

Filipe Fontana

**MEDIÇÃO DE CARREGAMENTO DE FLEXÃO EM DUTO
USANDO INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA COMBINADA
COM INTERFERÔMETRO RADIAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior

Coorientador: Dr. Matias Roberto Viotti

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fontana, Filipe

Medição de carregamento de flexão em duto usando
indentação instrumentada combinada com interferômetro radial
/ Filipe Fontana ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves
Júnior ; coorientador, Matias Roberto Viotti. -
Florianópolis, SC, 2015.

118 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Indentação instrumentada. 3.
Dutos. 4. Esforços de flexão. 5. Interferometria speckle.
I. Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi. II. Viotti, Matias
Roberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Filipe Fontana

**MEDIÇÃO DE CARREGAMENTO DE FLEXÃO EM DUTO
USANDO INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA COMBINADA
COM INTERFERÔMETRO RADIAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 19 de Fevereiro de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.
Orientador

Matias Roberto Viotti, Dr.Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng. (Presidente)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. André Roberto de Sousa, Dr.Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Celso Luiz Nickel Veiga, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Suterio, Dr.Eng.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Este trabalho é dedicado aos meus pais Milton e Mercedes, Irmã Gabriela e namorada Mariane.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade única de desenvolvimento deste trabalho, ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis pelo apoio financeiro.

Agradeço em especial meu orientador Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, pela atenção dispensada, paciência e por seus conselhos e ideias de excelência. Agradeço também meu coorientador Dr. Ing. Matias Roberto Viotti, pela atenção, amizade e conselhos, imprescindíveis para o sucesso desse trabalho.

Agradeço ao colega Anderson Pacheco pelos conselhos e dicas na realização dos ensaios experimentais. Ao técnico de laboratório Élsio Varela pelas exaustivas jornadas de trabalho durante a realização dos ensaios.

Agradecimento especial ao colega de laboratório Danilo Bonomo, e aos demais bolsistas de graduação que me auxiliaram ao longo deste período.

Aos amigos Vitor Farias de Borba, Renato Machado de Souza, pelas conversas, trabalhos, viagens e conselhos. Aos demais colegas mestrandos que de alguma forma apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Mariane Pires Ventura que esteve ao meu lado por quase toda essa longa caminhada, pela sua paciência nos momentos mais difíceis e companheirismo nos momentos mais descontraídos.

Por último, agradeço a meus pais pelas razões que uma folha de papel não consegue através de palavras explicar.

*Weisheit ist nicht das Ergebnis der Schulbildung,
sondern des lebenslangen Versuchs, sie zu
erwerben.*

(Albert Einstein, 1954)

RESUMO

O conhecimento do estado de tensões presentes nos dutos, considerando um cenário de possíveis movimentações do solo, é um importante requisito na avaliação da integridade desses, bem como para o planejamento de ações a serem tomadas para prevenir ou corrigir possíveis problemas de segurança. O estado de tensões do duto depende de diversos fatores. Os analisados nesse trabalho são os esforços de flexão, originadas através da interação solo-duto, e as tensões residuais, originadas dos processos de fabricação dos tubos. Nesse trabalho será apresentado e avaliado um procedimento de medição de esforços de flexão em dutos utilizando o método de indentação instrumentada, considerado rápido e pouco invasivo. Para a validação experimental do procedimento proposto foi utilizada uma bancada que gera carregamentos de flexão bem conhecidos em tubos. O sistema de medição utiliza um interferômetro laser com sensibilidade radial para a medição do campo de deformações em torno de uma marca de indentação controlada, que são correlacionadas com o nível de tensões combinadas presentes. Além do procedimento de medição desenvolvido, também foi avaliado um método de cálculo de incerteza de medição.

Palavras-chave: Dutos. Indentação instrumentada. Esforços de flexão. Integridade de dutos. Interferometria speckle.

ABSTRACT

The knowledge of the stress field present in pipelines is an important requirement in assessing the integrity, when facing rights of way subjected to ground movements, as well as the planning of actions to be taken to prevent or correct potential safety issues. The stress field in pipelines depends on several factors. In this work two were analyzed: bending stress due to ground-pipe interaction, and residual stresses due to the pipe manufacturing processes. This work presents and evaluates a bending stresses measurement procedure in pipes using instrumented indentation, a fast and minimally invasive method. A bending bench was used in the development and evaluation of the proposed procedure. It is able to produce very well-known bending loading. The measurement system uses a laser interferometer characterized by radial in-plane sensitivity to measure the developed displacement field in response to a controlled indented print, which is correlated to the stress state of the material. In addition, an uncertainty assessment method was also evaluated.

Keywords: Pipelines. Instrumented indentation. Bending stress. Pipeline integrity. Speckle interferometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Roseta extensométrica utilizada para a realização do método do furo.	35
Figura 2 - Exemplo de superposição do estado de tensões no material.	42
Figura 3 - Posicionamento dos extensômetros ao redor do furo, recomendado pela norma ASTM E837.....	43
Figura 4 - Tensões uniformes (a) e não uniformes (b) ao longo da profundidade.....	44
Figura 5 - Processo de indentação.	45
Figura 6 - Marca de indentação deixada após a realização do processo de medição.....	46
Figura 7 - Gráfico de força-deslocamento obtido após a realização de um ensaio com indentação instrumentada.....	49
Figura 8 - Comparação do tempo de medição entre método do furo-cego incremental e indentação.	50
Figura 10 - Padrão <i>speckle</i> observado por uma câmera.	52
Figura 11 - Luz laser refletida de forma difusa.....	52
Figura 9 - Configuração típica de um interferômetro com iluminação dupla. ..	53
Figura 12 - Configuração inicial do interferômetro radial com dois espelhos cônicos.....	57
Figura 13 - Configuração explorada por Kapp, utilizada no desenvolvimento desse trabalho.	57
Figura 14 - (a) Óptica de iluminação do sistema de medição e (b) região de medição.....	58
Figura 15 - Modelo 3D cabeçote de medição.....	59
Figura 16 - Disposição mecânica dos componentes presentes no cabeçote de medição.....	60
Figura 17 - Modelo 3D do cabeçote de indentação e vista em corte.	61
Figura 18 - Vista em corte do modelo 3D do cabeçote de medição evidenciando os sensores de carga e deslocamento.	62
Figura 19 - Modelo 3D da base de fixação.....	63
Figura 20 - Esquemático do sistema de posicionamento dos módulos à base de fixação.....	64
Figura 21 - (a) Módulo de medição e (b) indentação acoplados ao tubo.	65
Figura 22 - Leiaute principal do software de medição.....	66
Figura 23 - Aba " <i>indentation</i> " do software de medição.....	67
Figura 24 - Fluxograma do processo de medição.	69
Figura 25 - Leiaute do software de processamento RSindent.	71
Figura 26 - Ajuste de curvas através da constante de proporcionalidade.....	73
Figura 27 - (a) Flexão pura aplicada a um tubo gerando uma (b) distribuição linear de tensões.....	74
Figura 28 - Distribuição da tensão longitudinal ao longo de uma seção transversal em um tubo submetido à flexão e à carga axial.	76

Figura 29 - (a) Padrão de flexão e (b) detalhes do módulo de fixação e (c) módulo de aplicação de carga	81
Figura 30 - Modelo de viga biapoiada com aplicação de carga central pontual e elementos para o cálculo do momento fletor	84
Figura 31 - Diagrama de tensão de flexão calculado a partir das medições feitas com os extensômetros e a célula de carga.	84
Figura 32 - Distribuição das seções no tubo e posição angular considerada para a realização dos ensaios e escala angular adotada.	85
Figura 33 - Ensaios de avaliação para determinação da melhor força de indentação.	87
Figura 34 - Mapas de diferença de fase dos cinco ensaios de avaliação da repetibilidade, com força de indentação de 900 N.	88
Figura 35 - Tensões calculadas para os ensaios de repetibilidade.	88
Figura 36 - Curvas de força-deslocamento geradas a partir dos ensaios para avaliação da repetibilidade do sistema de indentação.	89
Figura 37 - Pontos de medição para a realização dos ensaios sem carga nas seções S1 e S7 do tubo do padrão de flexão.	90
Figura 38 - Mapas de diferença de fase das medições sem carga.	91
Figura 39 - Mapas de diferença de fase dos oito ensaios realizados, para medição sem carga de flexão, utilizando o método do furo cego.	92
Figura 40 - Distribuição dos pontos de medição nas seções mais carregadas (S3, S4, S5 e S6).	93
Figura 41 - Distribuição dos pontos de medição nas seções menos carregadas (S1, S2, S7 e S8).	94
Figura 42 - Ensaio (a) realizado na linha neutra, (b) no intradorso e (c) no extradorso do tubo carregado.	96
Figura 43 - Mapas de diferença de fase dos principais ensaios realizados nas quatro primeiras seções.	97
Figura 44 - Mapas de diferença de fase dos principais ensaios realizados nas quatro últimas seções.	98
Figura 45 - Mapas de diferença de fase dos ensaios realizados na seção S4. ...	99
Figura 46 - Vetor de deslocamentos utilizados como referência para o cálculo das tensões.	100
Figura 47 - Valores de tensão calculados para os pontos de medição da seção S4 através da indentação e célula de carga.	101
Figura 48 - Resultados da medição de tensão de flexão nas oito seções do tubo, utilizando vinte e quatro pontos de medição (S3, S4, S5 e S6) e dezesseis pontos de medição (S1, S2, S7 e S8).	102
Figura 49 - Mapa de orientação da linha neutra calculado a partir da medição das oito seções.	104
Figura 50 – Distribuição dos conjuntos de dados para análise do número mínimo de pontos.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do tubo utilizado para o desenvolvimento do trabalho.	82
Tabela 2 - Posição das oito seções de medição ao longo do tubo.	83
Tabela 3 - Resultados obtidos de tensão de flexão e intervalo de confiança (IC) nas oito seções do tubo.	102
Tabela 4 - Cálculos de tensão de flexão e IC para a análise do número mínimo de pontos por seção de medição.	105
Tabela 5 - Resumo do processamento de dados para análise do número mínimo de pontos de medição por seção.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
CCD	<i>Charge-coupled Device.</i>
DOE	<i>Diffraction Optical Element</i> (Elemento óptico difrativo).
ESPI	<i>Electronic Speckle Pattern Interferometry.</i>
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automatização.
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer.</i>
PZT	Atuador piezoelétrico.
P&G	Petróleo e Gás.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_m	Área média da superfície
c	Raio externo do eixo
C	Constante aditiva
D	Diâmetro do duto.
e	Vetor de resíduos
E	Módulo de elasticidade
F	Carregamento axial
I	Intensidade do padrão <i>speckle</i>
I_n	Momento de inércia da área de uma seção
IM	Incerteza de medição
J	Momento polar de inércia da área de uma seção transversal
L	Distância entre pivôs das braçadeiras do padrão de flexão
L_p	Distância entre o ponto de aplicação da carga e o pivô mais afastado da seção de medição
L_x	Distância entre a seção de medição e o pivô da braçadeira mais próxima
M_i	Momento fletor ao redor do eixo i
n	Número de pontos de medição
N	Número de elementos da curva
\vec{n}_a	Vetor unitário de direção
P	Coefficiente de proporcionalidade
p	Pressão manométrica
r	Raio interno do cilindro
R	Raio externo
$r(i, j)$	Coefficiente de correlação entre i e j
s	Desvio padrão
S_L	Tensão longitudinal
S_L^{med}	Tensão longitudinal média de uma seção transversal
S^f	Tensão oriunda do carregamento de momento fletor
S^{flex}	Máximo valor de tensão oriundo do carregamento de momento fletor
T	Torque atuante no eixo
t	Espessura da parede do tubo
t_i	Sinal teórico ou experimental de referência
$t(i, j)$	Coefficiente de <i>Student</i> para um nível de confiança i e número de graus de liberdade j
$u(i)$	Incerteza padrão da variável i

z	Distância entre o ponto avaliado e a linha neutra
α	Diferença de fase entre os feixes A e B
β_i	i -ésimo coeficiente da distribuição de tensões
γ	Nível de confiança
θ	Posição angular
θ_{LN}	Ângulo de orientação da linha neutra
θ_{Smax}	Ângulo de orientação da tensão máxima em uma seção
σ_i	Tensão normal na direção i
σ_{ponto}	Tensão no ponto de medição
σ_{ref}	Tensão no ponto de referência
τ	Tensão de cisalhamento atuante na seção
$\tau_{média}$	Tensão média de cisalhamento atuante na seção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	<i>MOTIVAÇÃO</i>	34
1.1.1	Medição de tensões residuais e combinadas	34
1.1.2	Holografia eletrônica	35
1.1.3	Indentação instrumentada	36
1.2	<i>OBJETIVO GERAL</i>	36
1.3	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	37
1.4	<i>ESTRUTURA DO DOCUMENTO</i>	37
2	TENSÕES EM TUBOS	39
2.1	<i>CARREGAMENTOS MECÂNICOS</i>	39
2.1.1	Carga axial	39
2.1.2	Flexão	39
2.1.3	Torção	40
2.1.4	Pressão	40
2.2	<i>TENSÕES RESIDUAIS DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS</i>	41
2.3	<i>TENSÕES COMBINADAS</i>	42
2.4	<i>MÉTODO DO FURO CEGO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES</i>	43
2.5	<i>INDENTAÇÃO</i>	44
2.5.1	Estado da arte	46
2.5.2	Indentação para medição de tensões	48
2.5.3	Aspectos positivos	50
3	MEDIÇÃO DE TENSÕES USANDO HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA	51
3.1	<i>PRINCÍPIOS</i>	51
3.1.1	Franjas de interferência	53
3.1.2	Deslocamento de fase	55
3.2	<i>INTERFERÔMETRO RADIAL</i>	56
3.2.1	Configuração óptica	58
3.3	<i>SISTEMA DE MEDIÇÃO</i>	58
3.3.1	Cabeçote de medição	59

3.3.2	Cabeçote de indentação	60
3.3.3	Base de fixação	62
3.3.4	Software de medição	65
4	MODELO DE CÁLCULO	69
4.1	<i>PROCESSO DE MEDIÇÃO</i>	69
4.2	<i>CÁLCULO DOS DESLOCAMENTOS</i>	70
4.3	<i>CÁLCULO DAS TENSÕES</i>	71
4.4	<i>CÁLCULO DAS TENSÕES DE FLEXÃO</i>	73
4.4.1	Incerteza de medição	78
5	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	81
5.1	<i>PADRÃO DE FLEXÃO</i>	81
5.1.1	Instrumentação	83
5.2	<i>ENSAIOS EXPLORATÓRIOS</i>	85
5.2.1	Parâmetros de indentação	86
5.2.2	Repetibilidade	87
5.3	<i>ENSAIOS SEM CARGA</i>	89
5.4	<i>ENSAIOS COM CARGA</i>	92
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
6.1	<i>MEDIÇÃO SOB FLEXÃO</i>	95
6.2	<i>ORIENTAÇÃO DA LINHA NEUTRA</i>	103
6.3	<i>AVALIAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS</i>	104
7	CONCLUSÕES	109
7.1	<i>MEDIÇÃO DA TENSÃO DE FLEXÃO</i>	109
7.2	<i>ORIENTAÇÃO DA LINHA NEUTRA</i>	110
7.3	<i>NÚMERO RECOMENDADO DE PONTOS DE MEDIÇÃO</i>	110
7.4	<i>PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO</i>	110
7.5	<i>GRAU DE INVASIVIDADE</i>	111
7.6	<i>DEPENDÊNCIA DE UM ENSAIO DE REFERÊNCIA</i>	111

<i>7.7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	<i>111</i>
REFERÊNCIAS	113
ANEXO A – Certificado de calibração da célula de carga	117

1 INTRODUÇÃO

O transporte de petróleo, gás-natural e derivados, hoje, em sua grande maioria, é realizado por dutos, podendo ser aéreos, subterrâneos ou marítimos, transportando os insumos da indústria de petróleo e gás (P&G) desde a região produtora até o consumidor final.

Esses dutos, devido aos seus tamanhos e locais de instalação, estão sujeitas às mais diversas ações do meio e eventos externos, como deslizamentos de terra, que quando ocorrem provocam alterações no solo e consequente movimentação dos dutos enterradas, tornando esse um dos principais fatores que levam à geração de esforços em dutos. Mas, ainda assim, é atualmente considerada a maneira mais segura para o transporte de tais insumos. A utilização de dutos contribui no aumento da segurança nas rodovias, diminuindo a demanda por caminhões que realizam o transporte dessas substâncias, assim como a poluição gerada por eles.

Após a instalação e operação os dutos podem sofrer com ações do clima ou do homem, tornando necessária a realização de inspeções e procedimentos que avaliem o nível de segurança desses. Uma ferramenta utilizada na inspeção desses é a medição do nível de tensões presentes no duto. A combinação das tensões geradas por agentes externos somada com as tensões residuais previamente presentes no material, decorrentes do processo de fabricação dos tubos, pode ultrapassar o limite aceitável e por em risco, ou mesmo, causar uma falha no componente.

Sendo assim, para monitorar a confiabilidade operacional e analisar riscos, o processo de medição das tensões combinadas se torna extremamente importante. Em se tratando de P&G, acidentes relacionados a explosões e vazamentos de insumos não representam apenas uma grande perda financeira para a companhia, mas também um risco ambiental imensurável.

Hoje em dia existem inúmeros métodos para determinar o nível de tensões combinadas e residuais. Um método bastante utilizado e estudado pelo Laboratório de Metrologia e Automatização (Labmetro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é o método do furo cego. No qual a medição de tensões residuais pode ser feita com a utilização de uma roseta de extensômetros, que é abrangido pela norma ASTM E837. No Labmetro estão sendo desenvolvidos outros procedimentos que utilizam interferometria laser para a medição do nível de tensões do material.

Estendendo os estudos realizados nessa área pela UFSC, este trabalho visa apresentar um método alternativo, confiável e menos invasivo, de medição utilizando o processo de indentação e avaliar a confiabilidade com que é possível determinar carregamentos de flexão que agem em dutos.

