Expandindo e adicionando as componentes de translação em relação a imagem, a equação 6.10 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_1}{r} + \left[ \left( \frac{2}{E} \right) \frac{K_2}{r} - \left( \frac{1+\nu}{2E} \right) \frac{K_3}{r^3} \right] \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^\nu} + T_x \cos \theta + T_y \sin \theta \quad (6.14)$$

onde:

$K_1, K_2$  e  $K_3$  são as constantes de indentação a determinar;

$K_4$  são as constantes da carga aplicada de indentação.

Os coeficientes  $T_x$  e  $T_y$  são os deslocamentos de corpo rígido nas direções das coordenadas cartesianas da imagem.

### 6.4.1 Modelo para Regressão Linear

A análise para interpolação utilizando-se do método dos mínimos quadrados<sup>[3], [61]</sup>, é baseada nos princípios apresentados no Apêndice D, desenvolvidos a seguir:

Reescrevendo a equação 6.14, tem-se:

$$u_r(r, \theta) = A \frac{1}{r} K_1 + \left[ B \frac{1}{r} K_2 + C \frac{1}{r^3} K_3 \right] \cos(2\theta - 2\beta) + \\ + T_x \sin \theta + T_y \cos \theta + K_4 D \frac{1}{r^{\nu-1}} \quad (6.15)$$

onde:

$$A = \frac{(1+\nu)}{2E} \quad ; \quad B = \frac{2}{E} \quad ; \quad C = -\frac{(1+\nu)}{2E} \quad ; \quad D = -\frac{\nu}{E(\nu-1)}$$

Aplicando a transformações trigonométricas em  $\cos(2\theta - 2\beta)$ , como sendo  $(\cos 2\theta \cos 2\beta - \sin 2\theta \sin 2\beta)$  <sup>[79]</sup> e a propriedade distributiva, obtém-se a seguinte equação:

$$u_r(r, \theta) = \frac{A K_1}{r} + \frac{B K_2}{r} \cos 2\theta \cos 2\beta + \frac{C K_3}{r^3} \cos 2\theta \cos 2\beta + \\ - \frac{B K_2}{r} \sin 2\theta \sin 2\beta - \frac{C K_3}{r^3} \sin 2\theta \sin 2\beta + \\ + T_x \cos \theta + T_y \sin \theta + K_4 D \left( \frac{1}{r^{\nu-1}} \right) \quad (6.16)$$

Os cálculos na imagem iniciam com transformações de coordenadas cartesianas para coordenadas polares:

$$\cos(2\theta - 2\beta) = \cos 2\theta \cos 2\beta + \sin 2\theta \sin 2\beta \\ \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = \left( \frac{x}{r} \right)^2 - \left( \frac{y}{r} \right)^2 = \frac{x^2 - y^2}{r^2} \\ \sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta = \left( \frac{y}{r} \right) \left( \frac{x}{r} \right) = \frac{2xy}{r^2} \\ \cos(2\theta - 2\beta) = \cos 2\beta \left( \frac{x^2 - y^2}{r^2} \right) + 2 \sin 2\beta \left( \frac{xy}{r^2} \right) \quad (6.17)$$

Desta forma o modelo de regressão pode ser reduzido da seguinte forma:

$$u_r(r, \theta) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 \quad (6.18)$$

onde:  $\beta_0 = 0$

$$\beta_1 = K_1 \quad X_1 = \frac{A}{r} \quad \beta_2 = K_2 \cos 2\beta \quad X_2 = \frac{B}{r} \cos 2\theta \\ \beta_3 = K_3 \cos 2\beta \quad X_3 = \frac{C}{r^3} \cos 2\theta \quad \beta_4 = K_2 \sin 2\beta \quad X_4 = -\frac{B}{r} \sin 2\theta$$

$$\begin{array}{llll} \beta_5 = K_3 \sin 2\beta & X_5 = -\frac{C}{r^3} \sin 2\theta & \beta_6 = Tx & X_6 = \cos \theta \\ \beta_7 = Ty & X_7 = \sin \theta & \beta_8 = K_4 & X_8 = \frac{D}{r^{\nu-1}} \end{array}$$

Assim tanto os parâmetros quanto a direção das tensões da equação analisada (equação 6.10), podem ser facilmente determinados.

## 6.5 Software de Análise

Uma versão operacional do software de análise de tensões residuais por indentação foi desenvolvido através de adaptações realizadas em softwares já existentes, de medição e análise de tensões residuais pelo método do furo<sup>[14],[15],[73]</sup>, e do software de medição e análise de tensões mecânicas de serviço<sup>[96],[97],[101]</sup>. O software de análise foi denominado de “Indentation Image Processing and Data Reduction”, cuja tela principal é mostrada na figura 6.6. O idioma inglês simplesmente foi adotado em função do software pré-existente ser em inglês. O software foi desenvolvido em Visual Basic® - versão 6 (“*Microsoft Corporation*”), sendo utilizado no cálculo de todos os resultados apresentados neste trabalho.

Atualmente o software é capaz de:

- processar as imagens conforme os modelos de regressão propostos para indentação, o método do furo e tensões de serviço (“*Evaluation Method*”);
- visualizar as imagens de mapa de fase, originais, processada, com remoção da translação de corpo rígido dentre outras operações (“*View Image*”);
- salvar em arquivo texto os campos de deslocamentos radiais medidos;
- apresentar as coordenadas cartesianas da imagem em pixels e apresentar as coordenadas cartesianas e polares em relação ao centro óptico ou ao centro do indentador (“*Image Evaluation*”);
- apresentar as direções principais de tensão;
- apresentar, em forma gráfica, o deslocamento radial em dois perfis em duas direções ortogonais definidas pelo usuário;
- quantificar e apresentar os resultados dos parâmetros de regressão (“*Results*” e “*Indentation Results*”).

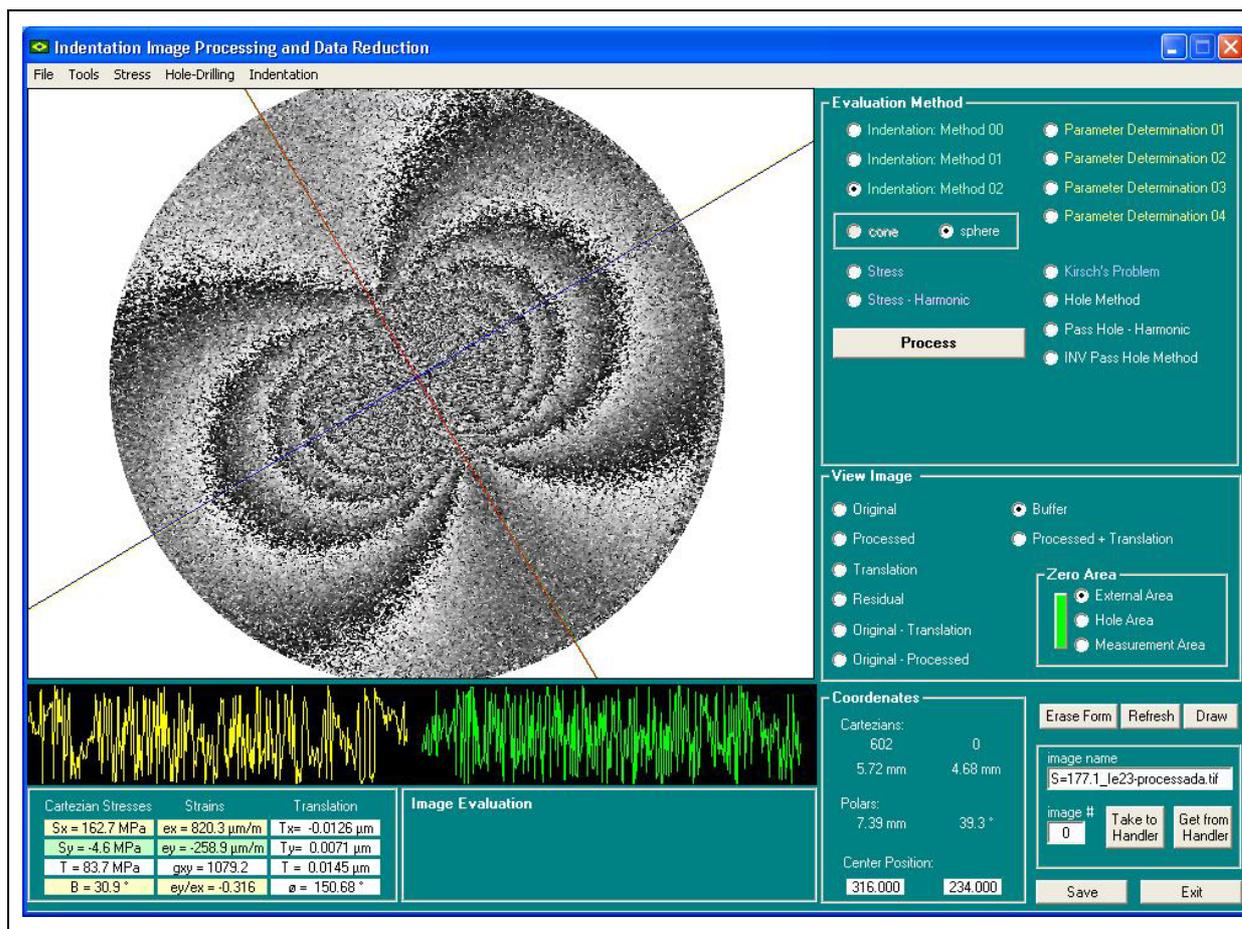


Figura 6.6 Software de medição desenvolvido.

### 6.5.1 Configurações Iniciais e Região de Análise

Inicialmente o software deve ser configurado através de uma tela de configuração apresentada na figura 6.7. Tais configurações foram divididas em seis regiões e estão descritas a seguir:

- configuração do material: informações do material e suas propriedades mecânicas, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidades e tensão de escoamento (“*Material*”);
- configuração do sistema óptico: informações do comprimento de onda do Laser utilizado, do ângulo de inclinação do espelho cônico e do coeficiente de calibração do comprimento de onda do Laser, obtido através da calibração da sistema óptico (“*Lase / Miroi*”);
- fator de escala: informações do fator de escala do sistema óptico de formação da imagem na superfície do material (“*Scale factor*”);

- configuração da indentação ou do furo: informações do raio da marca da indentação ou do raio do furo realizado, parâmetro da carga da indentação e o número de passos realizados para o caso do método do furo (“*Indentation configuration*”);
- posição de Origem: informações das coordenadas cartesianas em pixel do centro óptico do sistema de medição em relação à imagem (“*Origin position*”);
- configuração da medição: informações da região de amostragem tais como o raio mínimo e máximo de análise e o número de anéis e número de pontos por anel, a serem analisados pelo método de regressão matemática (“*Adjustment configuration*”).

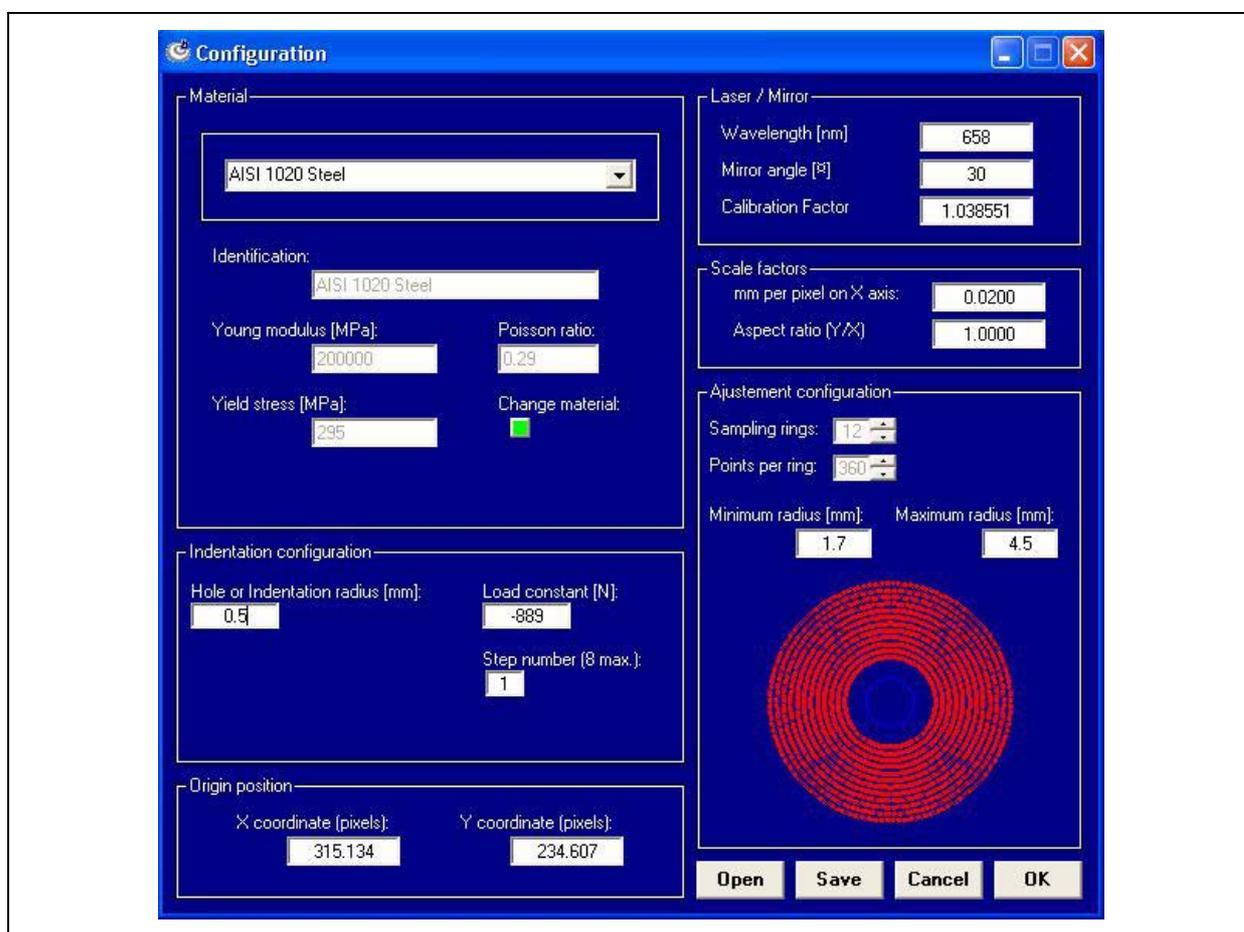
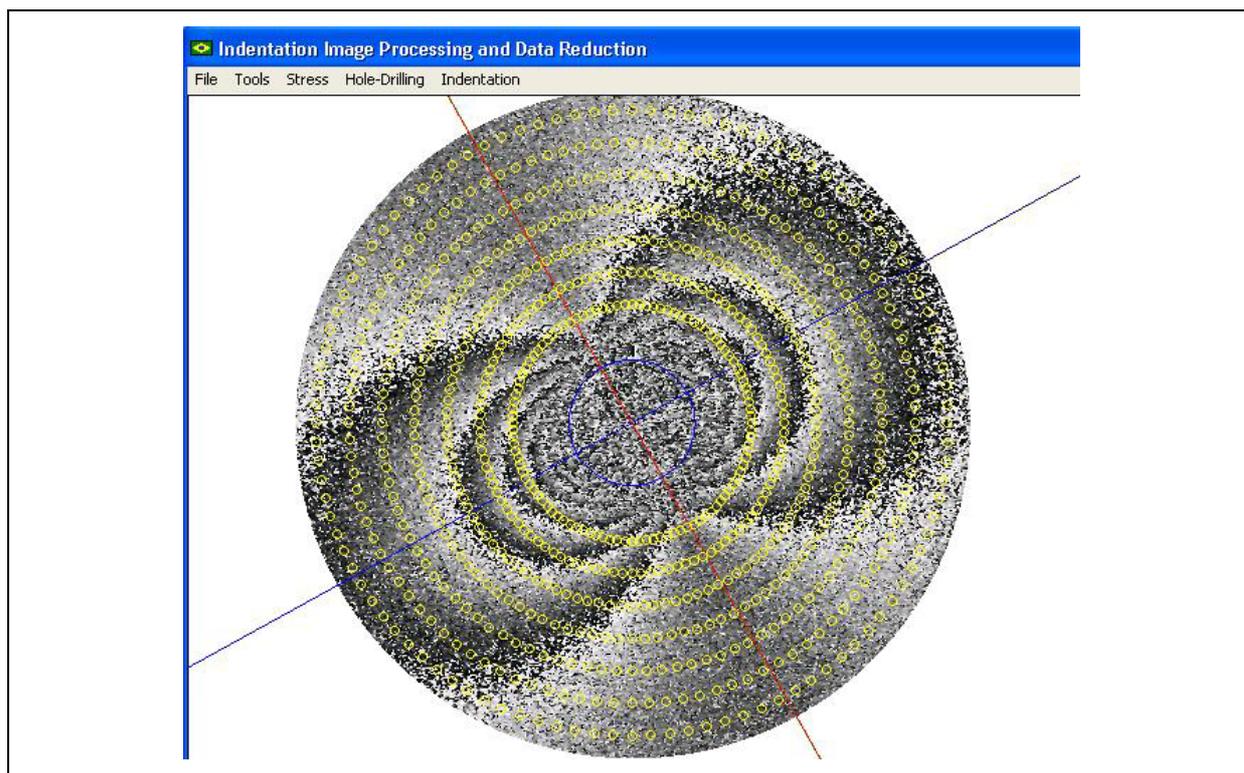


Figura 6.7 Configurações iniciais

Finalmente, após o processamento realizado pelo software, é representado graficamente na imagem analisada, os círculos e os pontos processados da área de amostragem e a direção das tensões principais, conforme mostrado na figura 6.8. Um arquivo de texto com todos os parâmetros calculados, pode ser importado para uma planilha de cálculo.



*Figura 6.8* Área de Processamento da análise, círculo de amostragem e direção das tensões principais.

## Capítulo 7

### Ensaio de Avaliação

Todos os experimentos realizados e modelos para quantificação de tensões residuais pelo método da indentação são apresentados e discutidos neste capítulo.

#### 7.1 Identificação dos Modelos Matemáticos de Cálculos

A tabela 7.1 apresenta a identificação utilizada para os diferentes modelos matemáticos utilizados neste trabalho. Os algoritmos desenvolvidos utilizam o método dos mínimos quadrados e seguem as formulações propostas no Capítulo 6, Seção 6.3.

Tabela 7.1 Identificação dos modelos matemáticos utilizados

Identificação do Modelo de Cálculo	Equação Capítulo 6 (Seção 6.3)	Referência
“Set_Indent”	$u_r(r) = K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu}-1}}$	Equação 6.9
“Set_02Par”	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta)$	Equação 6.11
“Set_03Par”	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta)$	Equação 6.7
“Set_02Par_Indent”	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu}-1}}$	Equação 6.13
“Set_03Par_Indent”	$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left[\left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} - \left(\frac{1+\nu}{2E}\right) \frac{K_3}{r^3}\right] \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\nu}{E(\nu-1)} \frac{1}{r^{\frac{1}{\nu}-1}}$	Equação 6.10

Deve-se ressaltar que todos os ensaios foram realizados com carregamentos uniaxiais em que a direção principal de tensão é sempre 30°. Este fato decorre da referência angular do MTRES Modular estar girada de 30° em relação ao eixo horizontal da imagem na tela do computador.

## 7.2 Medidas em Material Livre de Tensões residuais

Com o objetivo de verificar a repetitividade do indentador de impacto, foram realizadas diversas indentações em uma mesma amostra de aço AISI 1020, termicamente tratada para minimizar o nível de tensões residuais remanescente. A repetitividade foi avaliada através da monitoração dos diâmetros das marcas deixadas pelo indentador na superfície do material. A tabela 7.2 apresenta os resultados das medições de diâmetro. Os ensaios foram realizados com três ponteiros cônicos distintos formando ângulos de 60°, 90° e 120°. Foi utilizado um indentador tipo punção de traçagem de furos de centro, Starrett modelo 18-B. A energia de indentação é regulada através do ajuste da força da mola efetuada pelo afastamento do corpo no indentador, rosqueado na sua estrutura interna. A posição da mola do indentador igual a zero corresponde à máxima pressão na mola e à maior energia de indentação. As demais denominações com relação à posição da mola do indentador na tabela 7.2, correspondem às distâncias em milímetros do afastamento do corpo do indentador, que provoca o afrouxamento da mola.

*Tabela 7.2 Medidas do diâmetro da marca de indentação cônica em função da força de impacto*

Punção	Ângulo da Ponta de Indentação	Posição da mola do indentador [mm]	número de repetições efetuadas (n)	Diâmetro médio [mm]	Desvio padrão [mm]
n° 18-B	60°	0.0	5	1.07	0.06
		-2.5	5	0.84	0.04
		-5.0	5	0.73	0.03
	90°	0.0	5	1.17	0.04
		-2.5	5	1.03	0.02
		-5.0	5	0.86	0.02
	120°	0.0	5	1.31	0.05
		-2.5	5	1.18	0.03
		-5.0	5	1.02	0.03

A figura 7.1 apresenta graficamente os resultados obtidos das medidas dos diâmetros. Pode-se observar que o diâmetro da marca deixada pela indentação é linear em relação à posição da mola do indentador. A ponteira cônica de 120° causa maior dano ao material quando comparada às demais. Para todos os indentadores, verifica-se que a repetitividade da medição, em termos de um desvio padrão, está na casa do centésimo de milímetro, mostrando que o impacto gerado pelo indentador não é tão repetitivo quanto se desejaria.

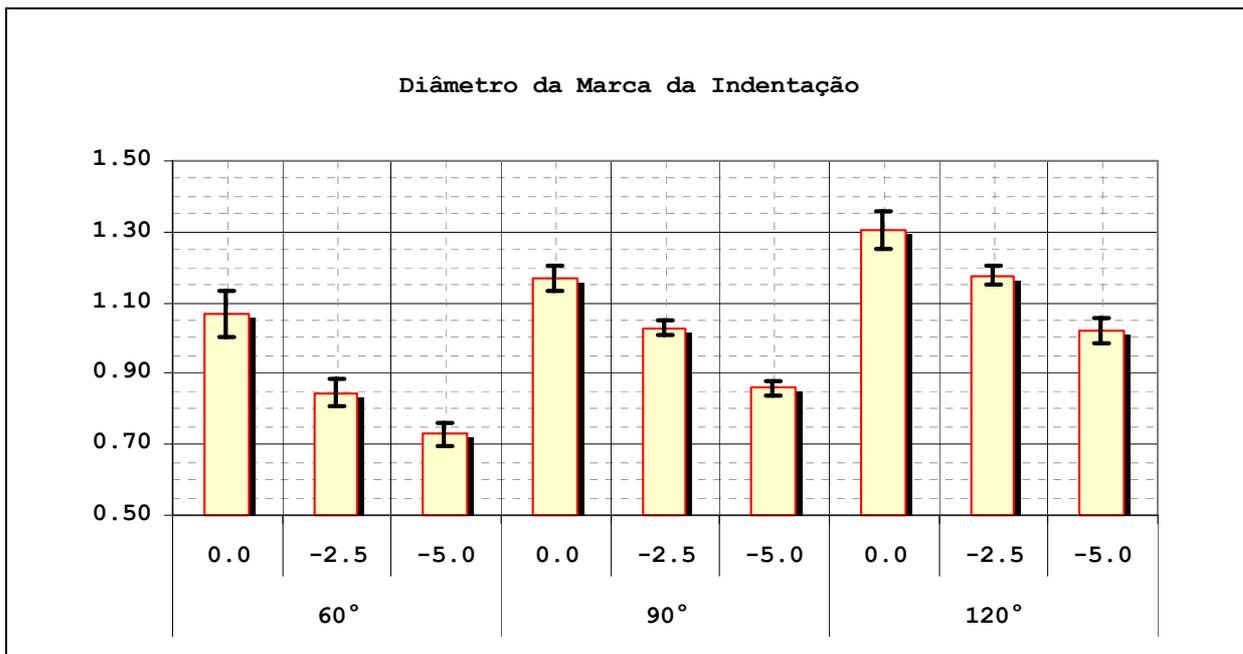


Figura 7.1 Gráfico de medição do diâmetro da marca da indentação em função de diferentes tipos de indentadores cônicos e da posição da mola do indentador.

Em medidas utilizando o interferômetro radial no corpo de prova em aço, livre de carregamento mecânico, verifica-se a mesma tendência com relação à repetitividade do indentador. A figuras 7.2 e 7.3 apresentam os resultados obtidos com indentação cônica e esférica respectivamente, e os valores dos parâmetros  $K_A$  determinados pelo modelo “Set\_Indent”. Em ambos os casos a posição da mola foi ajustada no zero para produzir a máxima energia possível. Pode-se verificar através das figuras, que a repetitividade em termos de um desvio padrão, das indentações representadas pelos parâmetros  $K_A$  estão na ordem de 10 % do valor médio calculado.

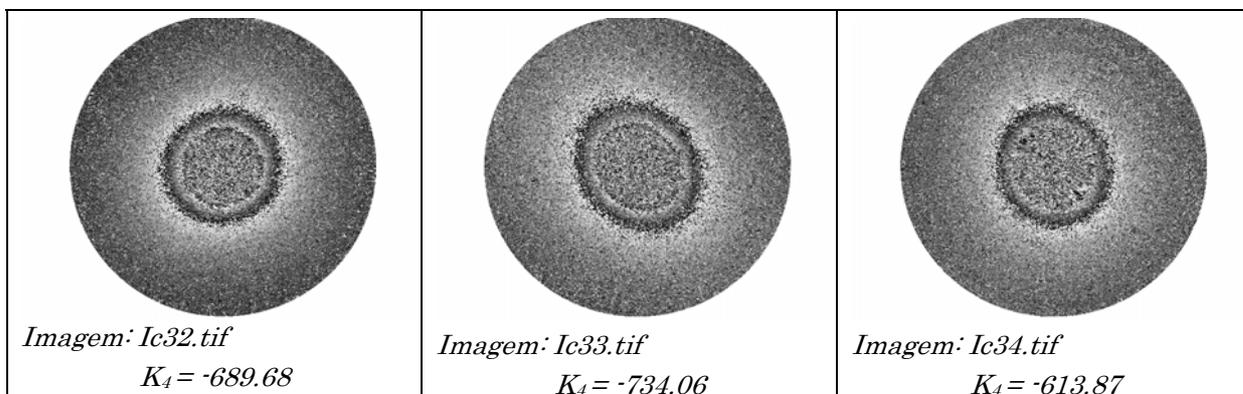
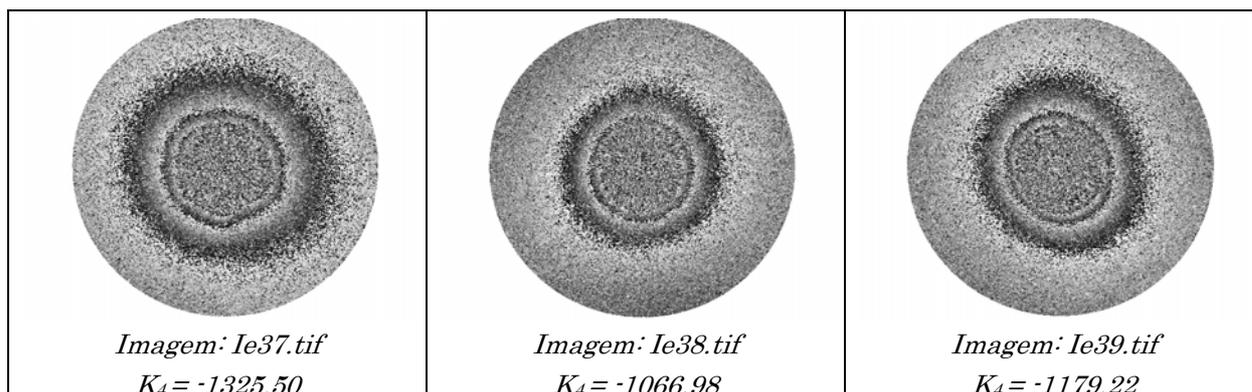


Figura 7.2 Indentação em aço com ponta cônica 120°. Material livre de tensões residuais.



*Figura 7.3 Indentação em aço com ponta esférica  $\phi$  2,5 mm. Material livre de tensões residuais.*

### 7.3 Medidas em Material com Tensões residuais Controlada

Medidas no corpo de prova de aço foram realizadas com simulações mecânicas de tensões residuais variando-se de 0 a 230 MPa. Esta faixa equivale aproximadamente de 0 a 80 % da tensão de escoamento do material.

As imagens obtidas nos ensaios estão apresentadas nas figuras 7.4 e 7.5, que correspondem à indentações cônicas e esféricas respectivamente. As imagens mostram as diferenças de fase (sem o salto de fase removido), provocadas pela movimentação da superfície do material antes e após a indentação, para diferentes níveis de tensões residuais simuladas.

Com o objetivo de isolar as tensões residuais aplicadas no material, as figuras 7.6 e 7.7 apresentam as imagens decorrentes da subtração do campo de deslocamentos radiais total da superfície do material indentado, pelo campo de deslocamentos radiais resultante de uma indentação do mesmo material livre de tensões residuais, ou seja, corpo de prova sem carregamento mecânico aplicado.

