

Avaliação de Sistemas de Medição de Tensões e Tensões Residuais em Dutos

por

Flávio Tito Peixoto Filho

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Departamento de Engenharia Mecânica - EMC

Laboratório de Metrologia e Automatização - Labmetro

Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial - PósMCI

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Metrologia Científica e Industrial na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 25 de junho de 2004

APROVAÇÃO

Nome: Flávio Tito Peixoto Filho
Titulação: Mestre em Metrologia Científica e Industrial
Título da Tese: Avaliação de Sistemas de Medição de Tensões e Tensões Residuais em Dutos

Banca Examinadora:

Ph. D. Marco Antônio Martins Cavaco

Dr. Rer. Nat. Frank Hrebabetzky

Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior
Orientador

Dr. Eng. Celso Luiz Nickel Veiga

Resumo

No setor de petróleo e gás há uma preocupação constante a respeito das condições dos dutos nos quais produtos são transportados. A ocorrência de vazamentos, além de prejudicar a distribuição de produtos, pode provocar sérias agressões ao meio-ambiente. A monitoração das condições de operação de dutos que transportam gás e derivados de petróleo torna-se essencial.

Uma dessas condições é o nível de tensões às quais o duto está submetido. Caso este nível ultrapasse os limites de resistência do material uma falha irá ocorrer. As tensões mecânicas devidas ao carregamento são consideradas nos cálculos de dimensionamento. Porém o nível de tensões residuais é raramente considerado e a medição raramente é executada em campo. Isto porque as técnicas hoje existentes são caras, de difícil aplicação, de baixa confiabilidade ou requerem uma mão de obra especializada.

Um caminho alternativo vem sendo desenvolvido há alguns anos pela UFSC, utilizando métodos ópticos na medição de micro-deslocamentos na superfície do material em prova, determinando-se então a deformação e, indiretamente, a tensão mecânica na estrutura. A idéia da construção de um dispositivo que efetuasse esse tipo de medição atingiu um amadurecimento recentemente com a concepção de um protótipo modular para medição de tensões mecânicas e tensões residuais.

Este trabalho mostra a avaliação do sistema de medição de tensões, descreve os dispositivos de simulação de tensões de referência, os procedimentos de ensaio utilizados e, por fim, a apresentação dos resultados acompanhados das devidas conclusões.

Abstract

The integrity and general mechanical conditions of pipelines is a constant concern in the oil industry. Leakages can seriously disturb the distribution and cause serious damages to the environment. A frequent evaluation of the pipelines' operational conditions becomes essential.

One important parameter is the level of total mechanical stresses acting over the pipeline. If this level reaches the material limits, a mechanical failure and a serious accident may occur. The loading stresses are usually considered at the time the pipelines are designed. The residual stresses, on the other hand, are rarely considered and its measurement rarely performed in the field. This happens because the techniques being used today are very time consuming, expensive, not reliable or require a skillful technician to correctly apply it.

An alternative method is in development at the *Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)* for years and is now functional. It uses an optical method to measure the very small displacement on the material's surface, obtaining the level of strain and indirectly the level of stress acting over the structure. The idea of developing a system to perform this kind of measurement reached its maturation recently, when a portable device was build.

This work shows the stresses measurement system's evaluation, describes the devices used to simulate a known level of total stresses, the experimental procedures and finally presents the results and final conclusions.

Publicações

- [1] “Desenvolvimento de um Dispositivo para Simulação de Tensões Residuais em Dutos”; Flávio T. Peixoto Filho, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Ricardo Sutério, Thiago Bigarella, Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003.
- [2] “Avaliação de um Simulador de Tensões Residuais”, Ricardo Sutério, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Anderson Pacheco, COTEQ VII, 2003.
- [3] “Evaluation of a Residual Stresses Measurement Device Combining a Radial In-Plane ESPI and the Blind Hole Drilling Method”, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Flávio Tito Peixoto Filho, Ricardo Suterio, Felipe Kleber Amaral, SPIE, 2004.

“The way your heart sounds makes all the difference
It’s what decides if you’ll endure the pain that
we all feel
The way your heart beats makes all the
difference
In learning to live
Here before me is my soul
I’m learning to live
I won’t give up
Till I’ve no more to give”

John Myung

Agradecimentos

À minha família, em especial meus pais pelo apoio financeiro, emocional e educacional;

Ao meu orientador, Professor Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, que me ofereceu os ensinamentos e a inspiração necessária. Há muito dele presente neste trabalho;

À equipe do Labmetro que, direta ou indiretamente, ofereceu uma contribuição muito importante a este trabalho e à minha própria formação: Felipe Kleber Amaral, Ricardo Sutério, Anderson Pacheco, Priscila Borém Sfredo, José Ricardo de Menezes, Élcio Devegili, Danilo José dos Santos, Rafael Peixoto Ferreira, Thiago Bigarella, Fabrício Luís Broering, Rosana Magali Vieira, César Kanda, Tiago Loureiro Pinto e os professores Marco Antônio Martins Cavaco, Gustavo Donatelli, Carlos Alberto Flesch e Carlos Alberto Schneider;

Aos meus amigos dentro ou fora do Labmetro que foram essenciais ao trabalho e à minha vida: Victor Hugo Guidini, Handerson Schlemper Kiquio, Paulo Gustavo Veloso Moura, Eduardo Leseire Poletto, Felipe Perazzinni, Christiane Jacques, Fabiana Brunello, Juliana Vaz Silocchi, Manoel Carlos Solera, Fabrício Kessler Bortoluzzi (*in memoriam*), Gustavo Léo Puchalski, Daniel Provin, Allan Hoffmann, meus primos, primas e muitos outros;

Ao CENPES, Centro de Pesquisa da Petrobrás e ao Engenheiro Luiz Cláudio de Marco Meniconi;

À Agência Nacional do Petróleo que através do programa PRH 34 custeou a minha bolsa.

Sumário

Aprovação	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Publicações	iv
Sumário	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 O panorama da instrumentação na indústria de Petróleo e Gás.....	5
2 Tensões Mecânicas e Tensões Residuais	9
2.1 O que são Tensões Residuais ?	9
2.2 A medição de tensões mecânicas e residuais	10
3 Princípios da Holografia Eletrônica e do Método do Furo	14
3.1 Speckle	15
3.2 Franjas de Interferência.....	16
3.3 Método do Furo	20
4 O Sistema de Medição de Tensões Mecânicas e Residuais	25
4.1 Base.....	25
4.2 Cabeçote de Medição	27

4.3	Cabeçote de Furação	28
4.4	Uma visão geral do M2TRES.....	31
5	Projeto e Construção de uma Bancada de Ensaios	33
5.1	A Concepção do Dispositivo	34
5.2	Procedimentos de Ensaio	35
5.3	Especificações de Componentes.....	39
5.4	Avaliação Teórica de Incertezas.....	41
5.4.1	Análise de Incertezas 1 – Tensões calculadas a partir da pressão...	43
5.4.2	Análise de Incertezas 2 – Tensões calculadas a partir da deformação 45	
5.5	Verificação por Elementos Finitos	48
6	Avaliação do Sistema de Medição	53
6.1	Análise de requisitos do sistema	55
6.2	Resultados	57
6.2.1	Ensaio no padrão uniaxial de tensões – resultados e considerações 58	
6.2.2	Ensaio no duto simulador de tensões bidimensionais – resultados e considerações	67
6.3	Avaliação Funcional	73
6.4	Avaliação Metrológica	75
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	76
7.1	Avaliação Operacional	76
7.2	Desempenho Metrológico	77
7.3	Sugestões para Futuros Trabalhos.....	78
	Referências Bibliográficas	80
	Apêndice A	
	Coeficientes de Correção para o Furo Cego	84
A.1	Coeficientes de correção do furo cego aplicados nas medições utilizando rosetas extensométricas	85

Apêndice B

Dimensões Comerciais de Dutos	86
--------------------------------------	-----------

Apêndice C

Vista Frontal e Cotas do Duto Simulador de Tensões	88
---	-----------

Lista de Figuras

Figura 1.1	Oleoduto rompido [1]	1
Figura 1.2	Ampliação da malha dutoviária brasileira [5].....	3
Figura 1.3	Situação de campo, linha de oleoduto em reparo [1].....	4
Figura 2.1	(a) Roseta extensométrica (b) Duas diferentes configurações de rosetas extensométricas coladas na superfície de medição	11
Figura 3.1	Luz incidindo em uma superfície rugosa	15
Figura 3.2	Padrão de speckles observado pelo M2TRES	16
Figura 3.3	Mapa da diferença de fase, provocada por um carregamento uniaxial.....	17
Figura 3.4	Espelho cônico/iluminação dupla.....	18
Figura 3.5	Iluminação dupla permite a sensibilidade no plano da superfície de medição	19
Figura 3.6	Definição dos símbolos utilizados na formulação matemática do método do furo [12]	22
Figura 4.1	Desenho da base com numeração de seus principais componentes	26
Figura 4.2	Vista em corte do módulo de medição com a identificação dos seus principais componentes	28
Figura 4.3	Módulo de furação.....	29
Figura 4.4	Módulo de furação acoplado na base	30
Figura 4.5	Broca utilizada para usinagem do furo [15]	30
Figura 4.6	M2TRES em operação.....	31
Figura 5.1	Duto simulador de tensões	34

Figura 5.2	Princípio de funcionamento do dispositivo de simulação de tensões.....	35
Figura 5.3	Os quatro estados de carregamento nos ensaios com o duto simulador de tensões.....	36
Figura 5.4	Ensaio em curso, realizado na linha neutra do duto.....	38
Figura 5.5	Anéis de pontos de medição.....	40
Figura 5.6	Perfil do diâmetro externo do duto.....	40
Figura 5.7	Manômetro [17].....	41
Figura 5.8	Fontes de incerteza na determinação da tensão de referência.....	42
Figura 5.9	Comparação entre as contribuições de incertezas.....	47
Figura 5.10	Sistema de ultra-som para medição de espessura de paredes [19].	48
Figura 5.11	Variação de espessura simulada em função do comprimento do corpo de prova.....	49
Figura 5.12	Variação da tensão circunferencial em função da espessura da parede do corpo de prova ao longo do comprimento do corpo de prova.....	51
Figura 6.1	(a) Dispositivo de simulação de tensões uniaxiais (b) M2TRES posicionado no padrão.....	54
Figura 6.2	Posicionamento dos extensômetros.....	54
Figura 6.3	(a) Furo imperfeito, medição comprometida (b) Furo adequado, sem rebarbas.	58
Figura 6.4	Relação entre as medições de σ_1 efetuadas com o M2TRES e o sistema de referência.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Análise dos erros devido à não-linearidade da distribuição radial das tensões [13].....	23
Tabela 3.2	Coefficientes de correção para o furo cego associado à holografia eletrônica	24
Tabela 5.1	Balanço de incertezas para tensão mecânica.....	44
Tabela 5.2	Balanço de incertezas para tensão residual.....	44
Tabela 5.3	Balanço de incertezas para tensão mecânica e residual a partir da deformação.....	46
Tabela 5.4	Balanço de Incertezas para cálculo da tensão mecânica	51
Tabela 5.5	Balanço de Incertezas para cálculo da tensão residual	52
Tabela 6.1	Resultados dos experimentos no padrão unidimensional, furos de 1 a 8.....	60
Tabela 6.2	Resultados dos experimentos no padrão unidimensional, furos de 9 a 16.....	61
Tabela 6.3	Desvio Padrão e média dos desvios de σ_1 e σ_2	63
Tabela 6.4	Avaliação de incertezas do dispositivo simulador de tensões uniaxiais [21]	66
Tabela 6.5	Resultados do M2TRES na medição das tensões oriundas do carregamento no duto.....	68
Tabela 6.6	Desvio das medições do M2TRES em comparação com os valores teóricos.....	69
Tabela 6.7	Desvio das medições do M2TRES em comparação com os valores indicados pelos extensômetros	69

Tabela 6.8	Desvios das medições do M2TRES em comparação com os valores teóricos para os pontos selecionados.....	70
Tabela 6.9	Resultados gerados pelo M2TRES em ensaios no duto e inter-comparação utilizando o método dos quatro passos	71
Tabela 6.10	Média e desvio padrão da diferença entre as tensões combinadas e o resultado da soma entre os valores das tensões de carregamento e residuais medidas individualmente	72

Lista de Símbolos

API	=	Abreviatura de “American Petroleum Institute”
ASTM	=	Abreviatura de “American Society for Testing of Materials”
$\Delta\phi$	=	Mudança de fase
λ	=	Comprimento de onda da luz [nm]
\vec{d}	=	Vetor deslocamento
\vec{p}	=	Vetor sensibilidade
I_θ	=	a intensidade resultante em um ponto da imagem para um determinado deslocamento de fase
u_r	=	Deslocamento radial [r, θ]
r	=	constante, razão entre o raio de amostragem (R) e o raio do furo R_0
R	=	Raio de amostragem [mm]
R_0	=	Raio do furo [mm]
ρ	=	relação entre o raio do furo (R_0) e a coordenada radial do ponto de medição (R). Inverso de r.
β	=	Ângulo da direção das tensão principal (σ_1) [°]
σ	=	Tensão [MPa].
σ_1, σ_2	=	Tensão nas direções principais [MPa]
ε	=	Deformação [$\mu\text{m}/\text{m}$].
ε_r	=	Deformação no sentido radial [$\mu\text{m}/\text{m}$]
$\sigma_{\text{máx}}$	=	Tensão mais trativa [MPa]
σ_{min}	=	Tensão mais compressiva [MPa]
α	=	ângulo entre $\sigma_{\text{máx}}$ e ε_r (medido no sentido anti-horário) [°]

θ	=	Diferença de fase. $\theta = \theta_1 - \theta_2$ [°]
E	=	Módulo de elasticidade ou módulo de Young [GPa].
ν	=	Coefficiente de Poisson.
p	=	Pressão [MPa]
t	=	Espessura de parede do duto [mm]
R'	=	Raio interno do duto [mm]
Re	=	Repetitividade
t	=	Coefficiente t de student
s	=	Desvio padrão
u_{med}	=	Incerteza das medições
u_{pad}	=	Incerteza do sistema de referência
u_{sm}	=	Incerteza do sistema de medição em prova

1

Introdução

A quantificação de tensões residuais e o monitoramento das tensões mecânicas de operação são essenciais para a prevenção contra falhas de componentes e estruturas mecânicas. Vigas, dutos, caldeiras, etc. podem ser danificados e terem sua função de trabalho comprometida caso a composição das tensões residuais e de operação ultrapasse os limites de escoamento do material (Figura 1.1). A monitoração dessas grandezas traz informação para que, por exemplo, sejam otimizados os intervalos de manutenção de um sistema mecânico.



Figura 1.1 Oleoduto rompido [1]

Apesar da importância, este tipo de medição não é efetuado em campo tanto quanto seria necessário. Isto porque as técnicas de medição desenvolvidas até hoje são complicadas ou caras demais. A existência de um dispositivo prático e confiável para efetuar esse tipo de medição é algo de grande interesse nos setores de petróleo e gás, naval, aeroespacial, dentre outros.

Um caminho para isso é a utilização da holografia eletrônica para a medição de micro-deslocamentos da superfície do material em prova determinando-se então a deformação e, indiretamente, a tensão mecânica na estrutura. A idéia da construção de um dispositivo que efetuasse esse tipo de medição já existia há algum tempo no Laboratório de Metrologia da UFSC [2,3], mas foi nos últimos anos, com o amadurecimento dessa idéia e o apoio do CT-Petro que o projeto e a concepção dos protótipos tornou-se possível.

Uma avaliação metrológica e funcional desses protótipos, voltada principalmente ao setor de petróleo e gás, é algo extremamente interessante. Isto por ser exatamente este setor que apresenta maior interesse por esse tipo de medição e, conseqüentemente, que apresenta o mercado mais promissor para a exploração comercial desse dispositivo.

A produção e o consumo de petróleo e seus derivados vêm crescendo continuamente e é preciso que o cuidado com o transporte desses produtos acompanhe este crescimento. Além disso, a construção de termoeletricas é a principal alternativa de médio prazo para minimizar o déficit de energia elétrica no país. Isto irá contribuir para uma maior participação do gás na matriz energética brasileira e, conseqüentemente, maior consumo de gás transportado por novos gasodutos.

Considerando os dutos que estão em fase de construção e outros projetos já em fase de implantação, estima-se que a malha nacional passe dos 12000 km em 2002 para 21000 km ainda neste ano de 2004 [4] (Figura 1.2).

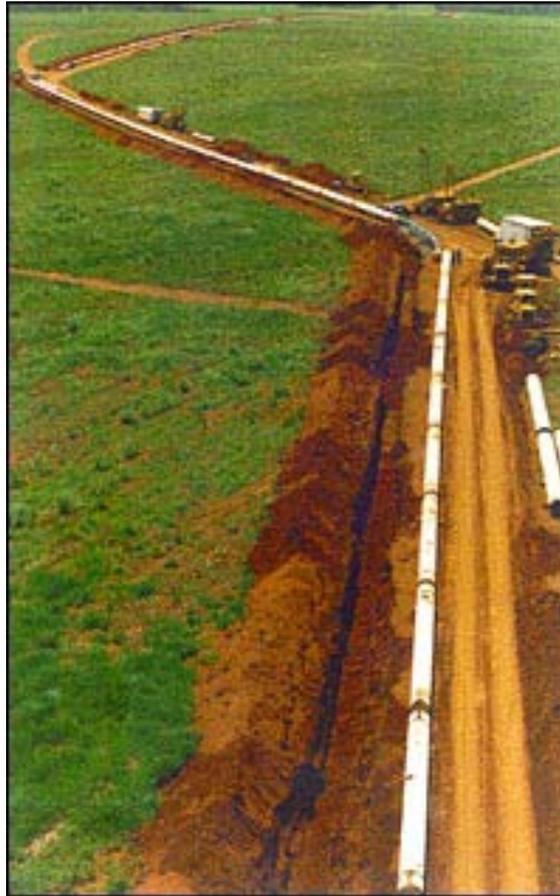


Figura 1.2 Ampliação da malha dutoviária brasileira [5]

O maior desafio desse novo sistema de medição no setor de petróleo e gás será contribuir para aumentar a confiabilidade operacional dos dutos e outras estruturas, melhorando seu gerenciamento e análise de riscos.

O escopo geral deste trabalho é avaliar os protótipos de medição de tensões mecânicas e residuais desenvolvidos pelo Labmetro. Esta avaliação deve ressaltar tanto o ponto de vista metrológico quanto funcional do sistema, apontando seus pontos fortes e suas limitações, principalmente em situações do interesse do setor de petróleo e gás. Essa avaliação deve ainda refletir o grau de amadurecimento do projeto, mostrando o quão perto este se encontra de estar pronto para ser explorado comercialmente.

Para o cumprimento desse objetivo foram efetuados ensaios com o sistema em dispositivos simuladores de tensões de referência. Um destes dispositivos foi desenvolvido incorporando características do setor de Petróleo e

Gás, reproduzindo no laboratório uma situação próxima daquela que o sistema de medição encontrará em campo (Figura 1.3).

O item a seguir, ainda fazendo parte da introdução, apresentará uma visão geral da situação da instrumentação na indústria de petróleo e gás brasileira, mencionando empresas e também fundos de fomento à pesquisa e desenvolvimento neste setor. O capítulo seguinte abordará as tensões residuais e tensões de operação em dutos e os métodos de medição existentes. O terceiro capítulo terá como tema os princípios da Holografia Eletrônica utilizados no equipamento, assim como detalhes sobre o método do furo para a medição de tensões residuais. O capítulo 4 apresenta o protótipo mais recente desenvolvido pelo Labmetro, descrevendo aspectos construtivos e funcionais. O capítulo 5 trata do projeto e construção de um duto simulador de tensões de referência para a avaliação do sistema. O sexto capítulo trata exatamente desta avaliação que contém a análise funcional e metrológica do sistema. Por fim são apresentadas as conclusões do trabalho e perspectivas futuras.



Figura 1.3 Situação de campo, linha de oleoduto em reparo [1]

1.1 O panorama da instrumentação na indústria de Petróleo e Gás

Os requisitos específicos da indústria do petróleo e gás já há muito tempo têm incentivado o desenvolvimento de pesquisas e empresas voltadas à instrumentação desse setor. Apesar da pouca “tradição” petrolífera do Brasil, isto tem ocorrido aqui da mesma maneira, embora com menor intensidade. Já no fim da década de 70 e início de 80, a PETROBRAS incentivava a pesquisa tecnológica nesse campo promovendo seminários e premiando pesquisas acadêmicas (*ver [6]*).