1.1 MOTIVAÇÃO

1.1.1 Medição de tensões residuais e combinadas

Existem diversos métodos para medição de tensões residuais e combinadas atuantes em materiais. Eles são divididos basicamente em três grupos: destrutivos, semidestrutivos e não destrutivos. As técnicas denominadas destrutivas e semidestrutivas baseiam-se na medição do deslocamento ocorrido através do alívio de tensão, ocasionado pela remoção de material de forma controlada para a determinação do estado de tensões do material ensaiado. Seccionamento, furo cego e anel usinado são os principais métodos destrutivos e semidestrutivos usados na medição de tensões (ROSSINI *et al.*, 2012).

O método do furo cego, citado com frequência na literatura, é um dos métodos mais utilizados e confiáveis na medição de tensões residuais, podendo também ser empregado para a caracterização de esforços de flexão a que certos materiais estão submetidos. Na versão com extensômetros, uma roseta extensométrica é instalada na região de medição (Figura 1), a qual é eletricamente conectada a uma ponte amplificadora. Após a instalação da roseta, a ponte é zerada e um furo cego é realizado na superfície, tipicamente com diâmetro entre 1 e 4 mm e profundidade igual ao diâmetro, sempre no centro da roseta extensométrica. A realização do furo gera um alívio de tensões no material, que provoca um campo de deformações na superfície que é detectado pela roseta (ASTM, 2013).

Figura 1 - Roseta extensométrica utilizada para a realização do método do furo.



Fonte: Próprio autor.

Embora o método do furo cego seja frequentemente rotulado como um método de medição de tensões residuais (STEINZIG; PONSLET, 2003), ele realiza a medição de todas as tensões combinadas que agem sobre o material, seja ela tensão residual ou tensão de trabalho. A medição das tensões combinadas possibilita a determinação de esforços de trabalho em estruturas.

Apesar de ser um método bastante consolidado e regido por norma (ASTM E837), possui algumas limitações:

- Requer habilidade do operador para o correto posicionamento e a colagem da roseta extensométricas.
- Elevado tempo para preparação da superfície e instalação da roseta.
- O valor lido através da ponte amplificadora reflete o valor médio de deformação na região da grade dos extensômetros.
- Impossibilidade no reaproveitamento da roseta extensométrica.

1.1.2 Holografia eletrônica

O uso de técnicas ópticas vem se aprimorando nas últimas décadas. A combinação do método do furo cego com a holografia eletrônica (ESPI – “*Electronic Speckle Pattern Interferometry*”) tem se mostrado bastante eficiente, com algumas vantagens em relação ao uso de rosetas extensométricas, principalmente em relação à sensível redução do tempo de preparação da superfície de medição.

A medição utilizando holografia eletrônica se torna atrativa por ser uma medição relativamente rápida. O uso de técnicas digitais

possibilita a automatização do sistema de medição e do processamento de dados.

Para medição de tensões nas quais não se conhece a direção da tensão principal é conveniente que o equipamento possua uma sensibilidade radial. Albertazzi Jr. desenvolveu junto com sua equipe um interferômetro óptico radial para a medição de micro deslocamentos, tornando mais simples o método de medição da magnitude e direção de deslocamentos e do estado de tensões biaxiais (ALBERTAZZI JUNIOR *et al.*, 2004; KAPP, 2010; KAUFMANN, 2011).

1.1.3 Indentação instrumentada

Pesquisas mostram que é possível obter resultados quantitativos para medições de tensões combinadas através da indentação instrumentada (SUTERIO, 2005; LEE; KWON, 2004; BISLAT; ROBERTS, 2000; SWADENER; TALJAT; PHARR, 2001).

O processo de indentação, bastante utilizado para a determinação das propriedades mecânicas de materiais (SAKHAROVA; PRATES; OLIVEIRA, 2012), consiste na realização de um processo mecânico que “carimba” o formato do indentedor na superfície, na qual se deseja medir o nível de tensões, utilizando uma cabeça semi-esférica, cônica ou piramidal. Esse processo cria uma região deformada plasticamente que possui forma e extensão influenciadas pelo nível de tensões presentes no material (SUTERIO, 2005).

A indentação instrumentada possui diversas vantagens em relação ao método do furo cego, sendo as principais: (a) a redução no tempo de medição, pois o processo de indentação é mais rápido que o processo de furação e (b) um processo menos invasivo, uma vez que o furo retira material, enquanto que a indentação produz apenas um pequeno amassamento na região analisada, gerando tensões compressivas, geralmente consideradas benéficas. Estes aspectos positivos motivaram o desenvolvimento do presente trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

Tendo em vista a necessidade real de avaliação da segurança dos dutos subterrâneos, o objetivo deste trabalho é a caracterização metrológica de um equipamento de medição de tensões residuais e de trabalho, já existente no Labmetro, e o desenvolvimento e validação de um processo de medição de esforços de flexão em dutos através do

método de indentação, com a expectativa de que se possa avaliar a segurança operacional de dutos de forma rápida e pouco invasiva.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ao final deste trabalho espera-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Aprofundar o estudo de tensões residuais, tensões combinadas e os principais métodos de medição;
- Familiarização com sistema de medição de tensões combinadas com indentação instrumentada já existente;
- Calibrar e validar o sistema de medição existente;
- Desenvolver e validar um procedimento de medição de esforços de flexão em dutos;
- Propor um procedimento para realizar as medições de momentos fletores e analisar os resultados.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura desse documento se divide em sete capítulos. O segundo capítulo trás uma revisão bibliográfica sobre tensões mecânicas, residuais e combinadas. No capítulo três é mostrado o sistema de medição de tensões com indentação instrumentada. O capítulo quatro desenvolve o modelo de cálculo matemático utilizado nesse trabalho. Os ensaios experimentais realizados para medição de tensão e a análise desses estão presentes, respectivamente, nos capítulos cinco e seis. Finalmente, o capítulo sete reúne as conclusões desse documento e é seguido pelas referências utilizadas no presente trabalho.

2 TENSÕES EM TUBOS

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica sobre tensões em tubos, tensões residuais, tensões combinadas e o método do furo cego para medição de tensões.

2.1 CARREGAMENTOS MECÂNICOS

As tensões mecânicas que se desenvolvem em materiais podem ser decorrentes de diversos tipos de esforços aplicados. Carregamentos de flexão, pressão, torção e carga axial são alguns exemplos destacados quando a avaliação de integridade de dutos é considerada.

2.1.1 Carga axial

Outro carregamento importante que pode agir sobre tubos, são os carregamentos axiais. Na mecânica, muitas são as aplicações nas quais deve-se calcular o nível de carregamento axial para se determinar sobre a segurança de tal material. Através da equação 1 é possível determinar a tensão atuante em uma viga (HIBBELER, 2010).

$$\sigma_{axial} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde σ_{axial} é a tensão axial presente no material, F e A são, respectivamente, a força atuante e a área da seção transversal do material.

2.1.2 Flexão

As tensões de flexão são de suma importância e objeto de estudo nesse trabalho. Em Hibbeler (2010) é demonstrado como construir os diagramas de força cortante e momento fletor para uma viga ou eixo, assim como o cálculo de tensão de flexão associado a determinado carregamento em materiais, utilizando-se a equação 2.

$$Sf = \frac{M_y z}{I_n} \quad (2)$$

Onde S^f é a tensão de flexão atuante no ponto, M_y é o momento fletor atuante, z é a distância entre o ponto avaliado e a linha neutra e I_n é o momento de inércia da área da seção (HIBBELER, 2010).

2.1.3 Torção

O torque, ou momento torçor, é um momento que tende a torcer o material em torno do seu eixo longitudinal. A partir do torque é possível calcular a tensão de cisalhamento para uma dada seção do material através da equação 3.

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (3)$$

Onde τ representa a tensão de cisalhamento atuante na seção, T o torque atuante, c raio externo do eixo e J o momento polar de inércia da área da seção transversal. Em tubos, o cálculo da tensão de cisalhamento média que age sobre a área de um determinado material a partir do torque, pode ser feito através da equação 4.

$$\tau_{m\acute{e}dia} = \frac{T}{2tA_m} \quad (4)$$

Onde $\tau_{m\acute{e}dia}$ é a tensão de cisalhamento média que age sobre a espessura do tubo, T o torque atuante na seção, t a espessura do tubo no local onde se deseja calcular a tensão e A_m a área média da superfície (HIBBELER, 2010).

2.1.4 Pressão

A pressão interna é outro fator de suma importância na integridade de dutos. Esse tipo de carregamento cria na parede dos tubos gradientes de tensões biaxiais, resultando nas tensões principais σ_c para as tensões circunferenciais e σ_L para as tensões longitudinais. Para o cálculo dessas tensões em reservatórios cilíndricos fechados, utilizam-se as equações 5 e 6.

$$\sigma_c = \frac{pr}{t} \quad (5)$$

$$\sigma_L = \frac{pD}{4t} \quad (6)$$

2.2 TENSÕES RESIDUAIS DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS

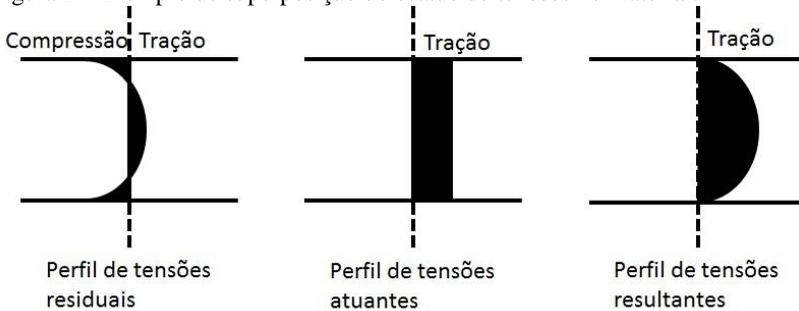
As tensões residuais são tensões existentes em um material sem que sobre ele estejam agindo carregamentos externos. Possuem sempre um estado de equilíbrio natural no material, ou seja a soma das tensões compressivas com as tensões trativas é igual a zero. A aplicação de carregamentos externos, gradientes de temperatura ou modificações na geometria pela remoção de material provoca uma redistribuição de tensões de modo que elas se equilibrem novamente, porém em outra configuração. Os principais geradores de tensões residuais são os processos de fabricação, por exemplo, através da laminação, fundição e estampagem dos materiais. Muitas vezes as tensões residuais podem ser induzidas posteriormente no material, durante processos de instalação, montagem, soldagem e operações com sobrecarga.

Tensões residuais são, em sua maioria, elásticas e superpõem-se às tensões de trabalho do material. Algumas vezes essa interação excede o limite aceitável pelo material ocasionando sua falha, especialmente nos casos que envolvem fadiga. É muito difícil prever a magnitude das tensões residuais, pois é preciso conhecer todo o histórico do material, desde a produção da matéria-prima até o processo de fabricação e montagem do equipamento final (MACHERAUCH, 1986).

Os efeitos das tensões residuais, dependendo do sinal, intensidade, distribuição e da interação com as tensões de trabalho ao qual o material está submetido, podem ser algumas vezes benéficos ou em outras prejudiciais (LU, 1996).

A Figura 2 mostra um exemplo de interação das tensões residuais presentes em um material com uma carga de tensão de trabalho trativa. O resultado da interação entre as tensões mostra um perfil totalmente trativo, que favorece a propagação de trincas e a corrosão do material. Entretanto, devido ao perfil compressivo de tensões residuais na superfície do material, o resultado da interação com a carga trativa é atenuado. Diminuindo a ação da tensão aplicada na superfície onde o material está mais sujeito a formação de trincas e corrosão, mostrando o efeito benéfico das tensões residuais compressivas. Na região interna acontece um aumento considerável no nível de tensões trativa, pela interação com o perfil trativo de tensões residuais, porém, a formação de trincas na parte interior do material é difícil de acontecer.

Figura 2 - Exemplo de superposição do estado de tensões no material.



Fonte: Próprio autor.

2.3 TENSÕES COMBINADAS

Tensões combinadas (equação 7) são aqui definidas como a soma de todas as formas de tensões que agem no material, sejam originárias das tensões residuais presentes no material ou das tensões de trabalho geradas devido à presença de carregamentos externos.

$$\sigma_T = \sigma_r + \sigma_t \quad (7)$$

Onde σ_T representa o nível de tensões combinadas presentes no material, σ_r o nível de tensões residuais e σ_t o nível de tensões de trabalho atuantes.

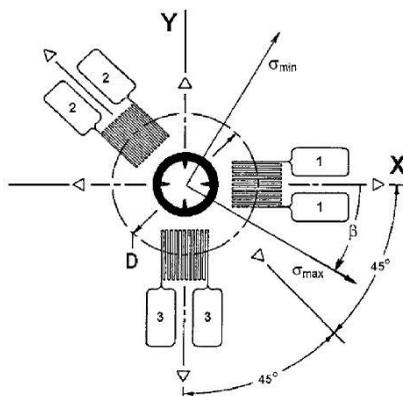
Os métodos para medição de tensões que aplicam alívio de tensões realizam, em sua maioria, a medição das tensões combinadas. As tensões de serviço podem ser facilmente medidas com extensômetros de resistência desde que seja possível remover o carregamento externo e zerar o extensômetro. As deformações medidas após a aplicação do carregamento externo estão relacionadas com as tensões de serviço. Porém, há casos onde não é possível remover o carregamento externo. É o caso de dutos enterrados. Nestes casos, a determinação das tensões de trabalho só é possível se houver conhecimento prévio das tensões residuais atuantes no material. Para isso devem-se realizar em laboratório ou em um ambiente livre de tensões de trabalhos, ensaios no material para determinação do nível de tensões residuais atuantes. Com o conhecimento das tensões residuais e a medição das tensões combinadas é possível calcular as tensões de serviço através da equação 7.

2.4 MÉTODO DO FURO CEGO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES

O método do furo cego é uma técnica para medição de tensões residuais próximas à superfície em materiais isotrópicos, baseado no alívio de tensões causado pela execução de um pequeno furo na superfície de interesse. Através da remoção deste material, é alterado o estado de tensões da superfície, fazendo com que ocorra um rearranjo dessas nas regiões adjacentes ao furo, gerando um campo de deformações. Esse, por sua vez, é dependente das propriedades elásticas do material, da geometria do furo e das tensões combinadas presentes no material anteriormente ao processo de furação.

Esse método é normatizado pela ASTM E837-13a (2013), para a utilização de rosetas extensométricas seguindo a configuração presente na Figura 3. Durante os últimos anos tem-se desenvolvido estudos no Labmetro para a substituição das rosetas extensométricas pelas chamadas rosetas ópticas, que utilizam técnicas ópticas para a medição das deformações geradas na superfície de medição. O cabeçote de medição utilizado no desenvolvimento desse trabalho, e que será descrito no capítulo 3, utiliza uma técnica óptica.

Figura 3 - Posicionamento dos extensômetros ao redor do furo, recomendado pela norma ASTM E837.



Fonte: ASTM (2013).

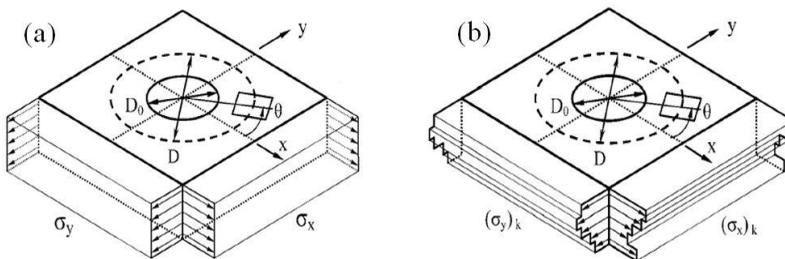
O método do furo cego é aplicável em materiais com comportamento elástico linear e recomendado, pela norma, seu uso para medições de tensões de até 80% do limite de escoamento de materiais com espessura maior que o diâmetro do furo e 50% para materiais não espessos, com espessura menor que o diâmetro do furo (ASTM, 2013).

Por se tratar de um método que utiliza o princípio de remoção de material, esse é considerado semi-destrutivo, pois os danos causados no material não afetam significativamente a estrutura do mesmo, podendo em muitos casos ser desprezados ou até reparados.

Quanto à execução do furo, é utilizada uma furadeira de alta rotação, com o objetivo de não introduzir novas tensões residuais no material durante o processo de usinagem. O diâmetro da broca pode variar entre 0,6 mm e 5,6 mm, dependendo da espessura do material analisado e do tipo da broca.

A norma ASTM E837 prevê duas formas de abordagens para medição de tensões: (a) uniformes, considerando as tensões constantes ao longo da profundidade do material e (b) não uniformes, o qual é considerado que as tensões variam com a profundidade. No primeiro caso cada ensaio pode ser realizado através de apenas um único passo de furação, ou com a realização de até oito passos. A cada passo realizado é feita a leitura de deformação através dos extensômetros e a partir dessas leituras calculado os valores de tensão, considerados constantes para toda a profundidade do furo (Figura 4a). No segundo método, o não uniforme, as medições são realizadas através da execução de até 20 passos de furação e calculados os valores de tensões para cada passo de furação (Figura 4b)(PACHECHO, 2014; ASTM, 2013).

Figura 4 - Tensões uniformes (a) e não uniformes (b) ao longo da profundidade.



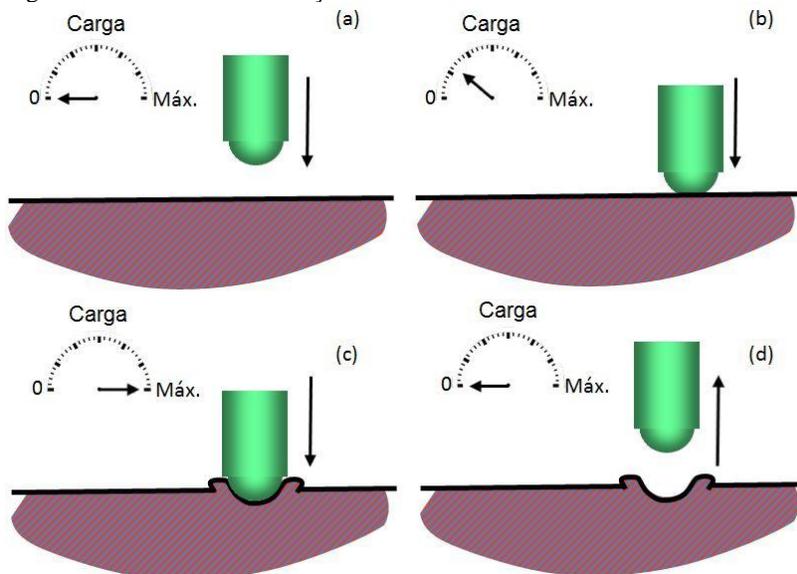
Fonte: ASTM (2013).