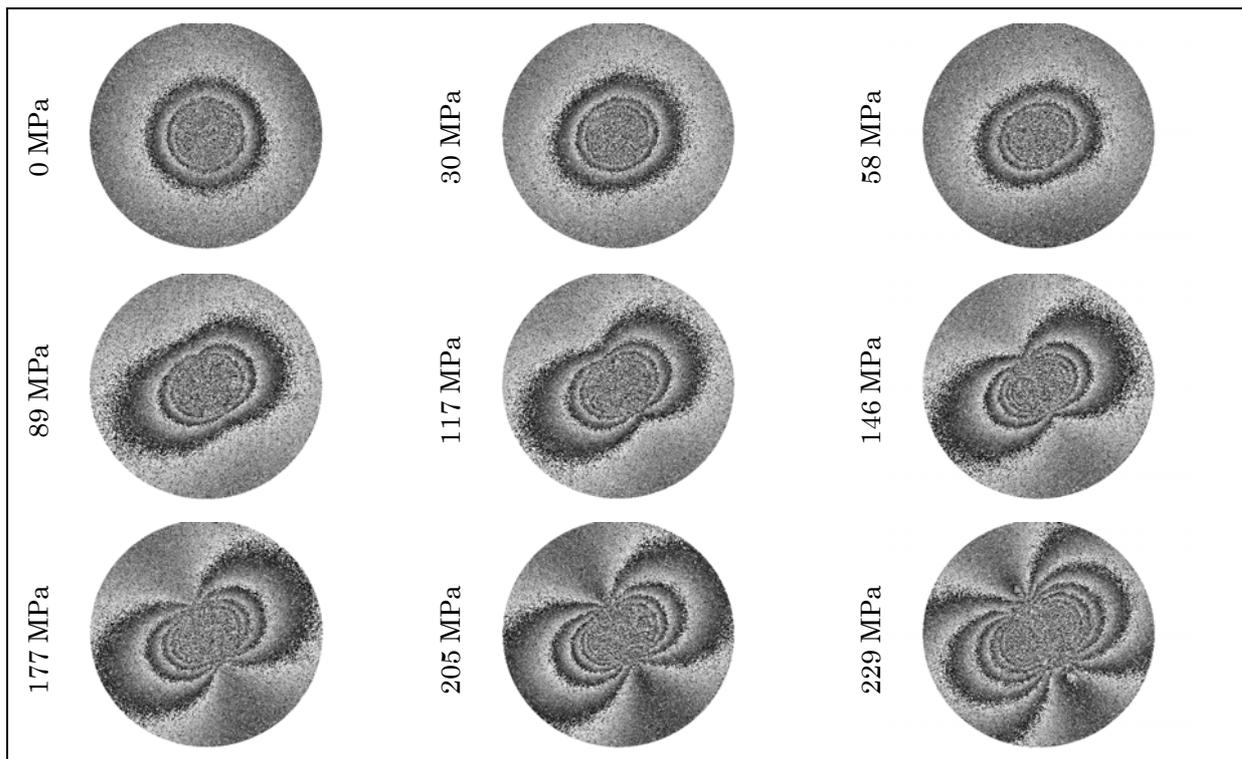


Figura 7.4 *Imagens obtidas da indentação cônica em função das tensões residuais*

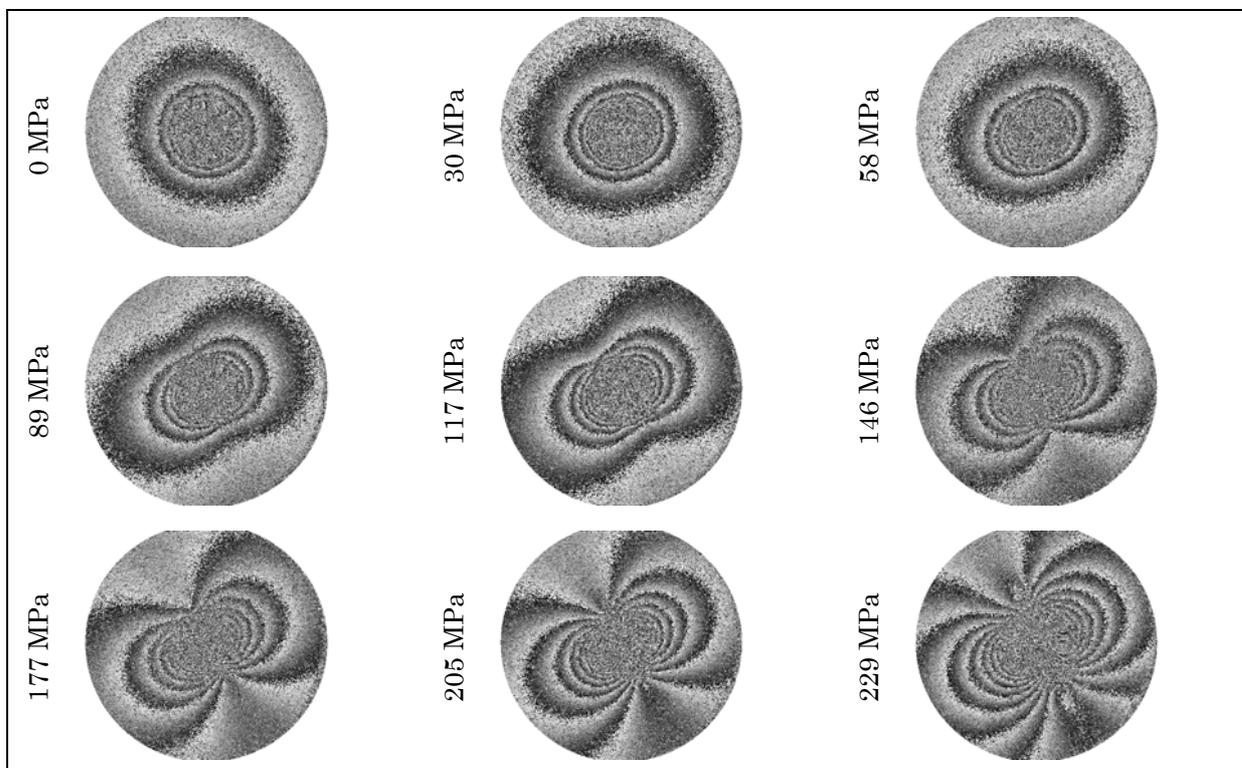


Figura 7.5 *Imagens obtidas da indentação esférica em função das tensões residuais*

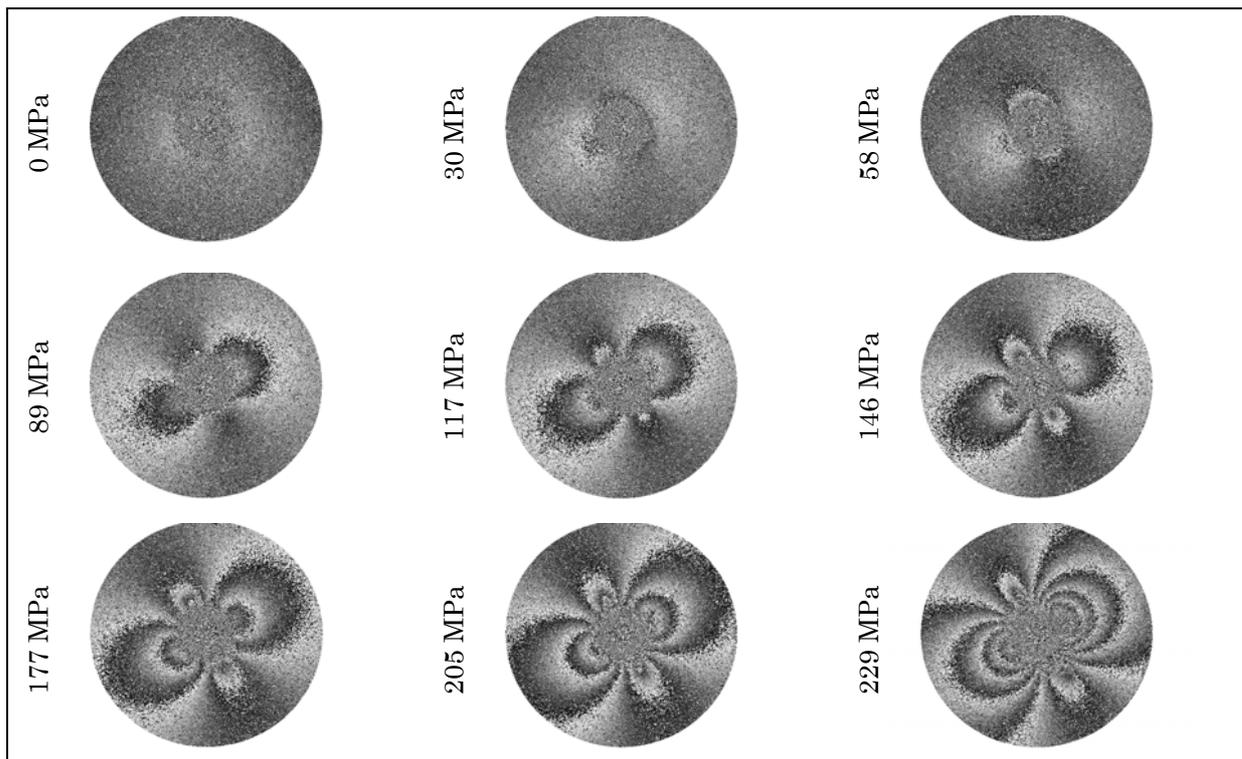


Figura 7.6 Diferença entre o campo de deslocamento do material com tensão e o campo de deslocamento do material livre de tensões residuais para indentação cônica

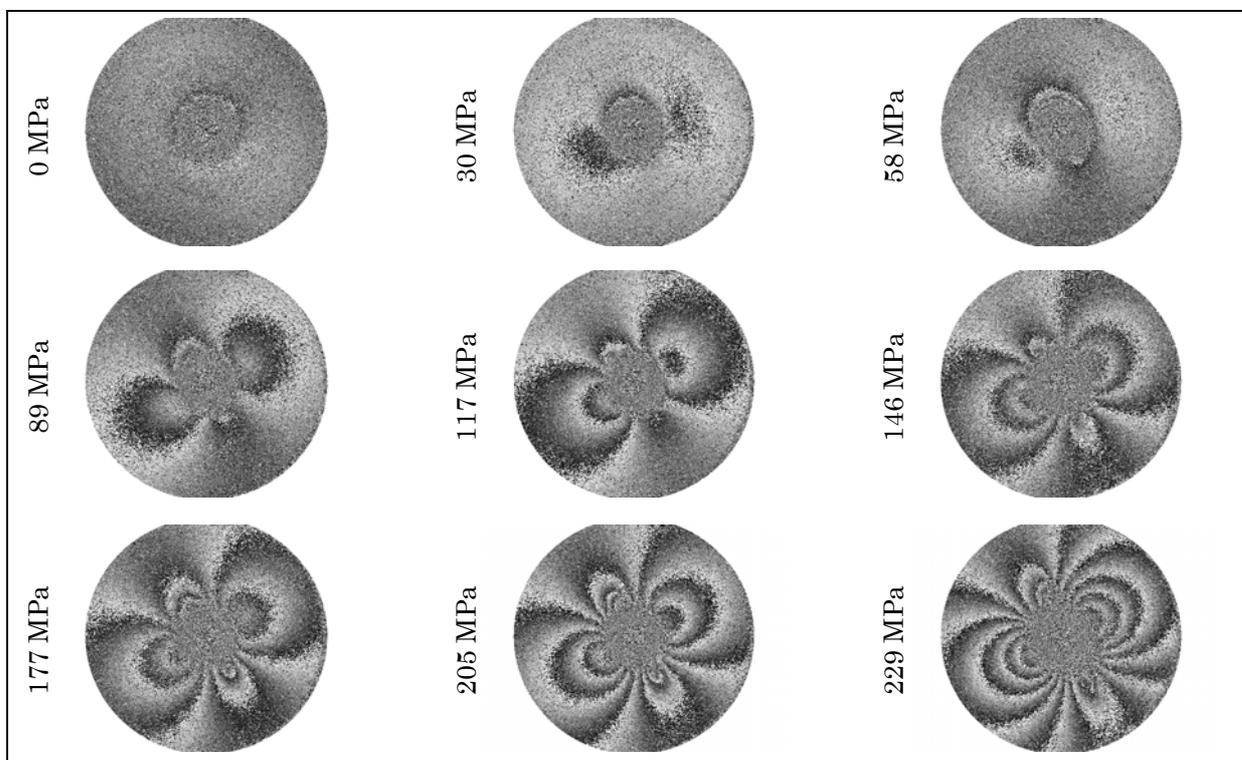


Figura 7.7 Diferença entre o campo de deslocamento do material com tensão e o campo de deslocamento do material livre de tensões residuais para indentação esférica

## 7.4 Resultados com Indentador Cônico em Aço

Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas seguintes. As imagens foram processadas pelos diferentes modelos resumidos na tabela 7.1. A simbologia apresentada em todas as tabelas é a seguinte:

- $n$  = número de medidas repetidas realizadas no material numa mesma condição de carregamento mas em posições diferentes no corpo de prova;
- $\sigma_{\text{ref}}$  = tensão principal ou tensões residuais de referência, simulada uniaxialmente [MPa]. Foi calculada através da média dos extensômetros instalados sobre corpo de prova;
- $\varepsilon_{\text{ref}}$  = deformação média de referência. Foi calculada através da média das deformações medidas nos extensômetros instalados sobre o corpo de prova [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ];
- $\beta$  = parâmetro calculado pelo método dos mínimos quadrado, equivalente ao ângulo da direção principal de tensão [ $^{\circ}$ ];
- $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$  = parâmetros calculados pelo método dos mínimos quadrados de acordo com o modelo de cálculo detalhado na tabela 7.1.

### 7.4.1 Modelo: “Set\_Indent”

A tabela 7.3 apresenta o resultado médio obtido das imagens do material idealmente livre de tensões residuais. O valor médio obtido do parâmetro  $K_4$  foi de -873 unidades. A repetitividade, expressa em termos de um desvio padrão, foi igual a 150 unidades (17,2 % do valor médio).

Tabela 7.3 Parâmetros médios calculados do material livre de tensões residuais para indentador cônico em aço (“Set\_Indent”)

Modelo	n	$\sigma_{\text{ref}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{ref}}$ [%]	$\varepsilon_{\text{ref}}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^{\circ}$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_Indent”	10	0.0	0.0%	0	0	0.00	0.00	0.00	-873.18

### 7.4.2 Modelos: “Set\_02Par” e “Set\_03Par”

Os modelos “Set\_02Par” e “Set\_03Par” foram utilizados no cálculo dos parâmetros de imagens similares às imagens apresentadas na figura 7.6. Nestas imagens os efeitos da indentação do material livre de tensões residuais foram subtraídos da imagem do

material indentado na presença de tensões residuais. O valor medido do parâmetro  $K_4$  da Seção 7.4.1 anterior, foi utilizado para construção da imagem de referência do material livre de tensões residuais a ser subtraída das imagens do campo de deslocamentos radiais do material indentado.

A tabela 7.4 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set\_02Par”. Somente os parâmetros  $\beta$ ,  $K_1$  e  $K_2$  foram determinados. Pode-se observar que para as tensões superiores a 30 MPa, em torno de 10 % da tensão de escoamento do material, os valores de  $\beta$  convergem a 30° como esperado. Observando de maneira qualitativa as imagens da figura 7.6, a direção do campo de deslocamentos é visível para tensões superiores a 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material.

Tabela 7.4 Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set\_02Par”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [°]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_02Par”	10	0.0	0.0%	0	122	2.24	8.07	0.00	
	3	29.8	10.1%	149	27	32.33	11.21	0.00	
	3	58.1	19.7%	290	24	15.95	17.74	0.00	
	4	89.2	30.2%	446	31	55.78	33.03	0.00	
	3	116.9	39.6%	584	32	135.83	51.64	0.00	-873.18
	4	145.7	49.4%	729	30	114.82	67.16	0.00	
	3	177.3	60.1%	887	30	141.69	82.59	0.00	
	4	205.0	69.5%	1025	29	240.23	111.61	0.00	
	3	229.3	77.7%	1147	30	400.36	149.62	0.00	

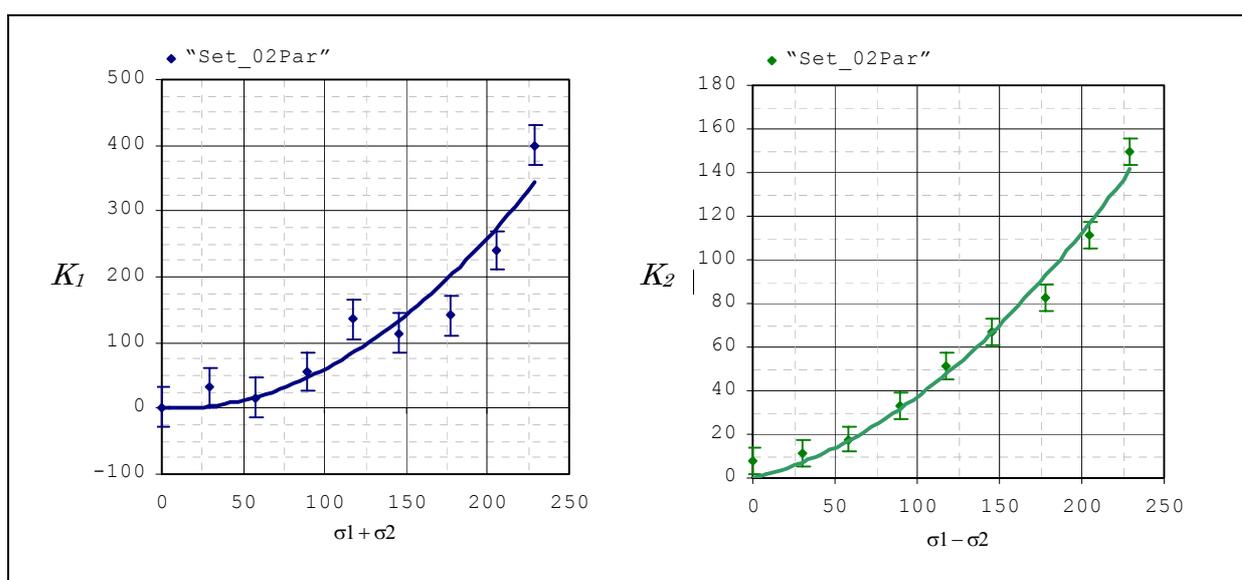


Figura 7.8 Gráfico dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set\_02Par” (indentador cônico em aço)

Os parâmetros calculados estão apresentadas nas figuras 7.8 em função das somas e das diferenças das tensões simuladas. Deve-se ressaltar que para o caso uniaxial, ambos os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  coincidem com a tensões residuais simulada, mas devido ao formalismo dos modelos apresentados, estão representados em função da soma e da diferença das tensões residuais, pois os modelos apresentados neste trabalho, estão baseados em formulações biaxiais.

A curva que representa os valores médios calculados para o parâmetro  $K_1$ , embora apresente alguns pontos fora da curva interpolada, apresenta um coeficiente de correlação (momento do produto de Pearson<sup>[79]</sup>),  $R^2 = 0.909$ , o que é razoável. A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 29 unidades.

A curva que representa os valores calculados para o parâmetro  $K_2$  tem um comportamento bem definido. A função interpolada apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.985$  e repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, em torno de 4 unidades.

A tabela 7.5 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set\_03Par”. Neste caso, os parâmetros  $\beta$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  foram determinados. Pode-se observar que os valores de  $\beta$  convergem para  $30^\circ$  a partir de 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material, mantendo-se praticamente constante para todos os outros níveis de tensões simuladas, coincidindo com a percepção visual da direção principal de tensão nas imagens da figura 7.6.

Tabela 7.5 Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set\_03Par”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^\circ$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_03Par”	10	0.0	0.0%	0	120	2.36	8.49	65.46	
	3	29.8	10.1%	149	73	32.36	8.29	62.83	
	3	58.1	19.7%	290	16	15.68	11.10	126.46	
	4	89.2	30.2%	446	30	56.03	23.09	166.37	
	3	116.9	39.6%	584	33	136.33	40.01	191.22	-873.18
	4	145.7	49.4%	729	30	115.45	52.05	243.83	
	3	177.3	60.1%	887	29	141.53	66.40	265.46	
	4	205.0	69.5%	1025	29	239.66	94.39	282.63	
	3	229.3	77.7%	1147	30	399.23	137.08	208.59	

Os valores destes parâmetros calculados estão apresentados na figura 7.9 em função das somas e das diferenças das tensões simuladas. A curva que representa os valores do parâmetro calculado  $K_1$  foi interpolada por um polinômio de 2ª ordem. Embora

apresente alguns pontos fora da curva, o coeficiente de correlação é razoável  $R^2 = 0.908$ . A repetitividade expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 30 unidades.

A curva que representa os valores do parâmetro calculado  $K_2$  tem um comportamento bem definido e coeficiente de correlação  $R^2 = 0.973$ . A repetitividade expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 4 unidades.

Os valores do parâmetro  $K_3$  são interpolados por um polinômio de 3ª ordem, e apresenta coeficiente de correlação  $R^2 = 0.972$ . A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 30 unidades.

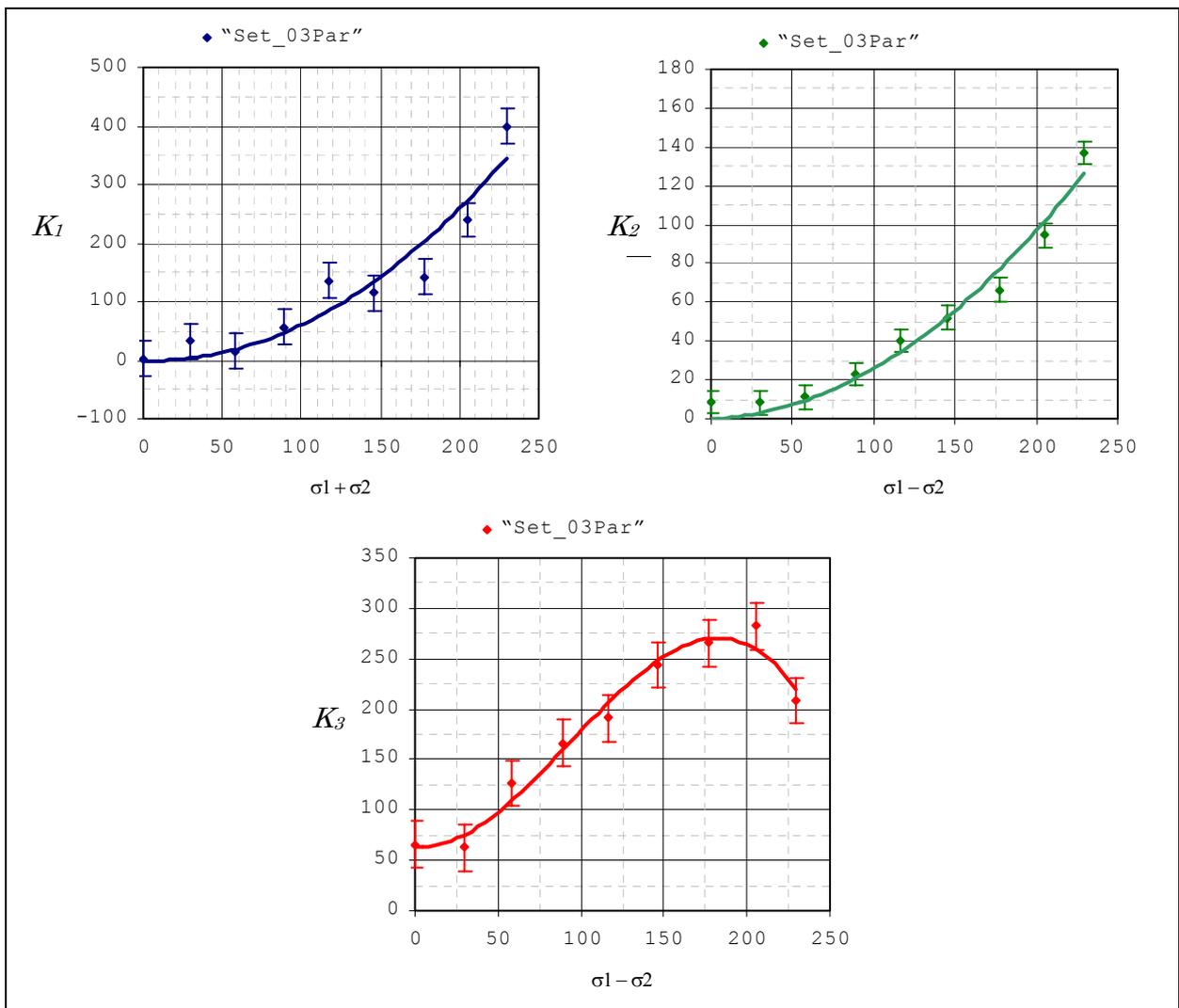


Figura 7.9 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: "Set\_03Par"(indentador cônico em aço)

Comparando os parâmetros  $K_2$  e  $K_3$  como funções das diferenças das tensões

principais, ambos apresentam coeficientes de correlação similares. Porém, os resultados mostram que a repetitividade de  $K_2$  é em torno de sete vezes melhor que a repetitividade apresentada por  $K_3$ . Por outro lado, enquanto as curvas dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  crescem com a tensão, a curva de  $K_3$  decresce a partir de 205 MPa (em torno de 70 % da tensão de escoamento do material), dando indicação de não ser um parâmetro confiável para a quantificação de tensões residuais.

#### 7.4.3 Modelos: “Set\_02Par\_Indent” e “Set\_03Par\_Indent”

Os modelos “Set\_02Par\_Indent” e “Set\_03Par\_Indent” foram utilizados no cálculo dos parâmetros de imagens similares às imagens apresentadas na figura 7.4.

A tabela 7.6 apresenta os valores dos parâmetros obtidos diretamente de imagens após o processo de indentação sem a subtração da imagem da indentação do material livre de tensões residuais. Pode-se observar que o valor médio do parâmetro  $K_4$  se alterou de -873 para -596, provavelmente havendo uma migração numérica para os valores dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ .

Tabela 7.6 Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço (“Set\_02Par\_Indent”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^\circ$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
Set_02Par_Indent	10	0.0	0.0%	0	122	60.04	8.08	0.00	-596.62
	3	29.8	10.1%	149	27	136.88	11.14	0.00	-616.53
	3	58.1	19.7%	290	24	123.60	17.72	0.00	-608.81
	4	89.2	30.2%	446	31	161.29	32.97	0.00	-614.62
	3	116.9	39.6%	584	32	194.78	51.58	0.00	-727.89
	4	145.7	49.4%	729	30	203.40	67.09	0.00	-654.67
	3	177.3	60.1%	887	30	236.76	82.58	0.00	-636.59
	4	205.0	69.5%	1025	29	314.01	111.67	0.00	-687.76
	3	229.3	77.7%	1147	30	428.63	150.00	0.00	-797.16

Outro fator interessante neste modelo, são os valores de  $\beta$  que convergem a  $30^\circ$  já a partir de 30 MPa, em torno de 10 % da tensão de escoamento do material, e se mantém praticamente constante para todos os níveis de tensões simuladas. Observando as imagens da figura 7.4 de maneira qualitativa, a direção do campo de deslocamentos é perceptível para tensões superiores a 58 MPa, em torno de 20 % da tensão de escoamento do material. Aparentemente este modelo dá melhores resultados que o modelo que envolve a subtração do efeito da indentação do material livre de tensões residuais.

Os parâmetros calculados em função das somas e das diferenças das tensões simuladas, estão apresentadas na figura 7.10. A curva que representa os valores do Suterio, R.

parâmetro calculado  $K_1$  foi interpolada por um polinômio de 3ª ordem, apresentando pontos com um comportamento bem homogêneo e um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.985$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 30 unidades.

A curva que representa os valores do parâmetro calculado  $K_2$  apresenta um comportamento similar aos apresentados nos modelos anteriores, com coeficiente de correlação  $R^2 = 0.985$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 4 unidades.