No entanto, no final da década de 1990, evidencia-se um novo modelo institucional no setor de petróleo e gás natural. Essa mudança coincide com a quebra do monopólio pela lei No 9.478/1997 que vem promovendo mudanças, particularmente na dinâmica do sistema setorial de inovação relacionado à indústria petrolífera nacional. Esta Lei, ao promover novas iniciativas que até então eram apenas exercidas pela Petrobrás, vem possibilitando que outras empresas, estrangeiras ou não, venham competir com a empresa estatal em todos os segmentos onde esta atua, a saber: atividades de exploração, produção, refino e transporte [7].

A mudança institucional, em curso desde o final dos anos 90, promove também um novo modelo de fomento às atividades de C&T no setor petrolífero nacional, onde foi constituído o fundo setorial do petróleo e gás natural - CT-Petro. Este fundo tem como objetivo apoiar as atividades de C&T nesse setor que antes eram exercidas prioritariamente pela Petrobras e seu centro de Pesquisa, Desenvolvimento & Engenharia Básica [7]. Todo esse incentivo tem aquecido o panorama brasileiro com pesquisas e recursos humanos no setor. Isso tem impacto direto na formação de empresas na área do petróleo e gás.

O segmento de exploração e produção de petróleo é o que mais cresce no setor petroquímico e por isso, receberá cerca de US\$ 65 bilhões em investimentos nos próximos dez anos, segundo a Organização Nacional da Indústria do Petróleo (ONIP).

Durante as últimas eleições brasileiras para presidente em 2002, uma das questões levantadas foi a atual capacidade brasileira para a produção de plataformas de petróleo. A produção nacional destas poderá significar a geração de empregos no Brasil, ao invés de estimulá-los no exterior pela contratação de empresas estrangeiras. No dia 28 de agosto de 2002 foi realizado na Coppe/UFRJ um encontro técnico sobre a Construção de Plataformas Offshore no Brasil. Inicialmente a PETROBRAS expôs sua demanda para os próximos anos, após o que, representantes de estaleiros e empresas de engenharia puderam discutir a viabilidade de construção das plataformas semi-submersíveis P-51 e P-52 no país [7].

No evento, foi lembrado que, nos anos 80, o Brasil já esteve entre os maiores produtores de navios, ostentando o segundo lugar no ranking mundial. No entanto, por decisões políticas e econômicas, o governo federal decidiu privilegiar a importação, alegando falta de capacidade técnica do Brasil. Isso, somado à falta de controle nos gastos das empresas privadas e à ineficiência administrativa dos estaleiros nacionais, levou à falência os construtores nacionais e impediu o necessário salto tecnológico que daria maior competitividade à construção naval brasileira [7].

No entanto, de acordo com os engenheiros da Coppe, Luiz Pinguelli Rosa e Segen Estefen, hoje o Brasil possui "capacitação nacional para que cascos e conveses possam ser aqui construídos". Com esse quadro em mente, eles alertam que o país não deve correr o risco de perder a oportunidade de inserir sua indústria no competitivo mercado de fabricação de plataformas flutuantes para a indústria do petróleo. Competência técnica e científica já estão demonstradas. Cabe apenas gerar os incentivos para que o setor nacional não seja excluído antes de tentar [7].

O desenvolvimento de plataformas no Brasil promoverá um horizonte ainda maior para as empresas brasileiras de instrumentação, visto que a importação de plataformas permite que nos seja "empurrada" uma tecnologia embarcada estrangeira. Esse desenvolvimento está tendo início agora em 2004 com a construção da P-52. Quando estiver pronta, em 2007, a P-52 será a maior plataforma semi-submersível do Brasil, capaz de extrair petróleo a quase 3000 metros de profundidade e de produzir 180

mil barris por dia, equivalente a 10% de toda a produção nacional. Mas mesmo em fase de construção, a P-52 já estará contribuindo para o desenvolvimento no setor, gerando mais de 2500 empregos diretos.

Dentre as empresas brasileiras de instrumentação que atuam no setor de Petróleo e Gás, pode-se citar a Smar, que é hoje o maior fabricante de instrumentos para controle de processos no Brasil e emprega mais de mil funcionários, a Detroit que tem 35% do seu faturamento em conta da produção de válvulas petroquímicas, Valmicro e Hermeto que atuam no mesmo segmento que a anterior.

Em Santa Catarina há a Photonita que, em estreita cooperação com a UFSC, atua no ramo da metrologia óptica desenvolvendo dispositivos para a medição de tensões mecânicas e residuais e para detecção de falhas em revestimentos de dutos.

Apesar dos incentivos estatais às pesquisas no campo do petróleo e gás existem já há algumas décadas, é claramente perceptível o aumento destes incentivos nos últimos anos (O CENPES é o centro de pesquisas da PETROBRAS, criado oficialmente em 1966. A partir de 1992, passou a receber 1% do faturamento bruto da empresa para desenvolvimento de pesquisa[7].). Isso é oriundo de um planejamento que tem, dentre outras metas, tornar o país auto-suficiente de petróleo até 2005 e menos dependente da tecnologia e recursos humanos estrangeiros. Com isso, a Agência Nacional do Petróleo criou programas de incentivos acadêmicos de graduação e pós-graduação para estimular pesquisas e abastecer o mercado de profissionais com conhecimentos do setor do petróleo e gás.

Um deles é o Plano Nacional de Ciência e Tecnologia de Petróleo e Gás Natural (CT-Petro), criado em 1997, que veio estimular a cadeia produtiva do setor, através dos recursos provenientes de seus *royalties*. O núcleo de pesquisas na área é formado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Centro de Estudos em Petróleo (CEPETRO) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O CT-Petro tem como objetivo apoiar as atividades de C&T nesse setor, que antes eram exercidas prioritariamente pela PETROBRAS e seu

centro de Pesquisa, Desenvolvimento & Engenharia Básica (P,D&EB). Os recursos destinados pelo fundo, composto por uma parcela dos *royalties* arrecadados com a produção de petróleo e gás natural, vêm ampliando os recursos que vêm sendo destinados à indústria petrolífera nacional [7].

Nas ações promovidas pelo CT-Petro, percebe-se a iniciativa de consolidação de um sistema setorial de inovação, ao promover a articulação das instituições científicas e tecnológicas do país, envolvidas no processo de desenvolvimento tecnológico do setor petróleo e gás natural, fazendo com que estas se integrem ainda mais com as empresas de bens de capital, empresas de petróleo e firmas de engenharia [7]. Afinal, se “o petróleo é nosso” que seja nossa também a tecnologia e os recursos humanos utilizados para sua exploração, refino e distribuição.

2

Tensões Mecânicas e Tensões Residuais

2.1 O que são Tensões Residuais ?

As tensões residuais que agem em determinado componente ou estrutura são formadas pelo estado de tensões internas do material que se mantêm equilibradas quando este está livre da influência de forças externas. Elas podem ser geradas ou modificadas em qualquer estágio do ciclo de vida do componente, desde a sua produção até o seu descarte. A soldagem é uma das principais causas de tensões residuais e produzem tipicamente grandes tensões, cujo valor máximo pode se aproximar das tensões de escoamento dos materiais sendo soldados, equilibradas por tensões residuais compressivas de menor magnitude ao longo de todo o restante do componente.

Tensões residuais trativas podem reduzir a performance ou causar falhas de produtos manufaturados. Elas podem aumentar a taxa de danos por fadiga, deformação ou degradação ambiental. Tensões residuais compressivas são, na maioria das vezes, benéficas.

Dados de tensões residuais podem ser obtidos através de medições, modelados numericamente ou até, para alguns casos específicos, obtidos na literatura (tensões

residuais padrões para as geometrias mais comuns de junções soldadas estão incluídas no Apêndice E da norma API 579).

Tensões residuais podem ser medidas por técnicas não-destrutivas, incluindo difração de raios X, difração de nêutrons e métodos magnéticos ou ultra-sônicos; métodos semidestrutivos, como furação; e por métodos de seccionamento como remoção de camadas [8]. A escolha do melhor método deve levar em conta o material, o volume, a geometria e o acesso.

A predição de tensões residuais através de modelagens numéricas dos processos de soldagem e outros tem crescido vertiginosamente nos últimos anos. A modelagem numérica de soldagem é muito exigida técnica e computacionalmente, e simplificações e idealizações do comportamento do material, dos parâmetros do processo e da geometria são inevitáveis. Apesar da modelagem numérica ser uma poderosa ferramenta na predição de tensões residuais, uma validação com referência em resultados experimentais é essencial.

As tensões residuais em estruturas soldadas podem ser minimizadas através da escolha apropriada dos materiais, processo e parâmetros de soldagem, geometria estrutural e seqüência de fabricação. Elas também podem ser aliviadas por processos de tratamento térmico ou por processos mecânicos como, por exemplo, o alívio de tensões por vibração. Cada tratamento é apropriado para uma determinada aplicação e a eficácia deste tratamento pode ser comprometida se esta escolha for mal feita.

2.2 A medição de tensões mecânicas e residuais

Dentre as técnicas experimentais para medição de tensões mecânicas e residuais, a extensometria é aquela mais largamente utilizada porque:

- É uma técnica pesquisada e utilizada há muitos anos;
- Os resultados são facilmente interpretados;
- O procedimento de ensaio de tensões residuais é regido por norma (ASTM E 837 [9]).

A medição de tensão mecânica neste caso é indireta, visto que é calculada a partir da medição de deformação dos extensômetros. A medição de tensões residuais é feita com rosetas extensométricas (Figura 2.1) que são nada mais do que o conjunto de três extensômetros distribuídos ao redor de uma pequena região onde um furo é usinado. A presença do furo provoca um alívio de tensões naquele ponto. Os extensômetros estão posicionados a 0° , 45° e 90° , e medem as componentes, em cada uma destas direções, da deformação gerada pelo alívio de tensões ao redor do furo.



Figura 2.1 (a) Roseta extensométrica (b) Duas diferentes configurações de rosetas extensométricas coladas na superfície de medição

No entanto, a medição de tensões por extensômetros ou rosetas extensométricas apresenta algumas dificuldades e limitações, tanto do ponto de vista operacional quanto metrológico.

Do ponto de vista operacional pode-se citar:

- Excessivo tempo necessário para a preparação da superfície da peça e colagem dos extensômetros;
- Necessidade de habilidade técnica do operador para instalação do extensômetro;
- Necessidade de instrumentação complementar cara;
- Utilização de materiais consumíveis;

- Interpretação dos resultados não é simples e direta nos estados bi-axiais de tensão mecânica e residual.

Do ponto de vista metrológico:

- Necessidade de grande exatidão na centragem entre o furo e a roseta extensométrica quando usada para a medição de tensões residuais;
- Amostragem discreta e em poucos pontos.

Existem outras maneiras de se medir tensões residuais, inclusive utilizando métodos não destrutivos como, por exemplo: difração de raios-X, difração de nêutrons, ultra-som, ruído Barkhausen, correntes parasitas, etc. [8]. No entanto, cada uma destas técnicas ainda apresenta limitações. Algumas têm grande incerteza, outras são muito caras ou têm sua aplicabilidade restrita a uma situação muito específica.

O Labmetro vêm, já há algum tempo, trabalhando no desenvolvimento de sistemas de medição de tensões mecânicas e residuais utilizando a holografia eletrônica. Em ambiente laboratorial, esta técnica já era utilizada há algumas décadas para medição de micro-deslocamentos utilizando espelhos planos. No entanto essa configuração só permitia a medição da componente do deslocamento na direção de um vetor sensibilidade. A idéia inovadora de utilizar um interferômetro com espelhos cônicos permitiu obter-se uma sensibilidade radial e, conseqüentemente, a possibilidade desta técnica ser utilizada na medição de tensões. A intenção é que, através destes dispositivos, este tipo de medição possa ser feita de forma muito mais rápida e simples.

A idéia consiste basicamente na interpretação pelo computador de um padrão de franjas formado a partir da diferença entre dois mapas de fase interferométricos. Na medição de tensões mecânicas, esses mapas de fase são adquiridos antes e depois de ser aplicada tensão no corpo de prova. Já na medição de tensões residuais, esses mapas de fase são adquiridos antes e depois de ser executado um furo, idêntico ao que é feito na técnica de medição de tensões residuais utilizando rosetas extensométricas. A partir da interpretação do padrão de franjas o computador determina a magnitude e

direção do deslocamento da superfície do material, e a partir disso calcula a deformação e a tensão mecânica aplicada.

A existência desse protótipo em condições já operacionais fez com que houvesse a necessidade da sua avaliação metrológica e operacional que é o objetivo central do presente trabalho. Adicionalmente, este trabalho visa caracterizar o desempenho desses sistemas em aplicações do setor de Petróleo e Gás, que é um setor que apresenta grande interesse em dispor de um sistema prático e confiável para a medição de tensões residuais. Para a execução dessas tarefas foi projetado e construído um dispositivo simulador de tensões utilizando um duto com características semelhantes àqueles encontrados no setor de Petróleo e Gás. Com esse dispositivo foi possível então avaliar as características metrológicas e operacionais dos sistemas de medição com o diferencial de simular nesta avaliação uma situação de campo.

3

Princípios da Holografia Eletrônica e do Método do Furo

A holografia eletrônica é uma técnica empregada na medição de micro-deslocamentos e deformações apresentando grande exatidão. Ela consiste na geração de franjas interferométricas resultantes de micro-deslocamentos na superfície da estrutura analisada e na aquisição e no processamento digital das imagens destas franjas. A idéia de se medir deslocamentos através da interferometria óptica não é nova, no entanto a técnica usada para isso empregava espelhos planos e com ela não era possível medir a componente deste deslocamento na direção radial através de uma única imagem. Com o advento do interferômetro radial utilizando espelhos cônicos [2,3], tornou-se mais simples medir a magnitude e a direção do deslocamento. Além disso, uma elevada sensibilidade a perturbações, como vibrações ou flutuações na temperatura limitava a utilização da holografia eletrônica a ambientes laboratoriais. Durante anos a equipe do Labmetro tem trabalhado para sanar ou minimizar estas limitações e permitir que essa técnica seja utilizada em campo.

Os sub-capítulos seguintes comentarão os princípios da holografia eletrônica que permitem a geração e interpretação das franjas de interferência para a medição de tensões residuais, descreveremos a idéia do interferômetro radial e também o método do furo utilizado na medição de tensões residuais.

3.1 Speckle

Quando um feixe de laser incide sobre a superfície de um material, a rugosidade desta superfície faz com que a luz seja refletida em várias direções (Figura 3.1). Estas ondas luminosas refletidas inteferem e formam um padrão de pontos claros e escuros denominados “*speckles*”. Esses pontos são distribuídos aleatoriamente e são resultados da interferência, ora construtiva, ora destrutiva, das diversas frentes de onda (Figura 3.2). Quando a superfície se deforma, ocorre uma mudança no ângulo de fase das frentes de onda que se interferem e com isso há mudanças nos *speckles*. Tudo isso só é possível porque a luz que forma cada *speckle* é coerente. A holografia eletrônica baseia-se na observação por câmera digital do padrão de *speckles*.

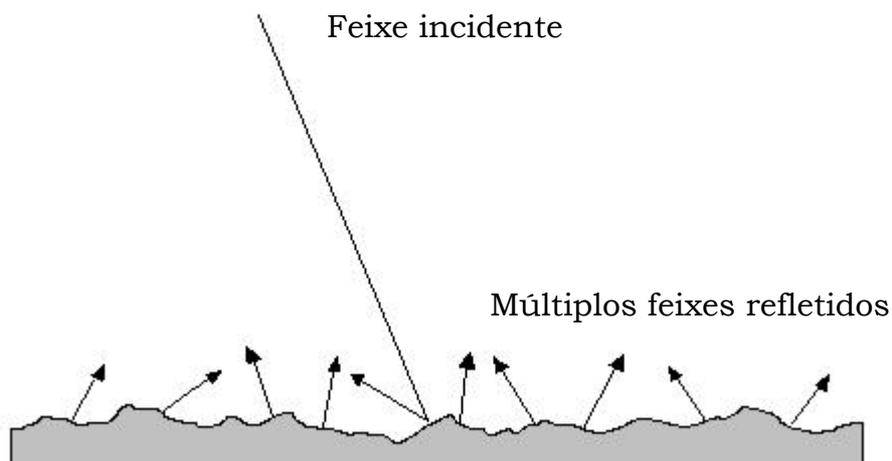


Figura 3.1 Luz incidindo em uma superfície rugosa

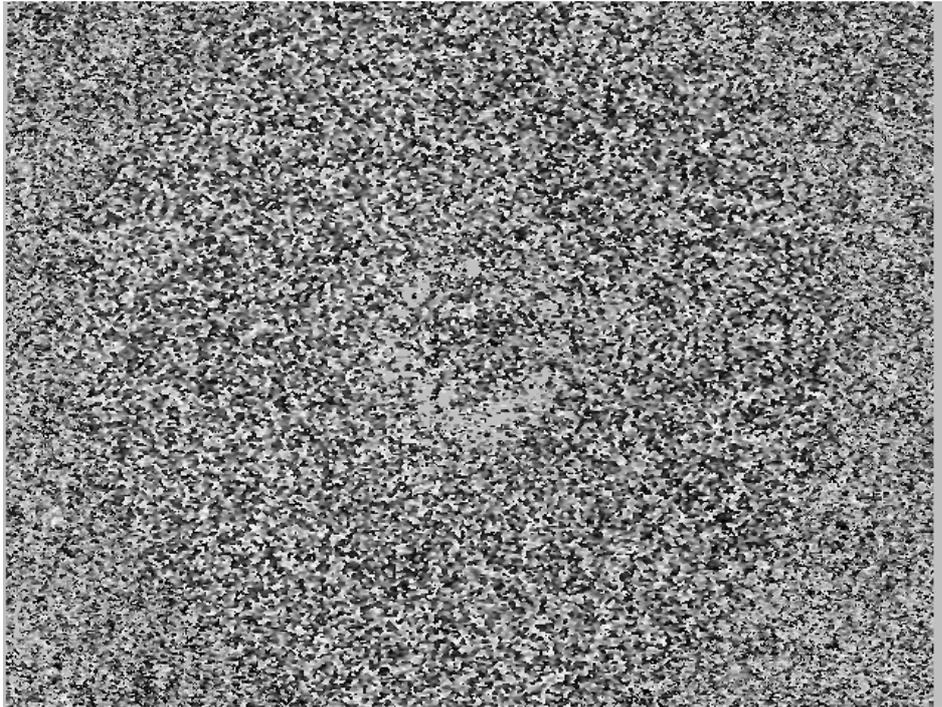


Figura 3.2 Padrão de speckles observado pelo M2TRES

3.2 Franjas de Interferência

A medição com holografia eletrônica freqüentemente é feita a partir da subtração dos padrões de speckles correspondentes a diferentes estados de deformação do material, gerando padrões de franjas que podem ser interpretados para se quantificar essa deformação (Figura 3.3). O resultado disso é a geração de um padrão de franjas quando o deslocamento de fase é um múltiplo inteiro de 2π . Cada franja clara ou escura representa uma região de deslocamento de fase constante (Figura 3.3). No caso da medição de tensões residuais, são envolvidos os mapas de fase da superfície do material antes e depois da execução do furo. A medição de tensões mecânicas envolve os mapas de fase antes e após o carregamento.