2.5 INDENTAÇÃO

A indentação é um processo mecânico que introduz novas tensões quando uma ponta de material duro é fortemente pressionada contra a superfície, provocando uma deformação plástica na superfície do material. As deformações geradas pelo processo são dependentes da forma da ferramenta, das propriedades elásticas do material, da força de indentação e das tensões previamente atuantes sobre o material

(RODACOSKI, 1997). A Figura 5 esquematiza um processo de indentação em uma peça. Esse inicia com a aproximação da ponta de indentação da superfície de interesse (Figura 5a). Na sequência na Figura 5b e Figura 5c é feita a aplicação da carga até o valor máximo desejado. A última etapa consiste na remoção da força e no retorno do equipamento fazendo o alívio de carga (Figura 5d).

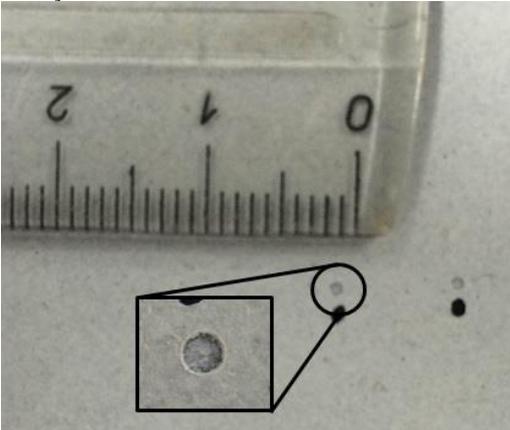
Figura 5 - Processo de indentação.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6 pode-se observar a marca de indentação deixada, após a realização do processo de medição em uma barra de aço, pelo equipamento objeto de estudo desse trabalho.

Figura 6 - Marca de indentação deixada após a realização do processo de medição.



Fonte: Próprio autor.

2.5.1 Estado da arte

Nas últimas décadas foi sugerida a utilização de indentadores, conhecidos na engenharia mecânica por serem utilizados em ensaios de dureza, para a medição de tensões residuais. Kokubo (1932) realizou diversos experimentos em diferentes materiais, com o objetivo de demonstrar os efeitos da tensão sobre a medição de dureza do material. Ele aplicou uma deformação de 0,3% no espécime e realizou ensaios de dureza Vickers sobre a região deformada. Observou-se uma redução na dureza de 5-12% na aplicação de tensões trativas, enquanto que para aplicação de tensões compressivas observou-se um aumento de apenas 0-3% na dureza do material (RUUD, 2006).

Desde 1932, muitos estudos foram realizados com o objetivo de aprimorar o método de medição de tensões residuais através de indentação. Estudos relacionados à análise de tensões residuais através do comportamento do processo de nano indentação aceleraram na década de 90, através de experimentos e simulações relatadas em dois artigos publicados por Tsui, Oliver e Pharr (1996) e Bolshakov, Oliver e Pharr (1996). Esses artigos relatam uma série de experimentos e simulações realizadas na tentativa de se estabelecer correlações entre a dureza do material e o nível de tensões ao qual esse está submetido. Porém, esses dois estudos não conseguiram determinar um processo detalhado de medição, para determinação das tensões, utilizando nano

indentação, entretanto, geraram grande motivação para pesquisas futuras (JANG, 2009).

Desde então inúmeras pesquisas foram publicadas propondo diversos métodos de interpretação dos resultados obtidos através do processo de indentação para a medição de tensões residuais. Porém, os métodos de medição com indentação ainda não são tão confiáveis como, por exemplo, o método do furo cego, sendo essa uma técnica pouco aplicada na prática (RUUD, 2006). Jang (2009) trás uma revisão de diversos métodos de medição de tensões residuais através de indentação e nano indentação, com o objetivo de fornecer esclarecimentos para pesquisas futuras.

Os processos de medição através de indentação podem ser classificados em três: (a) nano indentação, (b) micro indentação e (c) macro indentação. Essa classificação é feita em função da força aplicada e pelo tamanho da área deformada.

Os primeiros ensaios de dureza através de indentação utilizavam força variando entre 100 N e 30 kN, sendo a superfície deformada avaliada através de métodos ópticos. Com o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais e de sistemas de medição, criou-se a necessidade de se avaliar micro volumes de material, materiais frágeis, componentes com superfícies tratadas e micro estruturas. Através dessa necessidade surgiram os ensaios de micro durezas, com forças de indentação na ordem de 0,1 N, avaliando-se a superfície de deformação através de microscópios ópticos.

Nano indentações surgiram a partir da década de 90. As medições são realizadas monitorando continuamente a força e profundidade de penetração da ferramenta. As forças utilizadas nesse tipo de ensaio chegam a alguns nanonewtons com profundidade de indentação na ordem de nanômetros. Essa técnica é bastante utilizada na determinação das propriedades mecânicas (dureza e módulo de elasticidade) de materiais com superfícies modificadas e revestimentos.

Devido às suas características de portabilidade, fácil manuseio e por ser um método, dependendo da estrutura do material, não destrutivo, o processo de indentação tem chamado a atenção de pesquisadores em diversas áreas, podendo-se destacar estudos relacionados à determinação do módulo de elasticidade e tensão de escoamento do material, bem como a determinação de tensões residuais e de trabalho.

Existem três formas utilizadas para se indentar um material:

- **Carga controlada:** Na qual se conhece a força máxima de indentação. É utilizado na medição de dureza, tensões residuais e na determinação das propriedades elasto-plásticas do material.

- **Deslocamento conhecido:** No qual se conhece a profundidade máxima de penetração do indentador. É utilizado para medição de tensões residuais em materiais nos quais se conhecem as propriedades elásticas.

- **Impulso conhecido ou impacto:** mais utilizado na medição de dureza (SUTERIO, 2005).

Devido às características do equipamento utilizado para o desenvolvimento desse trabalho, o método de medição através de impulso conhecido ou impacto, não será aplicado. Neste trabalho serão investigados os métodos de carga controlada e deslocamento conhecido.

2.5.2 Indentação para medição de tensões

O processo de indentação, comprovado por Hung, Long e Wang (1997) e Suterio *et al.* (2002), causa um rearranjo de tensões no material, provocando um campo de deslocamentos ao redor da região indentada, tornando possível, através de métodos ópticos, a avaliação qualitativa do estado de tensões do material.

No decorrer das últimas décadas foram publicados inúmeros trabalhos sobre a medição de tensões com indentação. Com base neles, pode-se afirmar que existem quatro efeitos aos quais estão relacionadas às tensões residuais, sendo eles: (1) variação de dureza no material, (2) relação entre força e profundidade de indentação, (3) medição da forma geométrica da indentação e (4) medição da deformação ao redor da indentação.

Segundo Suterio *et al.* (2002), dentre os efeitos acima citados, a medição da deformação ao redor da região indentada é o mais indicado para uma avaliação quantitativa, embora ainda não exista um modelo matemático apropriado para a avaliação do nível de tensões presentes no material. Será esse o método de determinação de tensões utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

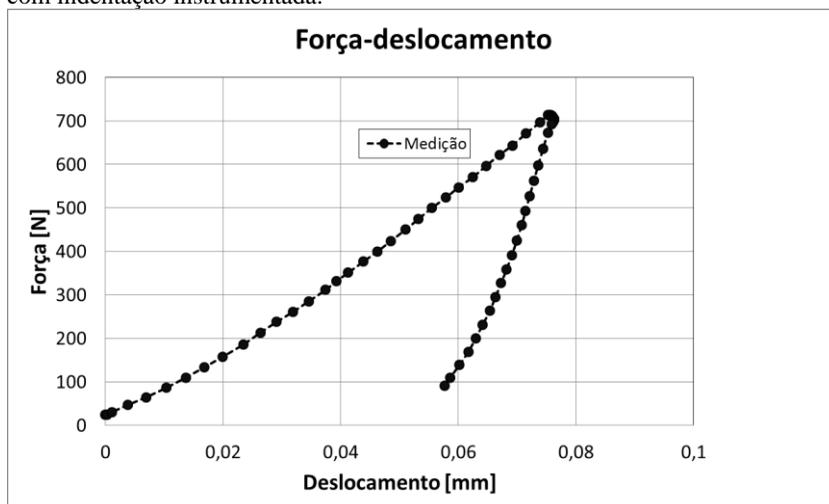
A grande vantagem em se medir os deslocamentos da região adjacente à indentação está na possibilidade de se determinar o sinal e a direção principal das tensões presentes no material. Em contrapartida, como desvantagem destaca-se a dificuldade em quantificar o valor de tensão e a necessidade de se conhecer as propriedades mecânicas do material a ser analisado (SUTERIO *et al.*, 2002).

Com o objetivo de suprir a necessidade do conhecimento das propriedades mecânicas do material, o método de indentação utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é denominado instrumentado. O equipamento possui um sensor de força para medição da carga aplicada

durante o processo de indentação e um sensor de deslocamento para medir a profundidade de penetração da indentação. Através desses sensores é possível obter-se a curva força-deslocamento (Figura 7).

Pesquisas mostram que através dessa curva é possível determinar-se características do material. Através da inclinação da curva de descarga no ponto de carga máxima e da área de contato projetada pela indentação é possível determinar o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e dureza do material. (SAKHAROVA. 2012); BUCAILLE *et al.*, 2003).

Figura 7 - Gráfico de força-deslocamento obtido após a realização de um ensaio com indentação instrumentada.



Fonte: Próprio autor.

Entre os trabalhos publicados relacionados à medição de tensões utilizando o método de indentação, Carlsson e Larsson (2001a e 2001b) fizeram uma análise teórica e numérica com o objetivo de determinar como tensões residuais e campos de deformações podem ser medidos em metais e ligas usando parâmetros extraídos da indentação.

Feng *et al.* (2007) desenvolveram uma expressão analítica para descrever a distribuição de tensões ao redor da região elasto-plástica da indentação. Os resultados foram comparados a modelos de simulação por elementos finitos obtendo-se excelentes correlações.

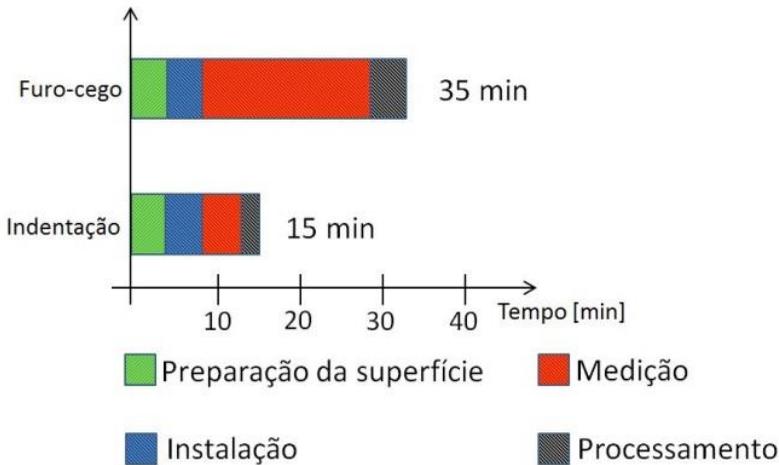
Swadener, Taljat e Pharr (2001), demonstram em seu trabalho que tensões biaxiais tem grande efeito sobre a indentação com pontas

esféricas, visíveis através das curvas de força-deslocamento. Os autores também apresentam dois métodos de medição com incertezas entre 10% e 20% do limite de elasticidade do material, podendo ser aplicados para medição de tensões biaxiais compressivas e trativas.

2.5.3 Aspectos positivos

Um dos aspectos positivos relacionados à utilização do método de indentação instrumentada para medição de tensões em tubos, em comparação a outros métodos de medição, é o menor tempo necessário para a realização do processo de medição. Se comparado ao método do furo cego, o tempo de medição pode chegar a um terço (Figura 8). Quanto ao nível de dano gerado na tubulação, o método de indentação cria apenas um pequeno amassamento na região de medição, tipicamente de até 0,06 mm de profundidade, gerando tensões compressivas consideradas normalmente como benéficas, não comprometendo a estrutura dos tubos.

Figura 8 – Comparação do tempo de medição entre método do furo cego incremental e indentação.



Fonte: Próprio autor.

3 MEDIÇÃO DE TENSÕES USANDO HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

A holografia eletrônica ou ESPI é a técnica óptica utilizada neste trabalho para a medição dos deslocamentos gerados pelo processo de indentação. Através da iluminação com laser da superfície medida e da formação de franjas de interferência, essa técnica usa processamento de imagens para medir campos de deslocamentos radiais na superfície da região vizinha ao processo de indentação.

Há bastante tempo, a holografia eletrônica vem sendo aplicada na medição de micro-deslocamentos, deformações e tensões. (SUN, 2009; WILLEMANN, 2002; ALBERTAZZI JR. *et al.*, 2000)

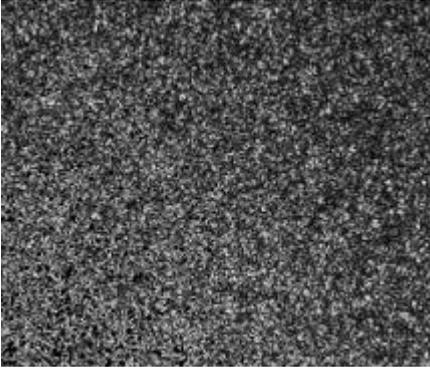
Com a evolução da tecnologia dos sensores de captura e a capacidade de processamento digital de imagens, o uso de holografia eletrônica vem crescendo cada vez mais, se tornando uma importante técnica de medição em tempo real das grandezas acima citadas (KAUFMANN, 2011).

Neste capítulo serão apresentados os módulos que constituem o sistema de medição utilizado no desenvolvimento deste trabalho e os conceitos básicos de holografia eletrônica. Informações mais aprofundadas relacionadas a esse tema podem ser encontradas em diversos outros trabalhos realizados na UFSC, como por exemplo, Veiga (2003), Rodacoski (1997), Borges (2000), Boettger (1998) e Kapp (1997 e 2010).

3.1 PRINCÍPIOS

Quando se ilumina uma superfície rugosa com luz coerente, como a luz do laser, observa-se na superfície um padrão de granular, como na Figura 9. Esse padrão é chamado de padrão *speckle* (traduzido como “granulado óptico”) e acontece devido à interferência de múltiplas ondas refletidas pela superfície rugosa da peça iluminada. Logo após a invenção do laser, esse efeito era considerado apenas um incômodo, pois degrada a qualidade da imagem. Porém a partir dos anos 70 foram desenvolvidos diversos trabalhos nos quais o padrão *speckle* era explorado como uma ferramenta de medição (GASVIK, 2002).

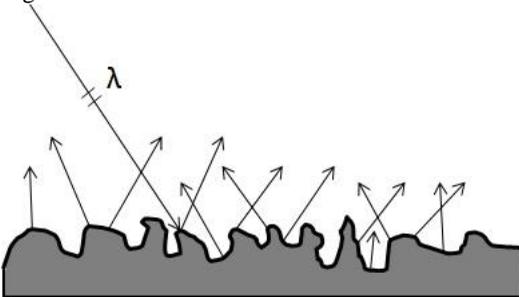
Figura 9 - Padrão *speckle* observado por uma câmera.



Fonte: Próprio autor.

O efeito *speckle* acontece quando a luz do laser incide em uma superfície com rugosidade maior que o comprimento de onda (λ) do laser, como representado na Figura 10. A luz incidente reflete em todas as direções, com diferentes fases. Essas ondas luminosas interferem formando um padrão de pontos claros e escuros, através de interferências construtivas e destrutivas, denominados “*speckles*” (GASVIK, 2002).

Figura 10 - Luz laser refletida de forma difusa.

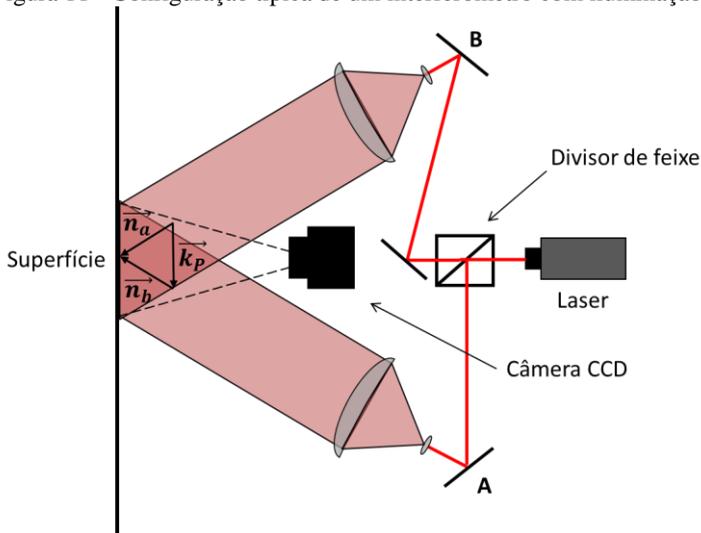


Fonte: Adaptado pelo autor de Gasvik (2002).