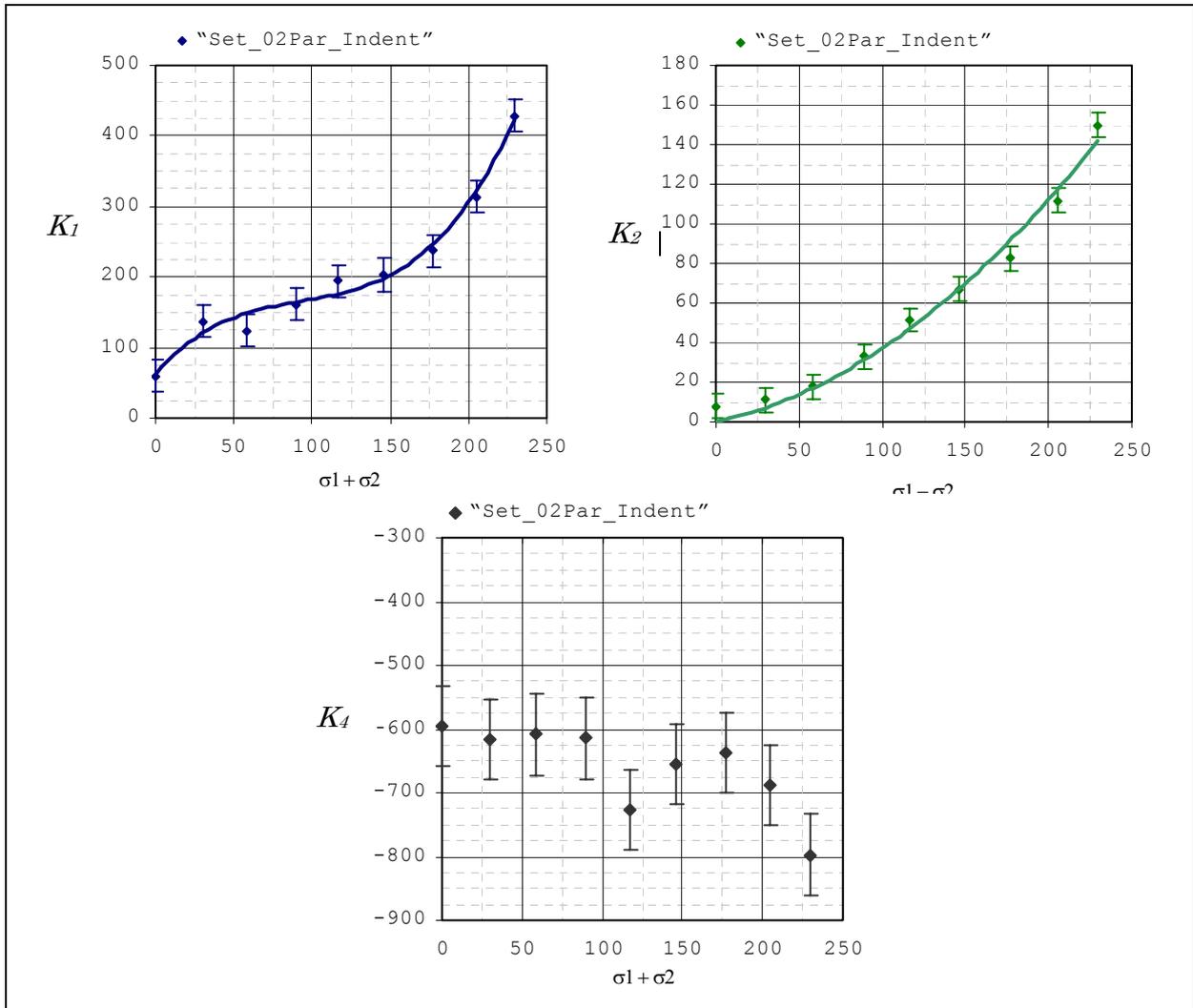


Figura 7.10 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: "Set\_02Par\_Indent" (indentador cônico em aço)

Os valores calculados para o parâmetro  $K_4$  mostram que a carga equivalente de indentação não é constante, mas por outro lado, aparenta ser independente do nível de tensão existente no material. As diferenças entre os valores do parâmetro  $K_4$  provavelmente existem devido à má repetitividade do sistema de mola do indentador

utilizado ou ainda a existência de uma certa dependência matemática entre o parâmetro  $K_I$  e o parâmetro  $K_A$ , fazendo com que os mesmos disputem valores numéricos quando é usado o método dos mínimos quadrado. Deve-se ressaltar que a repetitividade média dos valores do parâmetro  $K_A$  expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 75 unidades.

A tabela 7.7 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set\_03Par\_Indent”. Os valores dos parâmetros  $\beta$ ,  $K_I$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_A$  foram determinados diretamente de imagens similares as imagens da figura 7.4, obtidas após o processo de indentação, sem a subtração da imagem da indentação do material livre de tensões residuais.

Tabela 7.7 Parâmetros médios calculados para indentador cônico em aço  
 (“Set\_03Par\_Indent”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [o]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_A$
“Set_03Par_Indent”	10	0.0	0.0%	0	120	59.43	8.36	66.01	-598.50
	3	29.8	10.1%	149	73	136.86	8.32	61.06	-616.75
	3	58.1	19.7%	290	16	123.73	11.10	127.47	-608.27
	4	89.2	30.2%	446	30	160.34	23.05	166.98	-617.85
	3	116.9	39.6%	584	33	190.92	39.94	193.12	-739.84
	4	145.7	49.4%	729	30	199.95	52.01	245.07	-665.89
	3	177.3	60.1%	887	29	235.83	66.20	270.32	-640.27
	4	205.0	69.5%	1025	29	314.08	94.06	292.07	-687.78
	3	229.3	77.7%	1147	30	432.14	136.41	228.63	-786.70

Para o modelo “Set\_03Par\_Indent” os valores de  $\beta$  convergem para  $30^\circ$  a partir de 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material, e se mantém praticamente constantes para todos os outros níveis de tensões simuladas. Aparentemente este modelo não apresentou robustez nos níveis de cargas inferiores a este nível.

Comparando ao modelo “Set\_Indent”, os cálculos diretos do parâmetro  $K_A$ , que é relacionado a indentação do material livre de tensões residuais, se alterou de -873 para -598 unidades, havendo uma migração numérica para os parâmetros  $K_I$ ,  $K_2$  e  $K_3$ . Os valores calculados dos parâmetros  $K_I$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_A$  estão representados na figura 7.11. A curva que representa os valores do parâmetro calculado  $K_I$  foi interpolada por um polinômio completo de 3ª ordem e apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.985$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 30 unidades.

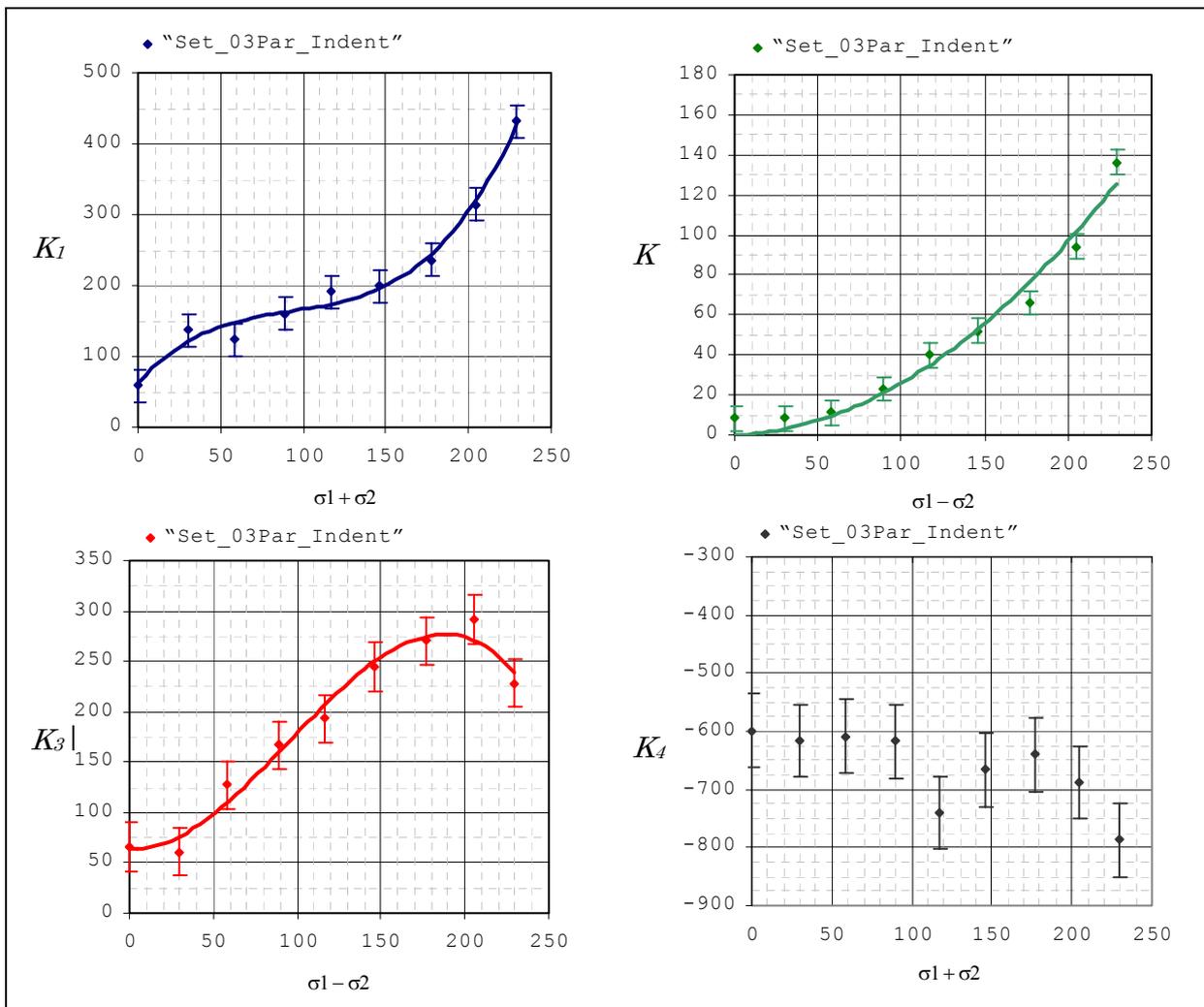


Figura 7.11 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: "Set\_03Par\_Indent" (indentador cônico em aço)

A curva que representa os valores do parâmetro  $K_2$  apresenta um comportamento similar aos apresentados nos métodos anteriores, sendo interpolada por um polinômio de 2ª ordem e coeficiente de correlação  $R^2 = 0.973$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 4 unidades.

A curva que representa os valores do parâmetro  $K_3$  foi interpolada por um polinômio completo de 3ª ordem. Apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.976$  e repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, em torno de 30 unidades. Mais uma vez a equação interpolada de  $K_2$  apresenta um melhor comportamento comparado à equação de  $K_3$ . Os resultados mostram que a repetitividade de  $K_2$  é em torno de sete vezes melhor que a repetitividade apresentada por  $K_3$ . Do mesmo modo, as curvas dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  crescem com a tensão, enquanto a curva de  $K_3$  decresce a partir de 205 MPa (em torno de 70 % da tensão de escoamento do material), dando indicação de não ser um parâmetro confiável para a quantificação de

tensões residuais.

Os valores calculados que representam o parâmetro  $K_4$  apresentam diferenças significativas, assim como as verificadas no modelo anterior - “*Set\_02Par\_Indent*”. Talvez causada pela pouca repetitividade do sistema de mola do indentador utilizado ou ainda uma certa dependência matemática existente entre o parâmetro  $K_1$  e o parâmetro  $K_4$  fazendo que os mesmos disputem valores numéricos quando é usado o método dos mínimos quadrado. A repetitividade média dos valores do parâmetro  $K_4$  expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 77 unidades.

## 7.5 Resultados com Indentador Esférico em Aço

Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas seguintes. As imagens foram processadas pelos diferentes modelos resumidos na tabela 7.1. A simbologia apresentada em todas as tabelas é a mesma especificada na Seção 7.4.

### 7.5.1 Modelo: “*Set\_Indent*”

A tabela 7.8 apresenta o resultado médio obtido das imagens do material idealmente livre de tensões residuais. O valor médio obtido do parâmetro  $K_4$  foi de -1351 unidades e a repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, foi igual a 238 unidades (17,6 % do valor médio).

Tabela 7.8 Parâmetros médios calculados de material sem tensões residuais para indentador esférico em aço (“*Set\_Indent*”)

Método	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^\circ$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“ <i>Set_Indent</i> ”	12	0.0	0.0%	0	0	0.00	0.00	0.00	-1351.51

### 7.5.2 Modelos: “*Set\_02Par*” e “*Set\_03Par*”

Os modelos “*Set\_02Par*” e “*Set\_03Par*” foram utilizados no cálculo dos parâmetros de imagens similares às imagens apresentadas na figura 7.7, onde o efeito da indentação do material livre de tensões residuais foi subtraído da imagem do material indentado na presença de tensões residuais simuladas. O valor medido do parâmetro  $K_4$  da Seção 7.5.1 anterior, foi utilizado para construção da imagem de referência do material livre de tensões residuais a ser subtraída das imagens do campo de deslocamentos radiais do material indentado.

A tabela 7.9 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set\_02Par”. Somente os parâmetros  $\beta$ ,  $K_1$  e  $K_2$  foram determinados. Pode-se observar que para as tensões superiores a 58 MPa, em torno de 20 % da tensão de escoamento do material, os valores de  $\beta$  convergem a 30° como esperado. Observando de maneira qualitativa as imagens da figura 7.7, a direção do campo de deslocamentos é visível para tensões superiores a 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material.

Tabela 7.9 Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set\_02Par”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [°]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_02Par”	12	0.0	0.0%	0	107	7.35	6.82	0.00	
	3	29.8	10.1%	149	22	0.67	13.40	0.00	
	3	58.1	19.7%	290	28	30.24	26.96	0.00	
	4	88.7	30.1%	443	30	68.35	56.19	0.00	
	3	116.9	39.6%	585	30	172.75	79.12	0.00	-1351.51
	4	145.8	49.4%	729	28	137.79	103.02	0.00	
	3	177.1	60.0%	886	30	152.53	123.45	0.00	
	4	204.8	69.4%	1024	29	221.39	154.36	0.00	
	3	228.7	77.5%	1144	30	403.38	203.20	0.00	

Os parâmetros calculados são apresentados em função das somas e das diferenças das tensões simuladas nas figuras 7.12. A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_1$ , embora apresentando alguns pontos fora da curva interpolada, apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.876$ , razoável. A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 58 unidades.

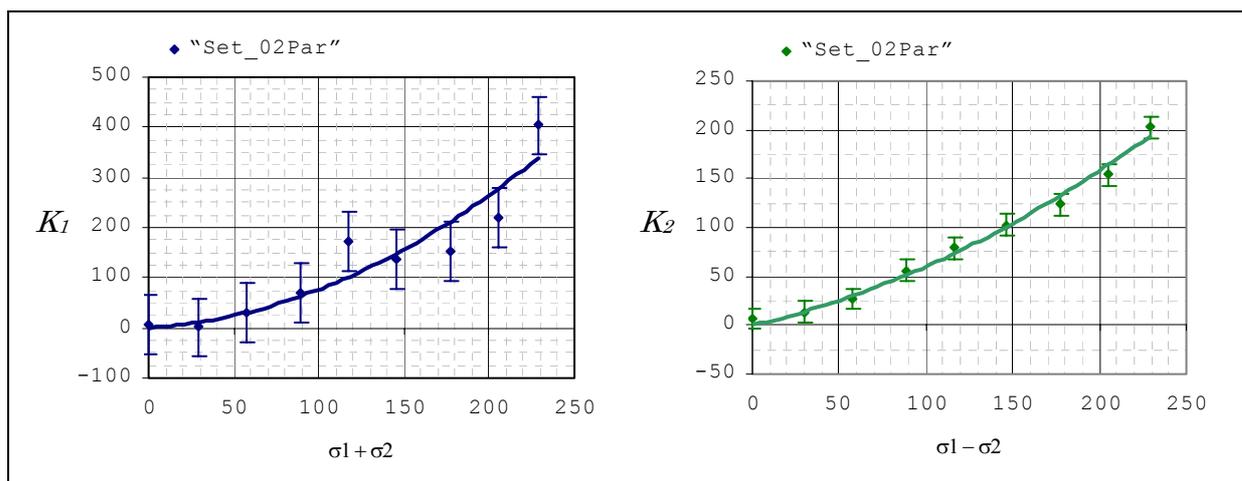


Figura 7.12 Gráfico dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set\_02Par” (indentador esférico em aço)

A curva que representa os valores médios calculados do parâmetro  $K_2$  tem um comportamento bem definido. A função interpolada apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.989$  e repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, Suterio, R.

em torno de 6 unidades.

A tabela 7.10 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “Set\_03Par” onde, os parâmetros  $\beta$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  foram determinados. Observa-se que os valores de  $\beta$  convergem a  $30^\circ$  a partir de 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material, mantendo-se praticamente constantes para todos os outros níveis de tensões simuladas e também coincide com a percepção visual de direção da tensão principal das imagens da figura 7.7.

Tabela 7.10 Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço (“Set\_03Par”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^\circ$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_03Par”	12	0.0	0.0%	0	104	7.25	7.55	57.05	
	3	29.8	10.1%	149	60	0.98	9.42	133.07	
	3	58.1	19.7%	290	25	30.32	21.10	104.76	
	4	88.7	30.1%	443	29	68.53	46.68	164.27	
	3	116.9	39.6%	585	29	173.09	69.69	159.77	-1351.51
	4	145.8	49.4%	729	27	137.84	89.85	217.09	
	3	177.1	60.0%	886	30	152.85	109.49	236.42	
	4	204.8	69.4%	1024	29	220.48	143.33	184.01	
	3	228.7	77.5%	1144	30	403.55	201.36	104.95	

Os parâmetros calculados, expressos em função das somas e das diferenças das tensões simuladas, estão apresentados na figura 7.13. A curva que representa os parâmetros calculados de  $K_1$  foi interpolada por uma equação de 2ª ordem. Embora apresente alguns pontos fora da curva e um coeficiente de correlação é razoável  $R^2 = 0.875$ . A repetitividade expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 58 unidades.

A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_2$ , tem um comportamento bem definido. Foi interpolada por um polinômio de 2ª ordem e coeficiente de correlação  $R^2 = 0.982$ . A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 8 unidades.

Os valores calculados do parâmetro  $K_3$  são interpolados por uma equação completa de 3ª ordem, coeficiente de correlação razoável  $R^2 = 0.836$ . A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 38 unidades.

Comparando os parâmetros  $K_2$  e  $K_3$ , como funções das diferenças das tensões principais, curva dos valores do parâmetro  $K_2$  apresenta um comportamento mais homogêneo, estável, coeficientes de correlação melhor e repetitividade em torno de cinco vezes melhor que a curva apresentada por  $K_3$ . Por outro lado, enquanto as curvas de  $K_1$  e

$K_2$  crescem com a tensão, a curva de  $K_3$  decresce a partir de 146 MPa (em torno de 50 % da tensão de escoamento do material), dando indicação de não ser um parâmetro confiável para a quantificação de tensões residuais.

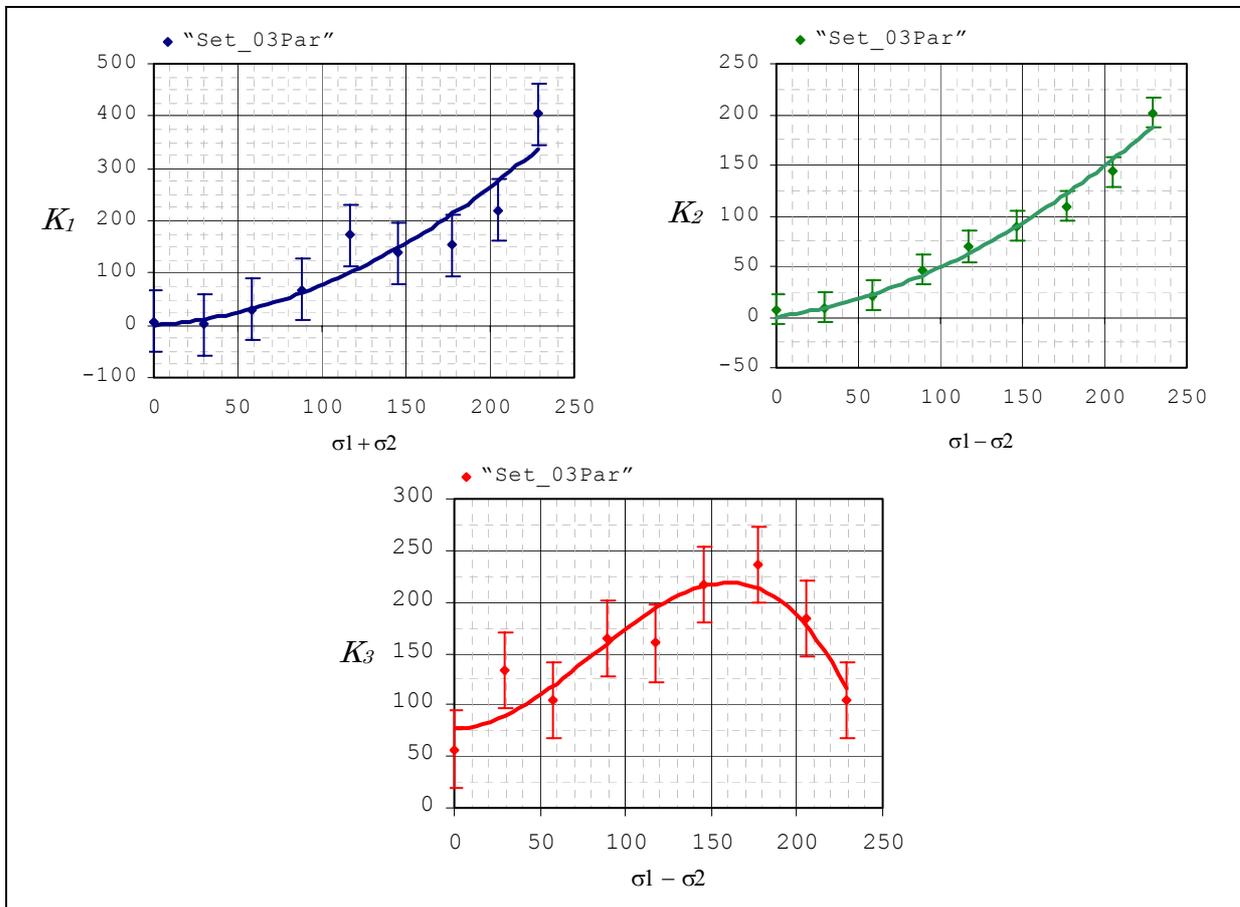


Figura 7.13 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set\_03Par” (indentador esférico em aço)

### 7.5.3 Modelos: “Set\_02Par\_Indent” e “Set\_03Par\_Indent”

Os modelos “Set\_02Par\_Indent” e “Set\_03Par\_Indent” foram utilizados no cálculo dos parâmetros de imagens similares às imagens apresentadas na figura 7.5.

A tabela 7.11 apresenta os valores dos parâmetros obtidos diretamente de imagens após o processo de indentação. Nota-se que no cálculo direto do parâmetro  $K_4$  do material livre de tensões residuais, se alterou de -1351 para -894, provavelmente havendo uma migração numérica para os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ . Os valores de  $\beta$  convergem a 30° já a partir de 58 MPa, em torno de 20 % da tensão de escoamento do material, e se mantém praticamente constantes para todos os níveis de tensões simuladas. Observando as imagens da figura 7.5 de maneira qualitativa, a direção do campo de deslocamentos é perceptível para o mesmo nível de tensão.

Tabela 7.11 Parâmetros médios calculados para indentador esférico em aço  
 (“Set\_02Par\_Indent”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^{\circ}$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“Set_02Par_Indent”	12	0.0	0.0%	0	107	192.08	6.82	0.00	-894.82
	3	29.8	10.1%	149	22	214.75	13.37	0.00	-926.39
	3	58.1	19.7%	290	28	262.53	26.99	0.00	-883.33
	4	88.7	30.1%	443	30	283.08	56.11	0.00	-924.37
	3	116.9	39.6%	585	30	346.49	79.05	0.00	-1021.27
	4	145.8	49.4%	729	28	374.10	103.12	0.00	-859.14
	3	177.1	60.0%	886	31	414.81	123.42	0.00	-791.13
	4	204.8	69.4%	1024	29	490.54	155.14	0.00	-745.79
	3	228.7	77.5%	1144	30	664.09	201.87	0.00	-760.96

Os parâmetros calculados estão apresentados na figura 7.14 em função das somas e das diferenças das tensões simuladas. A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_i$  foi interpolada por um polinômio de 3ª ordem, apresentando pontos com um comportamento bem homogêneo e um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.980$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 51 unidades.

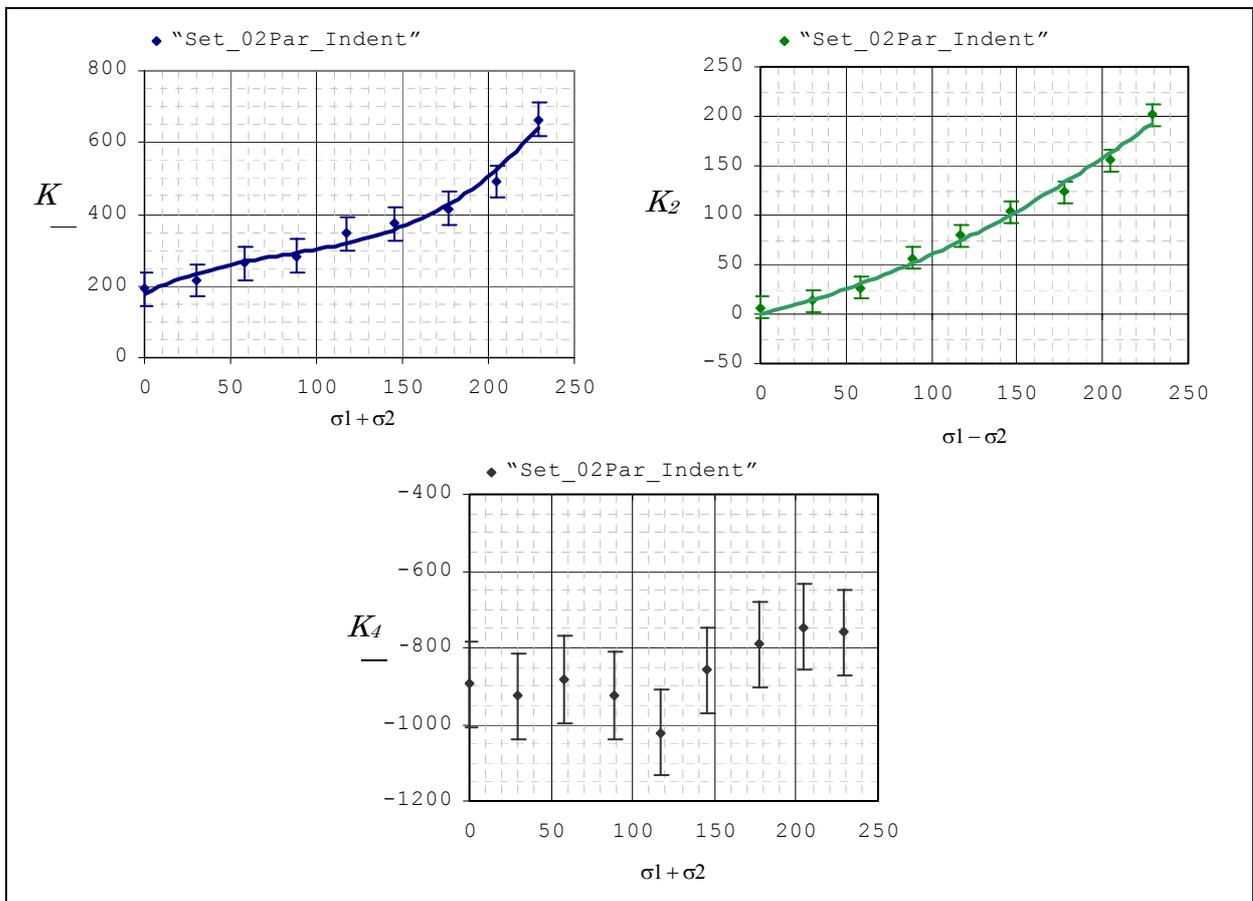


Figura 7.14 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: “Set\_02Par\_Indent” (indentador esférico em aço)

A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_2$  foi interpolada por um polinômio de 2ª ordem, e apresenta coeficiente de correlação  $R^2 = 0.990$ . A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 6 unidades.

Os valores calculados dos parâmetros  $K_4$ , mostram que a carga equivalente de indentação não é constante, mas por outro lado, aparenta ser independente do nível de tensão existente no material. As diferenças entre os valores do parâmetro  $K_4$  provavelmente existam devido à má repetitividade do sistema de mola do indentedor utilizado ou ainda a existência de uma certa dependência matemática entre o parâmetro  $K_1$  e o parâmetro  $K_4$ , fazendo com que os mesmos disputem valores numéricos quando é usado o método dos mínimos quadrado. Deve-se ressaltar que a repetitividade média dos valores do parâmetro  $K_4$ , expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 103 unidades.

A tabela 7.12 apresenta os resultados obtidos utilizando o modelo matemático “*Set\_03Par\_Indent*”. Os parâmetros  $\beta$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$  foram determinados diretamente de imagens após o processo de indentação, similares as imagens da figura 7.5.

Em comparação ao modelo “*Set\_02Par\_Indent*” os valores de  $\beta$  convergem para 30° a partir de 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material, e se mantém praticamente constantes para todos os outros níveis de tensões simuladas. Aparentemente este modelo não apresentou robustez nos níveis de cargas inferiores.

Tabela 7.12 Parâmetros médios calculados para indentedor esférico em aço  
 (“*Set\_03Par\_Indent*”)

Modelo	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\epsilon_{ref}$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [o]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
“ <i>Set_03Par_Indent</i> ”	12	0.0	0.0%	0	104	192.29	7.55	58.08	-894.05
	3	29.8	10.1%	149	60	213.25	9.21	130.54	-931.30
	3	58.1	19.7%	290	25	261.66	20.95	107.14	-886.05
	4	88.7	30.1%	443	29	281.86	46.58	167.31	-928.21
	3	116.9	39.6%	585	29	345.11	69.60	163.36	-1026.23
	4	145.8	49.4%	729	27	371.61	89.37	231.30	-867.76
	3	177.1	60.0%	886	30	411.99	109.57	239.14	-800.58
	4	204.8	69.4%	1024	29	491.85	141.83	224.63	-742.44
	3	228.7	77.5%	1144	30	663.09	203.99	148.27	-763.92

Comparando ao modelo “*Set\_Indent*”, no cálculo direto dos valores do parâmetro  $K_4$ , que é relacionado a indentação do material livre de tensões residuais, se alterou de -1351 para -894, havendo uma migração numérica para os parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ . Os valores calculados dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$  estão representados na figura 7.15. A

*Suterio, R.*

curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_1$  foi interpolada por um polinômio completa de 3ª ordem e apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.981$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 51 unidades.