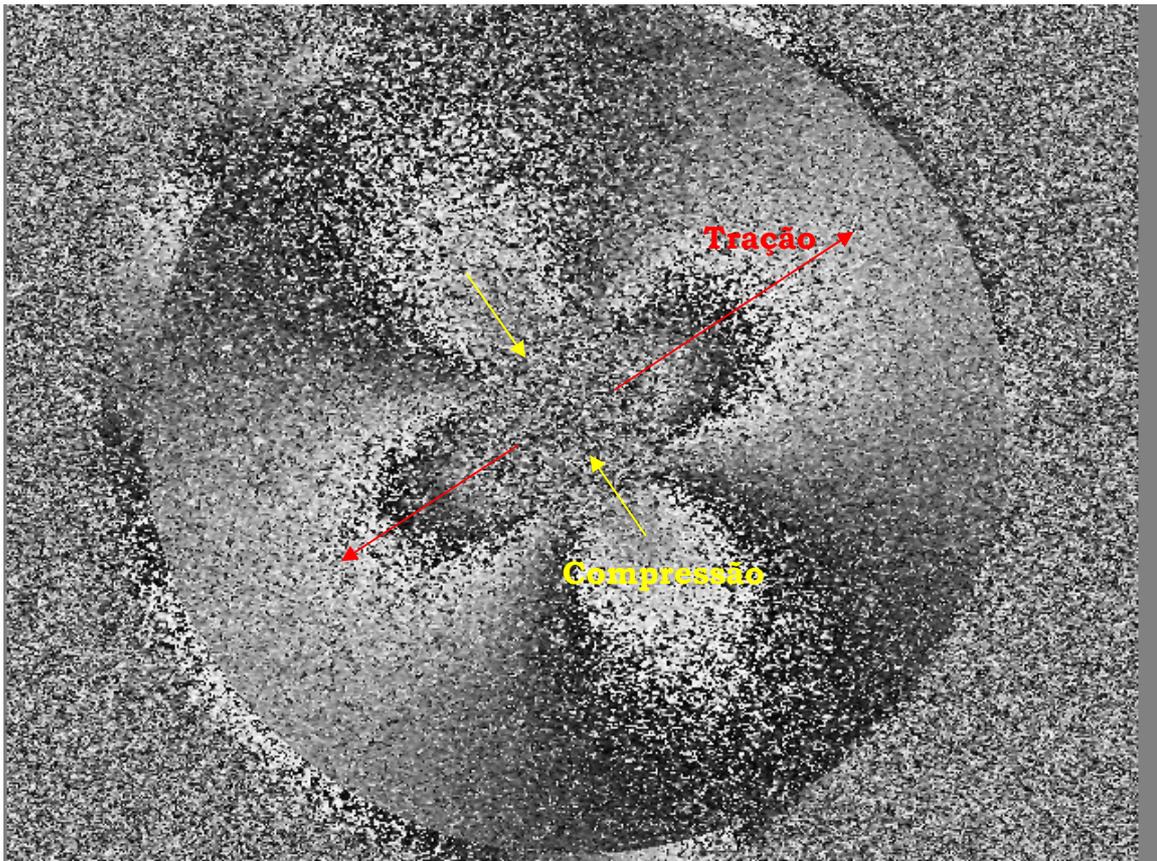


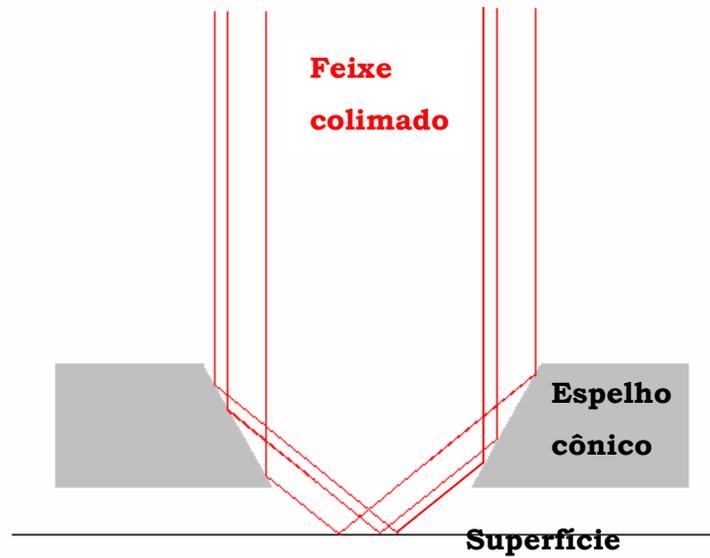
Figura 3.3 Mapa da diferença de fase, provocada por um carregamento uni-axial

No interferômetro de espelhos planos com dupla iluminação a diferença de fase ocorre somente em função da componente dos deslocamentos em uma determinada direção. Essa direção é determinada pelo vetor sensibilidade e é dependente da iluminação do sistema.

O sistema avaliado neste trabalho (M2TRES) entretanto, utiliza um interferômetro de dupla iluminação com um espelho cônico que lhe dá sensibilidade radial na medição dos micro-deslocamentos. O software processa a imagem e calcula os deslocamentos radiais com os quais são determinadas a direção e magnitude das tensões principais.

Um feixe de luz colimada incide sobre a superfície dos espelhos cônicos e é refletido em direção da área de medição no corpo de prova. Com exceção da região central, cada ponto dessa área é composto pela interferência de um par de raios refletidos pelo espelho de forma diametralmente oposta, como mostra a

Figura 3.4.

*Figura 3.4 Espelho côncavo/iluminação dupla*

Cada um dos feixes gera seu próprio padrão de speckles que interage com o padrão gerado pelo outro feixe, e é essa dupla iluminação que permite a medição de micro-deslocamentos paralelos ao plano da área de medição. Isso porque o vetor sensibilidade é determinado pela subtração dos vetores que correspondem à direção dos feixes de iluminação conforme mostrado na Figura 3.5.

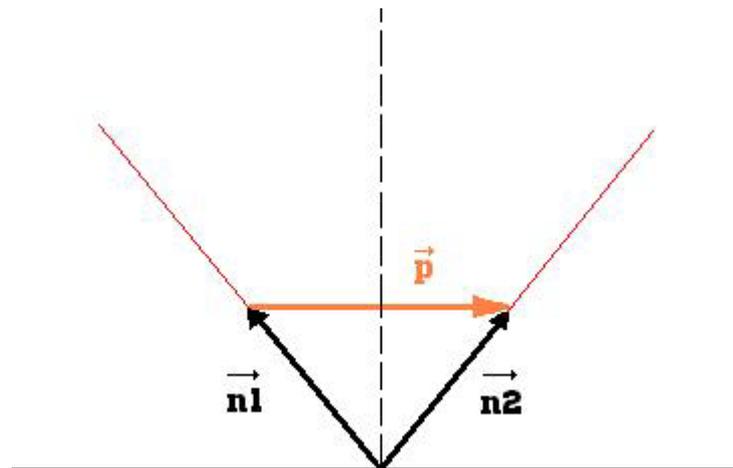


Figura 3.5 Iluminação dupla permite a sensibilidade no plano da superfície de medição

A relação entre a mudança de fase gerada por cada sub-feixe relativa a um determinado deslocamento é expressa pela equação a seguir:

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ = mudança de fase provocada por cada sub-feixe

λ = comprimento de onda da luz

\vec{d} = vetor deslocamento

\vec{p} = vetor sensibilidade

Para calcular os ângulos de fase do padrão de speckles é utilizado algum dispositivo que provoque deslocamentos de fase conhecidos. No caso do M2TRES é utilizado um atuador piezoelétrico solidário à região central de um espelho plano deslocando-o em relação ao seu anel externo que permanece fixo. A técnica utilizada para o cálculo é o Método dos Cinco Passos (ou Hariharan) onde o ângulo de fase é dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2(I_{90} - I_{-90})}{2I_0 - I_{180} - I_{-180}} \right) \quad (3.2)$$

Sendo:

I_θ : a intensidade resulta nte em um ponto da imagem para um determinado deslocamento de fase (θ).

Quando um estado uniforme de tensões é aplicado à região de medição o campo de deslocamento radial pode ser determinado a partir da relação linear entre a tensão e o deslocamento. Assim pode-se formular em coordenadas polares (r, θ):

$$u_r(r, \theta) = \frac{(1-\nu)}{2E} r (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{(1+\nu)}{2E} r (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad [3.3]$$

Onde:

r, θ : coordenadas polares (magnitude e ângulo);

σ_1, σ_2 : tensões principais (tensão máxima e tensão mínima respectivamente);

E : Módulo de elasticidade do material;

ν : Coeficiente de Poisson do material;

β : Direção da tensão máxima.

3.3 Método do Furo

A medição de tensões residuais pode ser feita com a Holografia Eletrônica associada ao método do furo, até então utilizado associado a rosetas extensométricas. O método do furo consiste na usinagem incremental de um pequeno furo na superfície de interesse e medir a deformação em volta do furo oriunda do relaxamento da tensão naquele ponto. As principais limitações

desta técnica são a inaplicabilidade quando há grandes gradientes de tensão ao longo da profundidade, bem como a existência de deformações plásticas causadas por tensões induzidas pelo próprio processo de furação, quando as tensões residuais excedem 33 % do valor da tensão de escoamento do material para tensões uniaxiais [10]. Alguns autores defendem que pode se medir até 60 % da tensão de escoamento sem que haja deformações plásticas expressivas na borda do furo [11], mas ainda assim é uma limitação importante. Além disso, não idealidades nos parâmetros geométricos do furo (cilindricidade, ortogonalidade, etc.) podem inutilizar a adoção do modelo matemático simples. Mesmo assim, o método do furo é uma técnica muito reconhecida em aplicações industriais.

O método do furo é geralmente aplicado associado à utilização de rosetas extensométricas, sendo ele neste trabalho associado ao interferômetro radial.

3.3.1 Formulação matemática

Não existe na teoria da elasticidade uma solução exata para a distribuição de tensões ao redor de um furo cego. As soluções existentes são aproximadas e usam constantes determinadas empiricamente [10]. Desta maneira inicia-se a determinação do modelo matemático a ser utilizado no M2TRES com a formulação matemática do furo passante (Eq. 3.4 [9] e Fig. 3.6).

$$u(R, \alpha) = \bar{A}(R)(\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\alpha) \quad (3.4)$$

u_r : deslocamento no sentido radial

σ_1 : tensão máxima (mais trativa)

σ_2 : tensão mínima (mais compressiva)

α : ângulo entre $\sigma_{\text{máx}}$ e u_r (medido no sentido anti-horário)

\bar{A} , \bar{B} : funções de r dadas por:

$$\bar{A}(R) = \frac{1+\nu}{2E} R \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$\bar{B}(R) = -\frac{1+\nu}{2E} R \left[\left(\frac{R_o}{R} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

ν : coeficiente de Poisson

E : módulo de elasticidade

R : o raio de amostragem

R_o : raio do furo

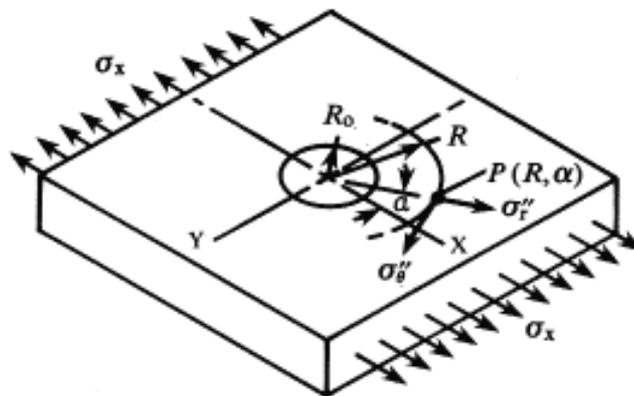


Figura 3.6 Definição dos símbolos utilizados na formulação matemática do método do furo [12]

Obviamente, em aplicações práticas dificilmente se poderia usar um furo passante, portanto correções devem ser aplicadas à fórmula inicial para obter outra que possa ser utilizada no caso do furo cego. A norma ASTM E 837 [9] fornece uma tabela com os coeficientes de correção do furo cego aplicados nas medições utilizando rosetas extensométricas (vide Apêndice A).

No caso da holografia eletrônica, os dados usados para a determinação das tensões residuais são amostrados de forma diferente em relação à extensometria. No M2TRES são realizadas várias medições pontuais distribuídas ao longo de um anel ao redor do furo. Já na extensometria, a região de medição consiste na área da grade do extensômetro. No entanto, dentro dessa área as deformações provocadas pelo alívio de tensões ao redor do furo variam de forma não-linear. Isso faz com que o valor indicado pelo

extensômetro corresponda a uma integração ao longo da área de medição gerando erros conforme apresentado na Tabela 3.1 [13].

Tabela 3.1 Análise dos erros devido à não-linearidade da distribuição radial das tensões [13]

Estado de Tensões Padrão			Resultados	
σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	B [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
100	50	30	94,6	52,4
100	0	30	91,2	6,8
100	-50	30	87,8	-38,8

Albertazzi, Boettger e Kanda simularam e mediram valores para as tensões máxima (σ_1) e mínima (σ_2) [13]. Conforme mostra a Tabela 3.1, o erro é maior quando a diferença entre as tensões máxima e mínima é maior.

Esse efeito pode ser compensado matematicamente, mas para isso deve-se conhecer muito bem as dimensões dos extensômetros.

A combinação desse efeito de integração com a descentragem do furo leva a erros ainda maiores. A compensação matemática destes erros é difícil e geralmente não é feita de forma correta na prática.

No método do furo associado à holografia eletrônica esse problema não ocorre, no entanto é necessária a adoção de novos coeficientes de correção “a” e “b”. Esses coeficientes foram determinados por Makino e Nelson [14] através de análises por elementos finitos e estão relacionados na tabela a seguir.

Tabela 3.2 Coeficientes de correção para o furo cego associado à holografia eletrônica

$R_o/R = \rho$	a	b
0,166	0,1069	0,2865
0,200	0,1456	0,3854
0,250	0,2073	0,5512
0,286	0,2534	0,6792
0,333	0,3136	0,8517
0,400	0,3943	1,0870
0,500	0,5073	1,4170
0,666	0,6808	1,8626

Onde R_o é o raio do furo usinado e R a coordenada radial do ponto de medição.

Então a equação do deslocamento em coordenadas polares devido ao alívio de tensões ao redor do furo pode ser escrita por:

$$u_r(\rho, \theta) = \bar{A} a(\rho) (\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B} b(\rho) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.7)$$

Onde A e B são constantes definidas por:

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

E ρ é a relação entre o raio do furo (R_o) e a coordenada radial do ponto de medição (R).

4

O Sistema de Medição de Tensões Mecânicas e Residuais

Ao contrário do seu antecessor, o modelo atual do MTRES aborda uma filosofia modular, na qual numa base universal podem ser acoplados os módulos de medição, furação ou indentação. Nos próximos três sub-capítulos são mostrados os aspectos construtivos e funcionais de cada uma destas partes individualmente, e no seguinte faremos uma síntese dos aspectos funcionais do M2TRES como um todo.

4.1 Base

A base universal contém, para fixação no corpo de prova, três “unhas” e quatro patas magnéticas (Figura 4.1). Estas patas magnéticas são feitas de ímãs de terras raras dentro de uma cápsula de metal (1). Estes ímãs têm força suficiente para manter fixo o sistema completo (base + módulo de medição ou furação) mesmo de cabeça para baixo. As unhas (2) são na verdade parafusos usados para alterar a altura do cabeçote de medição em relação à superfície do corpo de prova e, dessa forma, ajustar o alinhamento do feixe sobre a superfície. Além disso, as unhas dificultam o deslocamento horizontal da base em relação ao corpo de prova, minimizando o deslocamento de corpo rígido que,

em excesso, poderia comprometer a medição. Foi estimada uma limitação mínima de 180 mm de diâmetro externo para os tubos nos quais o M2TRES for fixado. Com este diâmetro as unhas de fixação formam um ângulo de 13° com a tangente do perfil circular do tubo.

Para a interação com os demais módulos, a base contém um acoplamento isoestático (3) que consiste em três pares de roletes que, juntos com um conjunto de três esferas no módulo a ser acoplado, permitem uma ótima repetibilidade no posicionamento. Para manter a rigidez novamente são utilizados ímãs (4) que também estão presentes nos demais módulos. A orientação entre os ímãs da base e do módulo a ser acoplado forma pares com polaridades iguais. Desta maneira eles se repelem fazendo com que o módulo acoplado seja expulso da base. No entanto, um disco pode ser girado inserindo uma chapa de material ferromagnético (5) entre esses pares fazendo assim com que eles se atraiam quando a chapa estiver presente. Esse sistema permite que o acoplamento e o desacoplamento sejam suaves, prevenindo choques que possam danificar o sistema ou comprometer a medição.

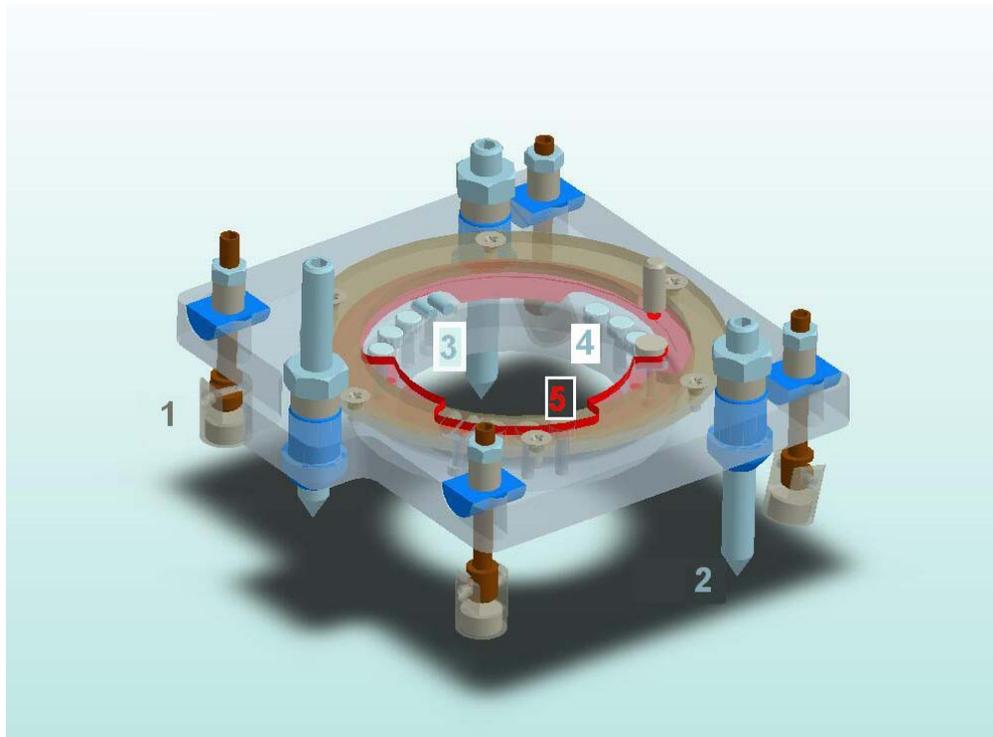


Figura 4.1 Desenho da base com numeração de seus principais componentes

4.2 Cabeçote de Medição

O cabeçote de medição, em comparação aos demais módulos, é certamente o mais importante, e também o mais complexo. Ele é responsável por toda a parte interferométrica e pela aquisição das imagens.

A seguir são listados seus principais componentes e um breve comentário com as características e com a função de cada um no sistema. Cada um destes componentes está indicado numericamente na Figura 4.2.

1. Laser diodo: fornece a luz coerente ao sistema. Está envolto por uma cápsula de alumínio para maior dissipação térmica. A estabilidade térmica é fundamental para garantir estabilidade no comprimento de onda da luz.

2. Espelho plano: posicionado a 45° reflete a luz proveniente do espelho do atuador piezoelétrico em direção da superfície da peça. Contém um furo passante no meio para permitir a passagem do feixe de laser e a visualização da câmera.

3. Espelho cônico: responsável pela iluminação dupla na superfície de medição e pela sensibilidade radial do sistema, conforme relatado no capítulo 3.