Na Figura 11 pode-se ver a configuração típica de um interferômetro com iluminação dupla para a medição de campo de deslocamentos paralelo à superfície através da holografia eletrônica. O feixe já colimado do laser é dividido em dois através de um divisor de feixe. Os dois feixes são direcionados para o objeto através dos espelhos A e B, de forma que a iluminação da superfície de medição seja feita

simultaneamente pelos dois feixes. A região iluminada é visualizada por uma câmera (CCD). A câmera captura o padrão de interferência de aparência granular gerada pela superfície rugosa da peça, denominado padrão “*speckle*”. Franjas de correlação podem ser obtidas pela subtração de dois padrões *speckle*: o padrão *speckle* do objeto deformado ou deslocado e o padrão *speckle* do objeto na condição de referência. Mas existe uma forma melhor de obter o sinal de medição, que será apresentada na sequência.

Figura 11 - Configuração típica de um interferômetro com iluminação dupla.



Fonte: Próprio autor.

Essa configuração de interferômetro apresenta um padrão de franjas decorrentes dos deslocamentos gerados na direção do vetor sensibilidade (\vec{k}). Sendo esse determinado através da subtração dos vetores \vec{n}_a e \vec{n}_b , que apontam para a direção de iluminação. Quando a direção de iluminação dos feixes é simétrica em relação a normal da superfície, o vetor sensibilidade situa-se no plano da superfície do objeto.

3.1.1 Franjas de interferência

Cada fecho da iluminação dupla forma um padrão de *speckle* distinto. Quando a iluminação ocorre simultaneamente, os dois padrões de *speckle* interferem e é a imagem da interferência que é adquirida

através de uma câmera. Sejam os dois feixes de laser com intensidades $I_a(x, y)$ e $I_b(x, y)$ e fases $\alpha_a(x, y)$ e $\alpha_b(x, y)$. Após interferirem originam um novo padrão de *speckle* com intensidade resultante $I(x, y)$ e fase $\alpha(x, y)$, sendo esse então captado pela câmera. A intensidade resultante é dada através da equação 8, que é a equação da interferência (GASVIK, 2002).

$$I = I_a + I_b + 2\sqrt{I_a I_b} \cos \Delta\alpha \quad (8)$$

Onde I representa a intensidade do padrão *speckle* resultante no ponto (x, y) , $\Delta\alpha$ a diferença de fase entre os feixes A e B. O termo $2\sqrt{I_a I_b} \cos \Delta\alpha$ é o termo de interferência.

A intensidade luminosa é captada por uma câmera CCD de 8 bits é discretizada em 256 tons de cinza com escala entre 0 e 255. Realizando uma análise sobre o termo de interferência pode-se observar que se a diferença de fase $\Delta\alpha$ for igual a 0° , tem-se uma interferência construtiva, e quando a diferença de fase for igual a 180° a interferência será destrutiva.

Durante a medição, a movimentação ou deformação da superfície faz com que a intensidade e fase dos padrões de *speckle* também variem. O sinal de medição da holografia eletrônica pode ser obtido através da imagem resultante do quadrado da subtração dos padrões de *speckle* de dois estados diferentes do material. Com a subtração aparecem franjas interferométricas nas regiões em que sofreram deslocamentos na direção do vetor de sensibilidade do interferômetro.

As franjas de interferência resultantes da movimentação da superfície de medição são obtidas através da subtração da imagem adquirida após a deformação do objeto (I_d) e a imagem de referência (I_r), a imagem resultante desta diferença (I_f) pode ser calculada através da equação 9 (HARIHARAN, 2006).

$$I_f = (I_d - I_r)^2 = 16I_d I_r \sin^2 \left(\Delta\alpha + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad (9)$$

Onde $\Delta\alpha$ representa a diferença de fase entre os feixes A e B, $\Delta\theta$ a variação de fase entre os estados do objeto deformado e em repouso, $\sin^2 \left(\Delta\alpha + \frac{\Delta\theta}{2} \right)$ representa o nível de ruído de fundo do padrão de

interferência e $\text{sen}^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)$ o termo modulador que descreve as franjas de interferência.

3.1.2 Deslocamento de fase

A melhor forma de determinar os ângulos de fase ($\Delta\theta$) é através da técnica conhecida como “deslocamento de fase”. Esse é um processo relativamente simples. Para aplicá-la, é necessário deslocar um dos espelhos (A ou B) da configuração mostrada na Figura 11, de modo a criar deslocamentos de fase conhecidos. Espelhos movidos por atuadores piezoelétricos são bastante utilizados para a realização dessa tarefa, porém requerem uma boa calibração, para que se possam executar deslocamentos de fase precisos. Esses deslocamentos podem aumentar ou diminuir o caminho óptico do feixe laser, modificando da mesma quantidade a fase de cada ponto de um padrão *speckle*, o que resulta na variação da diferença de fase relativa entre os padrões de *speckle* que interferem.

O algoritmo dos quatro passos é um dos mais utilizados para a determinação da fase. Quatro imagens com diferenças de fase conhecidas são adquiridas e combinadas. O valor da fase para cada um dos pixels é calculado pela equação 10 (VIOTTI; ALBERTAZZI JR., 2014).

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right) \quad (10)$$

Onde I_i é a intensidade registrada pelo pixel em cada passo i de 90° realizado através da alteração do caminho óptico do feixe laser. Sendo I_1 a intensidade medida no primeiro passo de fase igual a 0° , I_2 a intensidade do segundo passo (90°), I_3 a intensidade do terceiro passo (180°) e I_4 a intensidade medida do quarto passo de fase igual a 270° . Este método requer a aplicação precisa de deslocamentos de fase de 90° .

Alternativamente a este algoritmo, a equação de Carrè (equação 11), pode ser utilizada para realizar o cálculo da fase, também através de quatro incrementos de fase. A equação é mais complexa, porém, é mais robusta por ter maior imunidade a erros e a possibilidade de se obter o valor de fase sem que o valor dos incrementos de fase aplicados seja conhecido. É suficiente que sejam constantes (SERVIN; GONZALEZ, 2012).

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \quad (11)$$

Com o mesmo objetivo de Carrè, foi desenvolvido por Hariharan, Oreb e Eiju (1987) um algoritmo que utiliza cinco passos de deslocamento de fase e também não exige que os incrementos de fase sejam exatamente 90°. É suficiente que sejam iguais. A fase é calculada através da equação 12.

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (12)$$

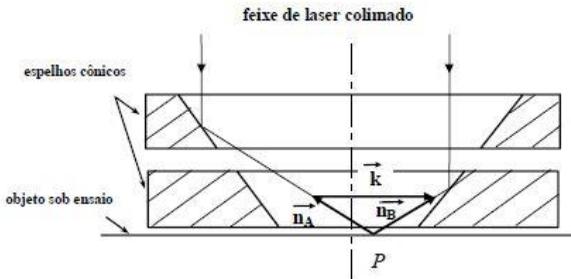
Sendo esse último o algoritmo para cálculo de fase utilizado neste trabalho.

3.2 INTERFERÔMETRO RADIAL

O princípio de dupla iluminação utilizando ESPI possibilita a medição de uma componente do deslocamento no plano, isto é, paralela à superfície medida. Para a medição das outras componentes do deslocamento seriam necessárias outras configurações de iluminação. Albetarzzi Jr. *et al* (1999 e 2003) desenvolveram um interferômetro capaz de medir em coordenadas polares através de apenas uma configuração óptica. Esse equipamento, denominado de Interferômetro radial, tem como característica principal a medição da componente radial dos deslocamentos em uma superfície. Inicialmente esse dispositivo foi utilizado para medição de tensões residuais associado ao método do furo cego.

Em sua primeira concepção, o interferômetro radial era constituído de dois espelhos cônicos dispostos como mostra a Figura 12, para a obtenção da dupla iluminação.

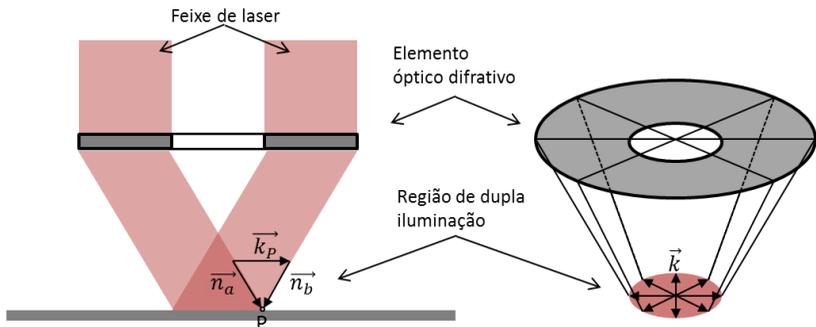
Figura 12 - Configuração inicial do interferômetro radial com dois espelhos cônicos.



Fonte: Suterio (2005).

Kapp (2010) explorou em seu trabalho uma alternativa ao uso de espelhos cônicos. Ele utilizou um elemento óptico difrativo (DOE) especial formado por estrutura difrativa concêntrica, através do qual a luz colimada do laser era difratada e não mais refletida como no uso dos espelhos. As vantagens relacionadas ao uso desse elemento são: possibilidade de compactação e robustez do arranjo óptico e independência do comprimento de onda do laser. A Figura 13 mostra a configuração utilizada por Kapp (2010) para o interferômetro radial, utilizando o DOE para a criação da dupla iluminação, proporcionando sensibilidade radial ao interferômetro.

Figura 13 - Configuração explorada por Kapp, utilizada no desenvolvimento desse trabalho.

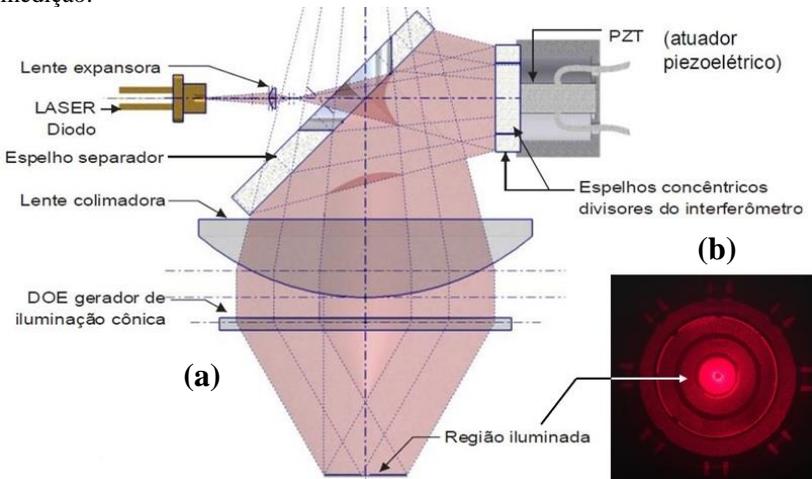


Fonte: Próprio autor.

3.2.1 Configuração óptica

A configuração óptica do interferômetro radial utilizado neste trabalho pode ser observada na Figura 14a. O feixe gerado pelo laser é expandido e segue através de diferentes lentes e espelhos, até chegar colimado ao DOE. Por meio de suas propriedades, o DOE difrata a luz do laser, para possibilitar a iluminação dupla da superfície, formando dois feixes cônicos que incidem sobre a superfície medida. Na Figura 14b é possível observar na parte central a região de iluminação dupla gerada pelo sistema óptico. Outras ordens de difração iluminam as regiões periféricas da imagem, mas não são utilizados para a medição.

Figura 14 - (a) Óptica de iluminação do sistema de medição e (b) região de medição.



Fonte: Kapp (2010).

3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO

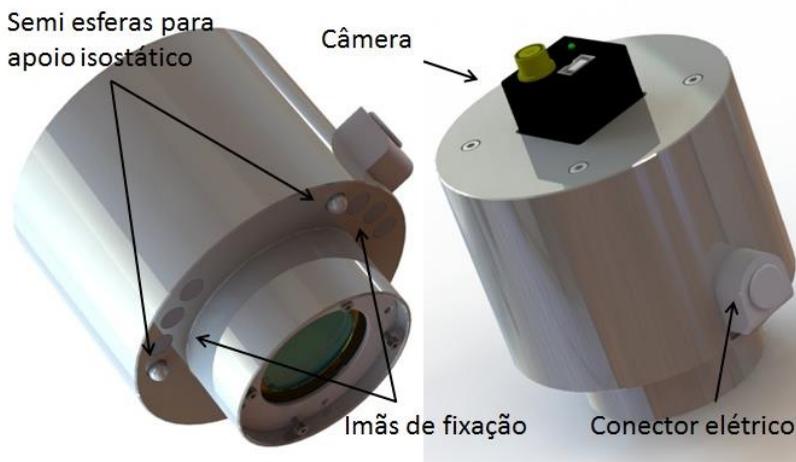
O sistema de medição de esforços de flexão através de indentação instrumentada utilizado neste trabalho foi desenvolvido durante a realização do projeto REIPETRO no ano de 2012 e possui quatro módulos: (1) Cabeçote de Medição; (2) Cabeçote de Indentação; (3) Base de Fixação; e (4) Software de Medição.

Serão descritos nesse capítulo suas principais características e funcionalidades.

3.3.1 Cabeçote de medição

É constituído pelos componentes ópticos e de visão do sistema de medição que integram o interferômetro radial e o sistema de holografia eletrônica. A Figura 15 mostra o módulo assim como suas principais características mecânicas.

Figura 15 – Modelo 3D cabeçote de medição.



Fonte: Próprio autor.

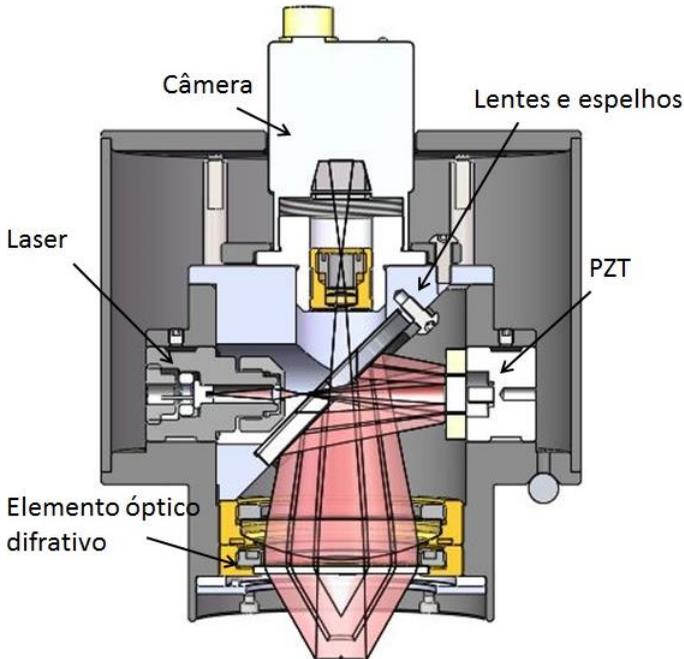
A estrutura mecânica desse cabeçote foi desenvolvida para torná-lo resistente a vibrações e estável. A disposição e fixação dos elementos ópticos, como espelhos e lentes, foi pensada para a criação de um arranjo compacto e rígido, para que as interferências de meios externos não afetassem o alinhamento das peças.

Para a ativação do laser existe um circuito elétrico específico para controle de corrente, para que este tenha uma vida útil adequada e seja estável quanto à intensidade. Outro componente presente no módulo de medição é o atuador piezoelétrico (PZT) responsável pelo deslocamento de fase. É formado por um cristal que gera microdeslocamentos quando sobre ele é aplicada uma carga elétrica.

O sistema de visão utiliza uma câmera Point Grey monocromática modelo FL3-SW-14S3M, com resolução de 1384x1032 pixels a 16 quadros por segundo. Essa câmera utiliza o protocolo de comunicação FireWire. Seu controle é realizado através do software de medição. A disposição mecânica do sistema óptico, câmera, atuador

PZT e laser presentes no cabeçote de medição podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Disposição mecânica dos componentes presentes no cabeçote de medição.



Fonte: Próprio autor.

3.3.2 Cabeçote de indentação

O cabeçote de indentação (Figura 17)   responsável pela indentação automatizada e instrumentada da superfície. O sistema realiza o acionamento da ponta indentadora assim como a medição da penetração dessa na superfície e a forçá de indentação aplicada no processo.

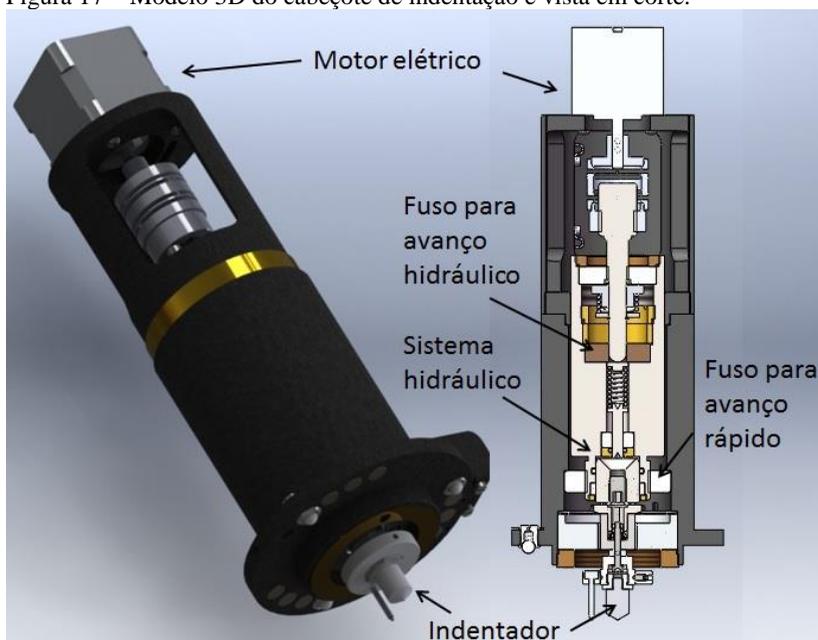
Suas principais características são:

- Aplicação e medição de forçá de indentação de até 2 kN;
- Penetração de indentação de até 0,3 mm;
- Ponta de indentação intercambiável.

Para a aplicação da carga de indentação, foi desenvolvido um sistema hidráulico de multiplicação de forçá baseado no princípio de

Pascal. Para a aproximação da ponta indentadora sobre a superfície de medição é utilizado um sistema com embreagem mecânica. Através de um fuso para avanço rápido é realizada a aproximação de todo o conjunto à superfície de medição. Quando a ponta encosta nessa é requerido do motor um torque maior, o que faz com que a mola da embreagem seja acionada, iniciando o avanço do fuso menor que ativa o sistema hidráulico de multiplicação de força.