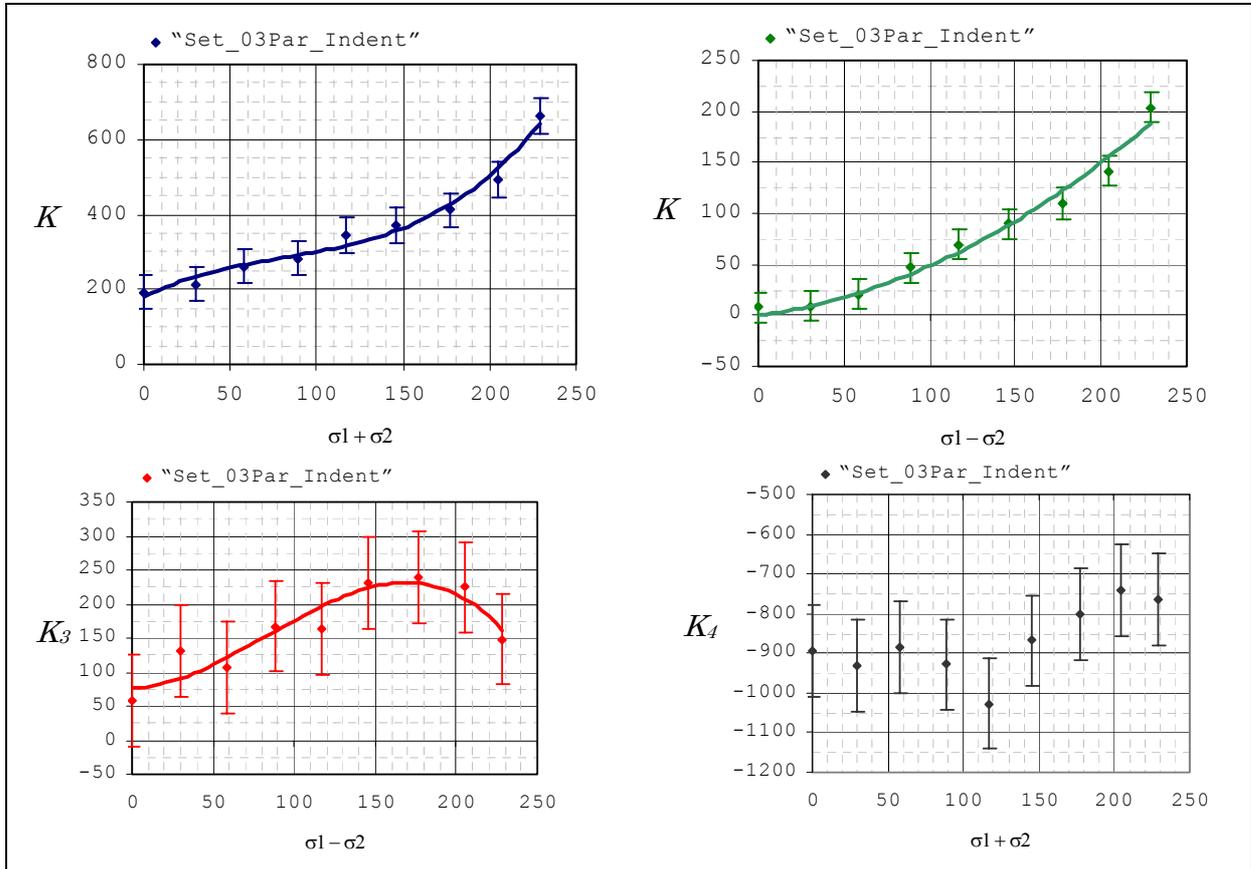


Figura 7.15 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais. Modelo: Set\_03Par\_Indent (índentador esférico em Aço)

A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_2$  apresenta um comportamento similar aos apresentados nos métodos anteriores, sendo interpolada por um polinômio de 2ª ordem e coeficiente de correlação  $R^2 = 0.979$ . A repetitividade média expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 8 unidades.

A curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_3$  foi interpolada por um polinômio completo de 3ª ordem. Apresenta um coeficiente de correlação  $R^2 = 0.870$  e a repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 45 unidades. Pode-se observar que a equação interpolada dos valores do parâmetro  $K_2$  apresenta um melhor comportamento comparado à equação dos valores do parâmetro  $K_3$ , além de apresentar repetitividade melhor em torno de seis vezes. De outra forma, observa-se que as curvas dos parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , observa-se que ambas crescem

com a tensão, enquanto a curva de  $K_3$  decresce a partir de 177 MPa (em torno de 60 % da tensão de escoamento do material), dando indicação de não ser um parâmetro confiável para a quantificação de tensões residuais.

Os valores calculados que representam o parâmetro  $K_4$  apresentam diferenças significativas, assim como as verificadas no modelo anterior - “*Set\_02Par\_Indent*”. Talvez causada pela pouca repetitividade do sistema de mola do indentador utilizado ou ainda a dependência matemática existente entre os parâmetros  $K_1$  e  $K_4$ , fazendo que os mesmos disputem valores numéricos quando é usado o método dos mínimos quadrados. A repetitividade média dos parâmetros  $K_4$  expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 102 unidades.

## 7.6 Análise dos Resultados em Aço

Os resultados experimentais dos modelos avaliados para as indentações cônicas e esféricas serão comparados e analisados. Resumidamente os coeficientes das equações interpoladas para os parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ , estão apresentadas nas tabelas 7.13 e 7.14.

A tabela 7.13 apresenta os coeficientes de correlação dos polinômios para interpolação pelos modelos estudados “*Set\_02Par*” e “*Set\_03Par*”, tanto para o indentador cônico quanto para o indentador esférico.

Tabela 7.13 Coeficientes de interpolação dos parâmetros avaliados pelos modelos “*Set\_02Par*” e “*Set\_03Par*”, indentadores cônico e esférico para o aço.

Indentador Cônico					
Modelo	“ <i>Set_02Par</i> ”		“ <i>Set_03Par</i> ”		
Parâmetros	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
R <sup>2</sup>	0.909	0.985	0.908	0.973	0.972
$\beta_0$	--	--	--	--	64.041
$\beta_1$	-0.10373	0.18365	-0.09417	0.03287	-0.16981
$\beta_2$	0.007017	0.001888	0.006957	0.002262	0.020452
$\beta_3$	--	--	--	--	-0.0000730
Indentador Esférico					
Modelo	“ <i>Set_02Par</i> ”		“ <i>Set_03Par</i> ”		
Parâmetros	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
R <sup>2</sup>	0.876	0.989	0.875	0.982	0.836
$\beta_0$	--	--	--	--	77.202
$\beta_1$	0.21252	0.40958	0.21698	0.23442	-0.02250
$\beta_2$	0.005548	0.001905	0.005524	0.002560	0.016898
$\beta_3$	--	--	--	--	-0.0000702

Pode-se observar que as equações de interpolação do parâmetro  $K_1$  apresentam coeficientes de correlação razoáveis. Já as equações de interpolação do parâmetro  $K_2$

apresentam melhor comportamento e coeficiente de correlação próximo a 1.0, ocorrendo o mesmo fato para a equação de interpolação do parâmetro  $K_3$  para o indentador cônico. Deve-se ressaltar que o parâmetro  $K_2$  no modelo de cálculo “*Set\_02Par*”, é equivalente aos valores de  $K_2$  e  $K_3$  do modelo “*Set\_03Par*” combinados, se assemelhando muito ao modelo do método do furo cego.

Comparando os modelos, observa-se que o “*Set\_02Par*” apresenta melhor comportamento que o modelo “*Set\_03Par*”. O primeiro envolve a subtração do campo de deslocamento do material livre de tensões residuais.

A subtração do campo de deslocamentos do material livre de tensões residuais é fundamental para a determinação das tensões em carregamentos biaxiais, especialmente quando ambas as tensões principais possuem o mesmo sinal. No caso particular em que as tensões principais assumem valores iguais, o campo de deslocamentos radiais da indentação se torna axisimétrico. Neste caso, somente com a subtração da imagem do material livre de tensões residuais é possível quantificar corretamente os níveis das tensões residuais existentes dentro da confiabilidade que este modelo empírico aproximado pode trazer.

A maior dispersão dos valores de  $K_1$ , evidenciada pelos piores valores dos coeficientes de correlação, é possivelmente causada pela baixa repetitividade do sistema de indentação.

Analogamente, a tabela 7.14 apresenta os coeficientes de correlação e interpolação dos modelos “*Set\_02Par\_Indent*” e “*Set\_03Par\_Indent*”. Nota-se comportamentos semelhantes aos observados nos dois modelos anteriores, diferenciando-se nos coeficientes de correlação dos parâmetros  $K_1$  que são mais próximos de 1.0, e no fato do coeficiente de correlação do indentador esférico ser menor para o parâmetro  $K_3$ .

No modelo “*Set\_02Par\_Indent*”, os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , apresentam coeficiente de correlação próximos a 1.0 para ambos tipos de indentadores. Mais uma vez deve-se ressaltar que o parâmetro  $K_2$  do modelo “*Set\_02Par\_Indent*”, engloba os parâmetros  $K_2$  e  $K_3$  do modelo “*Set\_03Par\_Indent*”.

Comparando os modelos observa-se que o “*Set\_02Par\_Indent*” apresenta um melhor comportamento em relação a todos os outros modelos apresentados. Ele não envolve a subtração do material livre de tensões residuais, tendo como vantagem de apenas processar a imagem após o processo de indentação para a quantificar a direção principal e as tensões residuais na superfície do material.

Tabela 7.14 Coeficientes de interpolação dos parâmetros estudados pelos modelos “Set\_02Par\_Indent” e “Set\_03Par\_Indent”, indentadores cônico e esférico para o aço.

Indentador Cônico					
Modelo	Set_02Par_Indent		Set_03Par_Indent		
Parâmetros	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$R^2$	0.985	0.985	0.986	0.974	0.976
$\beta_0$	62.492	--	62.023	--	63.378
$\beta_1$	2.53512	0.18099	2.57818	0.03487	-0.09503
$\beta_2$	-0.022882	0.001905	-0.023827	0.002242	0.019245
$\beta_3$	0.0000814	--	0.0000850	--	-0.0000675
Indentador Esférico					
Método	Set_02Par_Indent		Set_03Par_Indent		
Parâmetros	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$R^2$	0.980	0.990	0.981	0.979	0.870
$\beta_0$	179.076	--	179.026	--	76.583
$\beta_1$	2.33884	0.41365	2.31485	0.22201	0.07593
$\beta_2$	-0.018602	0.001878	-0.018556	0.002634	0.015320
$\beta_3$	0.0000752	--	0.0000755	--	-0.0000613

Não se pode afirmar até o momento se este modelo é suficientemente robusto e capaz de medir em campos de tensões biaxiais quando as tensões assumem valores diferentes de zero e no caso particular quando ambas as tensões assumem valores iguais.

### 7.6.1 Determinação das Tensões Residuais

Quatro modelos de cálculos foram estudados, dos quais dois são escolhidos para quantificar bem as tensões residuais pelo método da indentação: o modelo “Set\_02Par” e o modelo “Set\_02Par\_Indent” (tabela 7.1, seção 7.1). Deve-se ressaltar que as equações foram validadas para uma condição de contorno: tensões uniformes na superfície e ao longo da espessura do material. Embora o modelo proposto deva ser válido para estados de tensões biaxiais, futuros estudos devem ser realizados para verificar sua validade.

A regressão por polinômios do segundo grau para a quantificação de  $K_1$  e  $K_2$  mostra-se suficientes para interpolação. As suas respectivas funções inversas de correlação  $H$  e  $\Gamma$  apresentam coeficientes de correlação melhores que 0,90 ( $R^2$ ), e podem ser representadas por:

$$H(K_1) = \psi_{12} K_1^2 + \psi_{11} K_1 = (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (7.1)$$

$$\Gamma(K_2) = \psi_{22} K_2^2 + \psi_{21} K_2 = (\sigma_1 - \sigma_2)$$

onde:  $\psi_{1i}$  e  $\psi_{2i}$ , são os coeficientes experimentalmente determinados para  $K_1$  e  $K_2$  respectivamente.

O uso do modelo “*Set\_02Par*” e indentação cônica, a equação 7.1 se transforma em:

$$\begin{aligned} H(K_1) &= -0.002073 K_1^2 + 1.394 K_1 \\ R^2 &= 0.926 \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(K_2) &= -0.008402 K_2^2 + 2.787 K_2 \\ R^2 &= 0.986 \end{aligned}$$

E com a indentação esférica, a equação 7.1 se transforma em:

$$\begin{aligned} H(K_1) &= -0.001739 K_1^2 + 1.265 K_1 \\ R^2 &= 0.907 \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(K_2) &= -0.003321 K_2^2 + 1.810 K_2 \\ R^2 &= 0.991 \end{aligned}$$

Utilizando-se o modelo “*Set\_02Par\_Indent*” e indentação cônica, a equação 7.1 se transforma em:

$$\begin{aligned} H(K_1) &= -0.001595 K_1^2 + 1.465 K_1 - 100.6 \\ R^2 &= 0.946 \end{aligned} \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(K_2) &= -0.008430 K_2^2 + 2.791 K_2 \\ R^2 &= 0.986 \end{aligned}$$

E, finalmente, com a indentação esférica, a equação 7.1 se transforma em:

$$\begin{aligned} H(K_1) &= -0.001082 K_1^2 + 1.411 K_1 - 230.1 \\ R^2 &= 0.993 \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(K_2) &= -0.003291 K_2^2 + 1.806 K_2 \\ R^2 &= 0.992 \end{aligned}$$

Pode-se observar que utilizando o modelo “*Set\_02Par\_Indent*” e indentação esférica, obtém-se a melhor correlação para a determinação das tensões residuais.

Com os valores de  $H$  e  $\Gamma$  que são obtidos através de  $K_1$  e  $K_2$  calculados das imagens, os valores de  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  podem ser calculados da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{(H + \Gamma)}{2} \\ \sigma_2 &= \frac{(H - \Gamma)}{2} \end{aligned} \quad (7.6)$$

As tabelas 7.15 a 7.18 apresentam os valores obtidos de tensão com os respectivos valores calculados das funções propostas de  $H$  e  $\Gamma$ , tanto para a indentação cônica quanto para a indentação esférica.

Das tabelas 7.15 e 7.16 observa-se desvios máximos absolutos de 17 % e 24 % respectivamente, a partir de 89 MPa, em torno de 30 % da tensão de escoamento do material.

*Tabela 7.15 Valores de tensão calculados para o indentador cônico em aço “Set\_02Par”*

Tensão de referência $\sigma_{ref}$ [MPa]	Tensão de referência relativa ao escoamento $\sigma_{ref} / \sigma_y$	Valores medidos		Diferença	
		$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{ref} - \sigma_1$ [MPa]	$(\sigma_{ref} - \sigma_1) / \sigma_{ref}$
0.0	0.0%	12.5	-9.4	12.5	--
29.8	10.1%	36.5	6.4	6.7	22%
58.1	19.7%	34.3	-12.6	-23.8	-41%
89.2	30.2%	77.1	-5.8	-12.1	-14%
116.9	39.6%	136.3	14.8	19.4	17%
145.7	49.4%	141.0	-8.3	-4.7	-3%
177.3	60.1%	164.4	-8.5	-12.9	-7%
205.0	69.5%	210.8	4.4	5.8	3%
229.3	77.7%	227.4	-1.6	-1.9	-1%

*Tabela 7.16 Valores de tensão calculados para o indentador esférico em aço “Set\_02Par”*

Tensão de referência $\sigma_{ref}$ [MPa]	Tensão de referência relativa ao escoamento $\sigma_{ref} / \sigma_y$	Valores medidos		Diferença	
		$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{ref} - \sigma_1$ [MPa]	$(\sigma_{ref} - \sigma_1) / \sigma_{ref}$
0.0	0.0%	10.7	-1.5	10.7	--
29.8	10.1%	12.3	-11.4	-17.6	-59%
58.1	19.7%	41.5	-4.9	-16.6	-29%
88.7	30.1%	84.8	-6.5	-3.9	-4%
116.9	39.6%	144.5	22.1	27.6	24%
145.8	49.4%	146.2	-5.0	0.4	0%
177.1	60.0%	162.6	-10.2	-14.5	-8%
204.8	69.4%	197.5	-2.8	-7.3	-4%
228.7	77.5%	228.9	-1.8	0.2	0%

Das tabelas 7.17 e 7.18 que utilizam o modelo “Set\_02Par\_Indent”, observa-se desvios máximos absolutos de 11 % e 7 % respectivamente, a partir de 58 MPa, ou seja, em torno de 20 % da tensão de escoamento do material.

Tabela 7.17 Valores de tensão calculados para o indentador cônico em aço “Set\_02Par\_Indent”

Tensão de referência	Tensão de referência relativa ao escoamento	Valores medidos		Diferença	
		$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{ref} - \sigma_1$ [MPa]	$(\sigma_{ref} - \sigma_1) / \sigma_{ref}$
0.0	0.0%	1.8	-20.2	1.8	--
29.8	10.1%	50.1	20.0	20.2	68%
58.1	19.7%	51.5	4.7	-6.6	-11%
89.2	30.2%	88.5	5.7	-0.7	-1%
116.9	39.6%	122.9	1.4	6.0	5%
145.7	49.4%	140.4	-8.9	-5.4	-4%
177.3	60.1%	164.9	-8.0	-12.4	-7%
205.0	69.5%	204.4	-2.1	-0.6	0%
229.3	77.7%	231.7	2.7	2.4	1%

Tabela 7.18 Valores de tensão calculados para o indentador esférico em aço “Set\_02Par\_Indent”

Tensão de referência	Tensão de referência relativa ao escoamento	Valores medidos		Diferença	
		$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{ref} - \sigma_1$ [MPa]	$(\sigma_{ref} - \sigma_1) / \sigma_{ref}$
0.0	0.0%	6.6	-5.5	6.6	--
29.8	10.1%	23.3	-0.2	-6.5	-22%
58.1	19.7%	56.1	9.8	-2.0	-3%
88.7	30.1%	86.9	-4.1	-1.8	-2%
116.9	39.6%	125.6	3.4	8.7	7%
145.8	49.4%	148.9	-2.4	3.1	2%
177.1	60.0%	171.0	-1.8	-6.1	-3%
204.8	69.4%	201.5	0.5	-3.4	-2%
228.7	77.5%	230.3	-0.1	1.6	1%

## 7.6.2 Resumo dos Resultados Obtidos em Aço

A tabela 7.19 resume as funções obtidas para o aço em termos das pontas dos indentadores utilizados e dos modelos matemáticos propostos.

A diferença entre as tensões residuais está correlacionada à função  $\Gamma(K_2)$ . Esta função apresenta-se relativamente estável e independente do modelo de cálculo utilizado, mas muda com a forma da ferramenta de indentação. Já a função  $H(K_1)$ , ligada à soma das tensões residuais, apresenta diferenças de acordo com o modelo de cálculo adotado e, principalmente, muda consideravelmente com a geometria da ferramenta de indentação. Há uma expectativa de que a melhoria da repetitividade da aplicação da energia de impacto do indentador aproxime mais estas equações, o que contribuiria na direção de unificar os modelos de cálculo.

Tabela 7.19 Resumo das funções encontradas para o aço em termos do tipo do indentador e dos modelos utilizados.

	“Set_02Par”	“Set_02Par_Indent”	R <sup>2</sup>
<b>Cone</b>	$H(K_1) = -0.002073 K_1^2 + 1.394 K_1$	$H(K_1) = -0.001595 K_1^2 + 1.465 K_1 - 100.6$	0.93 / 0.95
	$\Gamma(K_2) = -0.008416 K_2^2 + 2.789 K_2$		0.99
<b>Esfera</b>	$H(K_1) = -0.001739 K_1^2 + 1.265 K_1$	$H(K_1) = -0.001082 K_1^2 + 1.411 K_1 - 230.1$	0.91 / 0.99
	$\Gamma(K_2) = -0.003306 K_2^2 + 1.808 K_2$		0.99

### 7.7 Resultados e Análise em Alumínio

Ensaios foram realizados em um corpo de prova em alumínio com simulação de tensões residuais variando de 0 a 90 MPa, equivalendo de 0 até aproximadamente 60 % da tensão de escoamento do material.

Algumas das imagens obtidas nos ensaios estão apresentadas na figura 7.16 para indentações esféricas. São mostradas as diferenças de fase, sem o salto de fase removido, provocadas pela movimentação da superfície do material antes e após a indentação, para diferentes níveis de tensões residuais mecanicamente simuladas.

Foram verificados basicamente todos os modelos propostos neste trabalho, onde estão apresentados somente os resultados analisados com o modelo “Set\_02Par\_Indent”.

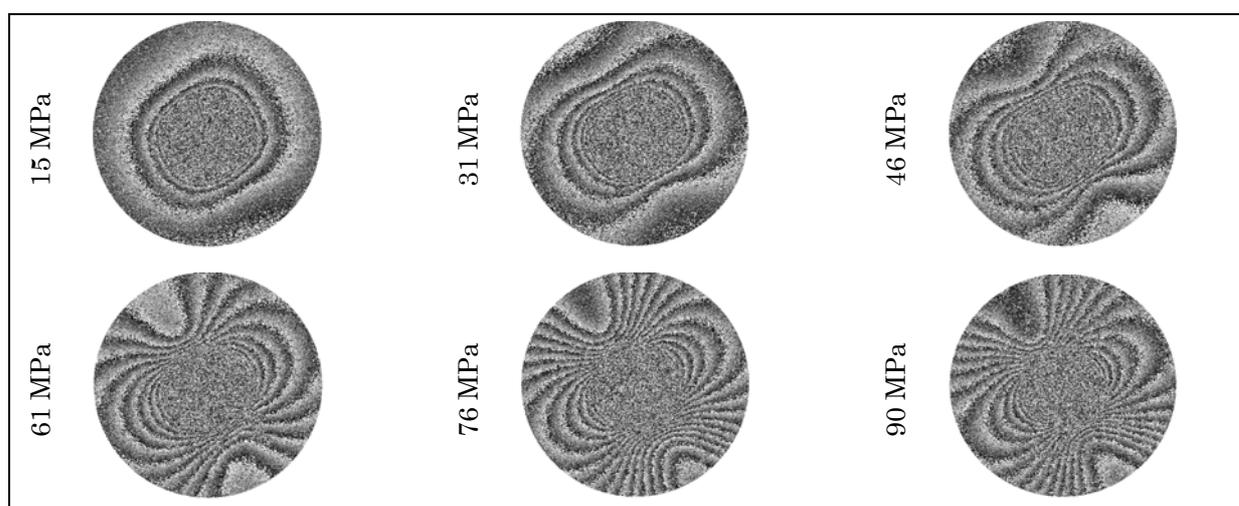


Figura 7.16 Imagens obtidas de indentação esférica em função das tensões residuais simuladas para corpo de prova de alumínio.

Os resultados obtidos dos parâmetros calculados diretamente das imagens após o processo de indentação estão apresentados na tabela 7.20. A energia de indentação foi regulada para uma configuração intermediária, numa posição de afastamento igual a -4 mm da posição da mola. Foi verificado que nesta condição não havia perda de correlação das imagens do interferômetro devido a grandes deslocamentos radiais.

Tabela 7.20 Parâmetros médios calculados para indentador esférico em alumínio  
("Set\_02Par\_Indent")

Método	n	$\sigma_{ref}$ [MPa]	$\sigma_{re} / \sigma_y$ [%]	$\epsilon_{ref}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\beta$ [ $^\circ$ ]	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
"Set_02Par_Indent"	5	0.0	0.0%	0	123	-32.12	12.49	0.00	-1041.91
	3	15.3	10.1%	222	45	-61.54	10.48	0.00	-847.21
	6	30.6	20.1%	444	32	-113.39	36.94	0.00	-875.55
	3	40.5	26.6%	588	32	132.49	63.57	0.00	-682.36
	3	45.4	29.9%	659	31	-226.13	64.58	0.00	-888.77
	6	60.9	40.1%	884	30	-1.88	107.63	0.00	-809.66
	5	76.0	50.0%	1104	29	34.50	162.57	0.00	-753.12
	3	89.8	59.1%	1303	28	172.64	200.29	0.00	-386.22

Devido à menor dureza do alumínio, os valores calculados do parâmetro  $K_4$  na tabela 7.20 apresentam valores muito maiores que os valores encontrados para o aço. Para reduzir estes valores, foi feita uma tentativa para regular o nível de energia do indentador para níveis menores. Entretanto, foi observado que para uma carga regulada com afastamento equivalente a -5 ou -6 mm do corpo do indentador, o mesmo se apresentou com pouca repetitividades devido ao desajuste constante do corpo do indentador na regulagem de carga.

Os valores de  $\beta$  convergem a  $30^\circ$  a partir de 30 MPa, em torno de 20 % da tensão de escoamento do material, e se mantém praticamente constante para todos os níveis de tensões simuladas. Observando de maneira qualitativa as imagens da figura 7.16, a direção do campo de deslocamentos é perceptível para o mesmo nível de tensão.

Os parâmetros calculados em função das somas e das diferenças das tensões simuladas estão apresentados na figura 7.17. Um fato interessante ocorreu com o alumínio. Os valores calculados para o parâmetro  $K_I$  mostraram grande variabilidade em função da tensão simulada. O mesmo fato acontece com os valores calculados do parâmetro  $K_4$ . A repetitividade média para os dois casos, expressa em termos de um desvio padrão, estão em torno de 124 e 146 unidades respectivamente e com aparente independência dos níveis de tensão aplicados.

Por outro lado o parâmetro  $K_I$  apresenta valores negativos, sendo que para

carregamentos de tração eram esperados valores positivos, assim como ocorrido nos ensaios com o aço.

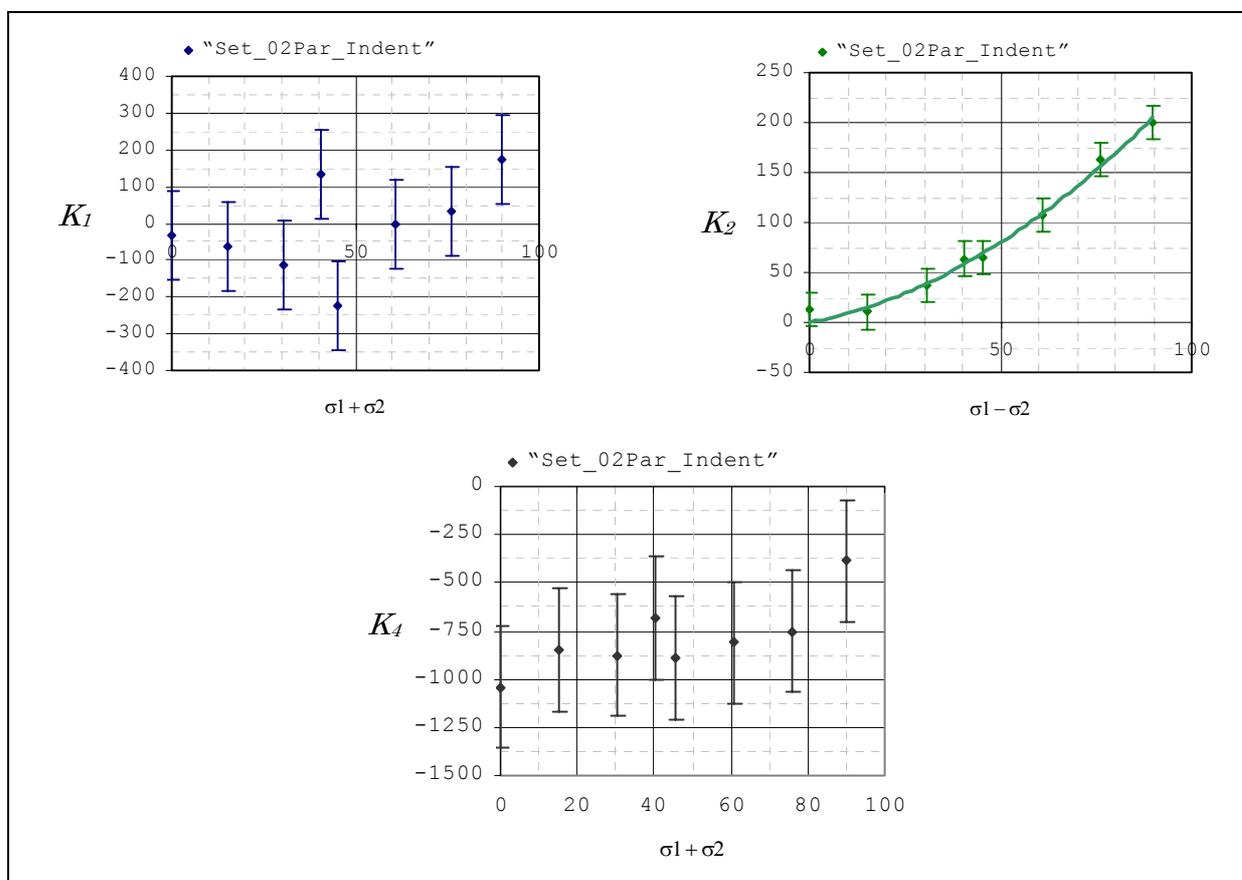


Figura 7.17 Gráfico dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$  em função das somas ou das diferenças das tensões principais.  
Modelo: "Set\_02Par\_Indent" (indentador esférico em alumínio)

Foi necessário realizar um número maior de ensaios para confirmar tal tendência. As diferenças entre os parâmetros provavelmente existam devido a dois fatores: (a) à baixa repetitividade do sistema de mola do indentador utilizado para pequenas energias de impacto e (b) à possível presença de tensões residuais iniciais no corpo de prova de alumínio, já que este não foi tratado termicamente.