4. Lente Colimadora: tornar paralelos os feixes incidentes no espelho cônico.

5. Atuador Piezoelétrico: atua em um espelho plano (6) provocando o deslocamento de fase.

6. Espelho plano do atuador piezoelétrico: junto com o atuador piezoelétrico provoca o deslocamento de fase

7. Câmera CCD: responsável por captar e transmitir na forma digital a imagem da superfície iluminada.

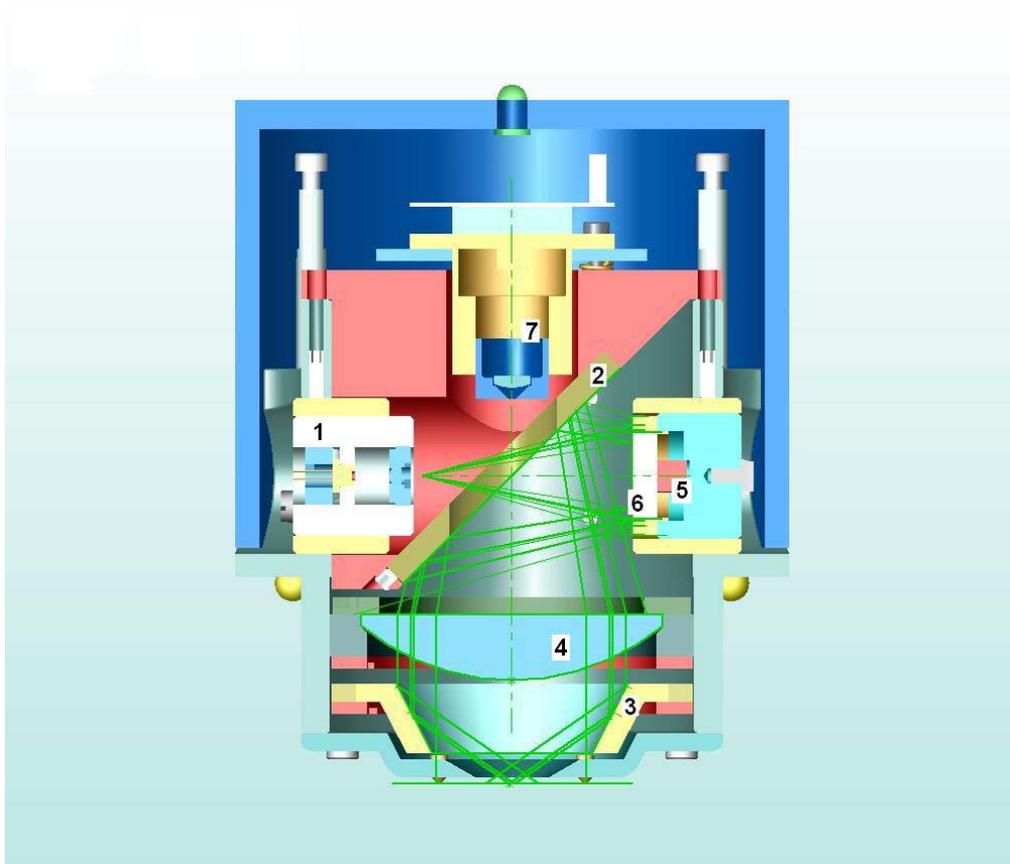


Figura 4.2 Vista em corte do módulo de medição com a identificação dos seus principais componentes

4.3 Cabeçote de Furação

O cabeçote de furação (Figura 4.3) é o módulo responsável pela execução do furo utilizado na medição de tensões residuais. O sistema deve garantir que o eixo de furação coincida com o eixo óptico. Para isso, o cabeçote de furação também é dotado do conjunto de esferas que, junto com os pares de roletes da base permitem uma boa repetitividade no posicionamento (Figura 4.4). Para a usinagem do furo, o cabeçote possui uma furadeira pneumática de alta rotação (300.000 rpm ou mais) que utiliza como broca uma micro-fresa de perfil cônico-invertido e 1,6 mm de diâmetro (Figura 4.5). Para o controle do avanço foi

acoplado um parafuso micrométrico. Há ainda um tubo utilizado para soprar o cavaco gerado pela furação, evitando que este comprometa a superfície de medição e/ou se deposite nas lentes e espelhos do sistema óptico. Todo o sistema é de fácil operação.



Figura 4.3 Módulo de furação

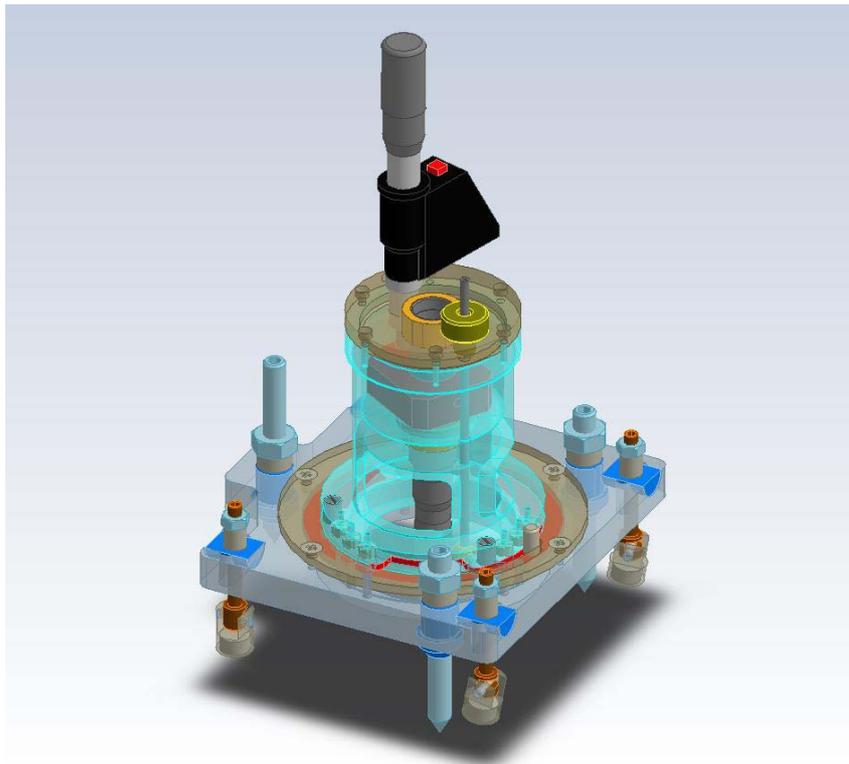


Figura 4.4 Módulo de furação acoplado na base

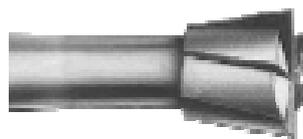


Figura 4.5 Broca utilizada para usinagem do furo [15]

4.4 Uma visão geral do M2TRES

O sistema M2TRES (Figura 4.6) apresenta vantagens funcionais evidentes, principalmente àqueles que já enfrentaram a trabalhosa tarefa de medir tensões utilizando extensômetros. O tempo consumido para se fazer uma medição de tensões residuais com o M2TRES, por exemplo, chega a ser em alguns casos até menos de um décimo do tempo utilizando uma roseta extensométrica. No caso da medição de tensões mecânicas, esta razão pode ser ainda maior. Tudo isso porque a extensometria requer procedimentos de preparação dispensáveis no caso do sistema óptico. O processamento dos dados gerados pelo M2TRES é feito pelo software de forma quase instantânea, gerando prontamente, e de forma clara ao operador, as magnitudes e direções das tensões principais e deformações.



Figura 4.6 M2TRES em operação

Toda essa agilidade do sistema pode se tornar ainda maior com a automatização de algumas tarefas como, por exemplo, a medição do raio do furo e também o controle da intensidade do laser para uma melhor qualidade da imagem.

Uma outra vantagem é que o sistema tem um potencial de confiabilidade muito maior em relação à extensometria. Isto porque a colagem e posicionamento dos extensômetros podem gerar erros que muitas vezes não são percebidos e fazem com que o operador adquira sem saber resultados que não refletem a realidade.

5

Projeto e Construção de uma Bancada de Ensaios

Na maioria das situações, para uma melhor avaliação do desempenho de determinado instrumento é interessante reproduzir em laboratório características que esse instrumento encontrará em campo. Com isso a avaliação se aproxima da situação real e o metrologista pode inclusive deparar-se com problemas que de outra forma não teria conhecimento até que o produto estivesse comercialmente em operação. Pensando nisso, procurou-se projetar e construir um dispositivo padrão de tensões mecânicas utilizando um duto com características daqueles encontrados na indústria do petróleo e gás. Esse dispositivo servirá para a avaliação metrológica e funcional dos protótipos de medição de tensões mecânicas e tensões residuais. Além de incorporar características encontradas em campo, este dispositivo simulador de tensões apresenta outras vantagens em relação a outros dispositivos desenvolvidos para o mesmo fim existentes no laboratório. A principal delas é que, neste caso, a tensão simulada é bidimensional e não apenas em uma direção.

No sub-capítulo 5.1 é descrita a concepção do dispositivo simulador de tensões explicando o seu princípio de funcionamento. No sub-capítulo 5.2 são descritos os procedimentos de ensaio adotados. No sub-capítulo 5.3 são apresentadas as especificações dos componentes principais comparando-as

com as especificações mais freqüentes nos dutos do setor de Petróleo e Gás. Em seguida, no sub-capítulo 5.4 são apresentados os cálculos da avaliação teórica de incertezas do sistema e comparados aos valores desejados. Por fim, o sub-capítulo 5.5 é relata uma simulação em um software de elementos finitos destinada a retratar o perfil de tensões e verificar o resultado dos cálculos efetuados.

5.1 A Concepção do Dispositivo

Em essência, o elemento principal consiste em um duto cheio de água, fechado com flanges em suas extremidades (Figura 5.1), no interior do qual pressão será aplicada. Um dos flanges possui um bocal por onde a bomba injetará óleo sob pressão conhecida e controlada (ver Figura 5.2). Quando a bomba aplica pressão, o óleo age sobre a água e esta por sua vez age sobre as paredes do duto gerando um estado de tensões bem definido nestas.

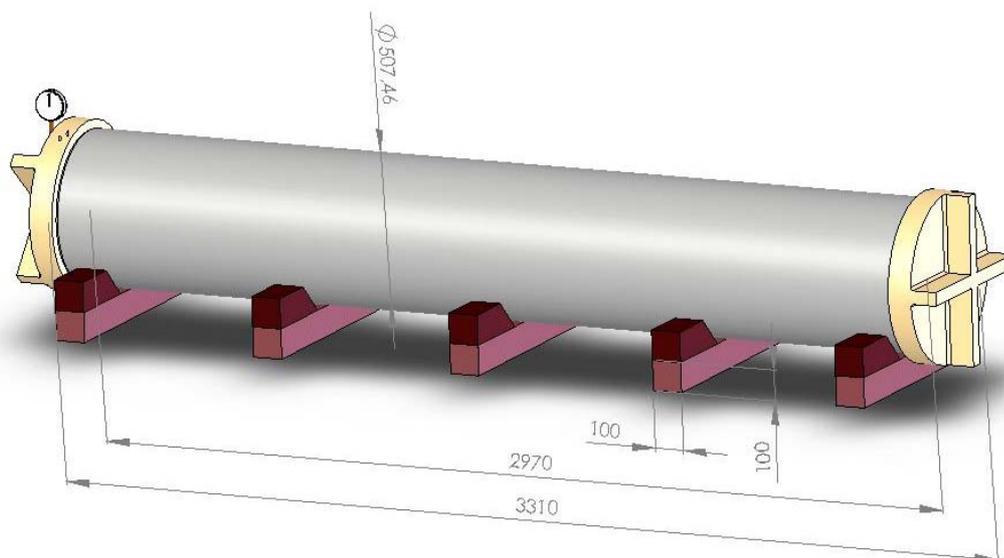


Figura 5.1 Duto simulador de tensões

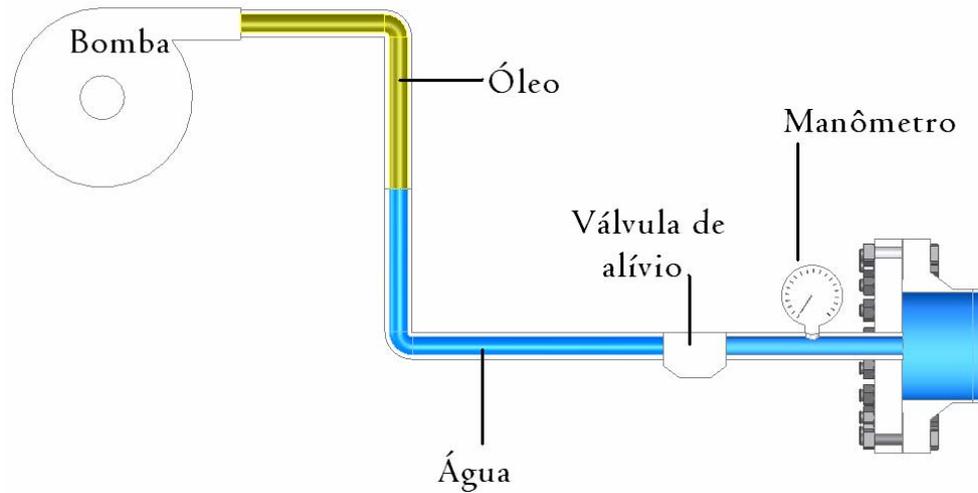


Figura 5.2 Princípio de funcionamento do dispositivo de simulação de tensões

No duto foram coladas oito rosetas de extensômetros, duplas a 90°, distribuídas ao longo de sua parede externa. Foram alinhadas aos eixos axial e circunferencial. Essas rosetas estão conectadas a pontes amplificadoras, por sua vez conectadas ao microcomputador, que monitora os sinais.

A relação entre as dimensões do tubo e a pressão (q) pode ser determinada a partir da Equação 5.1 [16].

$$t = \frac{3p^2rf^2 + p.r.f\sqrt{3(4e^2 - p^2f^2)}}{e^2 - 4p^2f^2} \quad [5.1]$$

5.2 Procedimentos de Ensaio

Nos ensaios com o sistema de medição no duto simulador de tensões foi adotado um procedimento chamado método dos quatro passos, cujo esquema é mostrado na Figura 5.3.

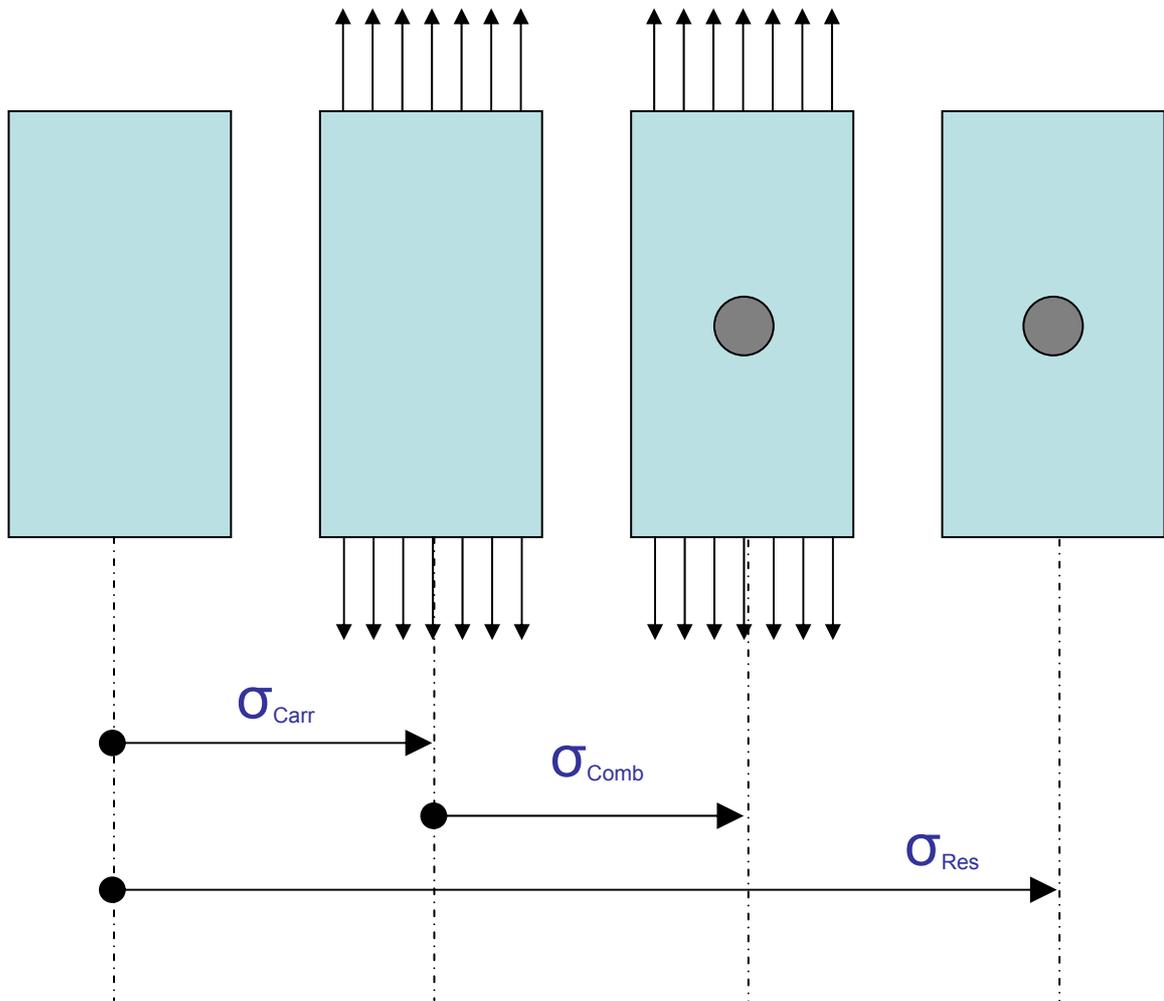


Figura 5.3 Os quatro estados de carregamento nos ensaios com o duto simulador de tensões

Estado 1: corpo descarregado.

Estado 2: corpo carregado.

Estado 3: corpo carregado e com furo cego

Estado 4: corpo descarregado e com furo cego.

O primeiro procedimento é naturalmente posicionar o M2TRES na superfície do tubo e alinhá-lo. A preferência é que a medição seja feita próxima à linha neutra para minimizar a influência da tensão de flexão e próxima a alguma roseta extensométrica para uma maior confiabilidade na comparação de resultados. Então, sem pressão no interior do duto e conseqüentemente sem tensão em suas paredes, as pontes amplificadoras são zeradas e um primeiro mapa de fases (1) de referência é adquirido pelo M2TRES. Feito isso, é então aplicada pressão através da injeção de óleo no interior da câmara até o manômetro indicar a pressão desejada para o ensaio. Nesse ponto é então adquirido mais um mapa de fases (2) que, subtraído do primeiro (1), indica o valor de tensão mecânica induzida no tubo pelo carregamento (σ_{carr}) (ver Figura 5.3). O próximo passo é a execução do furo e em seguida a aquisição de um terceiro mapa de fases (3). A diferença de fase entre este e o segundo permite a determinação da tensão combinada através método do furo (σ_{comb}). Este valor é a combinação da tensão originada pelo carregamento e as tensões residuais já existentes naquele ponto da estrutura. Por fim, é feito o alívio da pressão interna no tubo e é adquirido um quarto mapa de fases (4). A diferença de fase entre este o anterior nos dá o valor da diferença de tensão no descarregamento (σ_{descar}) e deve ser bem próximo ao valor de (σ_{carr}) em módulo. O quarto mapa de fases também deve ser analisado tomando o primeiro como referência (σ_{res}). O resultado deste passo é, assim como em σ_{comb} , determinado pela presença do furo mas é resultado apenas o valor da tensão residual existente naquele ponto, e não mais a tensão combinada. É fácil perceber que o valor determinado em σ_{comb} deve ser na teoria a soma dos resultados de σ_{carr} e σ_{res} , diferenças nessa comparação decorrem das incertezas do próprio sistema e/ou metodologia empregada na medição. O valor da tensão devido ao carregamento (σ_{carr}) deve ser comparado aos valores de deformação indicados pelos extensômetros e ao respectivo valor de pressão indicado pelo manômetro.

Idealmente seriam esperadas tensões similares nos vários extensômetros. No entanto, em função de variações das dimensões da parede do duto e possíveis variações nas propriedades elásticas do material, diferenças

são esperadas e incorporadas às incertezas com que é possível caracterizar o desempenho do sistema. A influência das deformações causadas pelo peso próprio nas diferentes regiões do duto será avaliada pelos diferentes valores indicados pelas rosetas extensométricas. Uma idéia é utilizar um modelo elástico para prever e compensar as componentes sistemáticas de tensão induzidas pelo peso próprio. Outra alternativa é, conforme já mencionado anteriormente, realizar as medições de tensões apenas na região da linha neutra, onde não há efeitos de flexão devido ao peso próprio (Figura 5.4).



Figura 5.4 Ensaio em curso, realizado na linha neutra do duto

5.3 Especificações de Componentes

O tubo utilizado como dispositivo de simulação de tensões residuais apresenta as seguintes características:

Material: Aço API 5L grau b

Composição: Carbono 0,20 %, Manganês 1,15 %, Silício 0,35 %, Fósforo 0,025 %, Enxofre 0,025 %, Nióbio até 0,065 %, Titânio até 0,030 %,

Constantes elásticas [17]: tensão de escoamento 294 MPa, tensão de ruptura 423 MPa, módulo de elasticidade (E) 208 GPa, coeficiente de Poisson (ν) 0,285.

Dimensões (dados de catálogo, ver Apêndice B): Três metros de comprimento, com diâmetro externo de 508 mm (nominal: 20 polegadas) e 9,5 mm de espessura de parede.

Foram efetuadas medições da geometria externa do duto utilizando o braço de medição ROMER, que apresenta uma incerteza pontual de 0,2 mm. Para isso foram criados dezoito planos imaginários perpendiculares ao eixo longitudinal do tubo e distantes 100 mm entre si. Por limitações dimensionais do braço essa análise foi feita apenas na região central do tubo, de 0,65 m até 2,35 m aproximadamente. Em cada plano foram adquiridos diversos pontos na superfície do tubo (Figura 5.5) e como resultado dessas medições encontrou-se um diâmetro médio de 507,46 mm com desvio padrão de 0,92 mm. A Figura 5.6 mostra o perfil de variação do diâmetro do duto ao longo do seu eixo longitudinal.