Figura 17 – Modelo 3D do cabeçote de indentação e vista em corte.



Fonte: Próprio autor.

Para a execução do procedimento de indentação foi selecionada uma ponta indentadora semiesférica com diâmetro de 2,5 mm. A escolha do formato levou em consideração o nível de deslocamento aplicado na superfície de medição, pois a ponta semiesférica provoca deslocamentos maiores se comparada à ponta cônica, e sua vida útil é maior. O diâmetro foi selecionado em função da facilidade de ser adquirido por ser amplamente utilizado para ensaios de dureza.

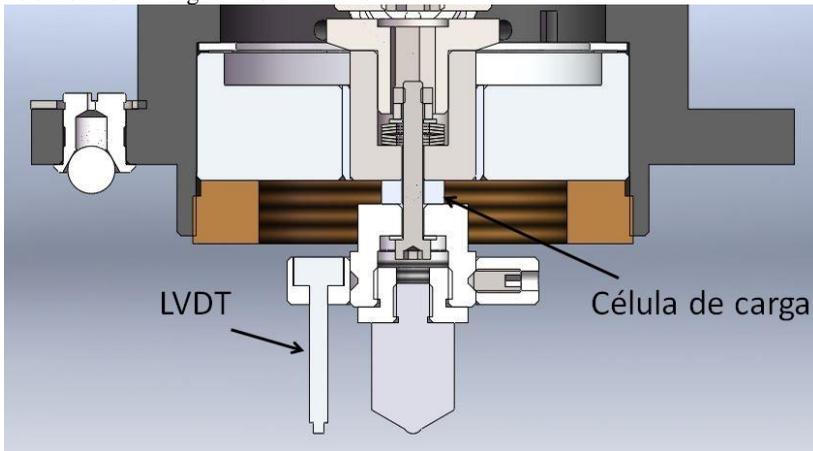
Os transdutores que realizam a medição da carga e penetração de indentação são dois. Para medição da carga é utilizada uma célula de

carga piezoelétrica. Essa, quando deformada, gera uma tensão elétrica proporcional à deformação sofrida.

Para se chegar a um valor de carga esse valor de tensão gerado é convertido através de um polinômio de terceiro grau determinado por calibração.

A medição de penetração da ponta de indentação é feita por um sensor de deslocamento indutivo (“*Linear Variable Differential Transformer*” – LVDT) solidário a essa. Através de três bobinas e um núcleo cilíndrico ferromagnético é gerado um sinal de tensão elétrica proporcional ao deslocamento do núcleo, esse por sua vez é movido por uma haste mecânica que está em contato com a superfície que se deseja medir. Na Figura 18, é possível observar a vista em corte do modelo 3D do cabeçote de indentação, na qual estão evidenciados os sensores de carga e deslocamento.

Figura 18 - Vista em corte do modelo 3D do cabeçote de medição evidenciando os sensores de carga e deslocamento.



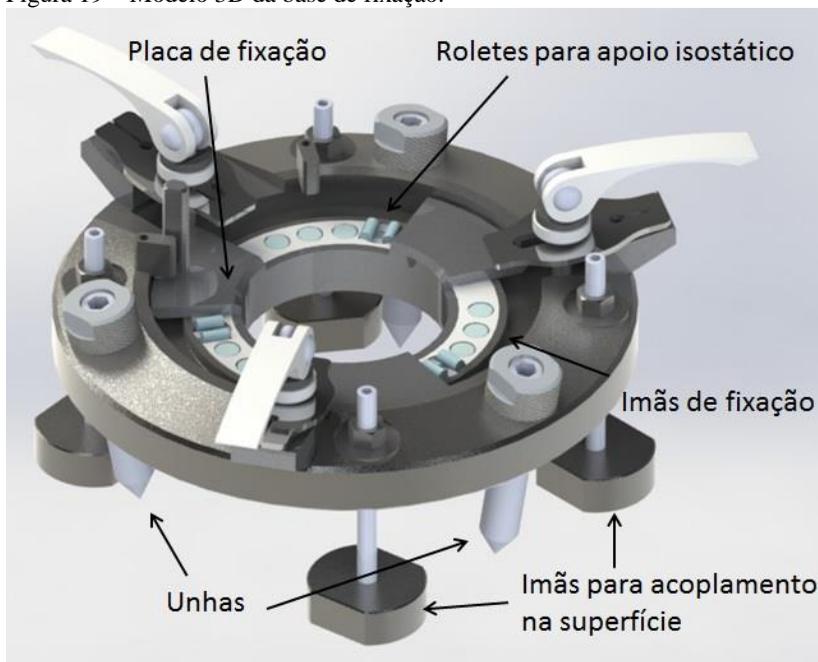
Fonte: Universidade Federal de Santa Catarina.

3.3.3 Base de fixação

Esse é o módulo responsável pela fixação e reposicionamento dos dois cabeçotes descritos acima. A base de medição foi desenvolvida para suportar as elevadas cargas de indentação e posicionar, através de suportes isostáticos, os cabeçotes de medição e indentação. Conforme observado na Figura 15 e Figura 17, esses módulos possuem três esferas posicionadas à 120° e um conjunto de ímãs de terras raras. A base de

medição (Figura 19) possui três pares de apoios cilíndricos dispostos a 120° para posicionamento desses módulos. Um conjunto similar de nove ímãs está presente nos outros dois módulos, porém, com polaridade invertida. A força de atração é obtida interpondo uma placa de material ferromagnético entre eles.

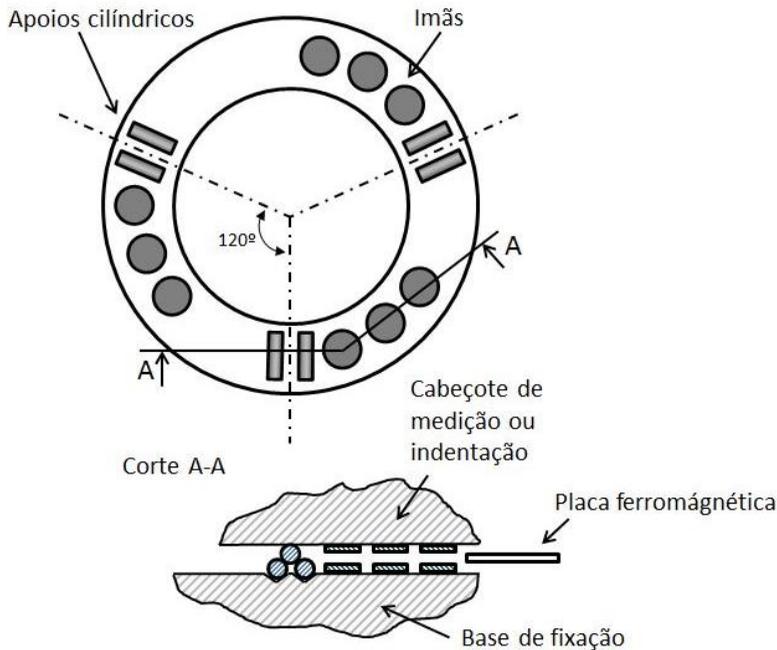
Figura 19 – Modelo 3D da base de fixação.



Fonte: Universidade Federal de Santa Catarina.

Quando os módulos são colocados na base de medição, as esferas se apoiam sobre os pares de suportes cilíndricos, resultando em um apoio isostático altamente repetitivo. A placa de material ferromagnético é deslizada por entre os ímãs passando a ser simultaneamente atraída pelos ímãs, gerando uma força magnética que fixa o sistema posicionado à base de medição. Na Figura 20 através da vista em corte, pode-se observar como se dá o acoplamento entre o cabeçote de medição ou indentação e a base de fixação.

Figura 20 - Esquemático do sistema de posicionamento dos módulos à base de fixação.



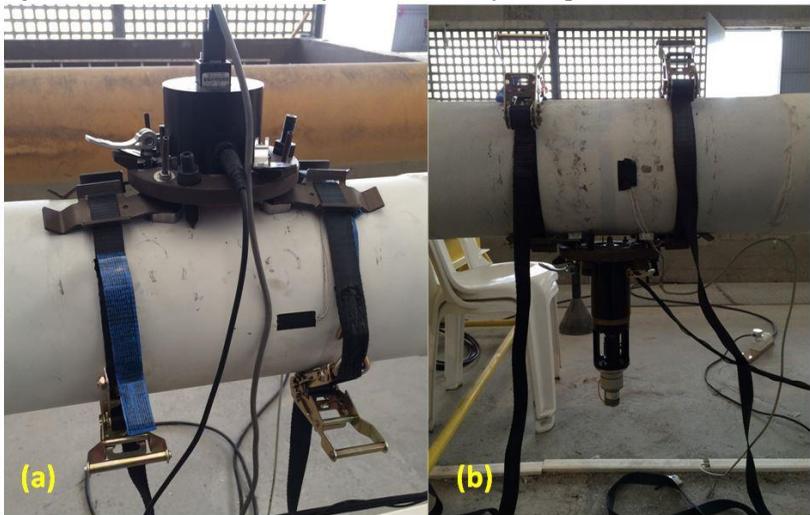
Fonte: Adaptado pelo autor de Kaufmann (2011).

Através desse sistema mecânico isostático de posicionamento é possível que os módulos sejam removidos e reposicionados com um erro menor que um quarto do comprimento de onda do laser.

Na Figura 19 também é possível observar três “unhas”, formadas por pontas cônicas, utilizadas para posicionar a base sobre a superfície de medição de forma a evitar vibrações. Também existe um conjunto de quatro imãs de terras raras usados para forçar as unhas contra a superfície de medição e facilitar a fixação. Esses imãs geram força suficiente para suportar os cabeçotes, mas não comportam a força de indentação, que pode ultrapassar 1 kN. Para melhorar a capacidade de resistir a estas forças, são usadas cintas flexíveis que abraçam o tubo onde o sistema está fixado.

Na Figura 21 é possível observar como é feito o acoplamento do sistema de medição ao tubo, através das cintas e pés magnéticos.

Figura 21 - (a) Módulo de medição e (b) indentação acoplados ao tubo.

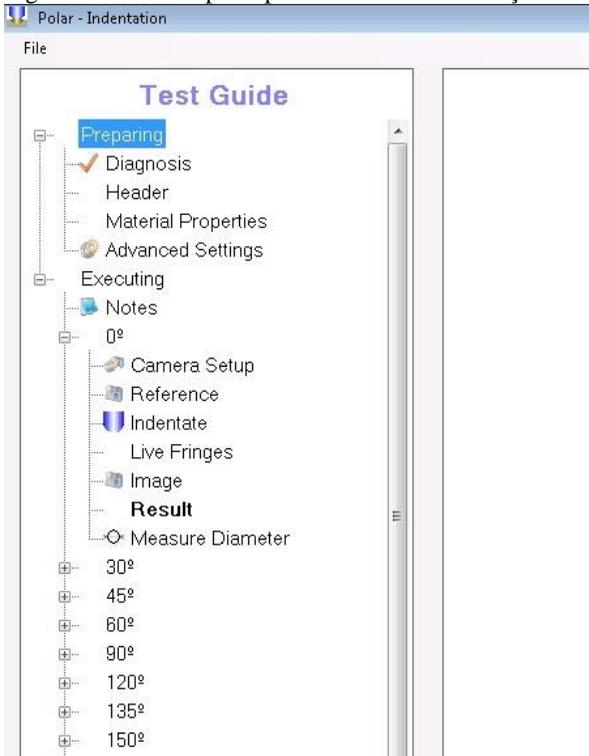


Fonte: Próprio autor.

3.3.4 Software de medição

É o módulo utilizado para aquisição e processamento de imagens e monitoramento e controle dos parâmetros de indentação. A Figura 22 mostra o leiaute da tela principal do software, no qual é possível observar as abas de configurações presentes. Através dessas o usuário pode configurar os parâmetros da câmera, do motor e do atuador PZT.

Figura 22 - Leiaute principal do software de medição.

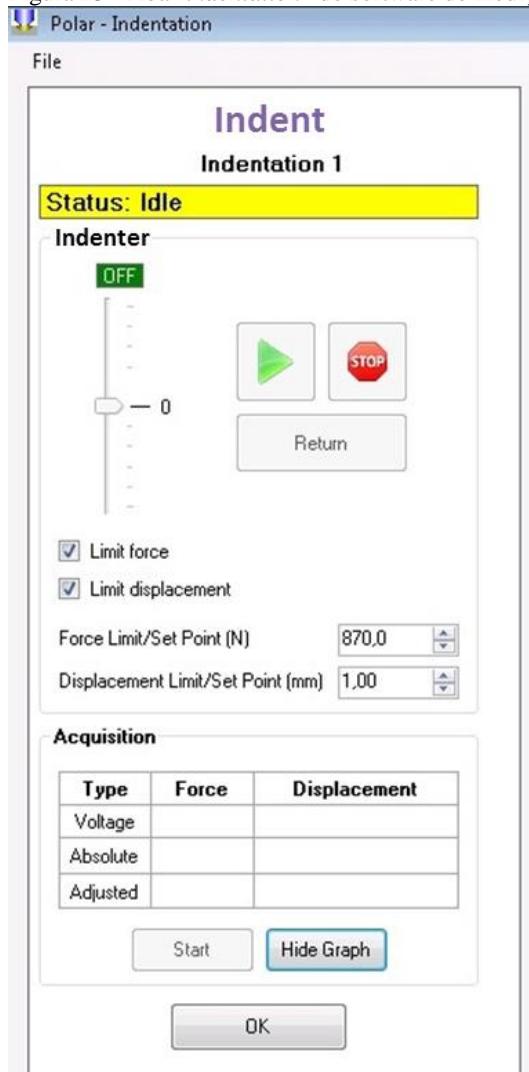


Fonte: Próprio autor.

Para a realização da medição, o software possui uma interface bastante simples e eficiente, a qual guia o usuário passo-a-passo, emitindo alertas quanto à execução de tarefas fora de ordem. A gravação das imagens e dos dados referentes ao processo de medição é feito de forma automática, a fim de que o usuário não precise se preocupar com tais tarefas.

A Figura 23 mostra a tela para configuração dos parâmetros de indentação. Nessa o usuário pode configurar a máxima carga e a máxima penetração de indentação. Pode também selecionar através de qual desses parâmetros deseja controlar o ensaio. Existe também uma tabela para a visualização dos dados, em tempo real, da carga e penetração da ponta indentadora no material de medição. Após a realização da indentação pode ser visualizado o gráfico força-deslocamento da medição.

Figura 23 - Aba "indentation" do software de medição.



Fonte: Próprio autor.

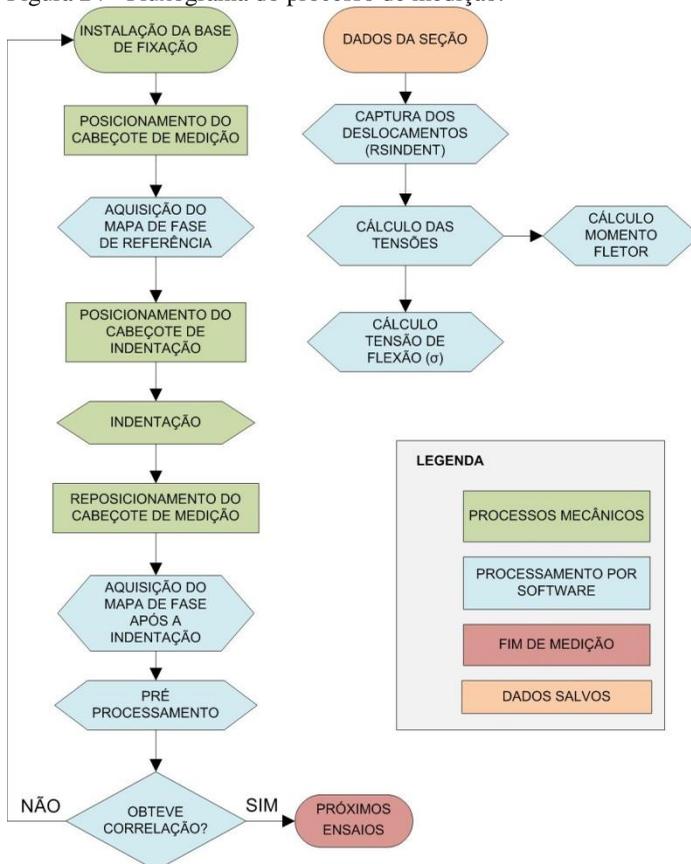
4 MODELO DE CÁLCULO

Nesse capítulo serão apresentados os procedimentos para a medição de flexão utilizados nesse trabalho.

4.1 PROCESSO DE MEDIÇÃO

O processo de medição utilizado na realização dos ensaios experimentais no tubo segue o fluxograma da Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma do processo de medição.



Fonte: Próprio autor.