Ficou comprovada mais uma vez a dependência matemática existente entre os parâmetros  $K_1$  e  $K_4$ , fazendo com que os mesmos disputem valores numéricos quando são calculados pelo método dos mínimos quadrados.

Por outro lado tal dificuldade para se encontrar uma boa correlação do parâmetro  $K_1$  pode estar ligada ao material. O alumínio ensaiado não sofreu qualquer tratamento térmico para alívio de tensões internas após o seu recebimento. Só devido ao transporte, a barra, que foi fornecida em dois pedaços de 3 metros, já apresentava deformações

visíveis ao longo de seu comprimento.

Nenhuma conclusão significativa pôde ser obtida com relação ao alumínio, o que prejudica a busca por um modelo genérico que possa ser usado para diferentes materiais metálicos.

Outro fator interessante, ainda observado na figura 7.17, foi o fato da curva que representa os valores calculados do parâmetro  $K_2$  ser interpolada por um polinômio de 2ª ordem, apresentando coeficiente de correlação  $R^2 = 0.991$ . A repetitividade média, expressa em termos de um desvio padrão, está em torno de 9 unidades. Este fato reforça a conclusão que o modelo é robusto em termos das diferenças das tensões principais.

Os coeficientes de interpolação dos parâmetros em função das tensões principais das indentações esféricas realizadas no alumínio, estão resumidos na tabela 7.21 abaixo.

*Tabela 7.21 Coeficientes de interpolação dos parâmetros analisados em função das tensões principais, indentação esférica em alumínio. Método: "Set\_02Par\_Indent"*

Indentador Esférico						
Modelo	Parâmetros	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
"Set_02Par_Indent"	K1	--	--	--	--	--
	K2	0.994	--	0.73503	0.01720	--

## Capítulo 8

# Análise de Incertezas

Este capítulo apresenta vários aspectos da análise metrológica do sistema e procedimento desenvolvido para medição de tensões residuais. São avaliados aspectos ligados ao interferômetro radial, ao sistema de aplicação de carga de indentação, aos indentadores, aos modelos matemáticos adotados e ao material ensaiado.

Duas abordagens podem ser realizadas: A primeira envolve a determinação dos intervalos de confiança de cada um dos parâmetros dos modelos matemáticos propostos e, com estes, determina-se as incertezas da medição de tensões residuais. A segunda envolve uma abordagem integral em que um modelo matemático é aceito e as demais condições de ensaio definidas e daí, são determinados os intervalos de confiança das tensões residuais medidas pelo sistema de medição.

Com o objetivo de quantificar tensões residuais pelo método da indentação, a segunda abordagem será adotada e analisada. Será aqui apresentado o procedimento adotado para a determinação das incertezas na quantificação de tensões residuais, considerando as condições de contorno de medição típicas deste trabalho: (1) carregamentos uniaxiais, (2) tensões residuais uniformes na superfície e ao longo da espessura do material.

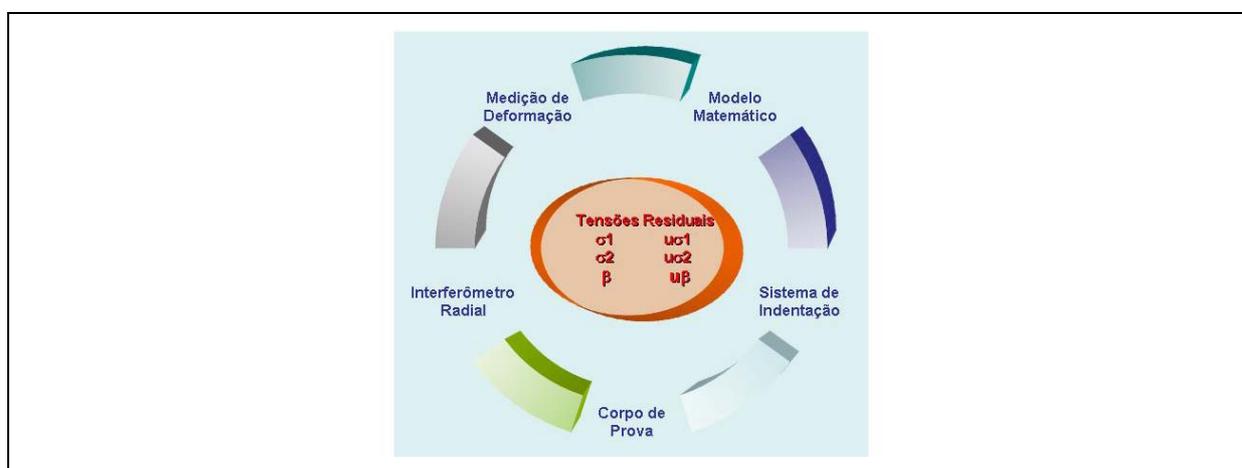
Deve-se ressaltar que a terminologia adotada e o procedimento de cálculo de incertezas, estão em conformidade com os praticados internacionalmente: O “*Vocabulário Internacional de Metrologia: Preâmbulo da Versão Brasileira*” – INMETRO<sup>[43]</sup>, e o “*Guia para Expressão da Incerteza de Medição*” – ISO, BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP, OIML<sup>[44]</sup>.

Será utilizada uma abordagem um pouco diferente das abordagens analíticas típicas por se tratar de uma medição indireta. Na impossibilidade de estabelecer um

modelo matemático que contemple as influências de todas as fontes de incertezas, será adotado um caminho que envolve simulações matemáticas utilizando-se o próprio software desenvolvido. Serão impostas ao software variações nas suas configurações e parâmetros de modo a identificar as influências nas saídas: as tensões residuais principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , e a direção principal das tensões, o ângulo  $\beta$ .

## 8.1 Fontes de Incertezas na Medição de Tensões Residuais

As principais fontes de incertezas identificadas no processo de medição de tensões residuais por indentação utilizando-se o sistema de medição - *MTRES modular*, o sistema de aplicação de carga e o tipo de indentador utilizados, estão apresentados na figura 8.1. Os principais fatores de influência para a quantificação das tensões residuais na superfície do material são as seguintes: (1) as medidas de deformações sobre o corpo de prova responsáveis para determinar a tensão de referência e utilizadas na comparação dos resultados, (2) os fatores de influência do corpo de prova, (3) os fatores de influência do interferômetro radial, (4) os fatores do sistema de indentação, e por último, (5) o modelo matemático proposto.



*Figura 8.1 Principais fontes de incertezas na medição de tensões residuais.*

Para medição de tensões residuais três grandezas são obtidas: as tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ), e a direção das tensões principais ( $\beta$ ). O ângulo  $\beta$  é o ângulo entre o eixo longitudinal da tela do computador até a tensão de maior intensidade no sentido anti-horário.

Considerando os equipamentos utilizados no processo de medição, as principais grandezas de entrada foram categorizadas da seguinte forma:

- ponte amplificadora;

- extensômetros;
- corpo de Prova;
- interferômetro radial, indentador e software de medição.

Basicamente a ponte amplificadora, os extensômetros e o corpo de prova, estão correlacionados à definição do valor da tensão de referência. Já o interferômetro radial, o indentador e o software de medição constituem o sistema de medição propriamente dito.

Vinte e cinco fontes de incertezas foram identificadas e são apresentadas a seguir:

#### **Ponte Amplificadora**

- $x_1$  = leitura de deformação;
- $x_2$  = erro de zero;
- $x_3$  = incerteza da ponte amplificadora;

#### **Extensômetros**

- $x_4$  = fator do extensômetro (Fator “*Gage*”);
- $x_5$  = erro de posicionamento dos extensômetros;

#### **Corpo de Prova**

- $x_6$  = tensões residuais pré-existentes;
- $x_7$  = variações nas propriedades mecânicas do material de ponto a ponto;
- $x_8$  = erros geométricos no corpo de prova;
- $x_9$  = existência de flexão no corpo de prova decorrente da aplicação do carregamento e apoio sobre o sistema de simulação de tensões residuais;

#### **Interferômetro Radial / Indentador / Software de Medição**

- $x_{10}$  = variabilidade do parâmetro  $K_1$  ( $\sigma_1 + \sigma_2$ );
- $x_{11}$  = variabilidade do parâmetro  $K_2$  ( $\sigma_1 - \sigma_2$ );
- $x_{12}$  = variabilidade da carga de indentação ou parâmetro  $K_3$ ;
- $x_{13}$  = efeito de arredondamento numérico;
- $x_{14}$  = descentralização da imagem em “x”;
- $x_{15}$  = descentralização da imagem em “y”;
- $x_{16}$  = valor do módulo de elasticidade;
- $x_{17}$  = valor do coeficiente de Poisson;
- $x_{18}$  = fator de escala da imagem;
- $x_{19}$  = variação do comprimento de onda do laser e do ângulo do espelho côncavo;
- $x_{20}$  = razão de aspecto da câmera (proporção entre “x” e “y”);
- $x_{21}$  = posição do raio interno da área de medição;
- $x_{22}$  = posição do raio externo da área de medição;

- $x_{23}$  = deslocamento de corpo rígido (translação em "x");
- $x_{24}$  = deslocamento corpo rígido (translação em "y");
- $x_{25}$  = ruído óptico da imagem.

Das vinte e cinco fontes de incertezas duas foram consideradas desprezíveis: a  $x_6$  (tensões residuais pré-existentes), e a  $x_8$  (erros geométricos). A primeira foi desprezada por considerar que o material está suficientemente livre de tensões residuais do ponto de vista macroscópico devido ao tratamento térmico realizado no aço. A segunda, por já está sendo considerada de forma englobada aos erros devido à flexão na aplicação do carregamento e apoio do corpo de prova sobre o sistema de simulação de tensões residuais (influência  $x_9$ ).

### 8.1.1 Fontes de Incertezas da Tensão de Referência

As fontes de incertezas da tensão de referência estão detalhadas no capítulo 5, seção 5.3.1. São oriundas dos extensômetros, da ponte amplificadora e do corpo de prova e foram identificadas de  $x_1$  a  $x_9$ .

### 8.1.2 Fontes de Incertezas do Sistema de Medição

As fontes de incertezas do sistema de medição são oriundas do interferômetro radial, do sistema de aplicação da indentação e do software de medição e análise das imagens. As fontes de incertezas foram identificadas de  $x_{10}$  a  $x_{25}$ . As influências das fontes de incertezas sobre as tensões residuais foram obtidas através de simulação das suas variações típicas nos parâmetros do software de análise, em função de especificações e medições verificadas nos ensaios controlados. Resumidamente simulou-se uma imagem de referência usando o modelo matemático adotado e, a partir desta imagem, foram aplicadas variações nos fatores de incertezas como as propriedades do material, do laser, da câmara, da força de indentação, dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$ , dentre outros, e verificando-se o comportamento das grandezas de saída em função de cada variação das grandezas de entrada.

O ponto de medição de 177.1 MPa foi escolhido juntamente com o modelo “*Set\_02Par\_Indent*” para analisar as incertezas. A figura 8.2 apresenta duas imagens. A primeira foi obtida nos ensaios controlados com o aço a uma tensão de referência de 177.1 MPa. A segunda, obtida através de simulação usando o modelo “*Set\_02Par\_Indent*” com os valores dos parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$  obtidos pelo processamento da imagem anterior.

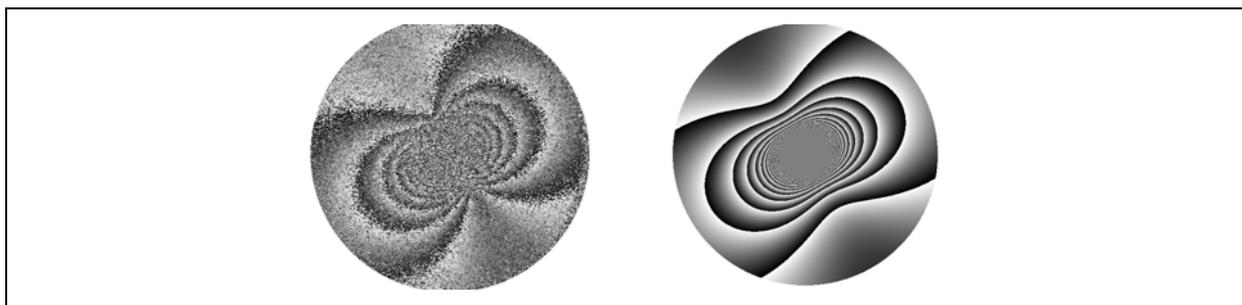


Figura 8.2 Imagem obtida de ensaio e imagem simulada a partir de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$ .

## 8.2 Análise Metrológica

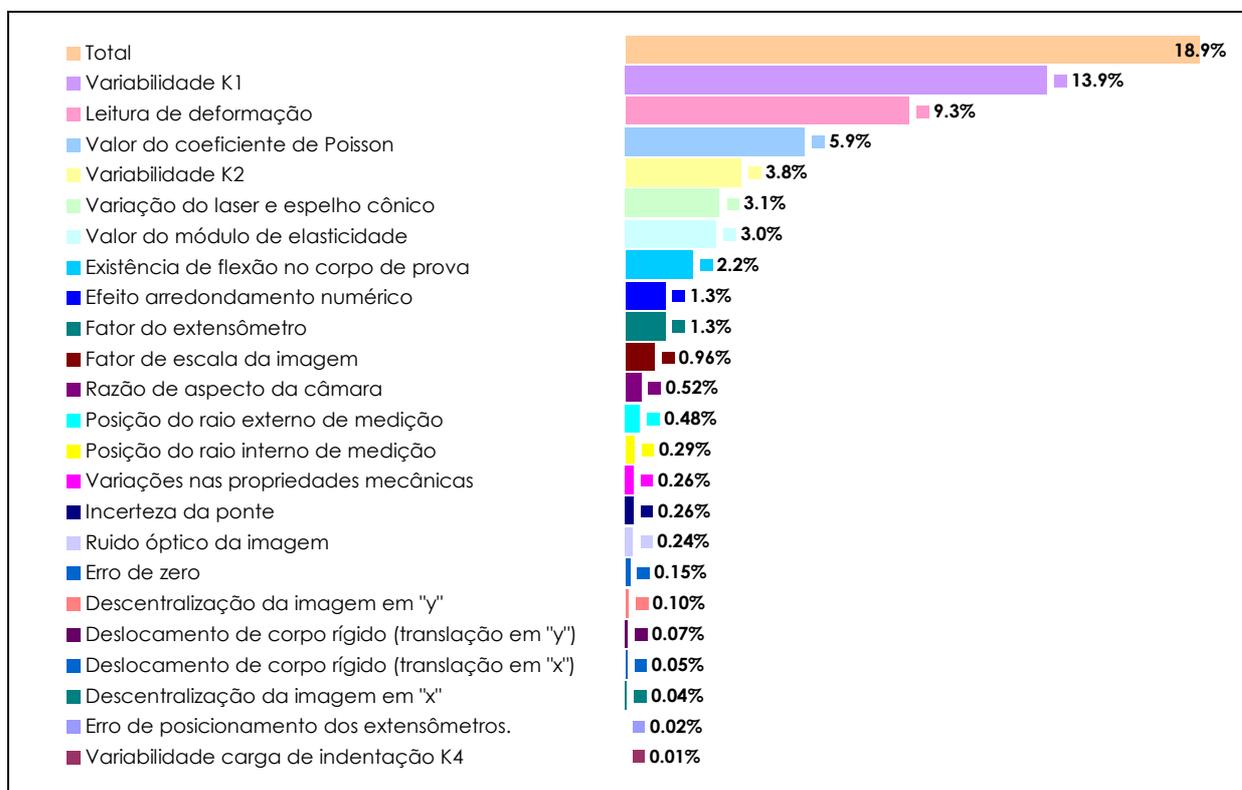
A tabela 8.1 apresenta o balanço de incertezas do ponto de medição de 177.1 MPa com o modelo “*Set\_02Par\_Indent*” e indentador esférico de 2,5 mm de diâmetro no corpo de prova em aço. Alguns comentários sobre os valores brutos relativos às fontes de incertezas são apresentados:

- x1: desvio padrão das medidas de deformação;
- x2, x3 e x4: foram obtidos através da especificação do manual do fabricante da ponte amplificadora e do extensômetro;
- x5: estimado através da experiência em colagem de extensômetros;
- x7: estimado através da literatura. Neste caso as variações nas propriedades mecânicas do material referem-se às não homogeneidades das propriedades mecânicas ao longo de todo o corpo de prova;
- x9: obtido através de simulação de vigas apoiadas sobre diversos apoios e a tensão obtida devido ao seu peso próprio;
- x10, x11 e x12: desvio padrão  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_4$  em diversas imagens;
- x13: erro numérico do modelo matemático devido à simulação de imagem e cálculo pelo método dos mínimos quadrados;
- x14 e x15: erro máximo encontrado do centro óptico da imagem nas direções “x” e “y” respectivamente;
- x16 e x7: erro médio encontrado na literatura<sup>[90]</sup>;
- x18 e x19: obtidos através de ensaios de calibração do interferômetro radial. O procedimento utilizado foi o mesmo realizado por VEIGA – 2000<sup>[96]</sup> em outro tipo de interferômetro;
- x20: estimado através de especificações de projeto do interferômetro;
- x21, x22, x23, x24 e x25: estimados em função da experiência em diversos ensaios realizados.

*Tabela 8.1 Balanço de incerteza do sistema de medição de tensões residuais por indentação em aço e indentador esférico*

Fontes de incertezas			Medição / Especificação					Efeitos aleatórios							
Simbolo	Descrição	Estimativa	Unidade	Valor bruto	Unidade	Medidas	Distribuição probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Unidade	Divisor	Incerteza padrão [MPa]	Grau de liberdade efetivo			
<b>Ponte Amplificadora</b>															
x1	Leitura de deformação	885.60	µm/m	36.56	µm/m	10	normal	0.2	MPa/µm/m	1.00	7.312	9			
x2	Erro de zero	1.00	µm/m	1.00	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	0.115	∞			
x3	Incerteza da ponte	0.20	%	1.77	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	0.205	∞			
<b>Extensômetros</b>															
x4	Fator do extensômetro	1.00	%	8.86	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	1.023	∞			
x5	Erro de posicionamento dos extensômetros.	1.00	°	0.13	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	0.015	∞			
<b>Corpo de Prova</b>															
x6	Tensões residuais pré-existent	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
x7	Variações nas propriedades mecânicas	0.20	%	1.7712	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	0.205	∞			
x8	Erros geométricos	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
x9	Existência de flexão no corpo de prova	15.00	µm/m	15.00	µm/m	--	retangular	0.2	MPa/µm/m	1.73	1.732	∞			
<b>Interferômetro Radial / Indentador / Software de Medição</b>															
x10	Variabilidade K1 ( $\sigma_1 + \sigma_2$ )	51.11	--	10.88	MPa	4	normal	1	MPa	1.00	10.880	3			
x11	Variabilidade K2 ( $\sigma_1 - \sigma_2$ )	6.46	--	2.98	MPa	4	normal	1	MPa	1.00	2.980	3			
x12	Variabilidade carga de indentação K4	17.60	%	0.01	MPa	4	normal	1	MPa	1.00	0.010	3			
x13	Efeito arredondamento numérico	1.00	%	1.77	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	1.023	∞			
x14	Descentralização da imagem em "x"	3.00	pixel	0.05	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.029	∞			
x15	Descentralização da imagem em "y"	3.00	pixel	0.13	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.075	∞			
x16	Valor do módulo de elasticidade	6.00	GPa	4.06	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	2.344	∞			
x17	Valor do coeficiente de Poisson	0.02	--	8.02	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	4.630	∞			
x18	Fator de escala da imagem	0.00005	mm/pixel	0.75	MPa	15	normal	1	MPa	1.00	0.750	14			
x19	Varição do laser e espelho cônico	2.50	%	4.2	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	2.425	∞			
x20	Razão de aspecto da câmara	0.10	%	0.7	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.404	∞			
x21	Posição do raio interno de medição	0.50	mm	0.39	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.225	∞			
x22	Posição do raio externo de medição	0.50	mm	0.65	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.375	∞			
x23	Deslocamento de corpo rígido (translação em "x")	1.00	µm	0.07	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.040	∞			
x24	Deslocamento de corpo rígido (translação em "y")	1.00	µm	0.09	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.052	∞			
x25	Ruído óptico da imagem	--	--	0.32	MPa	--	retangular	1	MPa	1.73	0.185	∞			
<b>Total</b>		<b>Tensão Medida:</b>			<b>177.1 MPa</b>			<b>graus de liberdade efetivo:</b>			<b>10</b>				
										<b>incerteza padrão combinada:</b>		<b>14.8 MPa</b>	<b>8.4%</b>		
										<b>t' student (95%):</b>		<b>2.262</b>	<b>incerteza expandida:</b>	<b>33.5 MPa</b>	<b>18.9%</b>

A figura 8.3 apresenta o balanço de incertezas das grandezas na tensão principal ao longo do corpo de prova de aço ( $\sigma_1$ ). As incertezas estão na forma expandida com um nível de confiança de 95%. É possível observar a contribuição de cada grandeza na quantificação da tensões residuais.



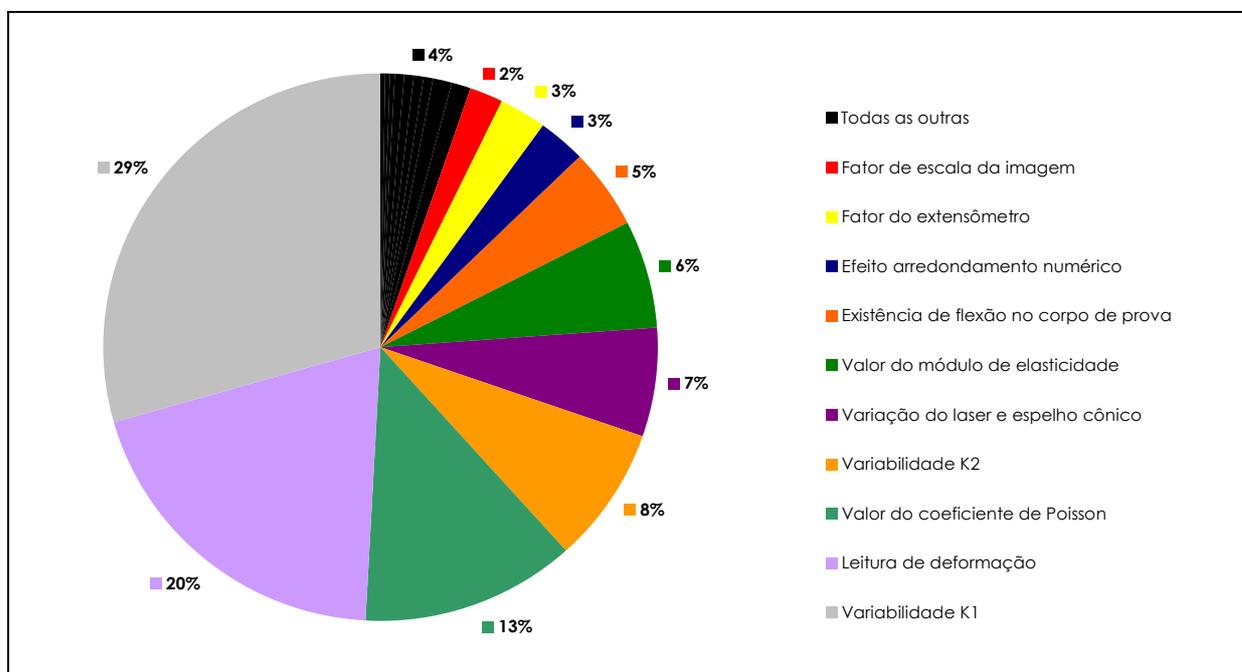
*Figura 8.3 Contribuição das incertezas de entrada na determinação das tensões residuais. Modelo: Set\_02Par\_Indent, indentador esférico em aço.*

As contribuições de todas as fontes de incertezas consideradas são apresentadas na figura 8.4 de forma percentual.

Conclusões importantes podem ser obtidas. Observa-se que a maior fonte de incerteza está na variação do parâmetro  $K_1$ , com uma contribuição de aproximadamente 29 % no valor total de todas as fontes de incertezas consideradas na medição da tensão principal. Mais uma vez fica verificado a pouca estabilidade que o modelo tem em relação à baixa repetitividade da carga de indentação, relacionada ao parâmetro  $K_4$ .

Em segundo lugar com aproximadamente 20 % da composição total, são as incertezas relacionadas às leituras de deformações dos extensômetros, ou seja, o valor da tensão de referência não é suficientemente conhecido para as análises propostas neste trabalho. Grandes dificuldades foram encontradas para se ter uma referência de tensão desde o início dos trabalhos, sendo que a configuração apresentada foi a melhor

encontrada neste momento, principalmente em função dos recursos disponíveis. Existe uma indicação significativa que para futuros estudos, a tensão de referência deve ser mais bem conhecida.



*Figura 8.4 Contribuição das incertezas na determinação das tensões residuais. Modelo: Set\_02Par\_Indent, indentedor: Esférico em Aço.*

Melhorias na composição da incerteza podem ser facilmente conseguidas através de um melhor conhecimento do material ensaiado. Fica claro que o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do material do corpo de prova, podem ser determinados através da realização de ensaios específicos. Esta possibilidade deve ser considerada para os próximos trabalhos de pesquisas.

As incertezas relacionadas ao interferômetro radial, tais como o fator de escala da imagem, variação do comprimento de onda do laser, irregularidades no espelho cônico e razão de aspecto da câmara, foram melhoradas simplesmente com a calibração do interferômetro radial. Em medidas em laboratório, o laser se apresenta bem estável em função da temperatura, mas para condições em campo, pesquisas nesta área ainda devem ser realizadas.

Os resultados de incerteza apresentados na tabela 8.1 são relativos à tensão principal longitudinal ao corpo de prova, que está em torno de  $\pm 34$  MPa para 177 MPa. Em termos práticos, as incertezas apresentadas são similares às incertezas de outros métodos de medição. Por exemplo, o método do furo apresenta incertezas na ordem de  $\pm 20$  MPa em ensaios típicos.

Deve-se registrar que analisando separadamente o sistema de simulação de tensões residuais e o sistema de medição, as incertezas padrão calculadas são 7.6 % e 12.7 % respectivamente. Observa-se que a contribuição de incerteza do sistema utilizado como referência é muito alta, comparada à contribuição de incerteza do sistema de medição. Neste caso fica difícil isolar a componente de incerteza relativa ao sistema de medição.

As análises realizadas para a determinação das incertezas de  $\sigma_2$ , se apresentaram na ordem de  $\pm 15$  MPa para o mesmo nível de carregamento. Analogamente, o sistema se apresentou muito bem na determinação das direções das tensões principais para carregamentos superiores entre 20 e 30 % da tensão de escoamento do material.

Com relação ao ângulo das tensões principais ( $\beta$ ), as incertezas típicas são sempre inferiores a  $\pm 1^\circ$ .

Análise metrológica no modelo “*Set\_02Par*” merecerá uma especial atenção em pesquisas para ensaios controlados com carregamento biaxial. Devido à susceptibilidade deste modelo à repetitividade limitada da carga de indentação, os níveis de incertezas ficam prejudicados. Para este modelo, a determinação do campo de deslocamentos para o material livre de tensões residuais, é a principal componente de incertezas, associado à incerteza da tensão de referência e do modelo matemático que apresenta coeficiente de correlação  $R^2$  em torno de 0.9 para a determinação de  $K_I$ .

## Capítulo 9

### Conclusões

Este trabalho investiga uma forma de medir tensões residuais combinando o método da indentação com a holografia eletrônica (*ESPI*- “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*”), usando um interferômetro radial. Esta combinação possui virtudes e limitações como ocorre com outros métodos. Pretende-se apresentar neste capítulo as conclusões de todo o trabalho evidenciando os aspectos positivos e limitações encontradas.

#### **(a) Quanto aos aspectos positivos**

O uso da holografia traz um grande benefício à técnica de medição de tensões residuais pelo método da indentação, pois usa dezenas de milhares de dados extraídos da superfície medida para determinar os três parâmetros que caracterizam o estado de tensões residuais no plano. Esta proporção é, em princípio, extremamente favorável para o processo de medição.

O método da indentação apresenta alguns aspectos positivos em relação ao método do furo. O método do furo é tipicamente utilizado para a faixa elástica linear que vai de 10 a 50 % da tensão de escoamento do material. Alguns pesquisadores admitem até 60 %. Com a calibração efetuada, o método da indentação mostrou ser possível atingir uma faixa de medição entre 20 e 80 % da tensão de escoamento do material. Naturalmente não se pode afirmar, até o momento, que o método da indentação venha substituir o método do furo, mas sim complementá-lo.