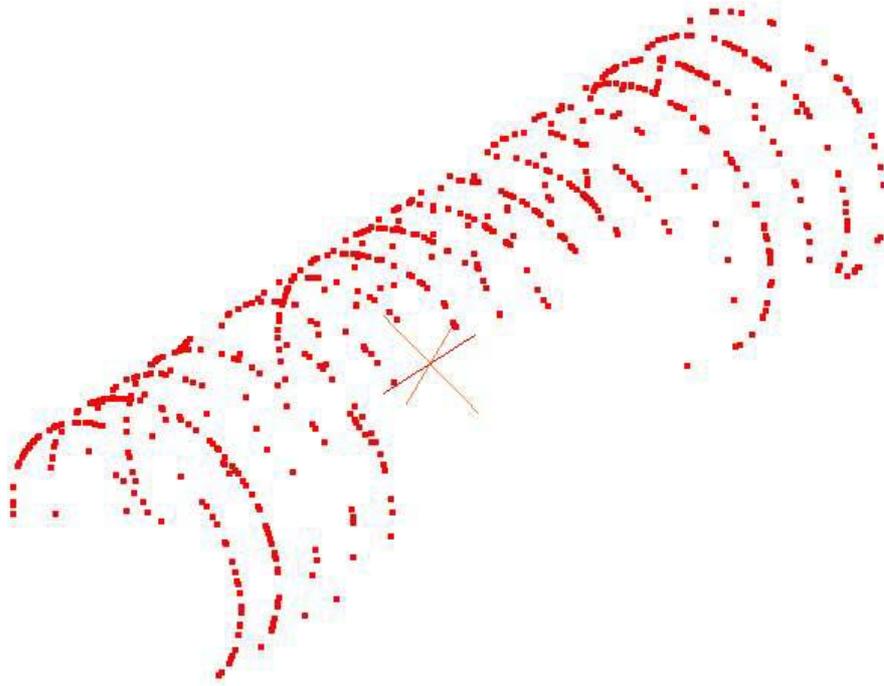


Figura 5.5 Anéis de pontos de medição

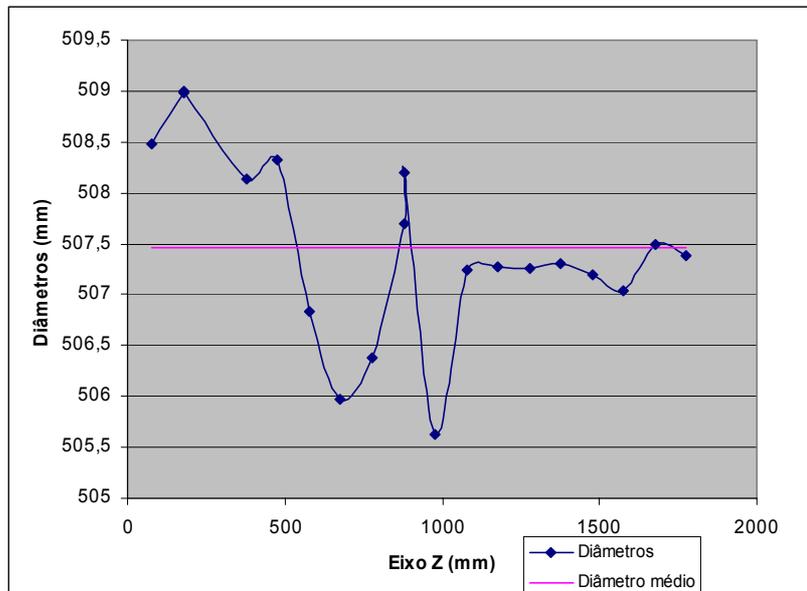


Figura 5.6 Perfil do diâmetro externo do duto

O manômetro utilizado para indicar a pressão do sistema é um manômetro utilizado na indústria petroquímica que pode trabalhar tanto com óleo quanto com água. Este equipamento apresenta exatidão classe A1, de $\pm 1\%$ do valor final da escala que é de 60 kgf/cm^2 (Figura 5.7) [17].



Figura 5.7 Manômetro [17]

Foi utilizada também uma bomba hidráulica de acionamento manual de um estágio e ação simples.

5.4 Avaliação Teórica de Incertezas

As principais fontes de incerteza estão divididas em quatro grupos principais: incertezas do sistema de referência, incertezas devidas ao peso próprio do duto cheio de água, incertezas nos valores das dimensões e propriedades mecânicas do material do duto (Figura 5.8).

Como nos ensaios os valores de tensão mecânica medidos pelo equipamento em prova serão comparados, tanto com o respectivo valor de tensão calculado a partir da pressão indicado pelo manômetro, quanto com os respectivos valores de deformação indicados pelos extensômetros, foram efetuadas duas análises de incertezas da tensão gerada. Uma em relação às tensões calculadas em função do valor da pressão indicada (Análise de Incertezas 1) e outra calculada a partir do valor médio de deformação indicada pelos extensômetros (Análise de Incertezas 2).

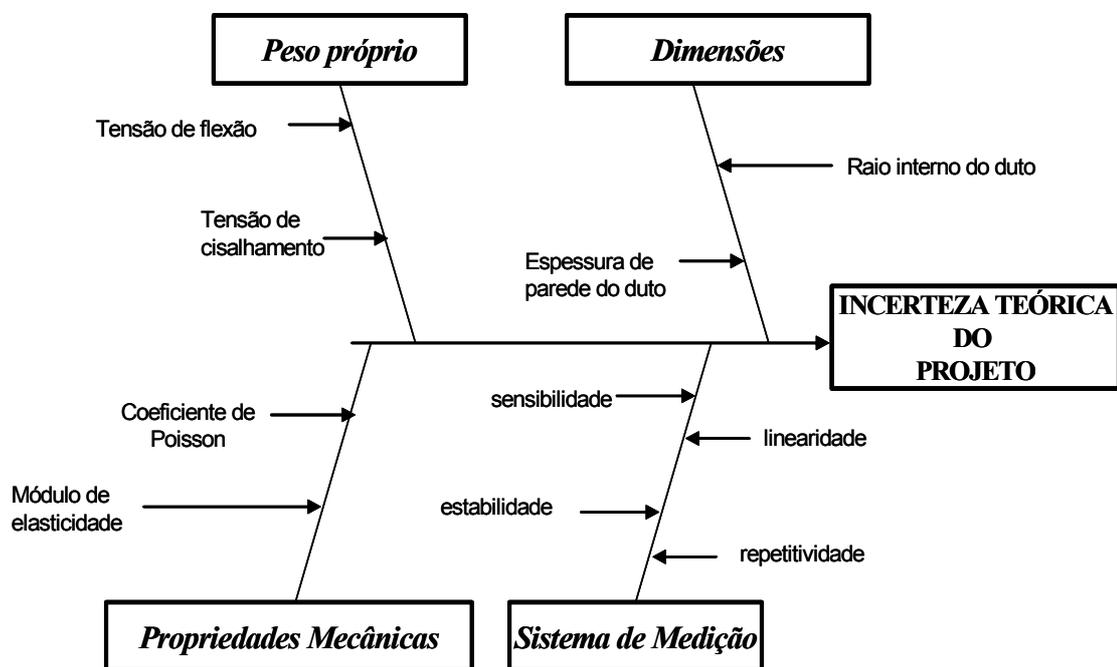


Figura 5.8 Fontes de incerteza na determinação da tensão de referência

5.4.1 Análise de Incertezas 1 – Tensões calculadas a partir da pressão

Utilizando cinco apoios distribuídos ao longo da extensão do duto, a contribuição das tensões de flexão e cisalhamento devida ao peso próprio no balanço de incertezas é inferior 0,5 MPa. Como essa contribuição não é constante ao longo do duto não será tratada como sistemática e sim como mais uma componente aleatória que afeta a incerteza do sistema. Esse valor significa uma componente de incerteza de no máximo 1%, visto que a tensão de trabalho não deve ser inferior a 50 MPa. No entanto, esta componente de incerteza não afeta a simulação de tensões mecânicas já que essa grandeza é determinada através de uma medição diferencial. Quando as medições são feitas na lateral do duto, que corresponde à linha neutra desta componente de flexão, este problema desaparece.

Para a simulação de tensões residuais, além das tensões induzidas pelo peso próprio do duto, deve-se levar em conta também as tensões residuais remanescentes após o tratamento térmico, que, na prática, nunca é perfeito. Entretanto, só com uma análise experimental pode se quantificar esta contribuição de incerteza. Além disso, no procedimento de ensaio utilizado (método dos quatro passos) o valor das tensões residuais no duto está presente nos dois estados comparados, não oferecendo nenhuma influência nos resultados da comparação. Assim, optou-se por desconsiderá-la nesta análise teórica.

Foi considerada uma tolerância na espessura da parede devido à laminação de 12,5% (dado de fornecedores do duto) e uma tolerância do raio interno de 3,5 mm. O manômetro, conforme já foi mencionado anteriormente, apresenta uma incerteza de 1% do valor do fim da escala. Isso significa uma incerteza de 0,06 MPa de pressão.

Tabela 5.1 Balanço de incertezas para tensão mecânica

Simb.	Ident.	Valor da grandeza	Valor Bruto	Distrib.	Divisor	Incerteza Padrão (u _i)	Incert. Pad. relativa	ν
p	pressão (MPa)	6,0	0,06	retangular	1,73	0,035	0,0058	∞
t	espessura (mm)	9,5	1,19	retangular	1,73	0,687	0,072	∞
R'	raio interno (mm)	245	3,5	retangular	1,73	2,02	0,0082	∞
u _c	incerteza combinada				2		0,073	∞
U _{95%}	incerteza expandida						14,6 %	

Tabela 5.2 Balanço de incertezas para tensão residual

Simb.	Ident.	Valor da grandeza	Valor Bruto	Distrib.	Divisor	Incerteza Padrão (u _i)	Incert. Pad. relativa	ν
p	pressão (MPa)	6,0	0,06	retangular	1,73	0,0346	0,0058	∞
t	espessura (mm)	9,5	1,19	retangular	1,73	0,687	0,0723	∞
R'	raio interno (mm)	245	3,5	retangular	1,73	2,02	0,00825	∞
	tensão de flexão e cisalhamento (MPa)	50	0,5	retangular	1,73	0,289	0,00577	∞
u _c	incerteza combinada				2		0,073	∞
U _{95%}	incerteza expandida						14,65%	

A incerteza expandida calculada é de 14,6 % para a simulação de tensão mecânica e 14,65 % para a simulação de tensão residual na parede do duto calculada em função da pressão indicada pelo manômetro.

5.4.2 Análise de Incertezas 2 – Tensões calculadas a partir da deformação

Na opção de utilização das tensões mecânicas medidas a partir do conjunto de rosetas extensométricas conectado à ponte amplificadora, algumas fontes de incerteza desaparecem e outras, novas, surgem. Devem ser acrescentadas à incerteza do conjunto as incertezas trazidas pelos extensômetros e ponte amplificadora, estimadas como sendo em torno de 2 % e do módulo de elasticidade, estimada como sendo 3 %. A incerteza relacionada ao manômetro não se aplica neste caso. Foram utilizadas oito rosetas extensométricas distribuídas em dois anéis na superfície externa do duto. Cada um deles a uma distância de aproximadamente um metro de cada extremidade do duto.

As variações encontradas entre as deformações medidas nos diferentes extensômetros, nas diferentes regiões do corpo de prova, devem ser tratadas com um cuidado especial. Duas causas principais podem ser enumeradas: (a) efeito da flexão devido ao peso próprio do duto cheio d'água e (b) variações naturais na geometria ou nas propriedades mecânicas do duto. A ação da flexão provocada pelo peso próprio do duto não é um grande problema. Não tem nenhuma influência na medição das variações de tensões mecânicas. Seu efeito pode ser minimizado se for matematicamente compensado ou se a medição for feita na posição da linha neutra do duto. No momento da medição da tensão média que age no duto, o efeito da flexão devido ao peso próprio pode ser compensado se pares de extensômetros forem posicionados em regiões diametralmente opostas do duto. As variações decorrentes da não uniformidade da geometria e das propriedades mecânicas do duto não podem ser

compensadas e contribuirão para aumentar a incerteza com que é possível definir o valor de referência para a tensão residual simulada.

Como a influência das tensões residuais remanescentes do tratamento térmico e desta vez a ação da flexão também é desconsiderada, o balanço de incertezas é o mesmo para tensão mecânica e tensão residual.

Tabela 5.3 Balanço de incertezas para tensão mecânica e residual a partir da deformação

Símb.	Ident.	Valor da Grandeza	Valor Bruto	Distrib.	Divisor	Incerteza Padrão (u_i)	Incert. Pad. relativa	ν
Re	Repetitividade da medição de deformação	-	0,00707	normal	1	0,00707	0,00707	7
E	Módulo de elasticidade (MPa)	210000	6300	retangular	1,73	3642	0,0173	∞
t	Espessura (mm)	9,5	1,19	retangular	1,73	0,688	0,0724	∞
R'	Raio interno (mm)	245	3,5	retangular	1,73	2,023	0,00826	∞
u_c	incerteza combinada				2		0,0752	89750
$U_{95\%}$	incerteza expandida						15,0%	

Nesta nova condição a incerteza expandida estimada está em torno de 15 % para as tensões mecânica e residual simuladas a partir de um respectivo valor médio de deformação indicado pelos extensômetros. Este valor ainda não satisfaz os requisitos metrológicos do projeto. Seria desejável incerteza da ordem de 5 % para simulação das tensões residuais e 3% para as tensões mecânicas.

O caminho natural está em tentar minimizar as fontes de incerteza mais significativas. Analisando os balanços de incerteza nota-se claramente que a grande responsável pela incerteza global desta magnitude é a incerteza na espessura da parede do duto (Figura 5.9). As especificações do fabricante do duto afirmam uma tolerância de 12,5 % devido à laminação. Não há muito o que fazer para reduzir esta incerteza. No entanto, conhecendo localmente o valor da espessura da parede no ponto onde será efetuada a medição, poderá ser aplicada uma correção no valor de tensão esperado. Para isso deverá ser usado, para medir a parede do duto, um sistema de ultra-som (Figura 5.10), que apresenta uma incerteza típica de $\pm (0,5 \% + 0,1 \text{ mm})$. Com estes novos parâmetros, a incerteza estimada da medição de tensão, cairia para 3 %. Além disso, medindo a espessura em diversos pontos do duto pode-se determinar uma eventual tendência e corrigi-la numericamente.

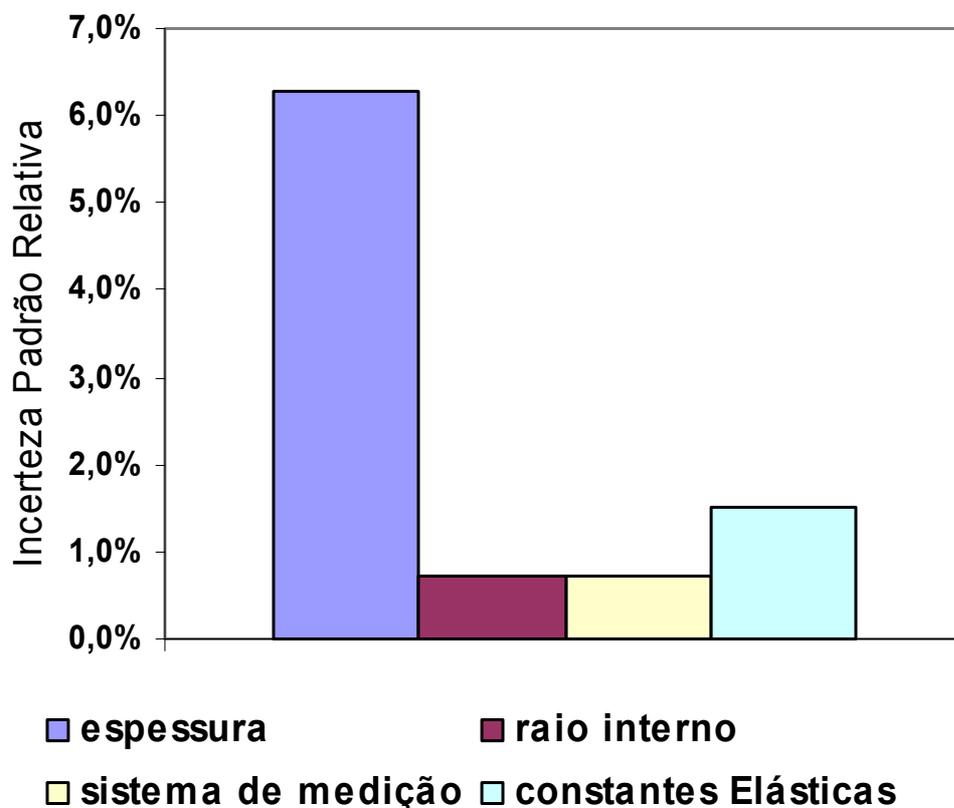


Figura 5.9 Comparação entre as contribuições de incertezas



Figura 5.10 Sistema de ultra-som para medição de espessura de paredes [19].

5.5 Verificação por Elementos Finitos

Com o objetivo de certificar que somente a monitoração da espessura seja suficiente para melhorar o nível de incertezas do dispositivo, uma simulação por elementos finitos, foi realizada com o objetivo de verificar o estado de tensão do dispositivo em função da variação da espessura do duto.

A tolerância de 12,5% resulta do processo de fabricação do duto, que gera ondulações na espessura da parede do duto. Os efeitos destas ondulações no estado de tensões no duto foram analisados por intermédio do MEF (Método de Elementos Finitos). A intenção é verificar se, com a medição da espessura, é possível compensar de forma eficaz este efeito.

O software utilizado foi o Ansys 5.3[®], e as especificações da simulação foram as seguintes:

- (1) modelo 2D com condição de axisimetria e elemento Plane82, 8 nós e 2 graus de liberdade nas direções “x” e “y”, perfazendo um total de 4.008 elementos e 14.417 nós.
- (2) foram aplicadas variações periódicas (senoidais) de espessura na parede externa do tubo. A Figura 5.10 representa esta variação de espessura simulada, sendo mantida dentro das especificações do fabricante.
- (3) Uma das extremidades do tubo teve todos os graus de liberdade restringidos, enquanto a outra teve somente o movimento radial restringido.
- (4) A pressão interna de simulação adotada foi de 6 MPa.

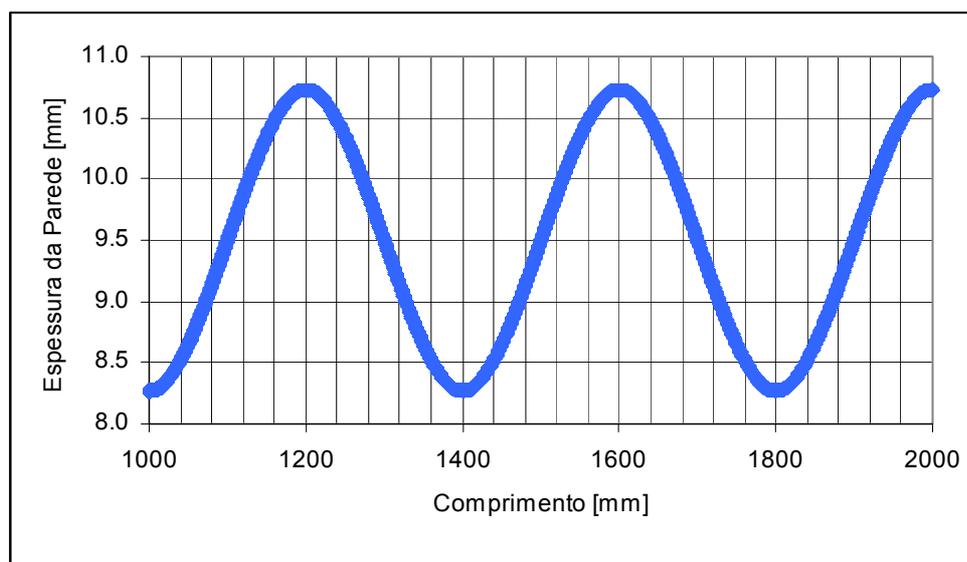


Figura 5.11 Variação de espessura simulada em função do comprimento do corpo de prova

Uma solução analítica pode ser encontrada em Young [16], para relação: $r / t > 10$, vasos de pressão de paredes finas, ou seja:

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \tag{5.2}$$

sendo:

p	pressão
r	raio interno
t	espessura da parede
σ_1	tensão principal na direção 1 (direção circunferencial)

Da equação 5.1 observa-se que, como esperado, a variação do valor de tensão se dá na direção inversa da variação da espessura. As tensões calculadas pelo MEF e as calculadas a partir da equação 5.2 considerando a variação da espessura ponto a ponto, estão representadas na Figura 5.11. Observa-se uma pequena diferença, de característica predominantemente sistemática que pode ser experimentalmente corrigida através de uma calibração e/ou do refino do modelo numérico. Estima-se que a contribuição da correção da espessura no balanço de incertezas seja inferior a 1%.