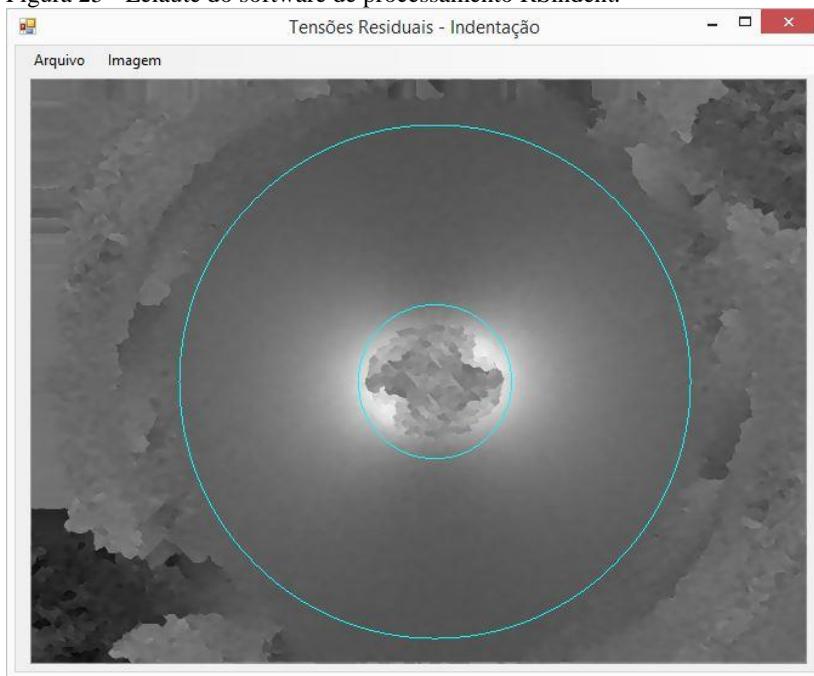
A parte da esquerda do fluxograma envolve a aquisição, que, necessariamente, deve ser realizada em campo. Após, os dados adquiridos podem ser processados em qualquer computador, iniciando pelo software “RSindent”. Com esse software é possível processar as imagens de modo a extrair dois vetores de deslocamentos gerados na superfície através do processo de indentação. Feito esse processamento, para a próxima etapa dos cálculos utiliza-se uma planilha especialmente preparada no software Microsoft Excel®, através da qual são obtidos os valores de tensão de flexão, momento fletor e orientação da linha neutra para cada seção medida no tubo.

4.2 CÁLCULO DOS DESLOCAMENTOS

A obtenção dos vetores de deslocamentos das imagens adquiridas nos ensaios é a primeira etapa do processo de cálculo das tensões de flexão presentes. Para isso, utiliza-se o software RSindent. O processamento parte do mapa da diferença de fase obtida após a indentação ser realizada, tendo como ponto de partida o mapa de fase de referência. O software calcula a parte simétrica do mapa da diferença de fase, e com isso remove a componente de corpo rígido (translação). Na sequência, o salto de fase é removido. Após essa etapa, o programa calcula os sinais correspondentes aos harmônicos $\sin(2\varphi)$ e $\cos(2\varphi)$ como função do raio. φ é o ângulo polar. Considerando o nível de tensões residuais presentes axissimétricos, estes harmônicos estão relacionados com a diferença entre as tensões principais e, portanto, com a componente de flexão. A razão entre eles permite determinar as direções principais das tensões. Assim, os sinais do segundo harmônico não são influenciados pela soma das tensões principais, que são invariantes com relação a φ , nem pelas deformações típicas induzidas pela indentação em si.

Na Figura 25 é possível visualizar o leiaute principal do software RSindent mostrando o resultado de uma medição após a remoção do salto de fase. Nessa imagem também é possível visualizar dois círculos cianos que delimitam a região de medição selecionada para a realização do processamento matemático, ou seja, o software apenas processa e extrai dados das regiões entre dos dois círculos cianos.

Figura 25 - Leiaute do software de processamento RSindent.



Fonte: Próprio autor.

4.3 CÁLCULO DAS TENSÕES

Partindo da premissa de que não se dispõe de um modelo matemático ou numérico confiável o suficiente para a quantificação de tensões residuais a partir da indentação, este trabalho utilizou um procedimento alternativo baseado em calibração empírica para quantificar as tensões. Uma das seções do tubo, na qual as tensões de flexão eram bem conhecidas, foi usada como referência. Os correspondentes deslocamentos radiais foram adquiridos e normalizados. Constantes de proporcionalidades foram determinadas nas indentações de todas as demais seções e, através delas, as tensões de flexão foram determinadas.

Para determinar os valores de tensões de flexão de referência, a bancada de flexão foi instrumentada com célula de carga e extensômetros de resistência elétrica, como será detalhado no capítulo 5. Assim, foi possível a utilização de um ensaio, realizado em uma região

com tensão conhecida, como referência para o cálculo da tensão nos outros pontos de medição.

O processamento utilizado para o cálculo do nível de tensão presente em cada ponto de medição idealmente envolveria a determinação de uma constante multiplicativa (P). Porém, visando absorver eventuais não-idealidades do processo de medição, o modelo matemático também englobou uma constante aditiva (C), resultando na equação 13.

$$u_i = Pt_i + C \quad (13)$$

Onde t_i representa um sinal de referência (no caso experimental, mas também poderia ser teórico), P uma constante multiplicativa de proporcionalidade a ser determinada, C uma constante aditiva também a ser determinada e, finalmente, u_i o sinal experimental a ser ajustado. Tanto u_i quanto t_i correspondem à amplitude do sinal do segundo harmônico, calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos harmônicos $sen(2\varphi)$ e $cos(2\varphi)$, sendo u_i extraído das imagens que se pretende quantificar e t_i da imagem de referência.

A solução dessa equação, através do método dos mínimos quadrados, leva à determinação das constantes P e C através das equações 14 e 15 respectivamente.

$$P = \frac{1}{N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \left(N \sum t_i u_i - \sum t_i \sum u_i \right) \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \left(\sum u_i \sum t_i^2 - \sum t_i \sum t_i u_i \right) \quad (15)$$

Onde N representa o número de pontos do vetor de deslocamento extraído de cada imagem. A partir da equação 14, na qual se determina o coeficiente de proporcionalidade da curva analisada em comparação à de referência, são calculadas as tensões.

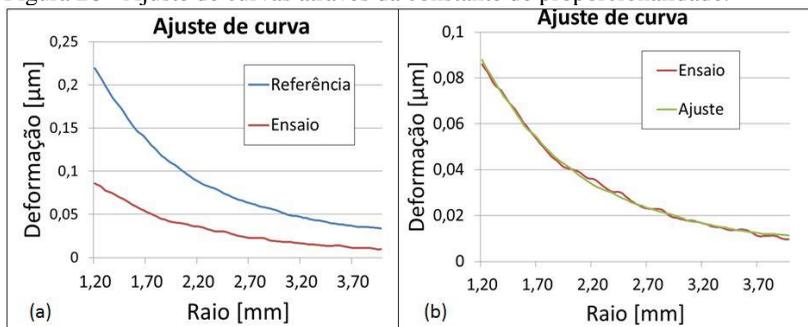
Utilizando a constante de proporcionalidade P em relação à referência e o valor da tensão de referência é possível, através da equação 16, determinar o valor de tensão para cada ponto de medição.

$$\sigma_{ponto} = P\sigma_{ref} \quad (16)$$

Onde a tensão de referência está representada por σ_{ref} e a tensão do ponto medido por σ_{ponto} .

A Figura 26a mostra um exemplo no qual há duas curvas de deformação: a curva de referência, obtida com carga conhecida, e a curva do ensaio de que se deseja calcular o valor de tensão. Após o processamento realizado através da equação 13 nota-se na Figura 26b que a curva ajustada praticamente coincide com a curva original do ensaio. Demonstrando assim que o modelo de ajuste com uma constante aditiva e outra multiplicativa se adéqua bem ao tipo de sinal obtido.

Figura 26 - Ajuste de curvas através da constante de proporcionalidade.



Fonte: Próprio autor.

4.4 CÁLCULO DAS TENSÕES DE FLEXÃO

De acordo com os princípios de resistência dos materiais, ao submeter uma viga a um carregamento de flexão pura, a distribuição de tensões flexão segue um padrão linear ao longo da seção transversal, sendo esse proporcional à carga de flexão aplicada e à distância da linha neutra. A equação 17 representa o cálculo realizado para a medição de flexão em tubos (HIBBELER, 2010).

$$Sf = \frac{M_y z}{I_n} \quad (17)$$

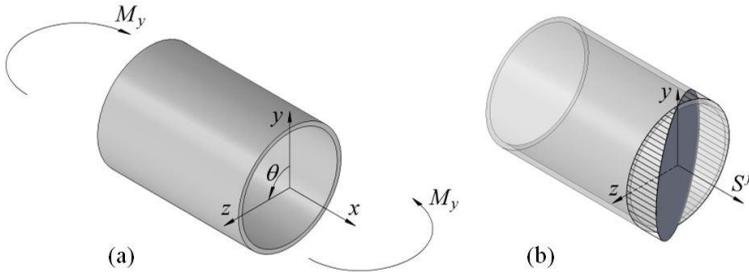
Onde M_y é o momento fletor aplicado à viga ao redor do eixo y como pode ser observado na Figura 27a, z a distância entre o ponto avaliado e a linha neutra, que na Figura 27b coincide com o eixo y . Em um tubo o valor máximo para Sf em uma seção ocorrerá no ponto mais distante da linha neutra, que nesse caso está representado pelo raio externo (R). Por comodidade e como recomendado por Pacheco (2014)

neste trabalho o valor máximo de tensão em uma seção transversal será denominado de *tensão de flexão* e representado por S^{flex} (equação 18).

$$S^{flex} = \frac{MR}{I_n} \quad (18)$$

Onde M é o valor do momento fletor atuante na seção.

Figura 27 - (a) Flexão pura aplicada a um tubo gerando uma (b) distribuição linear de tensões.



Fonte: Pacheco (2014).

Para o cálculo do momento de inércia de uma seção transversal de um tubo é aplicada a equação 19.

$$I_n = \frac{\pi(R^4 - (R - t)^4)}{4} \quad (19)$$

Onde t é a espessura da parede do tubo. Pacheco (2014) descreve em seu documento que em tubos enterrados dificilmente são encontradas apenas tensões de flexão. São também esperados carregamentos axiais, que adicionam tensões axiais tanto trativas como compressivas. Considerando essas tensões como uniformes ao longo da seção, elas podem ser obtidas através da equação 20.

$$S_L^{med} = \frac{F}{A} \quad (20)$$

Onde F é o carregamento axial atuante no tubo e A a área da seção transversal, obtida através da equação 21.

$$A = \pi(R^2 - (R - t)^2) \quad (21)$$

A presença de carregamentos axiais não altera a inclinação do plano de tensões de flexão presentes no material, apenas desloca a linha neutra desse e modifica o valor médio de tensão (PACHECO 2014).

O perfil de tensões longitudinais, como demonstrado por Pacheco (2014), pode ser representado pela equação de um plano (equação 22).

$$S_L = \beta_0 + \beta_y y + \beta_z z \quad (22)$$

Onde as constantes β representam os valores de tensão longitudinal (S_L) para cada ponto das coordenadas y e z da seção. Por se tratar de tubos é mais conveniente a representação, através da equação 23, da tensão longitudinal em função da posição angular (θ).

$$S_L = \beta_0 + \beta_y R \cos(\theta) + \beta_z R \sin(\theta) \quad (23)$$

Considerando R constante para toda a seção pode-se reescrever a equação 22 utilizando as equações 24 e 25.

$$\beta_1 = \beta_y R \quad (24)$$

$$\beta_2 = \beta_z R \quad (25)$$

Realizando a substituição tem-se a equação 26.

$$S_L = \beta_0 + \beta_1 \cos(\theta) + \beta_2 \sin(\theta) \quad (26)$$

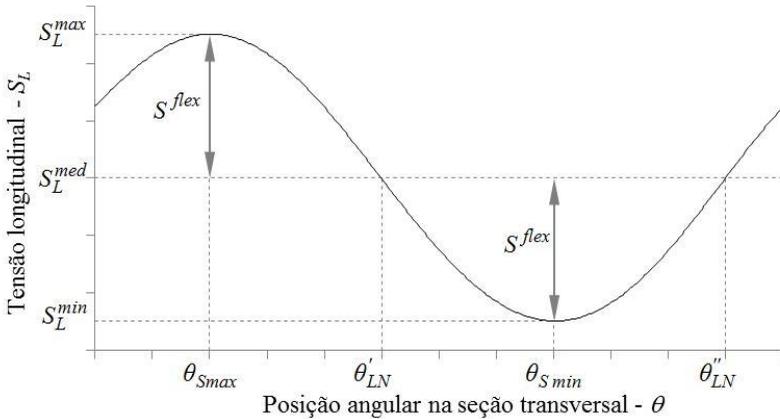
As constantes β podem ser obtidas através da resolução de um sistema linear alimentado por dados experimentais adquiridos através do sistema de medição de tensões por indentação. Um mínimo de três pontos ao longo de uma seção transversal é necessário para a definição dos parâmetros. A utilização de quatro ou mais pontos de medição torna o cálculo mais robusto desde que seja utilizado um método de regressão multilinear para a determinação das constantes, como por exemplo, o método dos mínimos quadrados (PACHECO, 2014).

Para a determinação do nível de tensões de flexão presentes na seção medida, pode-se reescrever a equação 26 como mostrado na equação 27.

$$S_L = S_L^{med} + S^{flex} \cos(\theta - \theta_{Smax}) \quad (27)$$

Onde S_L^{med} é o valor médio das tensões longitudinais presentes na seção, θ_{Smax} é a posição angular da tensão longitudinal máxima da seção. Através da Figura 28 é possível compreender com maior facilidade a distribuição de tensão longitudinal dada pela equação 27.

Figura 28 - Distribuição da tensão longitudinal ao longo de uma seção transversal em um tubo submetido à flexão e à carga axial.



Fonte: Pacheco (2014).

Pacheco (2014) descreve ainda em seu trabalho que igualando as equações 26 e 27 e aplicando a matemática adequada é possível isolar as constantes β e expressá-las em função de S_L^{med} , S^{flex} e θ_{Smax} . Obtendo assim as equações 28, 29 e 30.

$$\beta_0 = S_L^{med} \quad (28)$$

$$\beta_1 = S^{flex} \cos(\theta_{Smax}) \quad (29)$$

$$\beta_2 = S^{flex} \sen(\theta_{Smax}) \quad (30)$$

Realizando mais algumas operações matemáticas têm-se as equações 31, 32 e 33 nas quais é possível, respectivamente, calcular a tensão de flexão (S^{flex}) atuante na seção, θ_{Smax} e o ângulo de orientação da linha neutra (θ_{LN}).

$$S^{flex} = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2} \quad (31)$$

$$\theta_{Smax} = \tan^{-1}\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right) \quad (32)$$

$$\theta_{LN} = \theta_{Smax} \pm \frac{\pi}{2} \quad (33)$$

Para a determinação do momento fletor atuante, deve-se combinar as equações 18, 19 e 31, obtendo a equação 34.

$$M = \frac{\pi\sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}(R^4 - (R - t)^4)}{4R} \quad (34)$$

Para a determinação das constantes β são utilizados os valores de tensão longitudinal para cada ponto da seção transversal do tubo medido. Cria-se assim o sistema linear dado pela equação 35.

$$S_L = \theta\beta + e \quad (35)$$

Onde S_L , θ e β são dados pelas matrizes da equação 36, e e é um vetor de erros aleatórios ($n \times 1$) onde n é o número de pontos medidos na seção do tubo.

$$S_L = \begin{bmatrix} S_{L1} \\ S_{L2} \\ \vdots \\ S_{Ln} \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}(\theta_1) & \text{cos}(\theta_1) \\ 1 & \text{sen}(\theta_2) & \text{cos}(\theta_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}(\theta_n) & \text{cos}(\theta_n) \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Através do processamento pelo método dos mínimos quadrados as constantes β podem ser determinadas pela equação 37, sendo a apóstrofe usada para representar a matriz transposta.

$$\hat{\beta} = (\theta'\theta)^{-1}\theta'S_L \quad (37)$$

Após a determinação desses parâmetros é possível realizar o ajuste da distribuição de tensões longitudinais ao longo de θ através da equação 38.

$$\hat{S}_L = \theta \hat{\beta} \quad (38)$$

4.4.1 Incerteza de medição

A incerteza de medição calculada através do processamento matemático nesse trabalho não levou em consideração, as incertezas associadas ao processo de medição dos deslocamentos da superfície e do processo de indentação. Sendo o erro (e), associado ao ajuste das curvas pelo método dos mínimos quadrados, considerado a incerteza de medição gerada pelo processo.

O erro e pode ser calculado através da diferença entra a curva obtida com as medições e a curva ajustada (equação 39).

$$e = S_L - \hat{S}_L \quad (39)$$

Segundo Pacheco (2014) a variância do termo e pode ser estimada através da equação 40.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - 3} \quad (40)$$

Para a determinação da incerteza padrão associada a cada constante β utiliza-se a equação 41.

$$u(\hat{\beta}_i) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{ii}} \quad (41)$$

Onde \hat{C} é a matriz de covariâncias calculada pela equação 42.

$$\hat{C} = (\theta' \theta)^{-1} \quad (42)$$

A partir da incerteza padrão o intervalo de confiança pode ser calculado através da equação 43.

$$IC(\beta_i) = \hat{\beta}_i \pm t_{(\gamma, n-3)} u(\hat{\beta}_i) \quad (43)$$

Onde $t_{(\gamma, n-3)}$ é o coeficiente de *Student* para o nível de confiança desejado (γ) e grau de liberdade ($n - 3$). Para a obtenção da incerteza padrão associada a S^{flex} deve-se realizar a combinação das incertezas associadas aos parâmetros β_1 e β_2 através da equação 44.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_i} \right)^2 u^2(\beta_i) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \beta_j} \right) u(\beta_i) u(\beta_j) r(\beta_i \beta_j) \quad (44)$$

Onde $r(\beta_i \beta_j)$ representa o coeficiente de correlação entre β_i e β_j . De forma análoga ao cálculo do intervalo de confiança para as constantes β . De posse da incerteza padrão de S^{flex} o intervalo de confiança pode ser calculado através da equação 43. Essa análise para o cálculo da incerteza padrão pode ser estendido para a determinação das incertezas associadas ao momento fletor (M) e a orientação da linha neutra (θ_{LN}) (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

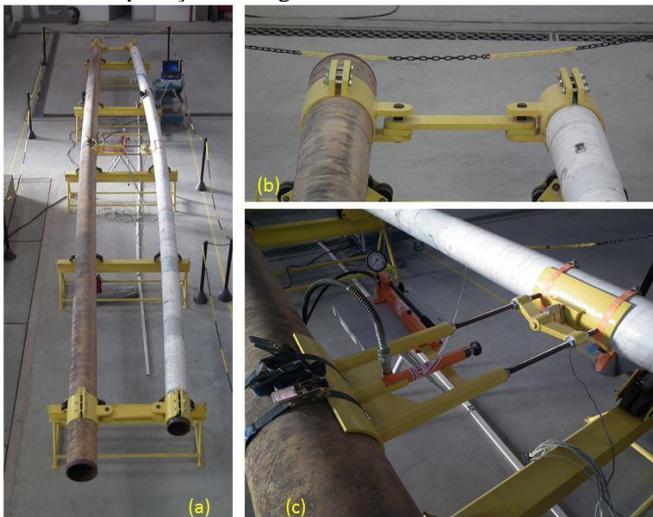
5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

A calibração e avaliação experimental do procedimento desenvolvido foram realizadas utilizando uma bancada capaz de gerar esforços de flexões bem conhecidos em um tubo comercial. Esta bancada é aqui simplesmente denominada de padrão de flexão. Através do padrão de flexão foi possível a realização de ensaios experimentais para avaliação da melhor carga ou profundidade de indentação, bem como a repetibilidade do sistema na medição de tensão de flexão. Esses experimentos, assim como a bancada padrão de flexão, serão discutidos nos subitens a seguir.