Assim como o método do furo, o método da indentação combinado com o interferômetro radial se mostra excelente para determinar a direção das tensões principais de forma simples e com excelente exatidão.

O método da indentação combinado ao interferômetro radial possui outros aspectos positivos do ponto de vista de engenharia:

- usa informações do campo de deslocamento de toda a área visualizada em torno da marca de indentação;
- é uma técnica menos destrutiva que o furo cego;
- não gera cavacos;
- tempo de medição é aproximadamente 5 vezes menor que o método do furo por holografia e aproximadamente 10 vezes menor que a técnica do furo com extensometria. O tempo de medição típico é de 5 minutos com a instrumentação existente.

Devido a não geração de cavacos o uso de indentação para medição de tensões residuais se mostra atrativa nos testes de qualificação de equipamentos aeroespaciais. Por exemplo: peças soldadas de titânio geralmente são soldadas e medidas em salas limpas com controle à contaminação de partículas.

#### **(b) Quanto aos aspectos operacionais**

A técnica de indentação por energia de impacto se mostrou eficiente, embora não tenha apresentado a repetitividade desejada do ponto de vista físico. A pouca repetitividade física foi compensada através de um grau de liberdade adicional presente no modelo “*Set\_02Par\_Indent*”.

A experiência adquirida ao longo do desenvolvimento do trabalho tornou possível observar qualitativamente através das imagens se o nível de carga ou energia do impacto da indentação é suficiente para realizar a medição.

Tanto o indentador cônico quanto o indentador esférico apresentam-se como boas escolhas e praticamente têm o mesmo comportamento. Transpondo para este trabalho as mesmas recomendações usadas nos ensaios de dureza, duas recomendações quanto ao modo de uso podem ser observadas: o cone de diamante para materiais mais “duros” e a esfera para materiais “dúcteis ou mais moles”. Tais recomendações devem ser observadas principalmente para garantir a durabilidade dos indentadores em função do uso. Foi observada que o indentador esférico proporciona maior sensibilidade na região de medição, ou seja, apresenta maior deslocamento radial para o mesmo nível de tensões residuais e energia aplicada na indentação.

**(c) Quanto aos modelos adotados**

O modelo adotado neste trabalho (“*Set\_02Par\_Indent*”), se deriva do modelo clássico do furo cego, modificado pela introdução de parâmetros adicionais empiricamente determinados através dos experimentos. Os parâmetros foram correlacionados às somas e às diferenças das tensões residuais mecanicamente simuladas no corpo de prova através de experimentos bem controlados. Os resultados mostraram que existe uma forte correlação entre os parâmetros e as tensões residuais, cujas relações podem ser representadas por polinômios de segundo grau.

A tabela 7.19 (Capítulo 7, Seção 0) resume as funções obtidas para o aço em função das pontas dos indentadores utilizados e dos modelos matemáticos adotados. A diferença entre as tensões residuais está correlacionada à função  $\Gamma(K_2)$ . Esta função apresenta-se relativamente estável e independente do modelo de cálculo utilizado, mas muda com a forma da ferramenta de indentação. Já a função  $H(K_1)$ , ligada à soma das tensões residuais, apresenta diferenças de acordo com o modelo de cálculo adotado e, principalmente, muda consideravelmente com a geometria da ferramenta de indentação. Há uma expectativa de que a melhoria da repetitividade da aplicação da energia de impacto do indentador aproxime mais estas equações, o que contribuiria na direção de unificar os modelos de cálculo.

O modelo “*Set\_02Par*” merece uma especial atenção em pesquisas para ensaios controlados com carregamento biaxial. Devido à elevada sensibilidade apresentada por este modelo em função da repetitividade da carga de indentação, os níveis de incertezas ficaram muito prejudicados. A determinação do campo de deslocamentos para o material livre de tensões residuais, é a principal componente de incertezas, seguida pela incerteza da tensão de referência na determinação do parâmetro  $K_1$ . Com a realização de ensaios controlados e utilizando um sistema de indentação com repetitividade melhor, acredita-se numa melhora significativa dos níveis de incertezas, de modo que, este modelo será de grande utilidade para carregamentos biaxiais.

**(d) Quanto às limitações encontradas**

Enquanto para o método do furo já existem estudos para avaliar a medição de gradientes de tensões residuais ao longo da profundidade, ainda que de forma limitada, a aplicação do método da indentação para este fim é muito mais difícil.

Com os resultados obtidos neste trabalho não foi possível generalizar um modelo capaz de quantificar tensões residuais em diferentes materiais. Uma certa coerência foi

obtida na relação entre o parâmetro  $K_I$  e os carregamentos nos corpos de prova de aço. Entretanto, nos ensaios com o corpo de prova de alumínio o parâmetro  $K_I$  apresentou grande variabilidade em função da tensão simulada, mostrando uma aparente independência em relação dos níveis de tensão aplicada, chegando até a apresentar valores negativos, o que não era esperado. Uma provável razão para esta grande variabilidade decorre da não homogeneidade do corpo de prova de alumínio, por não ter sofrido qualquer tratamento térmico para alívio de tensões internas após o seu recebimento. É fato que o corpo de prova apresentava deformações visíveis ao longo de seu comprimento.

Ficou nítido, através da análise dos resultados que uma certa similaridade matemática existente entre as expressões às quais estão associados os parâmetros  $K_I$  e  $K_A$ , provoque uma disputa numérica quando os mesmos são calculados pelo método dos mínimos quadrados: o aumento do valor de um se dá em detrimento da redução do valor do outro e vice e versa.

#### (e) Quanto aos aspectos metrológicos

A análise das incertezas revelou que, para as condições ensaiadas, é possível enquadrar o valor medido dentro de uma faixa de incerteza similar às incertezas de outras técnicas de medição de tensões residuais. Deve ficar claro que estes níveis de incerteza não são atribuídos apenas ao sistema de medição de tensões residuais, mais ao conjunto formado pelo sistema de medição e o dispositivo de aplicação de carga. De fato, a maior fonte de incertezas está nas variações do parâmetro  $K_I$ , um dos parâmetros utilizados na determinação das tensões residuais. As diferenças entre as deformações medidas nos extensômetros, que, no conjunto, definem o valor da tensão de referência são a segunda maior fonte de incerteza.

A incerteza atribuída ao sistema de medição de tensões residuais, é certamente menor do que os níveis de incertezas calculados no **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** Enquanto o sistema de simulação de tensões residuais apresentou níveis de incerteza padrão na ordem de 7,6 %, seriam esperados níveis de incerteza padrão de 12,7 % para o sistema de medição de tensões residuais, caso ambas as incertezas pudessem ser consideradas completamente independentes. Sem uma análise estatística mais aprofundada não é possível fazer esta afirmação com segurança.

Algumas providências podem ser tomadas para reduzir a incerteza do sistema de medição de tensões residuais. Um tratamento térmico para homogeneizar as

propriedades do material e o melhor conhecimento das propriedades mecânicas do material, são medidas convenientes. Tendo em vista a instabilidade do comprimento de onda do laser diodo, a calibração do interferômetro se torna obrigatória. Felizmente nas medições em laboratório a influência do comprimento de onda do laser em função da temperatura se torna praticamente desprezível. Para medições em campo, estudos mais aprofundados devem ser realizados para identificar a real influência das variações do comprimento de onda no sistema de medição.

(f) **Quanto aos impactos gerados**

Os impactos gerados deste trabalho são listados a seguir.

**Impacto Científico.**

- Foi desenvolvido e avaliado um novo caminho para medição de tensões residuais.

**Impacto Tecnológico.**

- Foi encaminhado pedido de patente junto ao INPI.
- O protótipo do medidor de tensões residuais desenvolvido está plenamente operacional.
- Foi desenvolvido um programa de computador para efetuar a análise dos resultados.

**Impacto Econômico.**

- Há uma redução significativa do custo operacional de medição, tais como: redução dos tempos de instalação e medição e evita-se o uso de materiais de consumo.
- Uma vez sendo encontrados meios para quantificar as tensões residuais em diferentes materiais acredita-se haver grande potencial para prestação de serviços e comercialização do sistema desenvolvido para a indústria metal-mecânica, construção civil, desenvolvimento de novos materiais etc.

**Impacto Social.**

- O desenvolvimento no país de uma tecnologia nacional, de ponta e com grande potencial de penetração no mercado internacional, é uma grande oportunidade para geração de empregos de alto nível no país.

**(g) Quanto aos trabalhos futuros**

O trabalho desenvolvido no âmbito desta tese apresenta uma contribuição significativa para o desenvolvimento de um novo caminho para a medição de tensões residuais. Entretanto, esforços adicionais são necessários. Apresentam-se, a seguir, alguns trabalhos que ainda devem ser desenvolvidos para viabilizar a aplicação desta tecnologia em um sistema comercial.

Uma vez que os ensaios foram realizados apenas em campos de tensões uniaxiais e à tração, é necessário validar os modelos propostos em ensaios uniaxiais de compressão e em estados de tensão biaxiais. Em tese, para materiais que tenham um comportamento de encruamento isotrópico, espera-se que as equações sejam válidas. Para outros tipos de materiais que apresentam comportamentos diferentes sob tração e compressão, a validade dos modelos deve ser verificada com mais cuidado.

Neste trabalho basicamente um material foi estudado com sucesso. Novas avaliações em outros materiais devem ser realizadas, preferencialmente materiais com as propriedades mecânicas bem conhecidas e homogêneas e a garantia de que o material esteja livre de tensões residuais. Espera-se que estes novos estudos permitam generalizar um modelo que seja válido para diferentes materiais.

Recomenda-se que para trabalhos futuros, a tensão de referência seja melhor determinada, pois a sua contribuição no balanço de incertezas é significativa.

## Referências

- [1] AHN, J.-H.; JEON, E.; CHOI, Y.; LEE, Y.-H.; KWON, D. - "*Derivation of tensile flow properties of thin films using nano-indentation technique*" - Current Applied Physics, v. 2, p. 525-531, 2002.
- [2] ALBERTAZZI JR., A. G.; PEIXOTO FILHO, F. T.; SUTERIO, R.; AMARAL, F. K. – "*Evaluation of a Residual Stresses Measurement Device Combining a Radial In-Plane ESPI and the Blind Hole Drilling Method*" – SPIE - The International Society for Optical Engineering, Europe International Symposium Photonics, Strasbourg, France, 26-30 April, 2004.
- [3] ALBERTAZZI JR., A. - "*Generalized Least Squares Approach to Compute Displacements, Strain and Rotations from Combined Single and/or Double Illumination Holographic Interferometry*" - SPIE - The International Society for Optical Engineering, v. 2004, Interferometry VI: Applications, p. 80-89, 1993.
- [4] ALBERTAZZI JR., A. - "*Holographic Station: A Practical System for Applying TV Holography*" - SPIE - The International Society for Optical Engineering, v. 2004, Interferometry VI: Applications, p. 215-223, 1993.
- [5] ALBERTAZZI JR., A.; KANDA, C.; BOETTGER, J. - "*Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por Meio da Holografia Eletrônica*" - ABCM / CEIE / CAET - III Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, RJ, p.19-26, Dez., 1995.
- [6] ALBERTAZZI JR., A.; RODACOSKI, M. R.; KANDA, C.; BOETTGER, J. - "*Residual Stresses Measurement using a Radial Interferometer: A Preliminary Analysis*" - SEM - Society for Experimental Mechanics, VII International Congress on Experimental Mechanics and Experimental / Numerical Mechanics in Electronic Packaging, Nashville, Tennessee, USA, Jun.10-13, 1996.
- [7] ALBERTAZZI JR., A. G. - "*Aplicações da Holografia Eletrônica em Ambiente Industrial - Realidade & Perspectivas*" - CERTI / UFSC - Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade, Florianópolis, SC, Brasil, módulo 1, artigo 1, Ago. 21-22, 1997.
- [8] ALBERTAZZI JR., A.; KANDA, C.; BORGES, M. R.; HREBABETZKY, F. - "*A Radial in-Plane Interferometer for ESPI Measurement*" - IMEKO/SPIE/SBM, International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, Florianópolis, SC, Brasil, Oct., 1999.

- [9] 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*" - SAET 2000 - VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Florianópolis - SC, Dez. 8, 2000.
- [10] ALBERTAZZI JR., A.; KANDA, C.; PEREIRA, M.; BORGES, M. R. - "*MTRES - Um sistema para Medições de Tensões Residuais combinando o Método do Furo com a Holografia Eletrônica*" - SAET 2000 - VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Florianópolis - SC, Dez. 8, 2000.
- [11] ANDREWS, E. W.; GIANNAKOPOULOS, A. E.; PLISSON, E.; SURESH, A. - "*Analysis of the Impact of a Sharp Indenter*" - Journal of Solids and Structures, v.39, p.281-295, 2002.
- [12] ASTM-E-837 - "*Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*" - ASTM - American Society for Testing and Materials, 2001.
- [13] BECHINI, M.; BERTINE, L. - "*Residual Stress Modelling by Experimental Measurements and Finite Element Analysis*" - Journal of Strain Analysis, v. 25, n.2, p. 103-108, 1990.
- [14] BOETTGER, J. - "*Desenvolvimento de um Sistema Portátil para a Medição de Tensões Residuais em campo utilizando Holografia Eletrônica e o Método do Furo*" - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [15] BORGES, M. R. - "*Otimização de um Medidor Portátil de Tensões Residuais*" - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [16] CALLISTER JR., W. D. - "*Materials Science and Engineering: An Introduction*" - John Wiley & Sons, USA, 4th edition, 1997.
- [17] CARLSSON, S.; LARSSON, P. L. - "*On the Determination of Residual Stress and Strain Fields by Sharp Indentation Testing. Part I: Theoretical and Numerical Analysis*" - Acta Materialia, v.49, p.2179-2191, 2001.
- [18] CARLSSON, S.; LARSSON, P. L. - "*On the Determination of Residual Stress and Strain Fields by Sharp Indentation Testing. Part II: Experimental Investigation*" - Acta Materialia, v.49, p.2193-2203, 2001.
- [19] CAVACO, M. A. M.; WILLEMANN, D. P.; BORGES, M. R. - "*Medição de Tensões Residuais em Corpos de Prova de Soldagem Pelo Método do Furo Cego*" - Cobem2001, Uberlândia, MG, 2001.
- [20] CHAMBARD, J. P.; COLON, E.; SMIEGIELSKI, P. - "*Application of Holographic and Speckle Interferometry in Industry*" - Fringe'97, s. 5, p. 520-523, 1997..
- [21] CHENG, W.; FINNIE, I. - "*Examination of the Computational Model for the Layer-Removal-Stress Measurement*" - Experimental Mechanics, p. 150-153, Jun., 1986.
- [22] CIAVARELLA, M.; HILLS, D. A. - "*The Influence of the Indenter Tip-Radius on Indentation Testing of Brittle Materials*" - Journal of the European Ceramic Society, v. 19, p. 239-245, 1999.
- [23] CLOUD, G. L. - "*Optical Methods of Engineering Analysis*" - Cambridge University Press, England, 1995.

- [24] CORDOVIL, F. C. S. - *"Desenvolvimento de um Dispositivo para Simulação Experimental de Tensões Residuais por Carregamento Mecânico"* - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [25] DALLY, J. W.; RILEY, W. F. - *"Experimental Stress Analysis"* - McGraw-Hill, USA, 3rd edition, 1991.
- [26] DOWLING, N. E. - *"Mechanical Behavior of Materials"* - Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1993.
- [27] ELMUSTAFA, A. A.; STONE, D. S. - *"Nanoindentation and the Indentation Size Effect: Kinetics of Deformation and Strain Gradient Plasticity"* - Journal of the Mechanics and Physics of Solids, MPS 932, p.1-25, 2002.
- [28] FETT, T. - *"An Analysis of the Residual Stress Intensity Factor of Vickers Indentation Cracks"* - Engineering Fracture Mechanics, v. 52, n. 4, p. 773-776, 1995.
- [29] FLAMAN, M. T.; BOAG, J. M. - *"Comparison of Residual-Stress Variation with Depth-Analysis Techniques for the Hole-Drilling Method"* - Experimental Mechanics, p. 352-355, Dec., 1990.
- [30] FLAMAN, M. T.; MANNING, B. H. - *"Determination of Residual-Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method"* - Experimental Mechanics, p. 205-207, Sep., 1985.
- [31] FLAMAN, M. T.; MILLS, B. E.; BOAG, J. M. - *"Analysis of Stress-Variation with Depth Measurement Procedures for the Center-Hole Method of Residual Stress Measurement"* - Experimental Techniques, p. 35-37, Jun., 1987.
- [32] FROCHT, M. M. - *"Photoelasticity"* - John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 5th printing, jan/1967, Volume II, 1948.
- [33] GALANULIS, K.; RITTER, R. - *"Speckle Interferometry in Material Testing and Dimensioning of Structures"* - SPIE - The International Society for Optical Engineering, v. 2004, Interferometry VI: Applications, p.269-275, 1993.
- [34] GASVIK, K. J. - *"Optical Metrology"* - John Wiley & Sons Ltd., England, 2nd edition, 1995.
- [35] GIANNAKOPOULOS, A. E. - *"Indentation of Plastically graded Substrates by Sharp Indentors"* - International Journal of Solids and Structures, v.39, p.2495-2515, 2002.
- [36] GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, A. - *"Determination of Elastoplastic Properties by Instrumented Sharp Indentation"* - Scripta Materialia, v.40 n.10 p.21191-1198, 1999.
- [37] GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, A. - *"Theory of Indentation of Piezoelectric Materials"* - Acta Materialia, v.47 n.7 p.2153-2164, 1997.
- [38] GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, S. - *"Indentation of Solids with Gradients in Elastic Properties. Part I: Point Force"* - Journal of Solids and Structures, v.34, n.19, p.2357-2392, 1997.
- [39] GIANNAKOPOULOS, A. E.; SURESH, S. - *"Indentation of Solids with Gradients in Elastic Properties. Part II: Axisymmetric Indentors"* - Journal of Solids and Structures, v.34, n.19, p.2393-2428, 1997.
- [40] HAY, J. C.; PHARR, G. M. - *"The Sneddon Solution and its Application to Nanoindentation Data"* - Advance Program, 1999 SEM Annual Conference & Exposition on Theoretical,

- Experimental and Computational Mechanics, Cincinnati, Ohio, USA, p. 264-267, 7-9 Jun., 1999.
- [41] HAY, J. L.; HAY, J. C. - "**Instrumented Indentation Using a Flat-Ended Cylindrical Punch**" - SEM IX - International Congress on Experimental Mechanics, Orlando, Florida, USA, p. 762-765, 5-8 Jun., 2000.
- [42] HUNG, M. Y. Y.; LONG, K. W.; WANG, J. Q. - "**Measurement of Residual Stress by Phase Shift Shearography**" - Optics & Lasers in Engineering, v. 27, p. 61-73, 1997.
- [43] INMETRO - "**Vocabulário Internacional de Metrologia: Preâmbulo da Versão Brasileira**" - Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo - Portaria no. 29 de 10 de Março, 1995.
- [44] ISO; BIPM; IEC; IFCC; IUPAC; IUPAP; OIML - "**Guia para Expressão da Incerteza de Medição**" - INMETRO, ABNT, SBM - Programa RH-Metrologia / PADCT-TIB, 1ª. Edição Brasileira do "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1997.
- [45] JACQ, C.; LORMAND, G.; NELIAS, D.; GIRODIN, D.; VINCENT, A. - "**On the Influence of Residual Stresses in Determining the Micro-yield Stress Profile in a Nitrided Steel by Nano-indentation**" - Material Science and Engineering, A 00, p.1-9, 2002.
- [46] JAYARAMAN, S.; OLIVER, W. C.; RUBIN, C. A.; BASTIAS, P. C. - "**Determination of Monotonic Stress-strain Curve of Hard Materials from Ultra-low-load Indentation Tests**" - Journal of Solids and Structures, v.35, n.5-6, p.365-381, 1998.
- [47] JUSTINO, J. G. - "**Desenvolvimento de um Modelo Constitutivo para Análise Elasto-Plástica de Metais Porosos Sinterizados**" - Tese de Doutorado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [48] KAPP, W. A. - "**Otimização do desempenho Metrológico do Sistema de Medição Estação Holográfica**" - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [49] KELSEY, R. A. - "**Measuring Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method**" - Annual Meeting of the Society for Experimental Stress Analysis, Chicago, Ill., USA, SESA Proceeding, V. XIV, n. 1, p. 181-194, Nov., 1995.
- [50] KOBAYASHI, A. S. - "**Handbook on Experimental Mechanics**" - SEM - Society for Experimental Mechanics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1993.
- [51] LAERMANN, K. H. - "**New Perspectives for Laser Metrology - Vision and Instruction**" - Fringe'97, p. 15-23, 1997.
- [52] LIN, S. T.; HSIEH, C. T.; HU, C. P. - "**Two Holographic Blind-Hole Methods for Measuring Residual Stresses**" - Experimental Mechanics, v. 34, n. 2, p. 141-147, Jun., 1994.
- [53] LOVE, A. E. H. - "**A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity**" - Dover Publications, New York, USA, 4th edition, 1927.
- [54] LOW, S. R. - "**Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials**" - NIST, Recommended Practice Guide SP 960-5, Jan., 2001.
- [55] LU, J. - "**Handbook on Measurement of Residual Stresses**" - SEM - Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.

- [56] LU, J.; FLAVENOT, J. F. - *"Applications of the Incremental Hole-Drilling Method for Measurement of Residual-Stress Distribution"* - Experimental Techniques, p. 18-24, Nov., 1989.
- [57] LUBLINER, J. - *"Plasticity Theory"* - Macmillan Publishing Company, New York, NY, USA, 1990.
- [58] MAKINO, A.; NELSON, D. - *"Residual-Stress Determination by Single-Axis Holographic Interferometry and Hole Drilling - Part I: Theory"* - Experimental Mechanics, p. 66-78, Mar., 1994.
- [59] MALVERN, L. E. - *"Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium"* - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1969.
- [60] MSC - *"Marc User's Guide"* - MSC Software Corporation, (P/N: MA\*2001\*Z\*Z\*Z\*DC-USR), Apr., 2001.
- [61] MONTGOMERY, D. C. - *"Design and Analysis of Experiments"* - John Wiley & Sons, USA, 4th edition, 1997.
- [62] MathWeb – *"Material Propertie Data"* – Disponível em: <http://www.matweb.com/>, data de acesso: 18/01/2005.
- [63] NAYEBI, A.; EL ABDI, R.; BARTIER, O.; MAUVOISIN, G. - *"Hardness profile Analysis of Elasto-plastic Heat-treated Steels with a Gradient in Yield Strength"* - Material Science and Engineering, A333, p.160-169, 2002.
- [64] ODO, G. Y. - *"Fundamentos da Nanoindentação e Aplicações em Vidros com Superfícies Modificadas por Migrações Iônicas"* - Tese de Doutorado, UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2001.
- [65] OETTEL, R. - *"The Determination of Uncertainties in Residual Stress Measurement (Using the hole drilling technique)"* - SM&T - Standards Measurement & Testing Project, UNCERT COP 15, no. SMT4-CT97-2165, issue 1, Sep., 2000.
- [66] PECHERSKY, M. J.; ESTOCHEN, E. G.; VIKRAN, C. S. - *"Enhanced Measurement of Residual Stress by Speckle Correlation Interferometry and Local Heat Treating for Low Stress Levels"* - ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Atlanta, Georgia, USA, 22-26 Jul, 2001.
- [67] PECHERSKY, M. J.; ESTOCHEN, E. G.; VIKRAN, C. S. - *"Measurement of Residual Stress with Through Thickness Gradients Using Laser Heating and Speckle Interferometry"* - Advance Program, 1999 SEM Annual Conference & Exposition on Theoretical, Experimental and Computational Mechanics, Cincinnati, Ohio, USA, p. 746-749, 7-9 Jun., 1999.
- [68] PEIXOTO FILHO, F. T. - *"Avaliação de Sistemas de Medição de Tensões e Tensões Residuais em Dutos"* - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [69] PEIXOTO FILHO, F. T.; BIGARELLA, ALBERTAZZI JR., A. G.; SUTERIO, R. - *"Desenvolvimento de um Dispositivo para Simulação de Tensões Residuais em Dutos"* - METROLOGIA 2003 - Congresso Internacional de Metrologia, SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, PB, 1 a 5 de setembro, 2003.
- [70] PERRY, C. C. - *"Data Reduction Algorithms for Strain-Gage Rosette Measurements"* - Experimental Techniques, p. 13-18, May, 1989.

- [71] PISAREV, V. S.; BALALOV, V. V.; AISTOV, V. S.; BONDARENKO, M. M.; YUSTUS, M. G. - *"Reflection Hologram Interferometry Combined with Hole Drilling Technique as an Effective Tool for Residual Stresses Fields Investigation in Thin-Walled Structures"* - Optics & Lasers in Engineering, v. 36, p. 551-597, 2001.
- [72] RABTCHEVICH, A. V.; RUDNITSKY, V. A. - *"Determination of Yield Stress of Steels by Computing the Indentation Curve"* - 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 26-29 May, 1998.
- [73] RODACOSKI, M. R. - *"Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica"* - Tese de Doutorado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- [74] SCHAJER, G. S. - *"Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements"* - Journal of Engineering Materials and Technology, v.103, p.157-163, Abr., 1981.
- [75] SCHAJER, G. S. - *"Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using the Hole-Drilling Method. Part I: Stress Calculation Procedures"* - Journal of Engineering Materials and Technology, v.110, p.338-343, Oct., 1988.
- [76] SCHAJER, G. S. - *"Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using the Hole-Drilling Method. Part II: Application of the Integral Method"* - Journal of Engineering Materials and Technology, v.110, p.344-349, Oct., 1988.
- [77] SCHAJER, G. S. - *"Use of Displacement Data to Calculate Strain Gauge Response in Non-Uniform Strain Fields"* - Strain, p. 9-13, Feb., 1993.
- [78] SCHWIDER, J. - *"State of the Art in Evaluation Techniques for Interferometry"* - Fringe'97, s. 1, p. 27-36, 1997.
- [79] SPIEGEL, M. R. - *"Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática"* - Silva, J.M.L.d. - Schaum / McGraw-Hill, SP, 2ª edição, 1992.
- [80] STEINZING, M.; HAYMAN, G. J.; PRIME, M. B. - *"Verification of a Technique for Holographic Residual Stress Measurement"* - ASME Pressure Vessels and Piping Conference in Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation, Atlanta, GA, USA, PVP - v. 429, 23-26 Jul., 2001.
- [81] STEINZING, M.; HAYMAN, G.; RANGASWAMY, P. - *"Data Reduction Methods for Digital Holographic Residual Stress Measurement"* - SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Portland, OR, USA, 4-6 Jul, 2001.
- [82] SURESH, A.; GIANNAKOPOULOS, A. E. - *"A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation"* - Acta Materialia, v.46, n.16, p.5755-5767, Oct., 1998.
- [83] SURESH, A.; GIANNAKOPOULOS, A. E. - *"Spherical Indentation of Compositionally Graded Materials: Theory and Experiments"* - Acta Materialia, v.45 n.4 p.1307-1321, 1997.
- [84] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; AMARAL, F. K., PACHECO, A. - *"Residual Stress Measurement Using Indentation and a Radial In-plane ESPI Interferometer"* - Laser Metrology 2005, 8th International Symposium on Laser Metrology, Macro, Micro, and Nano-Technologies applied in Science, Engineering, and Industry, Merida, Mexico, 14-18 Feb., 2005.

- [85] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; AMARAL, F. K. - *"Residual Stress Measurement Using Indentation and a Radial ESPI Interferometer – Recent Progress"* – ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics, Politécnico di Bari, Italy, August 29th - 2nd September, 2004
- [86] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; PACHECO, A.; FERREIRA, R. P. - *"Análise Metrológica de um Dispositivo de Simulação de Tensões Residuais"* - METROLOGIA 2003 - Congresso Internacional de Metrologia, SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife, PB, 1 a 5 de setembro, 2003
- [87] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; PEIXOTO FILHO, F. T.; PACHECO, A. - *"Avaliação de um Simulador de Tensões Residuais"* - 7o. Coteq - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos / VIII SAET - Seminário de Análise Experimental de Tensões, Florianópolis, SC, 9 a 12 de setembro, 2003.
- [88] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; CAVACO, M. A. M. - *"Preliminary Evaluation: The Indentation Method Combined with a Radial Interferometer for Residual Stress Measurement"* - SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, SEM - Society for Experimental Mechanics, Charlotte, North Carolina, USA, June 2-4, 2003.
- [89] SUTERIO, R.; VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A.; KAUFMANN, G. H. K. - *"Avaliação Preliminar de Métodos Alternativos de Medição de Tensões Residuais por Indentação e por Aquecimento Localizado, combinados a Holografia Eletrônica"* - COTEQ / VII SAET - Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Salvador, BA, 19-21 Ago., 2002.
- [90] SUTERIO, R. - *"Caracterização de Constantes Elásticas de Materiais Isotrópicos por Holografia Óptica Eletrônica combinada ao Método de Ressonância Mecânica"* – Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [91] SWADENER, J. G.; GEORGE, E. P.; PHARR, G. M. - *"The Correlation of the Indentation Siza Effect Measured with Indenters of Various Shapes"* - Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 50, p. 681-694, 2002.
- [92] SWADENER, J. G.; MISRA, A.; HOAGLAND, R. G.; NASTASI, M. - *"A Mechanistic Description of Combined Hardening and Size Effects"* - Scripta Materialia, v. 47, p. 343-348, 2002.
- [93] SWADENER, J. G.; TALJAT, B.; PHARR, G. M. - *"Measurement of Residual Stress by Load and Depth Sensing Indentation with Spherical Indenters"* - Journal of Materials Research, v. 16, n. 7, p. 2091-2102, 2001.
- [94] TN-503 - *"Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method"* - Vishay Measurements Group.  
[http://www.vishay.com/brands/measurements\\_group/guide/tn/tn503/503index.htm](http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/tn/tn503/503index.htm), capturada em 14 de abril de 2003.
- [95] UNDERWOOD, J. H. - *"Residual Stress Measurement using Surface Displacements around an Indentation"* - Experimental Mechanics, p. 373-380, Sep., 1973.
- [96] VEIGA, C. L. N. - *"Aplicações do Interferômetro Radial Plano na Medição de Translação, Deformações e Tensões Mecânicas"* - Tese de Doutorado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [97] VEIGA, C. L. N.; ALBERTAZZI JR., A. - *"Aplicação do Interferômetro Radial na Medição do Estado Plano de Tensões"* - SBM - Sociedade Brasileira de Metrologia, METROLOGIA 2000 - Congresso Internacional de Metrologia, São Paulo - SP, Dez. 4-7, 2000.