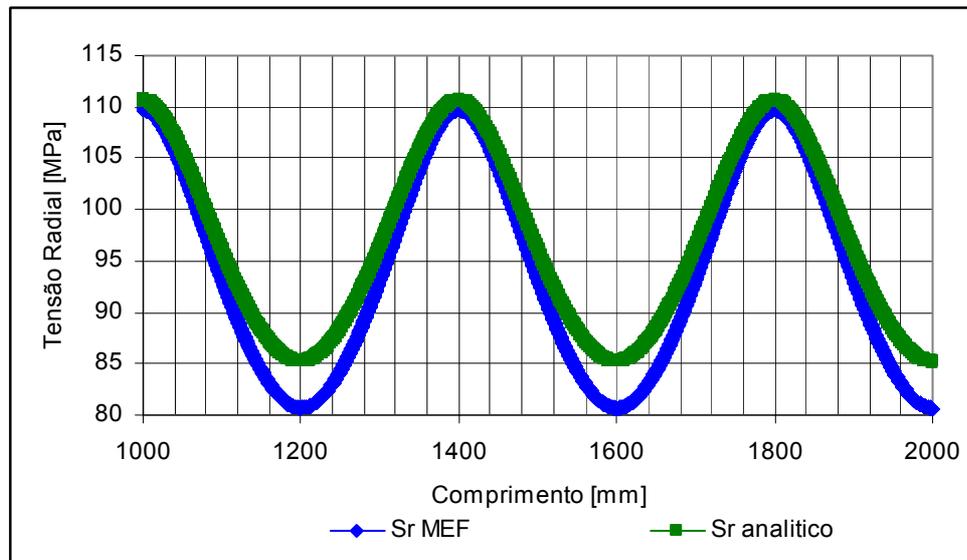


Figura 5.12 Variação da tensão circunferencial em função da espessura da parede do corpo de prova ao longo do comprimento do corpo de prova

Tabela 5.4 Balanço de Incertezas para cálculo da tensão mecânica

Simb.	Ident.	Valor da Grandeza	Valor Bruto	Distrib.	Divisor	Incerteza Padrão (u_i)	Incert. Pad. relativa	ν
p	pressão (MPa)	6	0,06	retangular	1,73	0,0346	0,00577	∞
t	espessura (mm)	9,5	0,1475	retangular	1,73	0,0737	0,00896	∞
R'	raio interno (mm)	245	3,5	retangular	1,73	1,75	0,0135	∞
u_c	incerteza combinada				2		0,0135	∞
$U_{95\%}$	incerteza expandida						2,70%	

Tabela 5.5 Balanço de Incertezas para cálculo da tensão residual

Simb.	Ident.	Valor da Grandeza	Valor Bruto	Distrib.	Divisor	Incerteza Padrão (u_i)	Incert. Pad. relativa	ν
p	pressão (MPa)	6	0,06	retangular	1,73	0,0346	0,00577	∞
t	espessura (mm)	9,5	0,1475	retangular	1,73	0,0852	0,00896	∞
R'	raio interno (mm)	245	3,5	retangular	1,73	2,02	0,00825	∞
	tensão de flexão e cisalhamento (MPa)	50	0,5	retangular	1,73	0,289	0,00577	∞
u_c	incerteza combinada				2		0,0147	∞
$U_{95\%}$	incerteza expandida						2,94 %	

Com essas novas considerações foram estimadas incertezas de 2,70 % para tensões mecânicas e 3 % para tensões residuais. Ambas calculadas a partir da pressão de trabalho e, assim, livres das incertezas relacionadas às constantes elásticas do material. Estes valores satisfazem os requisitos metrológicos do sistema justificando sua construção.

6

Avaliação do Sistema de Medição

A avaliação metrológica e funcional do protótipo é o tema central de todo o trabalho e é com base nos resultados desta avaliação que se concluirá a respeito do atual potencial de exploração comercial do sistema. No entanto antes de iniciar qualquer avaliação é importante ressaltar quais são os requisitos do sistema, quais as metas que se deseja que ele alcance. Por isso este capítulo é iniciado com uma breve, mas importante seção onde são descritos esses requisitos. Em seguida são apresentados os resultados e detalhes da avaliação metrológica e funcional do sistema.

Para essa avaliação foram efetuados diversos ensaios, tanto no duto simulador de tensões bidimensionais descrito no capítulo anterior, quanto em um padrão uniaxial de tensões.

Esse padrão consiste em uma barra fina de aço carbono 1020 tracionada por suas extremidades (Figura 6.1a). Esta barra tem cerca de três metros de comprimento, 50 mm de largura e 5 mm de espessura, e foi submetida a um tratamento térmico para alívio de tensões. Na sua superfície superior e inferior foram posicionados um total de dez extensômetros de resistência para a monitoração do valor e uniformidade da deformação aplicada (Figura 6.2). Estes extensômetros são conectados a uma ponte amplificadora que por sua vez é conectada a um micro-computador onde os valores de deformação podem ser monitorados e armazenados. A superfície da barra é também onde são

efetuados os ensaios com o M2TRES (Fig 6.1b).

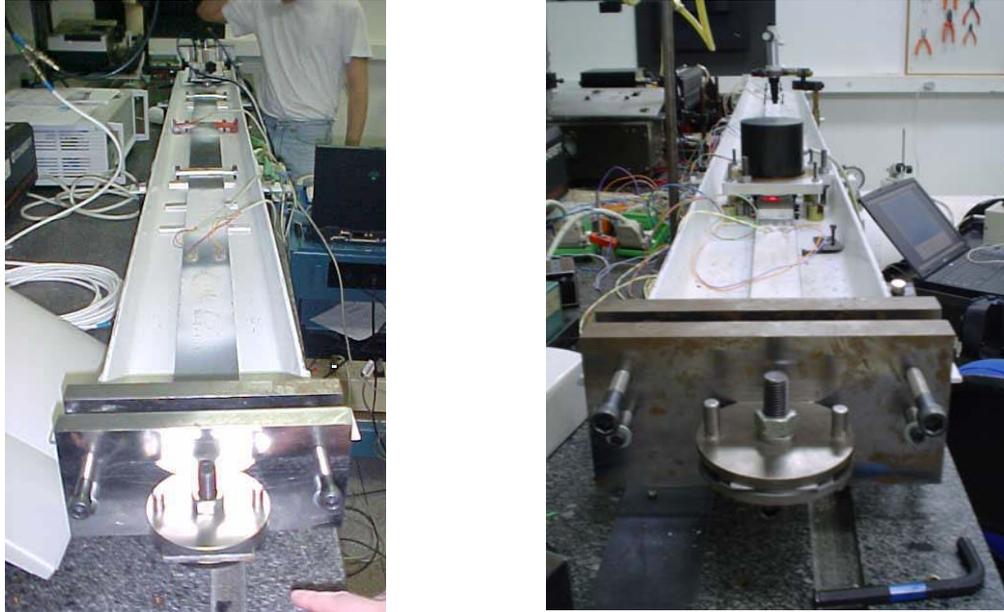


Figura 6.1 (a) Dispositivo de simulação de tensões uniaxiais (b) M2TRES posicionado no padrão

Vista Superior



Vista Inferior



Figura 6.2 Posicionamento dos extensômetros

Conforme visto no Capítulo 3, as principais propriedades mecânicas do material em prova, como por exemplo o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, são levadas em conta na determinação do valor medido. Após sofrer um recozimento, o aço 1020 tem essas propriedades mecânicas alteradas. Sendo assim, o módulo de elasticidade nesse caso é de (200 ± 10) GPa, o coeficiente de Poisson é $(0,290 \pm 0,015)$ e a tensão de escoamento é (295 ± 30) MPa [20].

Os ensaios no duto foram analisados comparando-se os valores das tensões de carregamento medidas com os respectivos valores de deformação indicados pelos extensômetros posicionados na parede do duto e com os valores esperados de tensões calculados a partir do valor de pressão indicado pelo manômetro. Além disso, o valor da tensão combinada (carregamento + tensões residuais) obtida através do método do furo é comparado com a soma do valor da tensão de carregamento com a tensão residual, conforme o método dos quatro passos explicado no capítulo 5.

Nos ensaios com o padrão de tensões uniaxiais os resultados das tensões medidas e seus respectivos valores de deformação são comparados apenas com os valores de deformação indicados pelos extensômetros instalados na superfície da barra.

6.1 Análise de requisitos do sistema

Os principais requisitos do sistema óptico para medição de tensões foram especificados, na sua maioria, para superar os aspectos negativos dos demais métodos de medição. Isso porque, é superando pontos fracos de outras técnicas que o produto se torna diferenciado, chamando a atenção do cliente.

- Baixa incerteza: um dos principais requisitos, senão o principal, é atingir a meta metrológica desejada. O sistema deve apresentar resultados confiáveis mantendo o nível de erro dentro dos limites aceitáveis. Um erro máximo em torno de 5 % do valor medido

seria o ideal. Mas erros de até 15 % ainda seriam considerados aceitáveis permitindo que o sistema desempenhe sua função.

- Medição rápida: é importante para o cliente que o sistema permita ao operador efetuar medições em curto espaço de tempo. Este requisito está intimamente ligado ao requisito de baixo custo do ensaio, isto é, o custo por ponto de medição. Na medição com rosetas extensométricas, por exemplo, um operador experiente leva pelo menos 60 minutos para efetuar uma medição, levando-se em conta o tempo de preparo da superfície (lixar e limpar), colagem do extensômetro, usinagem e medição do raio do furo. Considerando a possibilidade real de insucesso na colagem ou na medição, o tempo médio de cada medição pode aumentar ainda mais, impossibilitando o operador de efetuar dezenas de medições em um mesmo dia de trabalho. Sendo assim, qualquer ganho do sistema óptico em matéria de tempo de medição é muito bem-vindo. A intenção é que, em condições normais de operação, o sistema leve no máximo dez minutos para efetuar cada medição.
- Facilidade operacional: um sistema difícil de operar acarreta em uma dependência de recurso humano que não é desejável. É interessante que um técnico com uma experiência média possa operar o sistema com um pequeno treinamento, ainda assim mantendo uma grande possibilidade de sucesso de cada medição.
- Segurança: a segurança, tanto do operador quanto da estrutura em prova é essencial.
- Baixo custo por ponto medido: na maioria das vezes o custo é uma das primeiras questões levadas em conta quando se deve escolher entre um e outro caminho.
- Fácil interpretação dos resultados: os resultados devem ser apresentados pelo sistema de forma clara e direta, fornecendo todos os tipos de dados que possam interessar ao usuário e sem necessidade de processamento posterior por parte deste.

6.2 Resultados

Inicialmente os ensaios no duto não vinham satisfazendo inteiramente a relação do método dos quatro passos (ver seção 5.2). Alguns resultados eram coerentes e outros não respeitavam essa relação. Uma atenta investigação experimental revelou uma forte correlação entre o sucesso da medição e a qualidade do furo. Rodacoski [11] afirma que as rebarbas se mantêm dentro de uma borda de 0,05 mm ao redor do furo, não atingindo a área de medição, e que por isso não prejudicam a amostragem de deslocamentos por holografia eletrônica. No entanto, um furo com muitas rebarbas, mesmo que estas não atinjam a área de medição, trás indícios de alguns problemas. As rebarbas podem indicar que a furação não se deu de forma suave, podendo ter induzido novas tensões residuais durante a furação. Pode também provocar o descolamento da tinta que reveste a superfície medida tornando distintos os campos de deslocamentos da superfície da tinta e o verdadeiro campo de deslocamentos do aço resultante do alívio de tensões provocado pela introdução do furo. Além disso, é muito difícil determinar o raio efetivo de um furo imperfeito (Figura 6.3 a), uma variável muito importante no cálculo das tensões em função do deslocamento radial. Em conseqüência disso, procurou-se tomar um maior cuidado no avanço da broca antes do primeiro contato com a superfície do material para evitar uma remoção abrupta do cavaco e, conseqüentemente, a formação de rebarbas. Com isso, o índice de aproveitamento dos ensaios superou os 90 %.

Para ilustrar bem as características de um furo imperfeito escolheu-se um exemplar de qualidade muito ruim, mostrado na Figura 6.3 a. O furo em questão apresenta rebarbas por praticamente toda a sua extensão.

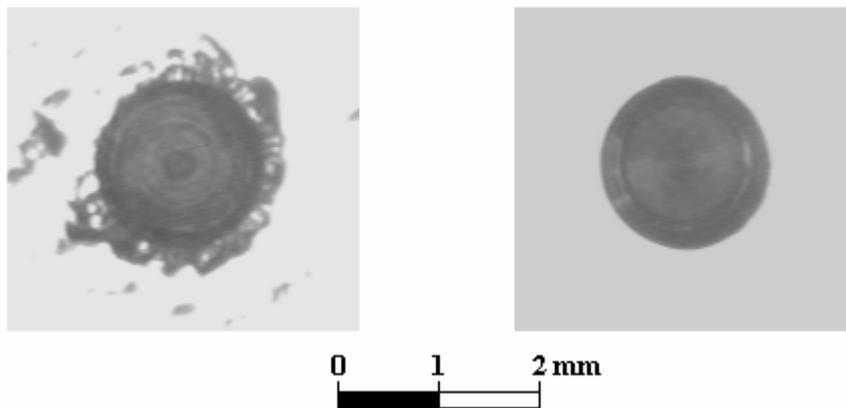


Figura 6.3 (a) Furo imperfeito, medição comprometida (b) Furo adequado, sem rebarbas.

Da mesma maneira que no duto, tentou-se também conseguir furos de boa qualidade no padrão unidimensional. Entretanto, descobriu-se ser mais difícil nesse último caso. A principal suspeita é que isso ocorra devido à baixa rigidez da barra no sentido normal ao plano de medição, fazendo esta atuar como um feixe de molas e impedindo que as primeiras camadas do material sejam arrancadas de forma suave. Apesar de ser utilizado um apoio de altura ajustável sob a área de medição, o problema, ainda que menor, persiste, visto que há uma preocupação em não exagerar na altura deste apoio de modo que este não gere novas tensões desconhecidas na superfície de medição que, por sua vez, se manifestariam nos resultados, inviabilizando as comparações.

6.2.1 Ensaios no padrão uniaxial de tensões – resultados e considerações

No padrão de tensões uniaxiais foram efetuados ensaios com diferentes valores de carregamento. Além disso, foram efetuados alguns ensaios com a barra descarregada para avaliar a influência das tensões residuais remanescentes no corpo de prova e das tensões induzidas pela usinagem do furo. Foram efetuados também alguns ensaios com um mesmo carregamento para verificar a repetitividade dos resultados.

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os resultados dos experimentos no padrão de tensões uniaxiais. Cada coluna representa um experimento, onde são apresentados os resultados da extensometria e da medição com o M2TRES: os valores em $\mu\text{m}/\text{m}$ de deformação indicados por cada um dos dez extensômetros (E1 a E10) são mostrados nas linhas preenchidas em amarelo. O valor médio e desvio padrão da deformação (em termos absolutos e relativo ao valor médio), e o respectivo valor em tensão mecânica, calculado a partir do valor médio de deformação através da lei de Hooke [Equação 6.1], são mostrados nas quatro linhas seguintes. Os resultados do sistema óptico são apresentados na seqüência: valores das tensões principais em MPa, direção da tensão principal (σ_1), as respectivas deformações principais, a razão entre os dois valores de deformação, a qualidade e o raio do furo. A qualidade do furo é um atributo subjetivo, registrado em todos os ensaios, mas que não foi usado para excluir resultados. Foi considerado bom o furo com a geometria aparente perfeita, livre de rebarbas. Foi considerado razoável o furo com alguma rebarba ou irregularidade, e ruim aquele completamente irregular, cuja determinação do raio se torna difícil.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (6.1)$$

Onde:

σ : Tensão mecânica;

E : Módulo de Elasticidade;

ε : Deformação mecânica.

Tabela 6.1 Resultados dos experimentos no padrão unidimensional, furos de 1 a 8

	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08
E1 ($\mu\text{m/m}$)	-2,0	6,0	-9,0	148,3	146,2	291,4	437,5	437,2
E2 ($\mu\text{m/m}$)	-7,0	-1,0	7,0	147,2	144,9	295,7	439,3	439,3
E3 ($\mu\text{m/m}$)	8,0	5,0	-8,0	149,6	149,0	304,2	458,4	458,3
E4 ($\mu\text{m/m}$)	7,0	3,0	9,0	142,8	141,2	292,7	434,0	434,1
E5 ($\mu\text{m/m}$)	-6,0	-2,0	-1,0	144,7	145,1	294,9	429,1	427,7
E6 ($\mu\text{m/m}$)	-45,0	-42,0	1,0	146,6	145,6	294,4	445,2	446,2
E7 ($\mu\text{m/m}$)	3,0	3,0	6,0	147,8	146,3	296,3	443,0	442,3
E8 ($\mu\text{m/m}$)	-9,0	-8,0	2,0	145,4	144,8	293,5	439,0	438,5
E9 ($\mu\text{m/m}$)	-7,0	-7,0	-4,0	148,3	149,2	302,3	451,3	451,2
E10 ($\mu\text{m/m}$)	-1,0	0,0	-8,0	147,2	149,3	302,2	453,0	453,3
Média ($\mu\text{m/m}$)	-5,9	-4,3	-0,5	146,8	146,2	296,8	443,0	442,8
S	15,0	14,0	6,6	2,0	2,5	4,5	9,1	9,4
S(%)	-253,9	-326,7	-1324,1	1,36	1,72	1,51	2,05	2,13
σ (MPa)	-1,18	-0,86	-0,1	29,36	29,23	59,35	88,60	88,56
Resultados Holografia								
σ 1 (MPa)	-1,39	-16,84	18,08	19,48	33,50	48,89	70,39	71,12
σ 2 (MPa)	-5,57	-19,71	14,82	-17,62	3,03	-24,13	-32,18	-31,19
β (°)	76,7	121,8	156,5	29,12	26,5	29,7	31,1	30,8
ϵ 1 ($\mu\text{m/m}$)	1,11	-55,6	68,91	122,95	163,08	279,43	398,6	400,8
ϵ 2 ($\mu\text{m/m}$)	-25,81	-74,15	47,88	-116,3	-33,4	-191,52	-262,94	-259,06
Razão entre os valores de deformação	-0,043	0,75	0,6948	-0,946	-0,205	-0,685	-0,66	-0,65
Qualidade do furo	Bom	razoável	razoável	ruim	razoável	razoável	razoável	ruim
Raio do furo (mm)	0,84	0,91	0,88	0,91	0,89	0,86	0,87	0,89

Tabela 6.2 Resultados dos experimentos no padrão unidimensional, furos de 9 a 16

	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
E1 ($\mu\text{m/m}$)	440,3	438,6	579,0	720,2	435,1	435,7	375,5	367,2
E2 ($\mu\text{m/m}$)	443,5	444,1	584,8	720,8	433,7	434,4	373,5	366,4
E3 ($\mu\text{m/m}$)	460,3	458,5	623,5	772,3	471,9	472,1	399,7	393,8
E4 ($\mu\text{m/m}$)	434,3	436,2	593,8	730,3	440,1	440,7	376,6	370,4
E5 ($\mu\text{m/m}$)	429,1	429,2	574,8	706,7	430,0	431,2	387,6	381,5
E6 ($\mu\text{m/m}$)	440,5	440,4	586,5	730,1	425,4	426,1	407,4	405,8
E7 ($\mu\text{m/m}$)	447,5	448,4	584,9	724,5	445,9	446,7	406,9	406,6
E8 ($\mu\text{m/m}$)	445,4	444,1	574,9	718,5	428,4	429,6	389,4	384,1
E9 ($\mu\text{m/m}$)	447,5	448,1	618,9	757,3	461,6	462,0	406,8	405,5
E10 ($\mu\text{m/m}$)	452,7	451,4	618,8	763,7	455,7	456,7	408,8	403,0
Média ($\mu\text{m/m}$)	444,1	443,9	591,2	731,2	441,3	442,1	393,2	388,4
S	8,87	8,32	18,04	20,64	15,85	15,62	14,46	16,64
S(%)	2,0	1,87	3,05	2,82	3,59	3,53	3,68	4,28
σ (MPa)	88,82	88,78	118,25	146,24	88,27	88,42	78,64	77,69
Resultados Holografia								
σ_1 (MPa)	70,81	88,73	126,19	182,25	103,9	102,25	78,71	86,06
σ_2 (MPa)	-32,43	-17,37	-12,55	7,27	-4,39	-6,37	-17,23	-10,24
β (°)	30,3	31,86	29,77	29,4	29,59	28,65	29,31	30,5
ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	401,6	468,81	649,14	900,73	526	520,49	418,51	445,13
ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	-264,8	-215,48	-245,7	-227,9	-172,7	-180	-200,3	-175,97
Razão	-0,66	-0,46	-0,38	-0,25	-0,33	-0,35	-0,48	-0,39
Qualidade do furo	bom	razoável	bom	ruim	bom	razoável	ruim	razoável
Raio do furo (mm)	0,86	0,88	0,86	0,93	0,89	0,85	0,95	0,89

Nos resultados dos ensaios no padrão unidimensional de tensões, um dos pontos que se destacam é a forte repetitividade entre alguns ensaios com um mesmo carregamento (445 $\mu\text{m/m}$; furos 7,8 e 9). O valor de σ_2 não coincidiu com o valor esperado (0 MPa), entretanto mesmo este valor apresentou forte repetitividade e a relação entre ϵ_1 e ϵ_2 (aproximadamente -0,66) foi mantida inclusive em outro nível de carregamento (furo 6). Suspeitou-se que o apoio usado sob o corpo de prova estivesse induzindo tensões neste e conseqüentemente afetando os resultados. Assim, optou-se por realizar mais ensaios neste nível de carregamento desta vez sem utilizar o apoio (furos 10, 13 e 14). No furo 10 o valor da tensão principal (σ_1) coincidiu com o valor de referência com base nos resultados indicados pelos extensômetros, enquanto

que o valor de σ_2 , ainda que menor, permaneceu longe de 0. Os furos 13 e 14 apresentaram resultados muito próximos entre si e um valor de σ_2 muito menor, no entanto o resultado da tensão principal (σ_1) foi mais de 15 % acima do valor de referência. Há uma grande possibilidade das tensões residuais remanescentes do tratamento térmico na barra não terem valores tão desprezíveis. Essa suposição é reforçada pelos resultados dos furos 1, 2 e 3, feitos com a barra livre de tensões de carregamento, que chegaram a indicar valores de tensões próximos de 20 MPa em módulo. Isso explicaria também o desvio dos resultados em relação aos valores de referência serem semelhantes entre alguns furos vizinhos (7, 8 e 9; 13 e 14), obedecendo a um perfil de tensões residuais existentes naquela região do corpo de prova especificamente. No entanto, tudo isto impossibilita que se condenem os resultados dos furos feitos com a presença do apoio. Isso porque o desvio desses resultados em relação ao valor de referência pode ter sido provocado não pela presença deste, e sim pela presença de tensões residuais no corpo de prova. Desta forma esses resultados foram mantidos na avaliação metrológica.