5.1 PADRÃO DE FLEXÃO

Desenvolvida por Pacheco (2014) no escopo do seu trabalho de mestrado, a bancada de flexão é constituída por dois tubos de doze metros de comprimento posicionados paralelamente sobre cinco cavaletes nivelados (Figura 29a) para evitar que o tubo sofresse flexão devido ao seu próprio peso. Os tubos são conectados em suas extremidades pelo módulo de fixação (Figura 29b), que mantém acopladas as extremidades dos tubos.

Figura 29 - (a) Padrão de flexão e (b) detalhes do módulo de fixação e (c) módulo de aplicação de carga



Fonte: Pacheco (2014).

A aplicação do carregamento de flexão nos tubos é realizada na seção central, com a utilização de um conjunto mecânico composto por um atuador hidráulico e duas barras de ancoragem (Figura 29c). Estas últimas são utilizadas após a remoção do atuador hidráulico para manter o carregamento estável no tempo. Este sistema de carregamento permite a aplicação da carga desejada no sentido transversal ao tubo.

Para facilitar o manuseio dos tubos na bancada, a mesma foi desenvolvida para que os tubos fiquem apoiados sobre mancais com roletes, possibilitando a movimentação transversal dos tubos sobre os cavaletes e a rotação em seu próprio eixo quando o módulo de fixação não estiver montado.

Os tubos utilizados nessa bancada foram escolhidos por Pacheco (2014) de acordo com a base de informações disponibilizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Através dessas informações se fez um levantamento dos diâmetros de tubo mais presentes na malha dutoviária brasileira, identificou-se que os tubos com diâmetro nominal de 200 mm (oito polegadas) e 250 mm (dez polegadas) são os mais utilizados, representando respectivamente, 13,1% e 10,6% da malha nacional. Os ensaios utilizando indentação instrumentada realizados no desenvolvimento deste trabalho referem-se a um tubo com as características presentes na Tabela 1. Devido às características construtivas da bancada, o tubo utilizado como ancoragem para o sistema de aplicação de força sofre deformações, porém, essas não influenciam no valor de carga de flexão aplicado uma vez que o sistema é carregado mecanicamente com base nos valores de carga lidos por uma célula de carga.

Tabela 1 - Características do tubo utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

Diâmetro nominal	200 mm (8")
Material	API 5L X65Q
Costura	Sem
Processo de fabricação	Trefilado a frio
Tratamento térmico	Temperado e revenido
	Ensaio
Módulo de elasticidade (GPa)	229×10^4
Limite de escoamento (MPa)	535
Resistência à tração (MPa)	600

Fonte: Pacheco (2014).

5.1.1 Instrumentação

A bancada foi instrumentada para o monitoramento da aplicação da carga de flexão por uma célula de carga e por extensômetros de resistência elétrica. A célula de carga foi previamente calibrada (Anexo A), e posicionada no módulo responsável pelo carregamento do tubo (Figura 29c). Além do monitoramento da carga aplicada, a deformação do tubo foi medida por meio de extensômetros ligados em configuração de meia ponte, instalados nas geratrizes do intradorso e do extradorso do tubo. O posicionamento dos extensômetros foi realizado em oito seções e dispostos conforme a Tabela 2, onde L_x representa a distância entre o ponto de apoio e a respectiva seção (Figura 30). Essas mesmas seções também foram utilizadas para os ensaios com o sistema de medição por indentação instrumentada avaliado nesse trabalho.

Tabela 2 - Posição das oito seções de medição ao longo do tubo.

	$L_x(m)$		$L_x(m)$
S1	1,34	S5	7,23
S2	2,54	S6	8,43
S3	3,74	S7	9,63
S4	4,94	S8	10,83

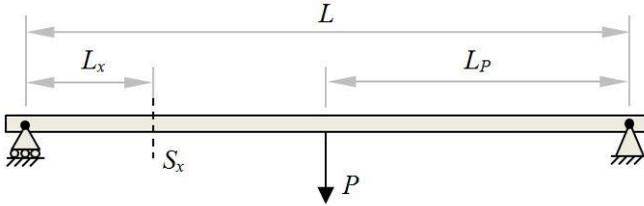
Fonte: Pacheco (2014).

A determinação da tensão de flexão foi feita de duas maneiras: (a) com o monitoramento do carregamento de flexão aplicado nos tubos através da célula de carga; (b) através dos extensômetros posicionados ao longo das oito seções preestabelecidas. A carga aplicada no tubo foi de $P = (29\ 883 \pm 160)$ N. A partir dessa força, considerando o tubo como uma viga biapoiada (Figura 30), foi possível calcular o valor de momento fletor atuante em todas as oito seções através da equação 45.

$$M(S_x) = \frac{PL_pL_x}{L} \quad (45)$$

Onde P representa a força medida na célula de carga, L_x é a distância entre a seção avaliada e o ponto de ancoragem mais próximo, L_p a distância entre o ponto de aplicação da força P e o ponto de ancoragem mais afastado da seção S_x e L representa a distância entre os dois pontos de ancoragem, de acordo com a Figura 30.

Figura 30 - Modelo de viga biapoada com aplicação de carga central pontual e elementos para o cálculo do momento fletor.



Fonte: Pacheco (2014).

Uma vez calculado o momento fletor M de cada seção, é possível através da equação 18 calcular a tensão de flexão (S^{flex}).

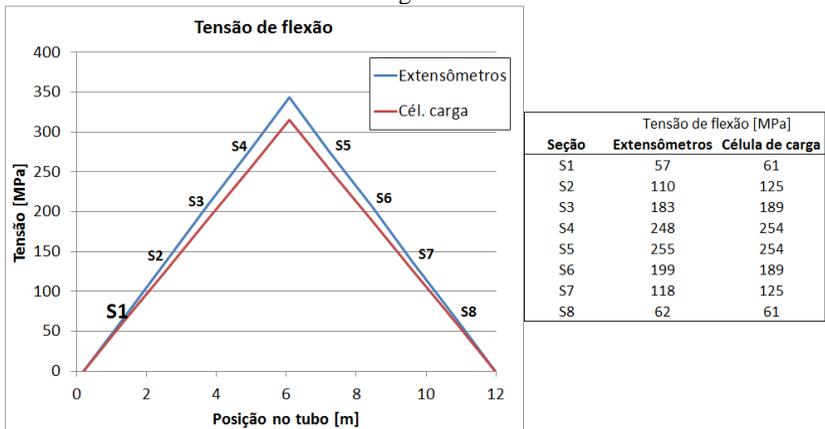
Nas medições realizadas com os extensômetros é possível, através da leitura de deformação, calcular a tensão de flexão atuante em cada seção usando a equação 46.

$$S^{flex} = \varepsilon_x E \tag{46}$$

Onde ε_x representa a deformação lida em cada seção e E o módulo de elasticidade do material.

Na Figura 31 é possível visualizar os diagramas de tensão de flexão medidos a partir dos dados da célula de carga e dos extensômetros.

Figura 31 - Diagrama de tensão de flexão calculado a partir das medições feitas com os extensômetros e a célula de carga.



Fonte: Próprio autor.

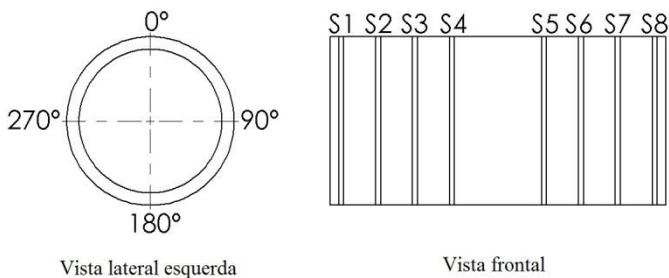
Uma avaliação mais profunda do padrão de flexão pode ser encontrada no trabalho desenvolvido por Pacheco (2014), no qual se constatou uma incerteza na medição de flexão inferior a 1% do valor medido para toda a faixa de medição. Como pode ser observado na Figura 31, existe um desvio entre o valor medido pelos extensômetros e pela célula de carga para a tensão de flexão. Por se tratar de um desvio diretamente proporcional à tensão de flexão, tem-se como provável causa um erro associado ao módulo de elasticidade utilizado para os cálculos (PACHECO, 2014).

5.2 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

Os ensaios exploratórios levaram à determinação do melhor parâmetro de controle de indentação para a realização dos ensaios no tubo, assim como avaliar a repetibilidade do sistema.

A Figura 32 mostra em um desenho, fora de escala para facilitar a visualização, a posição das seções de medição ao longo do tubo e a posição angular utilizada como referência para a realização de todos os ensaios. Nota-se também que a origem da escala angular, observando em uma vista lateral esquerda, é na posição superior, medido no sentido horário.

Figura 32 - Distribuição das seções no tubo e posição angular considerada para a realização dos ensaios e escala angular adotada.



Fonte: Próprio autor.

5.2.1 Parâmetros de indentação

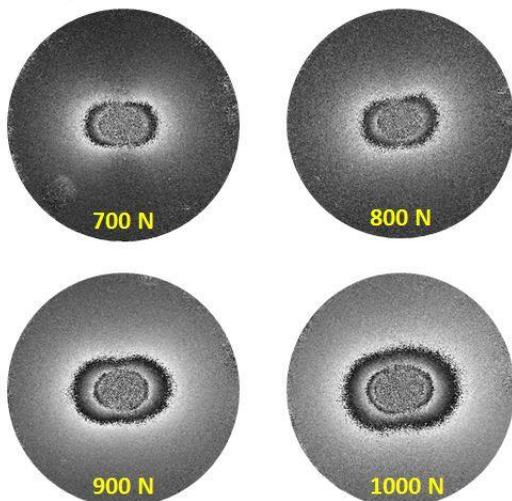
O processo de indentação pode ser controlado através de duas variáveis: força ou profundidade máxima de indentação. A escolha do parâmetro mais adequado para a realização do controle se deu através de diversos ensaios realizados no tubo.

Os ensaios realizados mostraram que quando o modo de controle de força é usado a penetração da ponta de indentação varia muito em função do nível de tensões aplicados no material. Devido a esse fato, o controle de indentação através da penetração de indentação foi descartado, pois para alguns níveis de tensões no tubo, o valor de penetração definido como referência poderia induzir cargas muito baixas, gerando pouca deformação no material e conseqüentemente uma imagem com sinal fraco. No outro extremo, poderia induzir cargas muito altas, com a possibilidade de extrapolar o limite aceito pelo sistema de medição e danificá-lo. A variação da penetração de indentação de acordo com o nível de tensões presentes no material sugere outra linha de investigação para a determinação da tensão de flexão atuante. Porém, essa não foi avaliada no decorrer deste trabalho.

O método de controle escolhido para a indentação foi o controle por força, no qual o usuário define a força de indentação desejada. Através do controle por força, pode-se garantir que o sistema não vá atingir cargas incompatíveis com seu funcionamento.

A definição da força ideal de indentação foi feita através de ensaios variando a força máxima de indentação. Os ensaios foram realizados no tubo na posição 90° da seção S3, no qual havia tensões de flexão e residuais presentes. Os mapas de diferença de fase dos ensaios estão representados na Figura 33

Figura 33 - Ensaios de avaliação para determinação da melhor força de indentação.



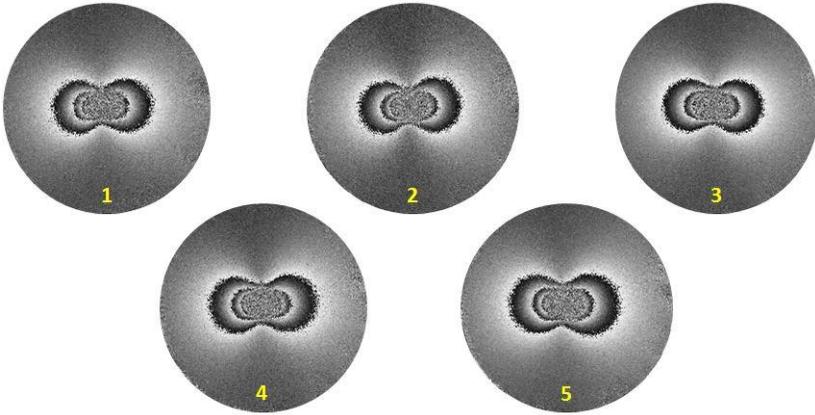
Fonte: Próprio autor.

A análise do valor ideal de força foi feita com base no limite aceito pelo sistema mecânico do equipamento de medição, verificado através de simulações feitas nos modelos 3D desenvolvidos, e em uma análise qualitativa das imagens adquiridas. O critério qualitativo utilizado foi a melhor qualidade e a quantidade de franjas de correlação na imagem. Tendo em vista a análise realizada, a carga de indentação selecionada para a realização dos ensaios foi a de 900 N.

5.2.2 Repetibilidade

A análise da repetibilidade do sistema de medição é um parâmetro importante na determinação da sua confiabilidade. Os ensaios foram feitos na seção S4 na posição de 90°. Foram realizadas cinco indentações próximas umas das outras para que a variação da tensão não fosse significativa, mas suficientemente distantes para que as tensões introduzidas através da indentação não influenciassem os ensaios próximos. Na Figura 34 estão presentes os mapas de diferença de fase adquiridos nos cinco ensaios de avaliação da repetibilidade.

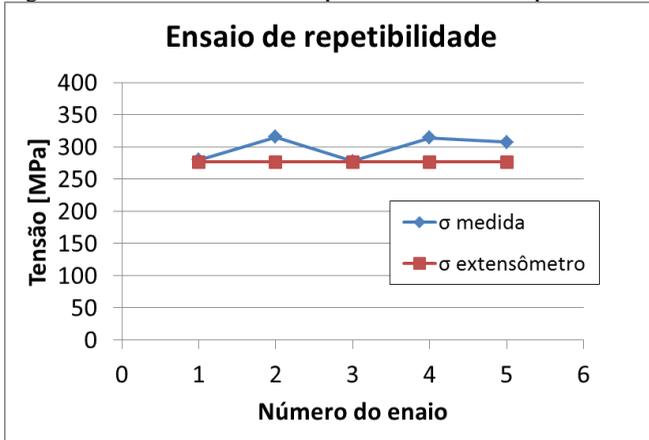
Figura 34 - Mapas de diferença de fase dos cinco ensaios de avaliação da repetibilidade, com força de indentação de 900 N.



Fonte: Próprio autor.

Através do modelo matemático para cálculo da tensão (σ_{ponto}) apresentado no item 4.3 desse documento, foram calculadas as tensões para cada um dos cinco pontos. Os resultados obtidos de tensão estão presentes na Figura 35.

Figura 35 - Tensões calculadas para os ensaios de repetibilidade.

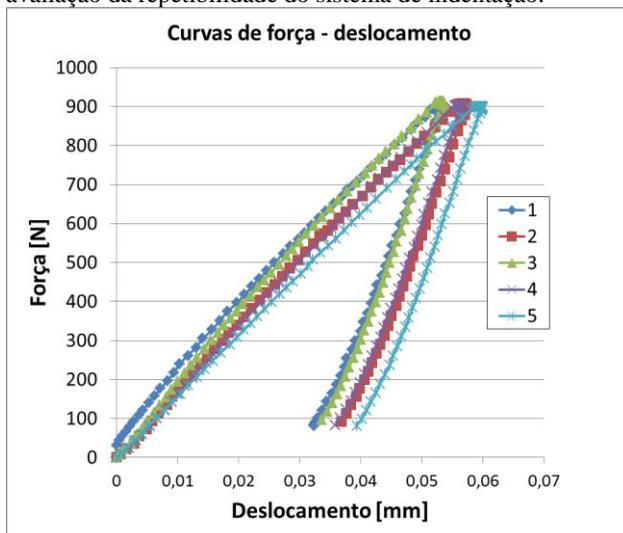


Fonte: Próprio autor.

A repetibilidade dos ensaios de indentação foi avaliada observando as curvas de força-deslocamento, presentes Figura 36.

Através dessas é possível observar que a força máxima de indentação se manteve bem repetitiva, variando dentro da faixa de ± 20 N, no valor nominal de 900 N. Variações mais significativas podem ser observadas na profundidade de indentação. Essas variações provavelmente decorrem de alterações localizadas de dureza na superfície indentada e imperfeições na superfície do tubo.

Figura 36 - Curvas de força-deslocamento geradas a partir dos ensaios para avaliação da repetibilidade do sistema de indentação.

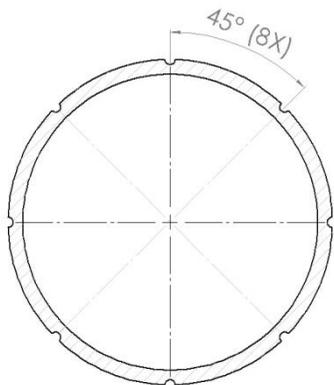


Fonte: Próprio autor.