- [98] VERLEENE, A.; DUBAR, L.; DUBOIS, A.; DUBAR, M.; OUDIN, J. - "**Hardening Behaviour Law versus Rigid Perfectly Plastic Law: Application to a Cold Forging Tool Steel**" - International Journal of Plasticity, v.18, p.997-1011, 2002.
- [99] VIOTTI, M. R.; SUTERIO, R; ALBERTAZZI JR., A. G.; KAUFMANN, G. H. - "**Residual Stress Measurement Using a Radial In-Plane Speckle Interferometer and Laser Annealing: Preliminary Results**" - Optics and Lasers in Engineering, v. 42, n. 1, p. 71-84, July 2004.
- [100] VIOTTI, M. R.; SUTERIO, R; ALBERTAZZI JR., A. G.; KAUFMANN, G. H. - "**Residual Stress Measurement Using a Radial In-Plane Speckle Interferometer and Laser Annealing**" - SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, Wolfgang Osten, Malgorzata Kujawinska, Katherine Creath; Eds., Munich, Germany, Proc. SPIE v. 5144, p. 571-577, 23-26 June, 2003.
- [101] WILLEMANN, D. P. - "**Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica**" - Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [102] WITHERS, P. J. A. - "**Overview: Residual Stress. Part 1: Measurement Techniques**" - Journal of Materials Science and Technology, v.17, p.355-365, Apr., 2001.
- [103] WITHERS, P. J. A. - "**Overview: Residual Stress. Part 2: Nature and Origins**" - Journal of Materials Science and Technology, v.17, p.366-375, Apr., 2001.
- [104] WU, S. Y.; QIN, Y. W. - "**Determination of Residual Stresses Using Large Shearing Speckle Interferometry and the Hole Drilling Method**" - Optics & Lasers in Engineering, v. 23, p. 233-244, 1995.
- [105] ZENG, K.; CHIU, C. - "**An Analysis of Load-Penetration Curves from Instrumented Indentation**" - Acta Materialia, v. 49, p. 3539-3551, 2001.
- [106] ZHIYONG, L.; CHENG, Y. T.; YANG, H. T.; CHANDRASEKAR, S. - "**On Two Indentation Hardness Definitions**" - Surface and Coating Technology, v.154, p.124-130, 2002.

## Apêndice A

# Conceitos Básicos do Comportamento dos Materiais

As relações tensão-deformação de um material em função de suas propriedades mecânicas são subdivididas basicamente em quatro áreas de estudo<sup>[50]</sup>: (1) elasticidade, (2) viscoelasticidade, (3) plasticidade, e (4) viscoplasticidade.

O diagrama tensão-deformação clássico representado na figura A.1, apresenta a existência de duas regiões, uma elástica e outra plástica. Estas regiões estão limitadas por uma fronteira dada pelo limite de escoamento superior, ou tensão de escoamento  $\sigma_y$ . A região elástica é caracterizada pelo retorno do material após a aplicação de um esforço, a região plástica pela apresentação de deformações permanentes<sup>[26],[57],[64]</sup>. Após um aumento ainda maior na tensão, o material atinge a ruptura. Este comportamento é típico de muitos metais, exceto aqueles que são excepcionalmente frágeis e que se fraturam na região de comportamento elástico.

### A.1 Relações Elásticas Tensão-Deformação para um Estado

#### Bidimensional

Formas simplificadas das relações tensão-deformação e deformação-tensão, no regime elástico e no plano, são facilmente encontradas na literatura<sup>[25],[53],[59]</sup>.

As equações aplicáveis ao campo de deformação associado ao **estado plano de tensão** consistem em igualar as componentes da terceira dimensão, a zero, ou seja:  $\sigma_{zz} = 0$ ,  $\tau_{zx} = 0$ ,  $\tau_{xz} = 0$ . Esta aproximação geralmente é utilizada para chapa fina de espessura  $h$ , carregada por forças aplicadas no contorno, paralela ao plano da chapa e distribuída uniformemente ao longo da espessura. Neste caso as componentes de tensão  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{zx}$ , e  $\tau_{xz}$  são nulas em ambas as faces e no interior da chapa.

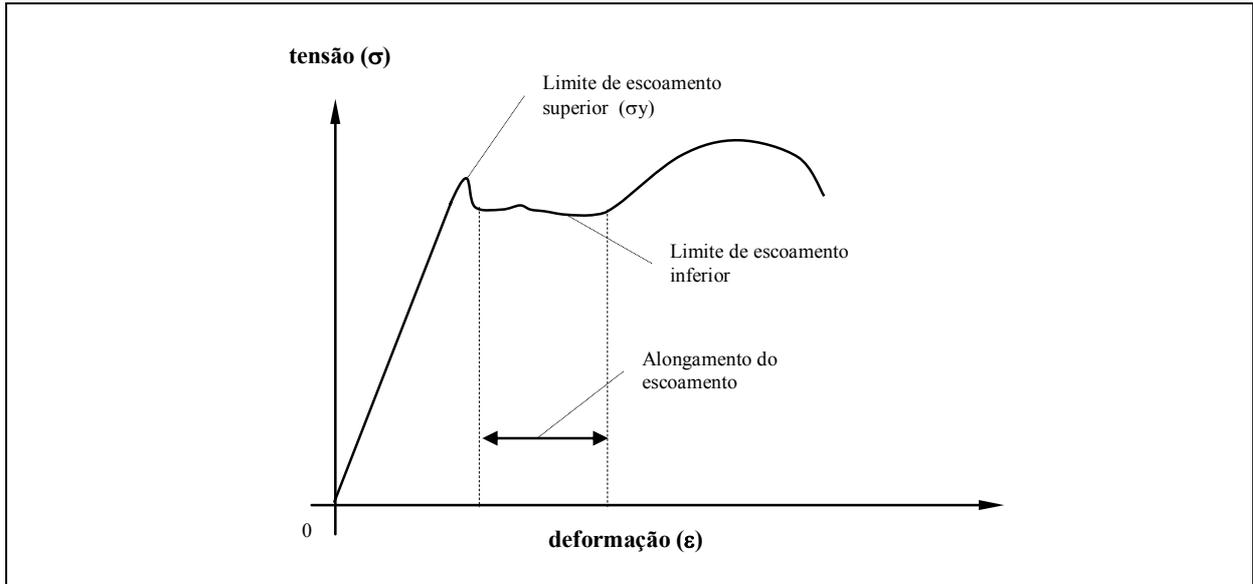


Figura A.1 Diagrama tensão-deformação

Tabela A-1 Estado plano de tensão e estado plano de deformação no regime elástico.

	<i>Em termos de Tensão</i>	<i>Em termos de Deformação</i>
<b>Estado Plano de Tensão</b>	$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x - \nu \epsilon_y)$ $\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_y - \nu \epsilon_x)$ $\sigma_z = 0$ $\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}$ $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$	$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y)$ $\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x)$ $\epsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$ $\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$ $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ <p>e ainda: <math display="block">\epsilon_z = -\frac{\nu}{(1-\nu)} (\epsilon_x + \epsilon_y)</math></p>
<b>Estado Plano de Deformação</b>	$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu) \epsilon_x + \nu \epsilon_y]$ $\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu \epsilon_x + (1-\nu) \epsilon_y]$ $\sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_x + \epsilon_y)$ $\tau_{xy} = \frac{2 E}{(1+\nu)} \gamma_{xy}$ $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ <p>e ainda: <math display="block">\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)</math></p>	$\epsilon_x = \frac{1}{E} [(1-\nu^2) \sigma_x - \nu (1+\nu) \sigma_y]$ $\epsilon_y = \frac{1}{E} [(1-\nu^2) \sigma_y - \nu (1+\nu) \sigma_x]$ $\epsilon_z = 0$ $\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$ $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$

Por outro lado, quando as deformações na direção  $z$  são nulas ou em alguns casos quando a espessura  $h$  é grande o suficiente, de tal forma que as deformações na direção  $z$  sejam consideradas nulas, o problema é descrito como **estado plano de deformação**, podendo então este ser tratado de forma bidimensional, uma vez que o comportamento em toda a seção transversal do sólido é o mesmo. Este caso consiste em igualar as componentes da terceira dimensão a zero, ou seja:  $\varepsilon_{zz} = 0$ ,  $\gamma_{zx} = 0$ ,  $\gamma_{zy} = 0$ .

A tabela A-1 resume as equações envolvidas para um estado plano de tensão e para um estado plano de deformação, de acordo com as considerações acima. Ambos estados são fornecidos em termos de tensão e em termos de deformação.

## A.2 Plasticidade

No regime plástico quando a tensão atinge a tensão de escoamento, a relação tensão-deformação em uma direção pode ser modelada da seguinte forma<sup>[47],[57],[59],[64]</sup>:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (\text{A.1})$$

onde:

- $\sigma$  = tensão uniaxial;
- $K$  = coeficiente de resistência plástico;
- $n$  = coeficiente de encruamento.

O estudo da plasticidade dos materiais é simplificado pela adoção de modelos que caracteriza o comportamento dos corpos após atingirem a tensão de escoamento. A figura A.2 esquematiza alguns modelos de curvas tensão-deformação, caso uniaxial, que representa o comportamento idealizado para materiais dúcteis.

Geralmente na solução de problemas de interesse prático é comum a utilização de modelos de materiais idealmente plásticos, tais como<sup>[57],[59],[64]</sup>:

- (a) material elasto-plástico ideal para casos onde as deformações plásticas não são superiores a 0,4 % (figura A.2a);
- (b) material rígido-plástico ideal para casos de grandes deformações plásticas como em conformações mecânicas de estampagens (figura A.2b).

Tais modelos não consideram: (a) os fenômenos estruturais de encruamento e de recristalização que dão origem a modificações das propriedades mecânicas dos sólidos durante a sua deformação e aquecimento, (b) o fenômeno de fluência – que é a deformação em função do tempo com a tensão constante, e (c) a histerese devido à

inversão da direção da tensão após o carregamento inicial.

Outros modelos que consideram alguns destes fenômenos, ainda de forma idealizada, também estão esquematizados na figura A.2, tais como:

- (c) material rígido com encruamento linear (figura A.2c);
- (d) material elástico com encruamento linear (figura A.2d);
- (e) material elástico com encruamento potencial (figura A.2e);
- (f) material elástico segundo o modelo de Ramberg-Osgood<sup>[64]</sup> (figura A.2f).

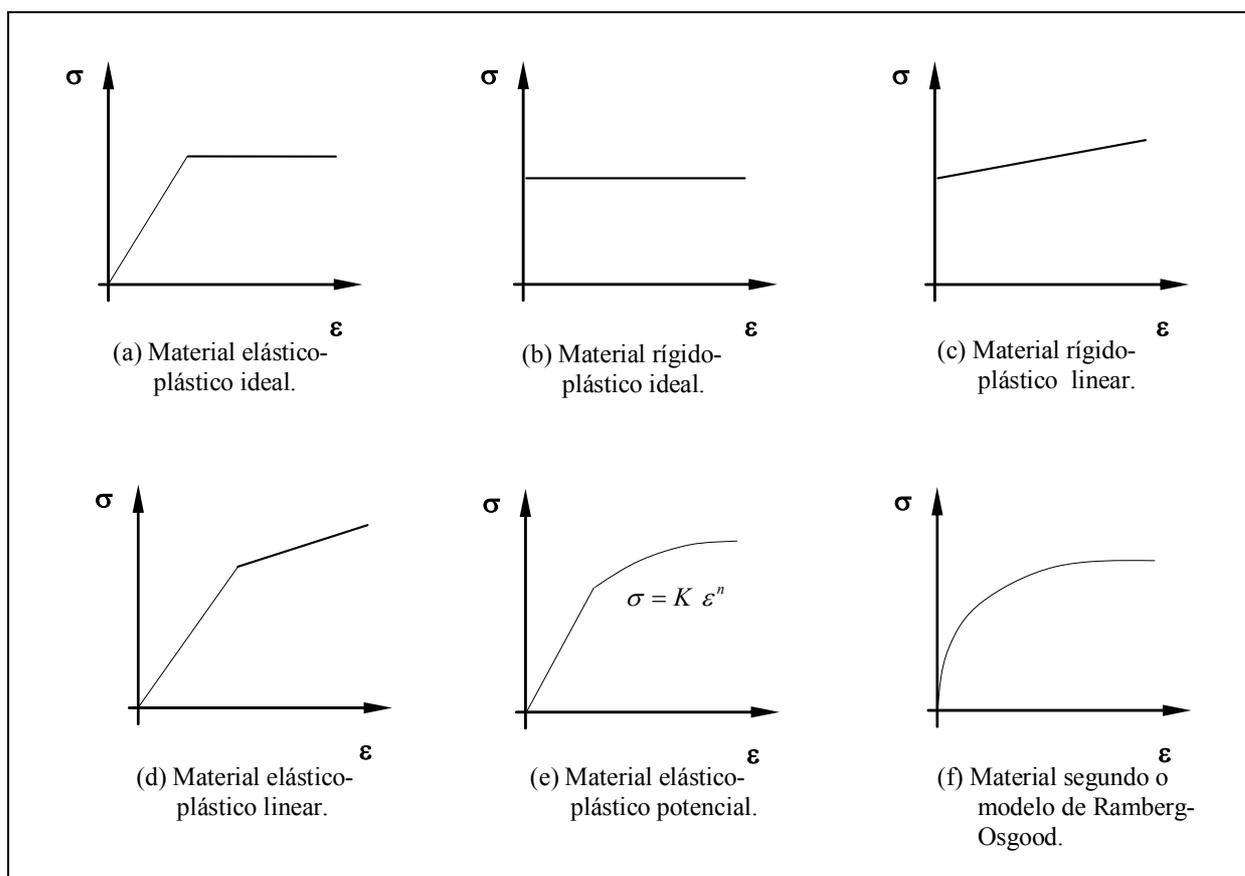


Figura A.2 *Curvas tensão-deformação uniaxial, representando o comportamento idealizado para materiais dúcteis.*

### A.3 Dureza

Experimentos com indentação tem sido usados por mais de cem anos na caracterização da dureza de sólidos<sup>[106]</sup>. A dureza é uma importante propriedade mecânica dos materiais, sendo uma medida de resistência à deformação plástica localizada. Consiste basicamente na aplicação de uma carga no indetador sobre a superfície do sólido e o valor de dureza é obtido dividindo-se o valor da carga pela a área residual projetada de indentação. Não necessita de amostras especiais e causa uma

impressão superficial pequena, freqüentemente desprezível. A medida de resistência do material em relação à penetração do indentador é obtida pela razão entre a força aplicada  $P$  e a área de contato projetada na direção do deslocamento  $A_0$ , dado por:

$$H = \frac{P}{A_0} \quad (\text{A.2})$$

onde:

$H$  = dureza do material;

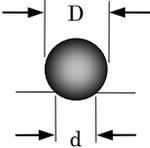
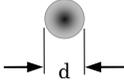
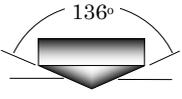
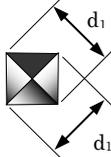
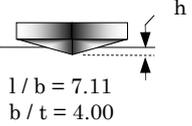
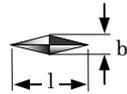
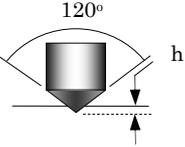
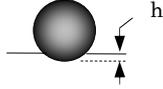
$P$  = carga aplicada da indentação;

$A_0$  = área projetada da indentação.

Os ensaios de dureza podem ser realizados por intermédio de pontas cônicas, cilíndricas, esféricas, ou piramidais<sup>[16],[54]</sup>. Tais pontas são fabricadas de aço, carboneto de tungstênio, ou diamante. Na tabela A-2 apresenta-se resumidamente os ensaios de dureza mais comuns, descrevendo o método utilizado, tipo de indentador e cargas envolvidas.

Na figura A.3 apresenta-se a comparação entre as principais escalas de durezas. A escala de dureza Mohs, referencia valores numéricos de 1 a 10 para tipos de materiais conhecidos (de talco a diamante). Esta escala é a escala de referência em medidas de dureza.

Tabela A-2 Ensaio de Dureza (CALLISTER JR. -1997)<sup>[16]</sup>

Ensaio	Indentador	Forma da Indentação		Carga	Fórmula para cálculo de dureza
		Vista Lateral	Vista de Topo		
Brinell	Esfera de aço ou de carboneto de tungstênio			P	$HB = \frac{2 P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers micro-dureza	Pirâmide de diamante			P	$HV = \frac{1.854 P}{d_1^2}$
Knoop micro-dureza	Pirâmide de diamante	 l / b = 7.11 b / t = 4.00		P	$HK = \frac{14.2 P}{l^2}$
Rockwell				Rockwell	
A } C } D }	Cone de diamante			60 kg	
				100 kg	
				150 kg	
B } F } G }	Esfera de aço φ 1/16"			Rockwell superficial	
				15 kg	
				30 kg	
E } H } K }	Esfera de aço φ 1/8"			45 kg	

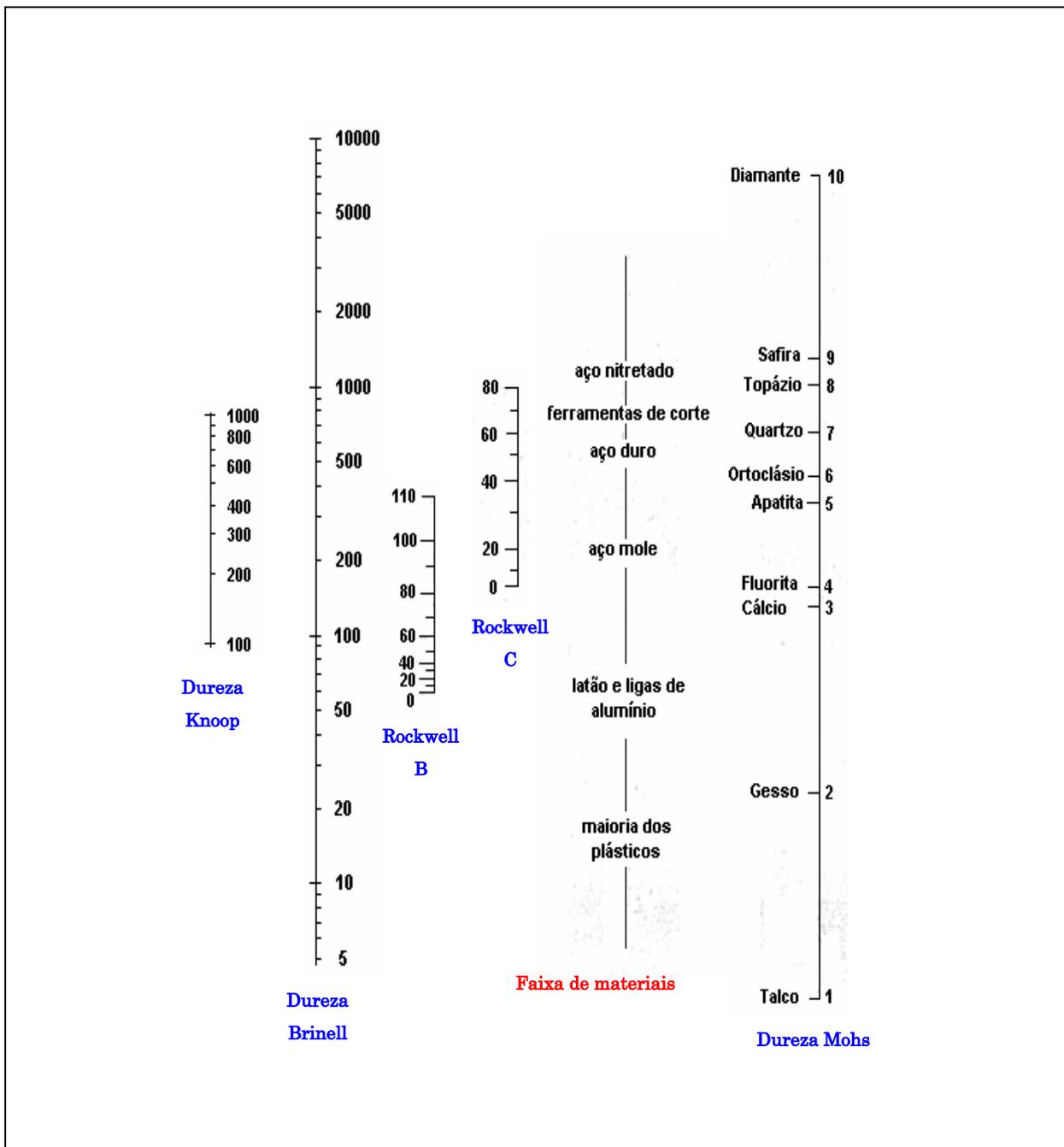


Figura A.3 Comparação de escalas de durezas<sup>[16]</sup>.

## Apêndice B

# Propriedades Mecânicas dos Materiais Ensaaiados

<b>MatWeb Data Sheet</b>				
<b>AISI 1020 Steel, annealed at 870°C (1600°F), furnace cooled 17°C (31°F) per hour to 700°C, air cooled, 25</b>		<b>Date: 1/18/2005 3:45:07 PM</b>		
<b>Keywords:</b>				
UNS G10200, AMS 5032, AMS 5045, ASTM A29, ASTM A108, ASTM A510, ASTM A519, ASTM A29, A108, A510, A512, A513, A519, A544, A575 M10120, A576, A635, A659, A827, A830, BS 970 040A20, 050A20 (En2C), 050A20 (En2D), 060A20, BS 970 Part 1 070M20, DEF STAN95-1-1 C1020, SAE J412, SAE J414, DIN 1.0402, AFNOR CC 20, UNI C 20, SS14 1450 (Sweden), SAE J403				
<b>SubCat:</b> Carbon Steel, AISI 1000 Series Steel, Low Carbon Steel, Metal				
<b>Material Notes:</b>				
Applications include parts in the case hardened condition where core strength is not critical, and for shafts of larger cross section that are not highly stressed. Other uses include lightly stressed gears with hard wearing surfaces and case hardened pins and chains.				
<b>Component</b>				
	<b>Value</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	
Carbon, C		0.17	0.23	
Iron, Fe		99.08	99.53	
Manganese, Mn		0.3	0.6	
Phosphorous, P			0.04	
Sulfur, S			0.05	
<b>Properties</b>				
	<b>Value</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Comment</b>
<b>Physical</b>				
Density, g/cc	7.87	--	--	Typical for steel
<b>Mechanical</b>				
Hardness, Brinell	111	--	--	
Hardness, Knoop	129	--	--	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	64	--	--	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	115	--	--	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate, MPa	395	--	--	
Tensile Strength, Yield, MPa	295	--	--	
Elongation at Break, %	36.5	--	--	in 50 mm
Reduction of Area, %	66	--	--	
Modulus of Elasticity, GPa	200	--	--	Typical for steel
Bulk Modulus, GPa	140	--	--	Typical for steel
Poissons Ratio	0.29	--	--	
Charpy Impact, J	16.9	--	--	at -30°C (-22°F), 18 J at -18°C (-0.4°F), 20 J at -3°C (26.6°F), 24 J at 10°C (50°F), 41 J at 38°C (100°F), 54 J at 65°C (150°F), 61 J at 95°C (200°F), 68 J at 150°C (300°F)
Shear Modulus, GPa	80	--	--	Typical for steel
<b>Electrical</b>				
Electrical Resistivity, ohm-cm	1.59E-05	--	--	at 0°C (32°F), condition unknown; 2.19E-05 Ohm-cm at 100°C (212°F); 2.92E-05 Ohm-cm at 200°C (390°F)
<b>Thermal</b>				
CTE, linear 20°C, µm/m-°C	11.7	--	--	at 20-100°C (68-212°F), 12.1 µm/m°C at 200°C (68-390°F)
CTE, linear 250°C, µm/m-°C	12.8	--	--	at 20-300°C (68-570°F), 13.3 µm/m°C at 20-400°C (68-750°F)
CTE, linear 500°C, µm/m-°C	13.9	--	--	at 20-500°C (68-930°F), 14.4 µm/m°C at 20-600°C (68-1110°F), 14.8 µm/m°C at 20-700°C (68-1290°F)
Heat Capacity, J/g-°C	0.486	--	--	from 50-100°C (122-212°F), condition unknown; 0.519 J/g°C from 150-200°C (302-390°F); 0.599 J/g°C from 350-400°C (662-752°F)
Thermal Conductivity, W/m-K	51.9	--	--	Typical for steel

Figura B.1 Especificação técnica do Aço AISI 1020, recosido – MatWeb-2005<sup>[62]</sup>.

<b>MatWeb Data Sheet</b>			
<b>Aluminum 1100-H18</b>		<b>Date: 1/18/2005 3:36:07 PM</b>	
<b>KeyWords:</b>			
Aluminium 1100-H18; UNS A91100; ISO Al99.0Cu; NF A45 (France); CSA 990C (Canada); AA1100-H18			
<b>SubCat:</b> Aluminum Alloy, Nonferrous Metal, 1000 Series			
Aluminum, Metal			
<b>Material Notes:</b>			
Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.			
<b>Component</b>	<b>Value</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Aluminum, Al		99	
Copper, Cu		0.05	0.2
Manganese, Mn		0.05	0.15
		0.95	
Zinc, Zn		0.1	
<b>Properties</b>	<b>Value</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>Physical</b>			<b>Comment</b>
Density, g/cc	2.71	--	-- AA; Typical
<b>Mechanical</b>			
Hardness, Brinell	44	--	-- AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Ultimate Tensile Strength, MPa	165	--	-- AA; Typical
Tensile Yield Strength, MPa	152	--	-- AA; Typical
Elongation at Break, %	5	--	-- AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
Elongation at Break, %	15	--	-- AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity, GPa	68.9	--	-- AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Notched Tensile Strength, MPa	207	--	-- 2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, K <sub>t</sub> = 17.
Ultimate Bearing Strength, MPa	241	--	-- Edge distance/pin diameter = 2.0
Bearing Yield Strength, MPa	207	--	-- Edge distance/pin diameter = 2.0
Poissons Ratio	0.33	--	--
Fatigue Strength, MPa	62.1	--	-- AA; 500,000,000 cycles completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Machinability, %	30	--	-- 0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus, GPa	26	--	--
Shear Strength, MPa	89.6	--	-- AA; Typical
<b>Electrical</b>			
Electrical Resistivity, ohm-cm	2.99E-06	--	-- AA; Typical at 68°F
<b>Thermal</b>			
Heat of Fusion, J/g	390	--	--
CTE, linear 68°F, µm/m-°C	23.6	--	-- AA; Typical; Average over 68-212°F range.
CTE, linear 250°C, µm/m-°C	25.5	--	-- Average over the range 20-300°C
Heat Capacity, J/g-°C	0.904	--	--
Thermal Conductivity, W/m-K	218	--	-- AA; Typical at 77°F
Melting Point, °C	--	643	657 AA; Typical range based on typical composition for wrought products 1/4 inch thickness or greater
Solidus, °C	643	--	-- AA; Typical
Liquidus, °C	657	--	-- AA; Typical
<b>Optical</b>			
Emissivity (0-1)	0.05	--	-- Bare Metal
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.86	--	-- Tungsten Filament Source, Bare Metal
<b>Processing</b>			
Annealing Temperature, °C	343	--	--

Figura B.2 Especificação técnica do Alumínio 1100-H18 – MatWeb-2005<sup>[62]</sup>.

## Apêndice C

# Modelamento Numérico do Processo de Indentação Esférica sobre um Material Elasto-Plástico Ideal.

Este relatório apresenta a simulação do processo de indentação sobre um material elasto-plástico ideal com uma indentação esférica. Foram feitas três análises:

- Caso 1: Material indentado sem tensões residuais.
- Caso 2: Material indentado com tensões residuais.
- Caso 0: Material apenas com tensões residuais.

### C.1 Descrição do Modelo

- Devido às características simétricas do problema, apenas 1/4 da região que sofre indentação será analisada.
- A indentação é simulada impondo um deslocamento prescrito vertical da superfície do indentador esférico, sendo este considerado infinitamente rígido.
- A força de indentação é uma incógnita do problema, devido ao carregamento ser definido pelo deslocamento vertical de indentação.
- Foi considerada na análise a recuperação elástica do material retirando o indentador esférico.
- O material possui endurecimento nulo na plastificação - material elasto-plástico perfeito (sem encruamento).