A Figura 6.4 mostra em azul a relação entre os resultados do M2TRES e dos extensômetros para a medição de σ_1 . Se os dois métodos concordassem perfeitamente a linha em azul coincidiria com a linha rosa. A figura revela que no último ponto à direita, relativo à medição com carregamento igual a 50 % da tensão de escoamento, a medição feita pelo M2TRES apresentou resultado muito superior ao valor indicado pelos extensômetros. Isso se deve, muito provavelmente, ao efeito de plastificação ao redor do furo usinado, e confirma o que a bibliografia [10] relata a respeito da limitação em se medir tensões superiores a 1/3 da tensão de escoamento do material utilizando o método do furo. Por essa razão só serão considerados na avaliação metrológica os pontos de medição efetuados com uma tensão de carregamento de até 30 % da tensão de escoamento do material, sendo abandonados então os furos 11 e 12.

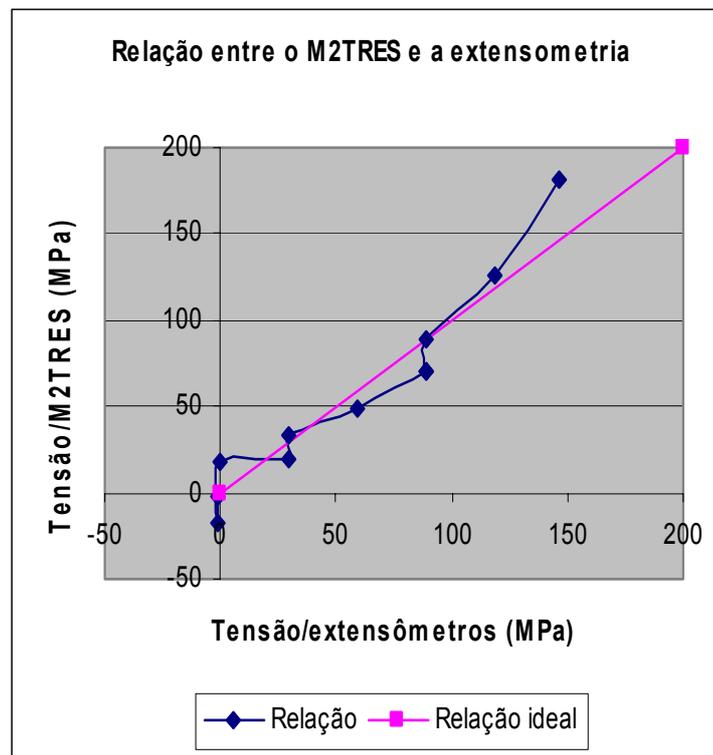


Figura 6.4 Relação entre as medições de σ_1 efetuadas com o M2TRES e o sistema de referência

Na análise dos resultados subtraiu-se o valor de referência do valor de tensão medido pelo M2TRES, encontrando-se assim o desvio de σ_1 e σ_2 em cada medição. A Tabela 6.3 mostra a média e o desvio padrão destes desvios.

Tabela 6.3 Desvio Padrão e média dos desvios de σ_1 e σ_2

Desvio padrão dos desvios de σ_1 em relação ao valor de referência (MPa)	13,05
Desvio padrão dos desvios de σ_2 em relação ao valor de referência (MPa)	13,84
Média dos desvios de σ_1 em relação ao valor de referência (MPa)	-2,13
Média dos desvios de σ_2 em relação ao valor de referência (MPa)	-14,33

A média dos desvios nos indica uma estimativa do erro sistemático do M2TRES e, conseqüentemente, uma correção a ser aplicada nos resultados gerados por este. Esta correção estimada é de 2,13 MPa para σ_1 e 14,33 MPa

para σ_2 .

Foi utilizada a Equação 6.2 para determinar a faixa de dispersão das medições de σ_1 a partir do desvio padrão do desvio relativo, ou seja, a relação entre o desvio de cada medição e o valor do respectivo carregamento. Nesse caso foram desconsideradas as medições feitas com a barra descarregada, porque erros de zeragem da ponte amplificadora e da presença de tensões residuais remanescentes na barra têm grande influência nestas medições, e esta influência seria muito maior no valor do desvio relativo.

$$Re = \pm t.s \quad (6.2)$$

Onde:

Re = faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório

t = coeficiente de student

s = desvio padrão das amostras

O desvio padrão dos desvios relativos é 0,18. Como foram analisados os resultados de 11 medições o número de graus de liberdade é 10 e assim, para uma probabilidade de 95 %, o valor t de student é 2,23.

Com isso:

$$\sigma_1: \quad Re = \pm 40,5 \%$$

No caso da determinação da dispersão para σ_2 não é possível usar o erro relativo, já que o valor de referência é zero. Nesse caso é utilizado o desvio padrão dos erros indicado na Tabela 6.3. Para um número de medições igual a 14, o valor do t de student é 2,16. Desta maneira:

$$\sigma_2: \quad Re = \pm 29,9 \text{ MPa}$$

A dispersão observada resulta da combinação das contribuições aleatórias do M2TRES e a do padrão uniaxial. A incerteza deste padrão uniaxial já foi avaliada em um trabalho anterior [21] e foi determinada como 13,30 % na simulação de deformações. No entanto, nesse caso algumas fontes de incerteza importantes foram desprezadas, como, por exemplo, as tensões residuais

remanescentes ou a influência do apoio, fatores que se mostraram relevantes nos experimentos. A dispersão entre os resultados de furos vizinhos (furos 7 a 9 e furos 15 e 16) foi muito menor do que a dispersão entre todos os experimentos, o que reforça a suspeita de uma influência significativa das tensões residuais remanescentes nos resultados. Então a avaliação de incertezas do padrão foi refeita e é mostrada na Tabela 6.4:

Tabela 6.4 Avaliação de incertezas do dispositivo simulador de tensões uniaxiais [21]

Fontes de incertezas		Medição / Especificação						Efeitos aleatórios			
Simbolo	Descrição	Estimativa	Correção	valores brutos [$\mu\text{m}/\text{m}$]	medidas	distribuição probabilidade	coeficiente de sensibilidade	Divisor	Incerteza padrão [$\mu\text{m}/\text{m}$]	grau de liberdade efetivo	
Ponte Amplificadora											
x1	Leitura de deformação	445,20	0,00	25,83	10	normal	1	1,00	25,829	9	
x2	Erro de zero	0,00	0,00	1,00	--	retangular	1	1,73	0,577	∞	
x3	Incerteza da ponte	0,00	0,00	0,89	--	retangular	1	1,73	0,514	∞	
Extensômetros											
x4	Fator do extensômetro	0,00	0,00	4,45	--	retangular	1	1,73	2,570	∞	
x5	Erro de posicionamento dos extensômetros.	0,00	0,00	0,5	--	retangular	1	1,73	0,289	∞	
Corpo de Prova											
Tensões											
x6	residuais pré-existentes + influência dos apoios	0,00	0,00	72,77	3	retangular	1	1,73	42,064	2	
x7	Variações nas propriedades mecânicas	0,00	0,00	9,79	--	retangular	1	1,73	5,655	∞	
x8	Erros geométricos	0,00	0,00	--	--	--	--	--	--	--	
x9	Erros de flexão na aplicação do carregamento	0,00	0,00	0,3	--	retangular	1	1,73	0,173	∞	
									graus de liberdade efetivo:	4	
									incerteza padrão combinada:	49,8	11,2%
correção combinada:			0,00	t' student (95%):		2,870	incerteza expandida:		142,8	32,1%	

As influências da presença de tensões residuais remanescentes e do apoio foram determinadas conjuntamente a partir das três medições com a barra descarregada feitas pelo próprio M2TRES. O desvio padrão dos maiores valores das tensões em módulo foi considerado como o valor bruto de incerteza.

Obtendo a incerteza do padrão (32,1 %), pode-se extrair da incerteza das medições a incerteza do sistema, utilizando a soma quadrática conforme mostrado na Equação 6.3.

$$u_{med}^2 = u_{pad}^2 + u_{sm}^2 \quad (6.3)$$

Com isso estima-se uma incerteza do sistema de 25 % na medição de σ_1 .

6.2.2 Ensaio no duto simulador de tensões bidimensionais – resultados e considerações

A avaliação dos resultados dos ensaios no duto simulador de tensões será dividida em duas partes. Primeiramente considerando apenas os resultados das medições da tensão de carregamento para avaliar a incerteza do sistema nesse tipo de medição. Na segunda parte, serão avaliados os ensaios de acordo com o método dos quatro passos, analisando a medição de tensões residuais.

Na Tabela 6.5 estão dispostos os valores de tensões mecânicas, geradas pelo carregamento, medidos pelo M2TRES em diferentes posições do duto. Estes resultados são comparados com os valores teóricos, calculados a partir da pressão e das dimensões do tubo através das equações de vasos de pressão de paredes finas (Equação 5.2), e com os valores de tensão, calculados a partir dos valores médios de deformação indicados pelos extensômetros, através das equações do estado plano de tensões (Equações 6.4 e 6.5). No cálculo da média dos valores indicados pelos extensômetros foram desconsiderados aqueles que apresentaram valores muito fora do esperado. Quando na tabela não é indicado o valor de tensão relativo aos extensômetros é porque este por alguma razão

não foi medido. Foram realizados ensaios com 60 kgf/cm² (1 a 4) e 30 kgf/cm² de pressão aplicada (5 a 16).

$$\sigma_1 = \frac{E(\varepsilon_1 + \nu.\varepsilon_2)}{(1-\nu^2)} \quad (6.4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E(\varepsilon_2 + \nu.\varepsilon_1)}{(1-\nu^2)} \quad (6.5)$$

Onde:

σ_1 e σ_2 : tensões principais;

ε_1 e ε_2 : deformações principais;

E : Módulo de elasticidade;

ν : Coeficiente de Poisson.

Tabela 6.5 Resultados do M2TRES na medição das tensões oriundas do carregamento no duto

	M2TRES		Valores Teóricos		Extensometria	
	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)
1	139,47	77,97	151,26	75,63	134,49	71,97
2	132,36	76,38	151,26	75,63	-	-
3	132,43	76,48	151,26	75,63	126,07	67,03
4	147,24	85,12	151,26	75,63	-	-
5	67,05	36,42	75,63	37,82	-	-
6	73,36	36,15	75,63	37,82	60,68	33,58
7	72,54	43,07	75,63	37,82	-	-
8	75,94	45,39	75,63	37,82	-	-
9	74,81	43,78	75,63	37,82	59,26	32,45
10	75,24	45,39	75,63	37,82	62,16	33,71
11	70,82	39,99	75,63	37,82	62,18	33,56
12	84,24	44,42	75,63	37,82	63,05	34,10
13	83,74	43,08	75,63	37,82	62,28	32,99
14	84,22	44,05	75,63	37,82	60,60	33,26
15	84,26	44,06	75,63	37,82	62,97	33,81
16	83,21	42,07	75,63	37,82	-	-

Conforme determinado no capítulo 5, a comparação da tensão mecânica medida com o valor teórico calculado a partir do valor de pressão indicado pelo manômetro apresenta uma incerteza menor do que comparando com o valor de deformação dos extensômetros, mesmo não utilizando nos ensaios o medidor de espessura por ultra-som para determinar a espessura da parede do duto. Por isso leva-se em conta na avaliação metrológica os resultados da comparação com os valores teóricos, no entanto foi feita a análise também para a comparação com os extensômetros. A média dos desvios absolutos e o desvio padrão dos desvios percentuais das medições com o M2TRES em relação aos valores teóricos são exibidos na Tabela 6.6. O mesmo foi feito com relação aos valores indicados pelos extensômetros, conforme mostrado na Tabela 6.7.

Tabela 6.6 Desvio das medições do M2TRES em comparação com os valores teóricos

	σ_1	σ_2
Média (MPa)	-1,98	4,22
Desvio Padrão (%)	8,86	8,30

Tabela 6.7 Desvio das medições do M2TRES em comparação com os valores indicados pelos extensômetros

	σ_1	σ_2
Média (MPa)	14,88	8,89
Desvio Padrão (%)	12,53	10,84

A partir dos valores da Tabela 6.6 foi estimado um valor de correção de 2,0 MPa para σ_1 e -4,2 MPa para σ_2 .

Utilizando novamente a Equação 6.2, para um grau de liberdade igual a 15 e um t de Student igual a 2,13 obtém-se:

$$\sigma_1: \text{Re} = \pm 19 \%$$

$$\sigma_2: \text{Re} = \pm 18 \%$$

A partir da comparação com a média dos valores indicados pelos

extensômetros foram encontrados os valores de correção de -14,9 MPa e -8,9 MPa para σ_1 e σ_2 respectivamente.

Neste caso o grau de liberdade é 9 e o t de Student 2,26.

$$\sigma_1: \text{Re} = \pm 28 \%$$

$$\sigma_2: \text{Re} = \pm 24 \%$$

No entanto, analisando os resultados da Tabela 6.5 foi constatado que as medições realizadas em uma mesma região do tubo (Furos 12 a 16) apresentaram uma repetitividade muito melhor, isto por estarem sujeitas a praticamente às mesmas variações na geometria do duto e por influência das mesmas tensões de flexão. Se durante os ensaios fosse usado o medidor de espessura por ultra-som (Figura 5.10), uma correção poderia ser feita no valor teórico da tensão mecânica, minimizando os erros. De qualquer maneira é mais justo que, no cálculo da dispersão, sejam consideradas apenas as medições de uma mesma região, sujeitas às mesmas perturbações no resultado. Deste modo a dispersão foi recalculada utilizando-se apenas as medições de 12 a 16 (Tabela 6.8). Já para o cálculo da correção não é interessante selecionar apenas esses pontos e sim o resultado de todos os experimentos, evitando assim que uma tendência relacionada exclusivamente a essa região (um desvio da espessura em relação ao valor nominal por exemplo) contamine o resultado.

Tabela 6.8 Desvios das medições do M2TRES em comparação com os valores teóricos para os pontos selecionados

	σ_1	σ_2
Média (MPa)	8,30	5,72
Desvio Padrão (%)	0,61	2,54

Para um grau de liberdade 4 e um t de Student igual a 2,78 obtém-se:

$$\sigma_1: \text{Re} = \pm 1,7 \%$$

$$\sigma_2: \text{Re} = \pm 7,1 \%$$

Sendo estes valores muito menores que os anteriores.

Concluí-se que, para estas condições, o sistema de medição em prova apresenta na medição de tensões mecânicas de carregamento tendências de 2,0 MPa e 4,2 MPa e incertezas de 1,7 % e 7,1 % para σ_1 e σ_2 respectivamente.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados de cinco medições utilizando como forma de comparação o método dos quatro passos.

Tabela 6.9 Resultados gerados pelo M2TRES em ensaios no duto e inter-comparação utilizando o método dos quatro passos

	Furo 01	Furo 02	Furo 03	Furo 04	Furo 05
Carregamento					
σ_1 (MPa)	84,24	83,74	84,22	85,87	83,21
σ_2 (MPa)	44,42	43,08	44,05	45,57	42,07
β (°)	28,17	28,82	28,92	29,01	30,6
Residual					
σ_1 (MPa)	21,04	-14,27	41,01	-3,78	65,3
σ_2 (MPa)	-34,93	-67,2	-34,62	-102,08	-34,11
β (°)	121,81	118,11	121,66	93,18	121,92
σ_1' (MPa)	-34,7	-67,2	-34,4	-101,6	-34,1
σ_2 (MPa)	20,8	-14,3	40,8	-4,3	65,3
Combinada					
σ_1 (MPa)	63,78	31,66	85,87	43,32	108,72
σ_2 (MPa)	48	14,3	47,02	-15,35	50,12
β (°)	122,903	116,39	124,04	98,4	124,47
σ_1'	48,1	14,3	47,3	-13,8	50,4
σ_2'	63,7	31,6	85,6	41,7	108,5
σ carregamento + σ residual					
σ_1 (MPa)	49,54	16,54	49,82	-15,73	49,11
σ_2 (MPa)	65,22	28,78	84,85	41,27	107,37
σ soma - σ combinada					
σ_1 (MPa)	1,44	2,24	2,52	-1,93	-1,29
σ_2 (MPa)	1,52	-2,82	-0,75	-0,43	-1,13
Desvio em relação ao valor do carregamento (%)					
σ_1	1,71	2,67	2,99	-2,25	-1,55
σ_2	3,42	-6,55	-1,7	-0,43	-2,69

Neste caso, a diferença entre a tensão combinada medida (tensões residuais + tensões de carregamento) e o valor resultante da soma entre o valor da tensão residual e de carregamento, medidas separadamente, é utilizada para determinar a dispersão das medições feitas pelo M2TRES. É importante frisar

que neste tipo de avaliação compara-se o M2TRES consigo mesmo, trazendo algumas limitações e fazendo com que esta avaliação seja encarada de um ponto de vista mais qualitativo.

Para entender melhor esse tipo de comparação, deve-se lembrar que na medição da tensão combinada os dois tipos de tensão, de carregamento e residual, são medidos utilizando a metodologia para medir tensão residual (algoritmo do furo passante). Já no outro lado da comparação, duas outras medições independentes são efetuadas: (a) novamente o método do furo cego para medição de tensão residual e (b) a medição das tensões de carregamento mecânico usando outro algoritmo e sem a usinagem do furo [22]. Isto significa que qualquer componente sistemática na medição da tensão residual não poderia ser determinada a partir desta avaliação, pois estaria presente nos dois lados da comparação. Isto significa também que se houver uma tendência da medição da tensão combinada dar resultados menores do que a soma das duas medições individualmente, o carregamento pode estar sendo superestimado. Por outro lado, se houver uma tendência de a tensão combinada ser maior do que a soma das outras duas o carregamento deve estar sendo subestimado.

A Tabela 6.9 apresenta a média e o desvio padrão da diferença entre as tensões combinadas e as duas tensões medidas individualmente.