### C.2 Propriedades e Dimensões usadas no Modelo

- Indentador.
  - Diâmetro da esfera = 2,5 mm.
  - Penetração máxima da esfera = 0,3 mm.

- Raio da esfera no plano da face de indentação = 0,8124 mm.
- Material elasto-plástico ideal.
  - Comprimento da aresta do cubo = 20 mm.
  - Tensão limite de escoamento = 250 MPa.
  - Módulo de elasticidade = 207.105 MPa.
  - Coeficiente de Poisson = 0,27
  - Módulo tangente = 0 (plasticidade ideal)

### C.3 Malha de Descritização

- A malha do modelo foi construída com simetria radial e refinada na região da indentação para melhor visualização e obtenção dos resultados (figura C.3).

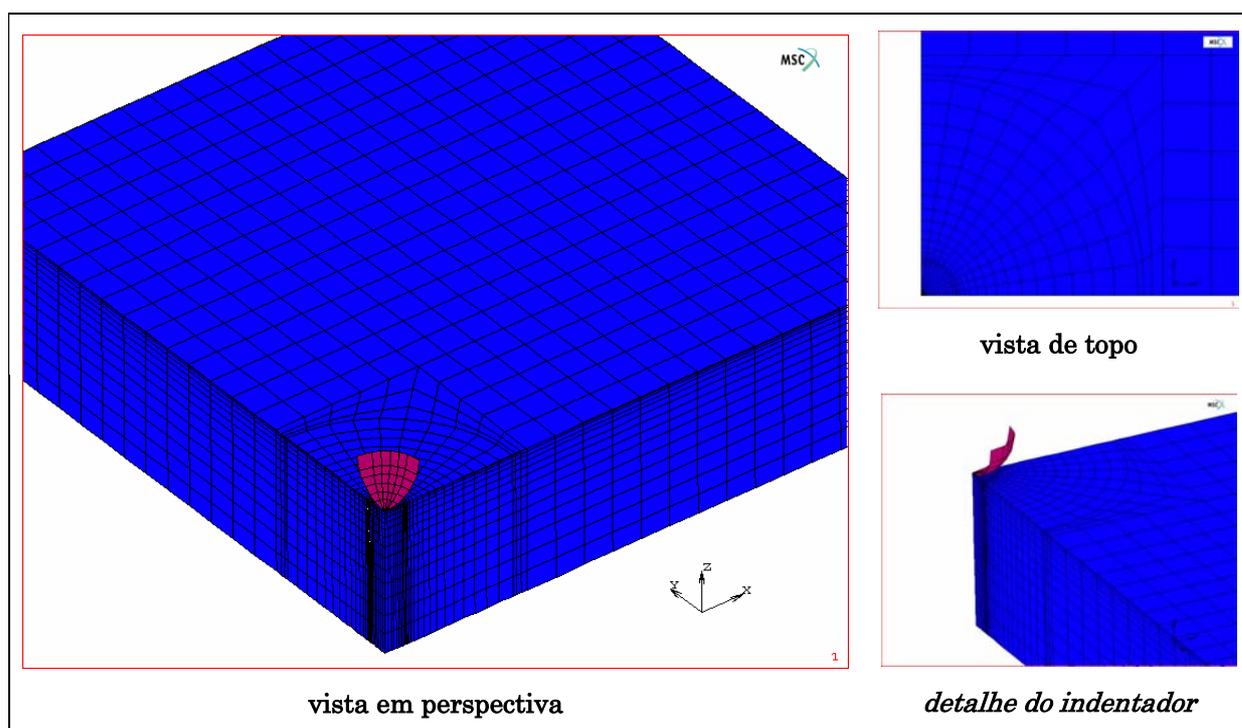


Figura C.3 Malha construída para a análise.

### C.4 Simulações

#### C.4.1 Caso 1: Material Indentado sem Tensões Residuais

Material sem tensões residuais em suas faces, sofrendo indentação com uma esfera. Os deslocamentos obtidos são denominados como “U1”.

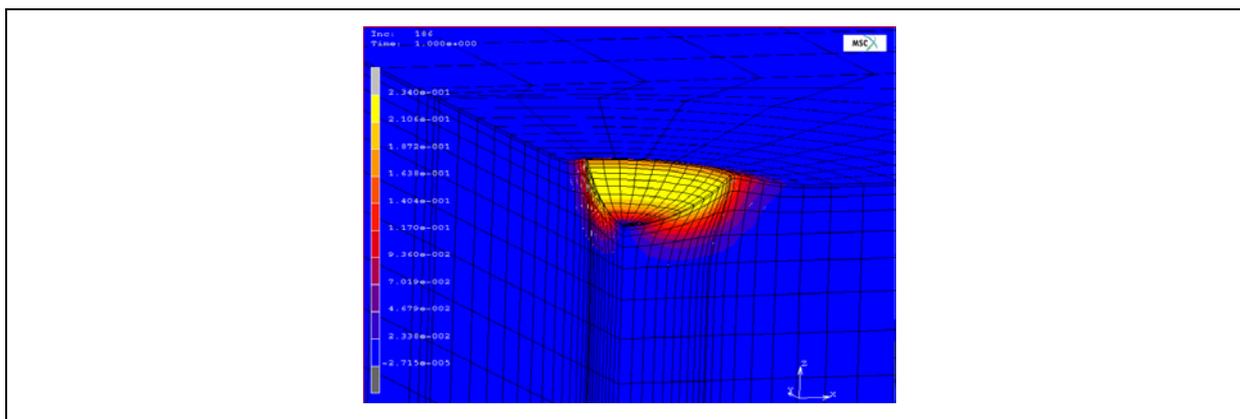


Figura C.4 *Campo de deslocamentos radiais (vista em perspectiva).*

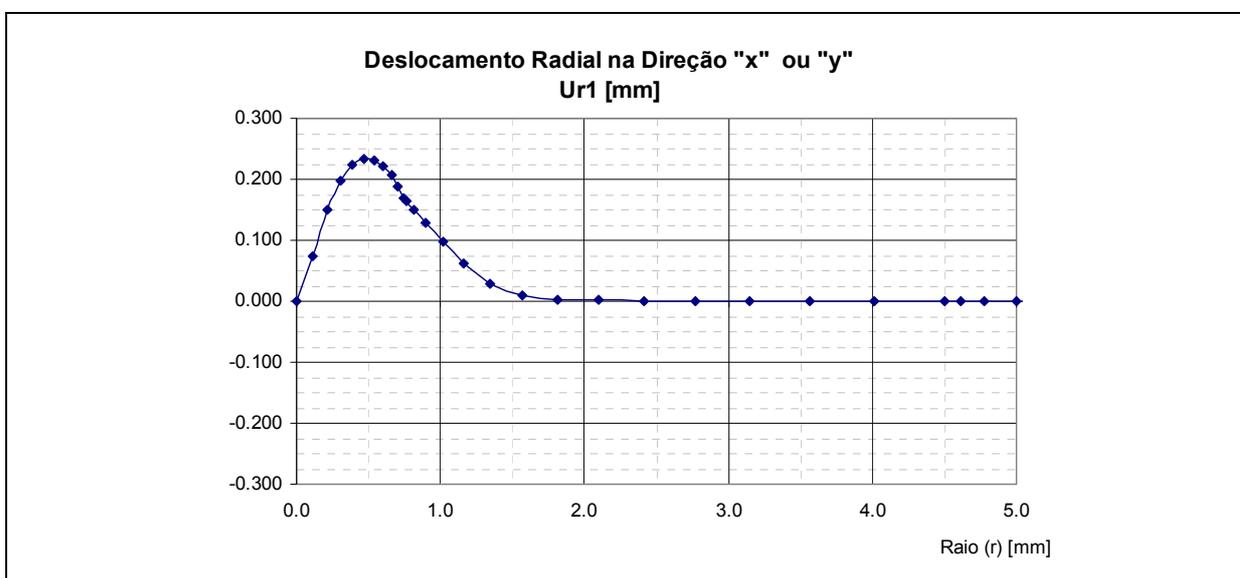


Figura C.5 *Gráfico de deslocamentos radiais no plano da face de indentação sem tensões residuais.*

### C.4.2 Caso 2: Material Indentado com Tensões Residuais

Material com tensões residuais na direção “x” através de deslocamentos prescritos na fronteira e sofrendo indentação esférica. Os deslocamentos radiais obtidos são denominados por “U2”.

As tensões residuais empregadas nas análises foram: 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa e 200 MPa.

### C.4.3 Caso 0: Material apenas com tensões residuais

Este caso analisa os deslocamentos radiais quando da aplicação de uma tensões residuais na direção “x”, com os valores de 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa e 200 MPa.

Nenhuma outra carga externa é considerada e os deslocamentos radiais obtidos são denominados por “U0”

### C.5 Resultados

Deve-se destacar que a leitura do interferômetro dos deslocamentos radiais corresponde à diferença de deslocamentos entre o Caso “2” (indentação com tensões residuais) e o Caso “0” (apenas tensões residuais), ou seja:  $U_r = U_2 - U_0$ .

Os gráficos a seguir são comparativos para os deslocamentos radiais no seguinte intervalo:  $2 \text{ mm} < r < 10 \text{ mm}$ .

Pode-se observar através dos resultados de que existem diferenças significativas no comportamento do deslocamento no plano para diferentes estados de tensões residuais. As razões nas direções “x” e “y”, também apresentam diferenças significativas, para o caso 1-D.

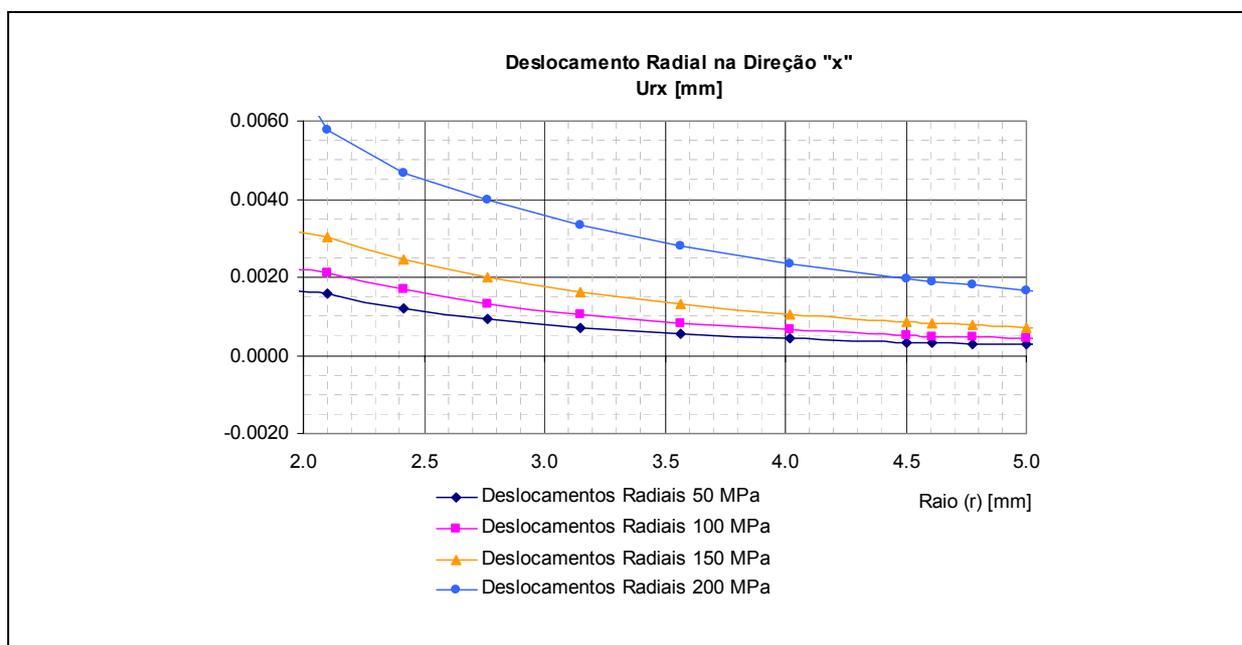
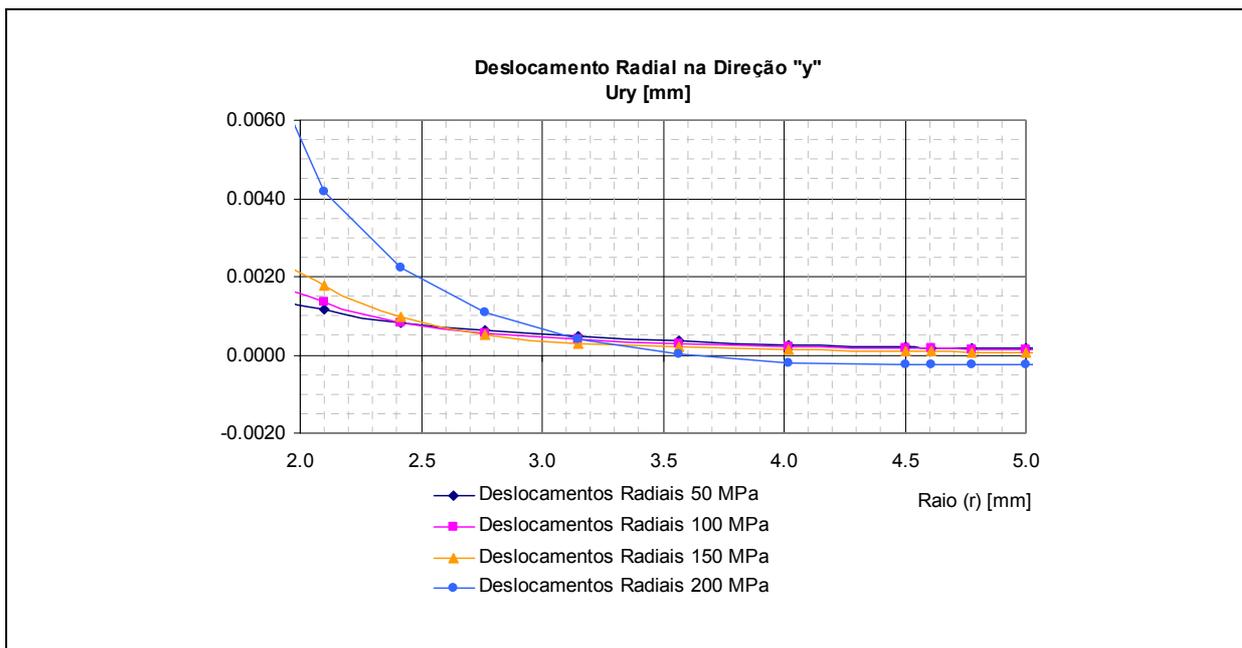
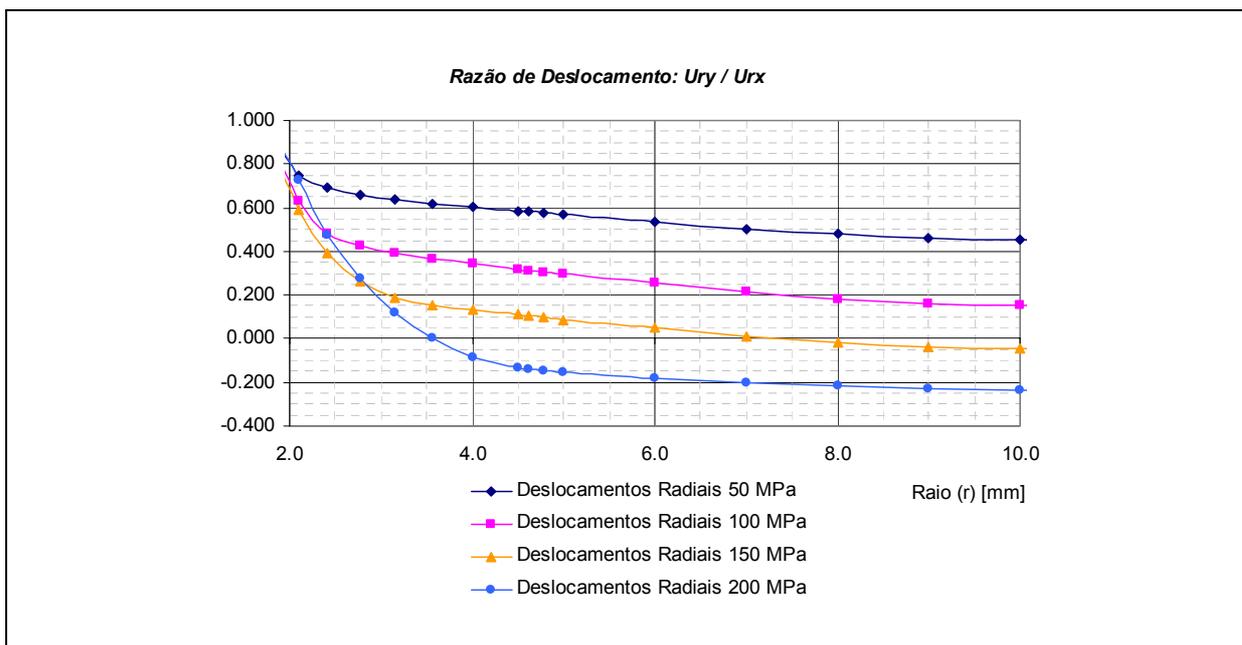


Figura C.6 Gráfico comparativo dos deslocamentos radiais na direção “x” do plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa.

Devido a resolução de medição obtidas através da holografia eletrônica, em torno de décimos de micrometros, e das diferenças significativas encontradas nas simulações, verifica-se que é possível realizar as medições com o interferômetro radial.



*Figura C.7* Gráfico comparativo dos deslocamentos radiais na direção "y" do plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa.



*Figura C.8* Gráfico da razão de deslocamentos radiais ( $U_{ry} / U_{rx}$ ) no plano da face de indentação. Tensões residuais: 50, 100, 150 e 200 MPa.

## Apêndice D

# Regressão Linear e Incertezas para Ajuste de Modelos pelo Método dos Mínimos Quadrados

### D.1 Modelos de Ajuste de Regressão

O método dos mínimos quadrados (MMQ) é tipicamente usado para estimar os coeficientes de regressão (ou parâmetros) em um modelos de regressão linear múltipla<sup>[61]</sup>.

A forma matricial de interpolação é a mais simples e é de fácil implementação em algoritmos específicos.

Supondo a seguinte denominação:

$y$  = variável dependente ou resposta;

$x_k$  =  $k$  variáveis independentes ou variáveis de regressão  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ .

$$y = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{D.1})$$

A equação D.1, representa o modelo de regressão. Esta regressão deve ser um polinômio de ordem mais baixa possível, que represente ou aproxime uma função.

### D.2 Modelo de Regressão Linear

O modelo de regressão linear múltipla pode ser escrito da seguinte forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{D.2})$$

onde:

$$\beta_j = \text{São os parâmetros ou coeficientes de regressão, de } k \text{ variáveis}$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (x_1, x_2, \dots, x_k)$$

Este modelo descreve um hiperplano num espaço de  $k$  dimensões de variáveis de regressão  $\{x_j\}$ . Os parâmetros  $\beta_j$  representam a variação esperada na resposta  $y$ , pela unidade de variação em  $x_j$  quando todas as outras variáveis permanecem constantes.

Modelos que são aparentemente mais complexos que aquele apresentado na equação D.2, podem ser freqüentemente reduzidos e analisados pela técnica de regressão linear, por exemplo o seguinte modelo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (\text{D.3})$$

Pode ser reduzido, através de transformação de variáveis:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (\text{D.4})$$

onde:

$$\beta_3 = \beta_{12} \quad \text{e} \quad x_3 = x_1 x_2$$

### D.3 Estimativa dos Parâmetros de Regressão Linear

O método dos mínimos quadrados é tipicamente usado para estimar os coeficientes de regressão em um modelo de regressão linear múltiplo.

Supondo  $n > k$ , tem-se  $n$  respostas para a variável  $y$ , ou seja:  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Para cada resposta observada  $y_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), tem-se uma observação da variável de regressão  $x_{ij}$  ( $i$ -ésima observação da  $j$ -ésima variável). Desta forma a equação A.2 pode ser rescrita:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (\text{D.5})$$

Utilizando-se de notação matricial, pode-se escrever a equação A.5 da seguinte forma:

$$\{y\} = [X] \{\beta\} + \{\varepsilon\} \quad (D.6)$$

onde:  $\{y\} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$ ,  $[X] = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$ ,  $\{\beta\} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}$ , e  $\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$

Geralmente  $\{y\}$  é um vetor de observações ( $n \times 1$ ),  $[X]$  é uma matriz de níveis de variáveis independentes ( $n \times p$ ),  $\{\beta\}$  é um vetor dos coeficientes de regressão ( $p \times 1$ ), e  $\{\varepsilon\}$  é um vetor da componente aleatória de erros ( $n \times 1$ ).

O vetor  $\{\beta\}$  dos coeficientes de regressão pode ser estimado por mínimos quadrados, da seguinte forma:

$$\{\hat{\beta}\} = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T \{y\} \quad (D.7)$$

onde:

$\{\hat{\beta}\}$  = coeficientes de regressão estimados;

$[X]^T$  = matriz transposta de  $[X]$ .

Assim a equação D.6, pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\{\hat{y}\} = [X] \{\hat{\beta}\} \quad (D.8)$$

A diferença entre a atual observação real  $y_i$  e o correspondente valor ajustado  $\hat{y}_i$ , é o resíduo, ou seja:  $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ .

### D.3.1 Estimativa da Variância do Modelo de Regressão Linear

A estimativa da variância do modelo ajustado ( $\hat{y}$ ), de regressão linear, pode ser escrito na seguinte forma:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - p} \quad (D.9)$$

onde:

$SS_E$  = é a soma dos quadrados dos resíduos.  $SS_E = \{y\}^T \{y\} - \{\hat{\beta}\}^T [X]^T \{y\}$ ;

$n - p$  = grau de liberdade de medição,  $n$  = número de observações e  $p$  = número de coeficientes estimados.

### D.3.2 Estimativa da Incerteza do Modelo de Regressão Linear

A estimativa da incerteza expandida do modelo ajustado ( $\hat{y}$ ), de regressão linear, pode ser escrito na seguinte forma:

$$U_y = t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2} \quad (\text{D.10})$$

onde:

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-p}$  = coeficiente da distribuição t-student em função do nível de significância ( $\alpha$ ), e grau de liberdade  $n - p$ .

### D.3.3 Estimativa da Incerteza dos Coeficientes de Regressão

O método dos mínimos quadrados torna os coeficientes de regressão  $\{\hat{\beta}\}$ , uma combinação linear das observações, normalmente distribuído com média  $\{\beta\}$  e respectiva matriz de covariância. A matriz de covariância é definida como:

$$[\text{cov}\{\hat{\beta}\}] = \sigma^2 [ [X]^T [X] ]^{-1} \quad (\text{D.11})$$

Assim, a estimativa da incerteza expandida individual dos coeficientes de regressão, pode ser escrita da seguinte forma:

$$U_{\beta_j} = t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\sigma^2 C_{j,j}} \quad (\text{D.12})$$

onde:

$C_{j,j}$  = jj-ésimo elemento da matriz  $[ [X]^T [X] ]^{-1}$

## Apêndice E

### Fotos: Aplicação em Campo



*Figura E.1* Módulo de Medição de Tensões Residuais Labmetro / UFSC - Roseta Óptica e detalhes de fixação.



*Figura E.2* Módulo de Medição de Tensões Residuais Labmetro / UFSC - Detalhe do módulo de furação.



*Figura E.3* Módulo de indentação – detalhes do indentador



*Figura E.4* Módulo de indentação sobre a superfície de medição

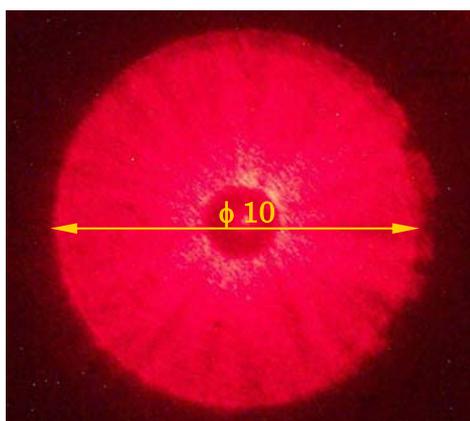


Figura E.5 Área de medição. Superfície iluminada.

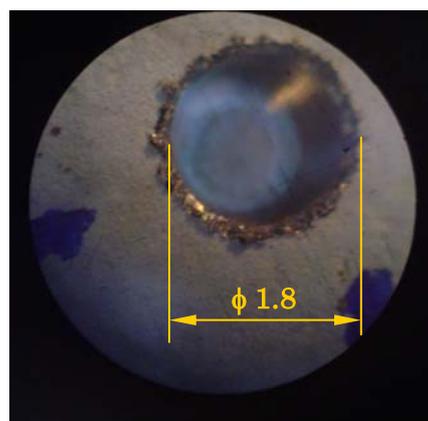


Figura E.6 Detalhe do furo.

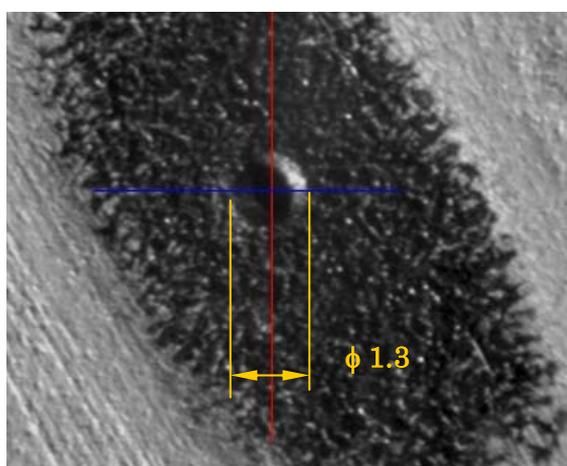


Figura E.7 Detalhe da indentação cônica 120°

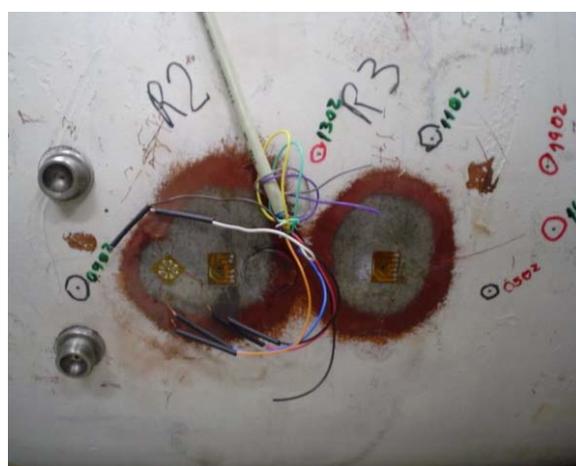


Figura E.8 Detalhes de instalação de "strain gages" para utilização do método do furo



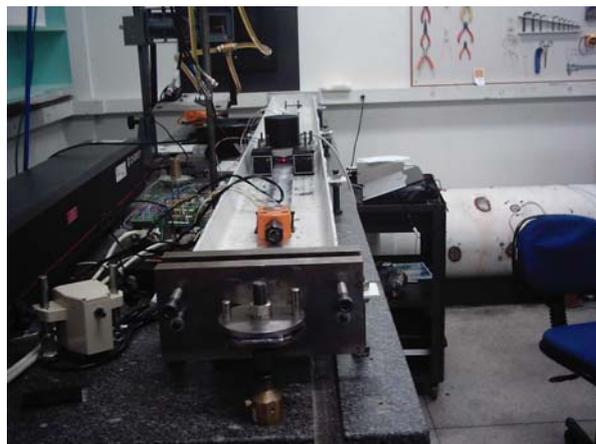
Figura E.9 Vista do sistema de medição óptico (MTRES Modular) e o sistema de medição por "strain gages" (RS200)



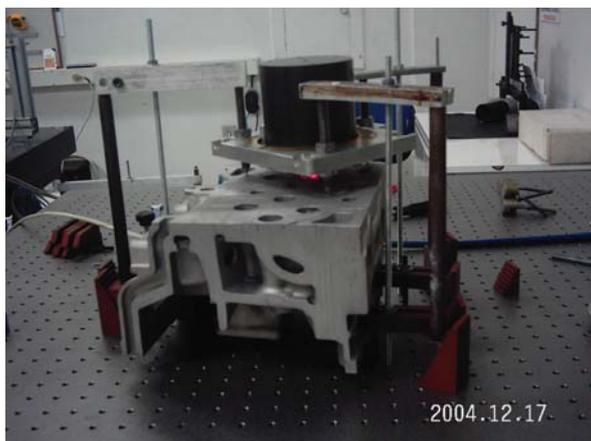
Figura E.10 Sistema de medição apresentado em feira de tecnologia



*Figura E.11 Sistema de simulação de tensões residuais. Detalhe da aplicação de carga no corpo de prova*



*Figura E.12 Medição em laboratório com o MTRES Modular.*



*Figura E.13 Medição em laboratório com MTRES Modular em bloco de motor*



*Figura E.14 Medição em campo do MTRES Modular em dutos*



*Figura E.15 Medição em campo com o MTRES Modular. Detalhe da medição de tensões residuais em dutos*



*Figura E.16 Medição em campo com o MTRES Modular. Detalhe do sistema de aquisição de imagens.*