Tabela 6.10 Média e desvio padrão da diferença entre as tensões combinadas e o resultado da soma entre os valores das tensões de carregamento e residuais medidas individualmente

	σ_1	σ_2
Média (MPa)	0,60	-0,72
Desvio Padrão (MPa)	2,06	1,56

Os resultados da Tabela 6.9 sugerem uma tendência na medição de tensões de carregamento de 0,60 MPa para σ_1 e -0,72 para σ_2 . Estes resultados contrariam o que foi determinado anteriormente (página 80) mas por serem valores pequenos (abaixo de 2%) podem ser considerados dentro do aceitável.

Os baixos valores de dispersão são um bom sinal e indicam que o sistema efetua as medições com um baixo erro aleatório, reforçando a suspeita de que o principal problema está realmente em não se dispor de um padrão de

tensões confiável.

6.3 Avaliação Funcional

No estado atual o sistema de medição tem cumprido com eficácia alguns dos requisitos funcionais, parcialmente alguns outros e fracassado em outros.

Não há dúvida que, em comparação com a extensometria, o sistema é muito mais prático. A preparação para a medição se limita quase que totalmente ao posicionamento do sistema, enquanto que a extensometria requer uma tarefa árdua de lixar a superfície em prova, alinhar, colar e conectar eletricamente o extensômetro. Entretanto, quando se afirma que o sistema é mais prático não se deve confundir com que ele possa ser operado por um usuário inexperiente. Nesse ponto o sistema ainda não atinge seu requisito. Uma considerável experiência do operador é requerida no acoplamento da base com a superfície de medição, na verificação da rigidez desse acoplamento, no acoplamento e manipulação dos módulos de medição e furação, na verificação da qualidade das imagens, nos eventuais ajustes necessários na potência do laser e nos cuidados durante a usinagem do furo. Detalhes estes que, na maioria, só podem ser aprendidos efetivamente com a prática e, de preferência, com o acompanhamento de um usuário experiente. Pouco poderia ser explicado na forma escrita, impedindo que um “guia do usuário” pudesse fornecer todas as informações e habilidades necessárias ao operador.

Com relação ao tempo de cada medição (posicionamento do sistema, usinagem do furo e aquisição das imagens), a meta de 10 minutos não chega a ser atingida na maioria das vezes, mas se aproxima bastante (12 a 15 minutos). Além disso, o tempo só não é menor porque se gasta algum tempo com alguns cuidados como a verificação da rigidez do sistema e, após a usinagem do furo, quando se aguarda cerca de três minutos para estabilização térmica antes da aquisição da imagem. Entretanto, é importante salientar que com o M2TRES não se costuma efetuar usinagens incrementais como na extensometria. A usinagem incremental do furo (em pelo menos oito passos [9]) é utilizada para a

verificação da existência de gradientes de tensão ao longo da profundidade. No caso do sistema óptico geralmente não é feito esse tipo de usinagem. Isso porque cada incremento na furação requereria a remoção e o reposicionamento dos módulos de medição e de furação, acarretando em uma possível perda de correlação entre a primeira imagem adquirida antes do furo, e a última, adquirida após a execução de todos os passos. Caso essa medição incremental fosse feita, o tempo total de medição alcançaria os 40 minutos, lembrando que após cada passo deveria se esperar os três minutos para a estabilização térmica antes da aquisição do mapa de fases. Outro ponto é que o laser diodo utilizado no M2TRES necessita de um certo tempo ligado para atingir sua estabilidade térmica e, conseqüentemente, estabilidade no comprimento de onda. Uma variação no comprimento de onda do laser entre a aquisição dos diferentes mapas de fase compromete totalmente a medição. Sendo assim, nos ensaios é normal esperar pelo menos uma hora com o laser ligado, antes de efetuar a medição, para assegurar a estabilização. Esse tempo não foi considerado ao se determinar o tempo médio de medição.

Limitações próprias do método do furo afetam tanto a medição de tensões residuais com holografia eletrônica quanto com rosetas extensométricas, mas ainda sim cabe aqui mencioná-las. Um exemplo disso é a plastificação localizada. O furo atua como um elemento concentrador de tensões. No estado uniaxial de tensões o fator de concentração de tensão (K_t) é igual a 3, enquanto no estado biaxial com σ_1 igual a σ_2 este fator é igual a 2. Isto significa que, se a tensão exceder 1/3 da tensão de escoamento no caso uniaxial ou 1/2 no caso biaxial, haverá plastificação nas vizinhanças do furo [3]. Esta plastificação compromete a medição, pois nesse caso não se pode considerar que o material se comporte da mesma maneira que no regime elástico. Há inclusive na literatura diversos trabalhos que avaliam por elementos finitos os erros gerados ao se aplicar os coeficientes do comportamento elástico em componentes com altos níveis de tensões residuais [10].

Apesar dos obstáculos em se cumprir muitos dos requisitos, a praticidade, a rapidez e a confiabilidade em relação à extensometria fazem do M2TRES um potencial desbravador do nicho de mercado dominado pelos

extensômetros e rosetas extensométricas. O interesse partiria tanto do cliente que necessita de medições de tensões residuais freqüentemente, e assim se interessaria em adquirir um exemplar do sistema, quanto para o cliente indireto que, necessitando ocasionalmente desse tipo de medição, costuma contratar terceiros para a execução do serviço. Entretanto, cabe aqui ressaltar que para que esta avaliação funcional fosse completa, ensaios em campo deveriam ser realizados. Ainda não se sabe como o sistema se comportará trabalhando sob o sol, sujeito a variações de temperatura durante a medição, ou sujeito às vibrações de um duto de petróleo em operação.

6.4 Avaliação Metrológica

Como resultados conclusivos da avaliação metrológica do M2TRES são apresentados:

Para medição de tensões mecânicas de carregamento:

$$\sigma_1: \text{Resultado da medição} = \text{valor indicado} + 2,0 \text{ MPa} \pm 1,7 \%$$

$$\sigma_2: \text{Resultado da medição} = \text{valor indicado} - 4,2 \text{ MPa} \pm 7,1\%$$

Para medição de tensões residuais:

$$\sigma_1: \text{Resultado da medição} = \text{valor indicado} + 2,1 \text{ MPa} \pm 25 \%$$

$$\sigma_2: \text{Resultado da medição} = \text{valor indicado} + 14,3 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$$

7

Conclusões e Perspectivas Futuras

Este trabalho apresentou os detalhes da avaliação metrológica e funcional de um dispositivo para medir tensões de carregamento e residuais através da holografia eletrônica. Avaliou também os aspectos construtivos e operacionais dos dispositivos simuladores de tensões de referência aqui utilizados. Essa avaliação foi parcialmente direcionada para situações típicas do setor de petróleo e gás, mais especificamente voltada à medição de tensões mecânicas em dutos.

Neste capítulo é apresentada primeiramente uma síntese do que foi concluído durante a avaliação do sistema de medição. Em seguida, apresentam-se as perspectivas futuras relacionadas à evolução do sistema e das metodologias empregadas nos ensaios e interpretação dos resultados.

7.1 Avaliação Operacional

Dentre os aspectos operacionais do sistema destaca-se a praticidade, que permite efetuar medições de forma muito mais rápida e menos trabalhosa ao se comparar com a extensometria (as medições de tensões residuais com o M2TRES são cerca de quatro vezes mais rápidas do que utilizando rosetas

extensométricas). No entanto o sistema ainda não é suficientemente robusto de modo a permitir que um usuário inexperiente efetue medições com um elevado índice de sucessos.

A filosofia modular do sistema tem aspectos positivos e negativos. A separação física dos módulos responsáveis pela medição e furação impede que problemas relacionados à usinagem do furo, como a geração de cavacos, prejudiquem a medição. Por outro lado, essa filosofia não é a mais adequada quando se deseja efetuar uma furação incremental para verificação da existência de gradientes de tensão residual ao longo da profundidade.

Uma inconveniência freqüente no atual protótipo é a imprevisível instabilidade no comprimento de onda do laser, tendo inclusive comprometido alguns ensaios.

7.2 Desempenho Metrológico

A confiabilidade metrológica dos dispositivos simuladores de tensões de referência foi o principal fator limitante que impediu a avaliação metrológica do sistema em sua plenitude. A barra apresenta limitações metrológicas e funcionais consideráveis e não incorpora características de campo típicas das condições finais de uso do sistema. O duto, por sua vez, não serve exatamente como um padrão de tensões residuais de referência, visto que não está livre de tensões residuais pré-existentes e o nível destas no ponto de medição não pode ser definido a priori, impedindo a determinação de valores de referência com níveis de incerteza compatíveis.

Os ensaios realizados com a barra levaram à conclusão de que o desempenho metrológico do sistema de medição apresentou uma incerteza nas medições de tensões residuais pior do que se pretendia. No entanto, nos ensaios realizados no duto, os pequenos desvios e dispersões observados nos resultados da comparação pelo método dos quatro passos indicam que o M2TRES pode ter um desempenho muito superior ao que foi possível concluir com os ensaios na barra. Medições adicionais de tensões no duto utilizando o

método dos quatro passos com rosetas extensométricas foram efetuadas por terceiros, apresentando resultados piores do que o sistema óptico.

Ainda com respeito à medição de tensões residuais, os ensaios indicaram uma componente sistemática muito grande nos resultados de σ_2 , provavelmente conseqüência de valores inadequados das constantes de correção para a utilização do furo cego nas medições com holografia eletrônica.

Em síntese, é possível confirmar que o sistema mostrou-se muito adequado na medição de tensões de carregamento, apresentando baixas tendências e incertezas, com uma dispersão menor do que a média de oito extensômetros. O nível de incerteza determinado poderia ser ainda melhor se na região de cada ensaio fosse determinada a espessura da parede do duto. Esse viés de sucesso mostra o quanto a metrologia óptica pode ser confiável e que, no caso da medição de tensões residuais, o processo de furação tende a ser o “gargalo” metrológico do sistema.

No decorrer do trabalho foi observada uma clara evolução, tanto do atual protótipo do sistema em relação ao anterior, quanto da metodologia empregada nos ensaios. O sistema mostrou que hoje em dia está preparado para efetuar medições de forma mais prática e em muitos casos mais confiável do que a extensometria. Estando, entretanto, ainda muito dependente da experiência do operador.

7.3 Sugestões para Futuros Trabalhos

Como continuidade deste trabalho, novas constantes para o método do furo podem ser determinadas por calibração. Para isto, é necessário fazer o caminho inverso, ou seja, a partir de padrões de franja referentes a um determinado estado de tensões, determinar quais seriam as constantes para que o valor medido coincida com o valor de referência. Essas novas constantes contribuirão para reduzir a componente de erros sistemáticos nos resultados das medições utilizando o método do furo, principalmente no valor de σ_2 que se mostrou o mais afetado. No entanto, para esse estudo ter sucesso novamente

seria muito recomendado que se dispusesse de um melhor padrão de tensões.

Deve ser investigado o fato da diferença entre as tensões residuais medidas ($\sigma_1 - \sigma_2$) sempre apresentar menor dispersão que a soma das tensões residuais ($\sigma_1 + \sigma_2$). Este fato pode servir de base para o aperfeiçoamento dos algoritmos de cálculo das tensões residuais.

Outra análise que ainda deve necessariamente ser feita é a verificação do comportamento do sistema em condições reais de campo, sujeito a vibrações e flutuações de temperatura.

Há outros estudos já em curso com o intuito de substituir a furação por métodos menos invasivos, como indentação ou aquecimento localizado, promovendo um horizonte ainda maior para a utilização do sistema. Outra possível inovação é a substituição do espelho cônico por um elemento óptico difrativo. Desta maneira o sistema não seria afetado por variações no comprimento de onda do laser, eliminando um problema freqüente no protótipo atual.

Referências Bibliográficas

- [1] Site da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo; www.cetesb.sp.gov.br 03/2004.
- [2] ALBERTAZZI JR., A., KANDA, C., BORGES, M. R.; HREBABETZKY, F. A Radial in-Plane Interferometer for ESPI Measurement. In: IMEKO/SPIE/SBM, International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, Florianópolis, SC, Brasil, out., 1999.
- [3] ALBERTAZZI Júnior, A., KANDA, C., BOETTGER, J.; “Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por Meio da Holografia Eletrônica”, Anais do III Simpósio de Análise Experimental de Tensões; Rio de Janeiro, Brasil, 1995.
- [4] Site da Petrobrás;
http://www.petrobras.com.br/tecnologia/portugues/programas_tecnologicos/produt.stm 03/2004.
- [5] Portal GasEnergia; www.gasenergia.com.br 03/2004.
- [6] SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO; (4.; 1981; Rio de Janeiro). Trabalhos técnicos: 4 Seminario de Instrumentação, 20 a 23 de setembro de 1981- Rio de Janeiro.. Rio de Janeiro: IBP: CNPq, 1981.
- [7] Site da Com Ciência Revista Eletrônica de Jornalismo Científico;
<http://www.comciencia.br/reportagens/petroleo/pet07.shtml> 2002.

- [8] Lu, J. - "Handbook on Measurement of Residual Stresses" - SEM - Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Lilburn, GA, USA, 1996.
- [9] "E837 – 92 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Annual Book of ASTM Standards.
- [10] SOARES, Ana Cristina Cosme; "Uma Nova Metodologia Numérica para Avaliar os Efeitos da Plasticidade na Medição de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Cego" Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- [11] RODACOSKI, Marcos Roberto; "Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica" Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 1997.
- [12] Site da Vishay, <http://www.vishay.com> 03/2004.
- [13] ALBERTAZZI, Armando; BOETTGER, Juliano; KANDA, César; "Medição de Tensões Residuais pelo Método do Furo: Uma Comparação entre Extensometria e Holografia", IX SIBRAT / COTEQ 96, 1996.
- [14] MAKINO, A.; NELSON, D.; "Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole Drilling – Part I" 1994.
- [15] Site da Komet-Brasseler; <http://www.kometdental.de> 03/2004.
- [16] YOUNG, W. C.; "Roark's Formulas for Stress & Strain" - McGraw-Hill, USA, 6th edition, 1989.
- [17] CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; Meggiolaro, Marco Antônio; "Fadiga em Dutos"; COTEQ VI, 2002.
- [18] Site da Record S.A.; <http://www.recordsa.com.br> 06/2003.

- [19] Site da ACS – Acoustic Control Systems,
<http://www.acsys.ru/prod/a1208/ea1208.htm> 08/2003.
- [20] Site Matweb, banco de dados de materiais,
<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=M1020H>
05/2004.
- [21] SUTÉRIO, Ricardo; ALBERTAZZI Júnior, Armando; PEIXOTO Filho, Flávio Tito; PACHECO, Anderson; “Avaliação de um Simulador de Tensões Residuais”, COTEQ VII, 2003.
- [22] VEIGA, Celso Luiz Nickel; “Aplicações do Interferômetro Radial Plano na Medição de Translação, Deformações e Tensões Mecânicas” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [23] BOETTGER, Juliano; “Desenvolvimento de um Sistema Portátil para Medição de Tensões Residuais em Campo Utilizando a Holografia Eletrônica e o Método do Furo”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- [24] WILLEMANN, Daniel Pedro; “Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações Utilizando Holografia Eletrônica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [25] LORD, Jerry; “Hole Drilling Techniques”, BCA Structural Materials Workshop, 2000.
- [26] WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H.; “Residual Stress Part 1 – Measurement Techniques”, Materials Science and Technology, Vol. 17 abril de 2001.
- [27] WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H.; “Residual Stress Part 2 – Nature and Origins”, Materials Science and Technology, Vol. 17 abril de 2001.

- [28] YEN, Hung-Ju; LIN, Mark Ching-Cheng; CHEN, Lih-Jin; "Measurement and Simulation of Residual Stress in Type 304 Weld Overlay Stainless Steel Pipe", *Materials Science and Technology*, Vol. 17 abril de 2001.
- [29] OETTEL, R.; "The Determination of Uncertainties in Residual Stress Measurement", *Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials*, Code of Practice No 15, 2000.
- [30] ANDRINO, Marcílio Haddad; "Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

Apêndice A

Coeficientes de Correção para o Furo Cego

A.1 Coeficientes de correção do furo cego aplicados nas medições utilizando rosetas extensométricas

Do/D	a	b
0,30	0,111	0,288
0,31	0,118	0,305
0,32	0,126	0,322
0,33	0,134	0,340
0,34	0,142	0,358
0,35	0,150	0,376
0,36	0,158	0,394
0,37	0,166	0,412
0,38	0,174	0,430
0,39	0,182	0,448
0,40	0,190	0,466
0,41	0,199	0,484
0,42	0,208	0,503
0,43	0,217	0,521
0,44	0,226	0,540
0,45	0,236	0,558
0,46	0,246	0,576
0,47	0,255	0,594
0,48	0,265	0,612
0,49	0,275	0,630
0,50	0,285	0,648

Apêndice B

Dimensões Comerciais de Dutos

Diâmetro Nominal DN	Diâmetro Externo OD		Espessura das paredes T															
			Sched. 10		Standard (Std. W)		Sched. 40		Extra (X-S)		Forte		Sched. 80		Sched. 160		Duplo Extra Forte (XX-S)	
pol.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.	pol.	mm.
3/8"	0.675	17.1	-	-	0.091	2.3	0.091	2.3	0.126	3.2	0.126	3.2	-	-	-	-	-	-
1/2"	0.840	21.3	0.083	2.11	0.109	2.8	0.109	2.8	0.147	3.7	0.147	3.7	0.187	4.7	0.294	7.5	-	-
3/4"	1.050	26.7	0.083	2.11	0.113	2.9	0.113	2.9	0.154	3.9	0.154	3.9	0.218	5.5	0.308	7.8	-	-
1"	1.315	33.4	0.109	2.77	0.133	3.4	0.133	3.4	0.179	4.5	0.179	4.5	0.250	6.35	0.358	9.1	-	-
1 1/4"	1.660	42.2	0.109	2.77	0.140	3.6	0.140	3.6	0.191	4.9	0.191	4.9	0.250	6.35	0.382	9.7	-	-
1 1/2"	1.900	48.3	0.109	2.77	0.145	3.7	0.145	3.7	0.200	5.1	0.200	5.1	0.281	7.1	0.400	10.2	-	-
2"	2.375	60.3	0.109	2.77	0.154	3.9	0.154	3.9	0.218	5.5	0.218	5.5	0.343	8.7	0.436	11.1	-	-
2 1/2"	2.875	73.0	0.120	3.05	0.203	5.2	0.203	5.2	0.276	7.0	0.276	7.0	0.375	9.5	0.552	14.0	-	-
3"	3.500	88.9	0.120	3.05	0.216	5.5	0.216	5.5	0.300	7.6	0.300	7.6	0.438	11.1	0.600	15.2	-	-
3 1/2"	4.000	101.6	0.120	3.05	0.226	5.7	0.226	5.7	0.318	8.1	0.318	8.1	-	-	-	-	-	-
4"	4.500	114.3	0.120	3.05	0.237	6.0	0.237	6.0	0.337	8.6	0.337	8.6	0.531	13.5	0.674	17.1	-	-
5"	5.563	141.3	0.134	3.4	0.258	6.6	0.258	6.6	0.375	9.5	0.375	9.5	0.625	15.9	0.750	19.05	-	-
6"	6.625	168.3	0.134	3.40	0.280	7.1	0.280	7.1	0.432	11.0	0.432	11.0	0.718	18.2	0.864	21.9	-	-
8"	8.625	219.1	0.148	3.76	0.332	8.2	0.332	8.2	0.500	12.7	0.500	12.7	0.906	23.0	0.875	22.2	-	-
10"	10.750	273.0	0.165	4.19	0.365	9.3	0.365	9.3	0.500	12.7	0.593	15.1	1.125	28.6	-	-	-	-
12"	12.750	323.9	0.180	4.57	0.375	9.5	0.406	10.3	0.500	12.7	0.687	17.4	1.312	33.3	-	-	-	-
14"	14.000	355.6	-	-	0.375	9.5	0.438	11.1	0.500	12.7	0.750	19.05	1.406	35.7	-	-	-	-
16"	16.000	406.4	-	-	0.375	9.5	0.500	12.7	0.500	12.7	0.843	21.4	1.593	40.5	-	-	-	-
18"	18.000	457.2	-	-	0.375	9.5	0.562	14.3	0.500	12.7	0.937	23.8	1.781	45.2	-	-	-	-
20"	20.000	508.0	-	-	0.375	9.5	0.593	15.1	0.500	12.7	1.031	26.2	1.968	50.0	-	-	-	-
24"	24.000	609.6	-	-	0.375	9.5	0.687	17.4	0.500	12.7	1.218	30.9	2.343	59.5	-	-	-	-

Apêndice C

Vista Frontal e Cotas do Duto Simulador de Tensões