5.3 ENSAIOS SEM CARGA

Os ensaios sem carga foram realizados no tubo com o objetivo de verificar a uniformidade do estado de tensões residuais presentes no tubo descarregado. Foram feitos oito ensaios na seção S1 e outros oito na seção S7. Os pontos de medição foram separados 45° entre si e posicionados na seção conforme a Figura 37.

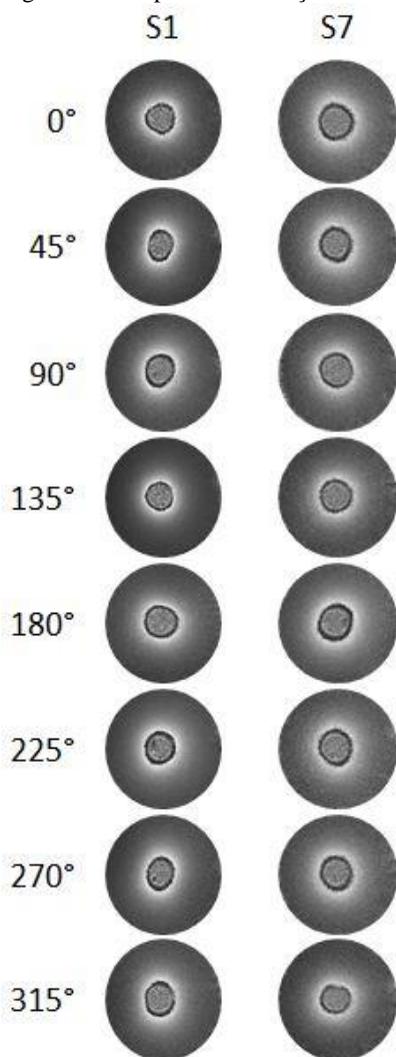
Figura 37 - Pontos de medição para a realização dos ensaios sem carga nas seções S1 e S7 do tubo do padrão de flexão.



Fonte: Próprio autor.

Os mapas de diferença de fase obtidos através das medições podem ser visualizados na Figura 38.

Figura 38 - Mapas de diferença de fase das medições sem carga.

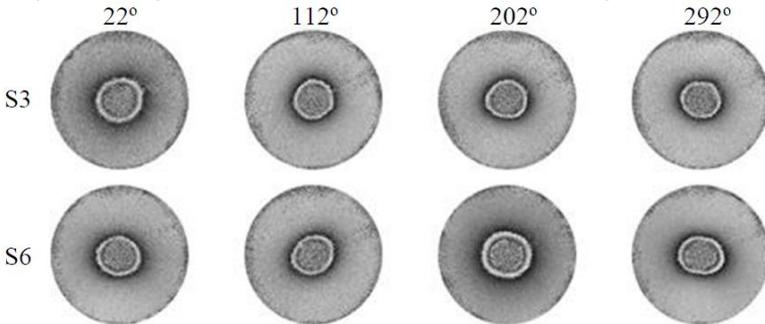


Fonte: Próprio autor.

Uma primeira análise qualitativa mostra, por meio dos mapas de diferença de fase, franjas de correlação circulares. Que demonstra um padrão de deformações uniformes ao redor da região indentada, indicando um estado de tensões residuais equibiaxial e praticamente invariante ao longo das seções. Uma análise realizada no mesmo tubo

por Pacheco (2014) com o método do furo cego confirma a uniformidade característica observada através dos ensaios com indentação. Na Figura 39 é possível observar os resultados das medições sem carga de flexão, obtidos por Pacheco (2014) através do método do furo cego. As franjas circulares ao redor do furo representam um padrão de deformação radialmente uniforme, o que indica a presença de um estado de tensões residuais equibiaxial.

Figura 39 - Mapas de diferença de fase dos oito ensaios realizados, para medição sem carga de flexão, utilizando o método do furo cego.

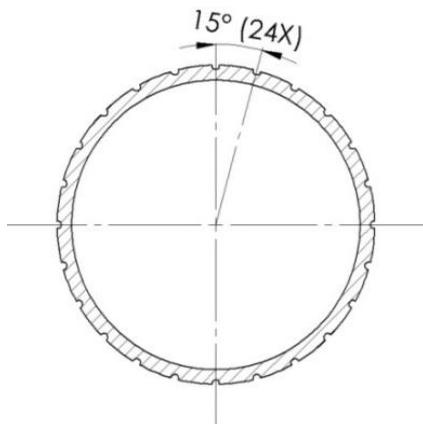


Fonte: Pacheco (2014).

5.4 ENSAIOS COM CARGA

Os ensaios realizados com carga foram feitos em todas as seções (S1 a S8) sob o carregamento especificado no item 5.1.1 desse documento. Os ensaios foram em maior número nas seções com maior carregamento (S3, S4, S5 e S6), nas quais foram realizadas vinte e quatro indentações em cada seção transversal, separadas de 15° entre si (Figura 40).

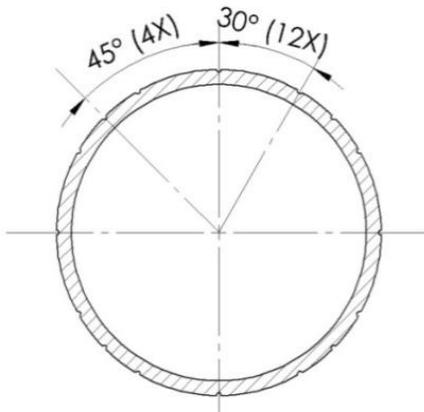
Figura 40 - Distribuição dos pontos de medição nas seções mais carregadas (S3, S4, S5 e S6).



Fonte: Próprio autor.

Nas seções menos carregadas (S1, S2, S7 e S8) foram realizados doze ensaios separados 30° entre si. Complementarmente a esses ensaios foram ainda realizados ensaios nos pontos de 45° , 135° , 225° e 315° , totalizando dezesseis pontos de medição em cada uma destas quatro seções (Figura 41). A realização desse denso número de ensaios, que em campo se torna em alguns casos inviável, foi motivado pelo aspecto investigativo deste trabalho, uma vez que havia a disponibilidade do tubo no laboratório e também a necessidade em se obter dados para análises mais profundas. Optou-se por adquirir uma quantidade maior do que o mínimo necessário para que seja possível analisar uma mesma seção a partir de diferentes combinações de dados de indentação. Um dos principais parâmetros a ser analisado, através desses conjuntos de dados, é o número mínimo de pontos de indentação requeridos por seção de medição para caracterizar a flexão.

Figura 41 - Distribuição dos pontos de medição nas seções menos carregadas (S1, S2, S7 E S8).



Fonte: Próprio autor.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

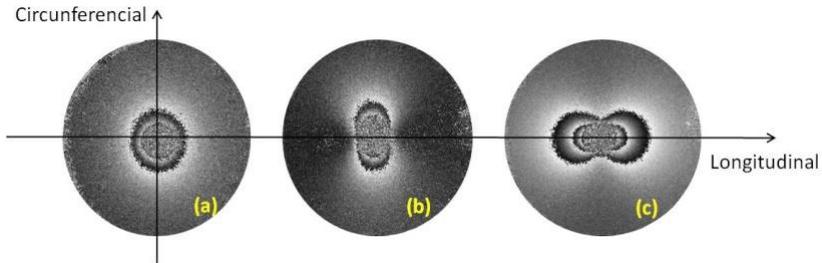
Nesse capítulo serão apresentados os resultados da medição das tensões de flexão atuantes no tubo e orientação da linha neutra, referentes às medições realizadas no padrão de flexão.

6.1 MEDIÇÃO SOB FLEXÃO

Uma análise qualitativa das franjas dos mapas de diferença de fase mostra uma coerência em relação à direção e intensidade das tensões aplicadas ao tubo. Conforme o observado no item 5.2, as tensões residuais presentes no tubo apresentam um estado axissimétrico, o que é comprovado pelo formato circular das franjas. Esse mesmo comportamento pode ser observado na Figura 42a, que resulta de ensaio de indentação realizado em uma seção do tubo carregado na posição de 0° , que corresponde à linha neutra, onde o nível de tensão de flexão é nulo. Na ausência de pressão, neste ponto estão agindo apenas as tensões residuais de fabricação do material.

Na Figura 42b tem-se o mapa de fase de uma medição feita no intradorso do tubo sob flexão. Nessa região as tensões residuais de característica compressiva do tubo são intensificadas pela tensão de flexão compressiva atuante, apresentando no mapa de fase a figura de uma elipse na direção circunferencial. A intensificação da compressão na direção longitudinal restringiu a movimentação do material, tornando menor o eixo da elipse nesta direção. As medições realizadas no extradorso mostraram o mesmo comportamento do intradorso, porém na direção contrária, longitudinal. Os esforços de flexão atuantes no extradorso na direção longitudinal apresentam um comportamento trativo. No mapa de fase presente na Figura 42c é possível observar uma medição feita no extradorso do tubo. Nota-se agora que a elipse possui sentido longitudinal equivalente às tensões trativas presentes. A tração existente na direção longitudinal ampliou a movimentação do material nesta direção e alongou a elipse.

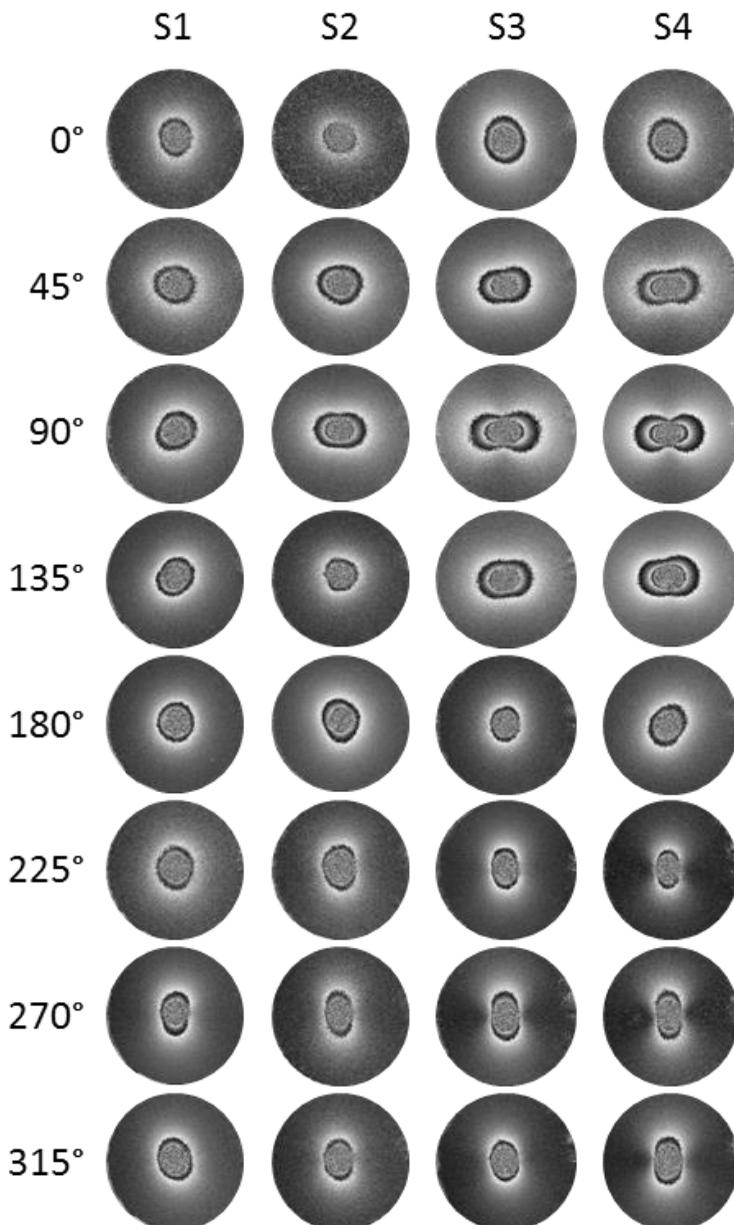
Figura 42 - Ensaio (a) realizado na linha neutra, (b) no intradorso e (c) no extradorso do tubo carregado.



Fonte: Próprio autor.

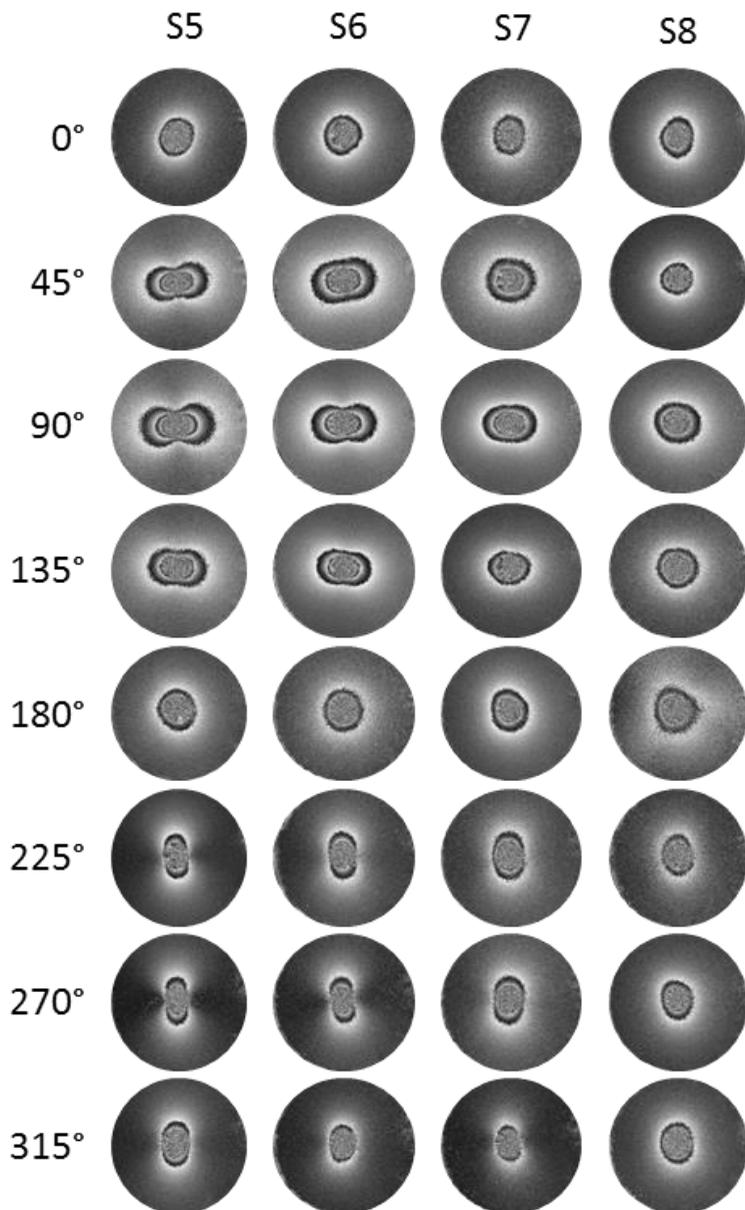
Uma análise mais completa das medições realizadas pode ser feita através da Figura 43 e Figura 44, que apresenta os mapas de diferença de fase para os principais pontos de medição das oito seções. Nele é possível observar claramente que nas seções mais carregadas, os mapas de diferença de fase apresentam franjas com maior deformação. Através dos mapas de diferença de fase, observa-se uma intensificação nas tensões partindo da linha neutra até os pontos de 90° e 270° , nas quais se tem, respectivamente, maior tensão de flexão trativa e compressiva. É também muito nítida a intensificação das deformações à medida que se parte das seções menos carregadas, posicionadas nas extremidades do tubo, para as mais carregadas, posicionadas na região central do tubo.

Figura 43 - Mapas de diferença de fase dos principais ensaios realizados nas quatro primeiras seções.



Fonte: Próprio autor.

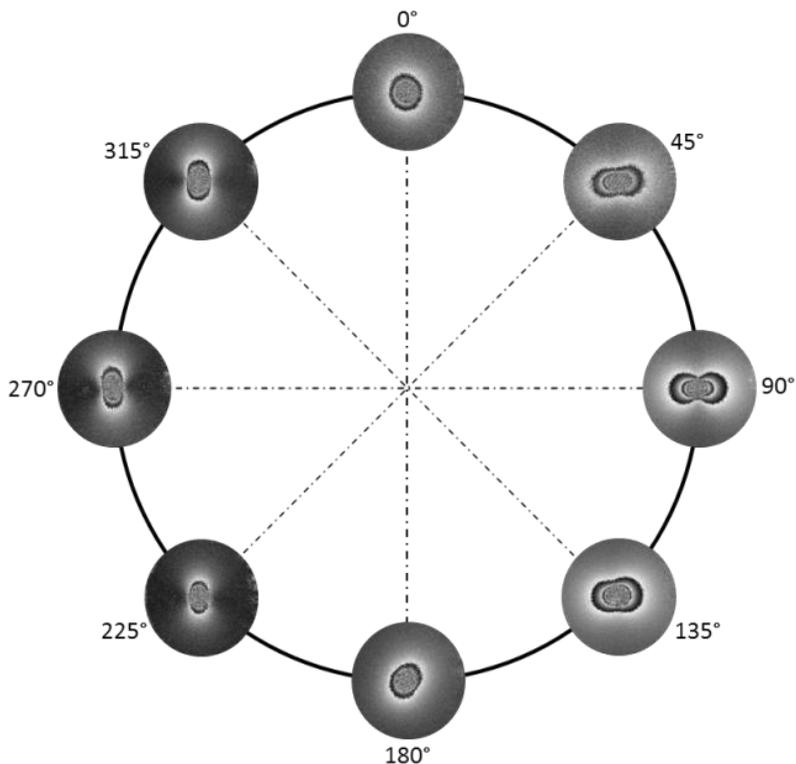
Figura 44 - Mapas de diferença de fase dos principais ensaios realizados nas quatro últimas seções.



Fonte: Próprio autor.

Para a melhor visualização da variação da tensão na seção, a Figura 45 apresenta os mapas de diferença de fase de S4. Notam-se claramente os pontos de tensão máxima trativa e compressiva, nas posições de 90° e 270° respectivamente. É possível observar também o aumento no nível de deformação, e conseqüente aumento do nível de tensões presentes, partindo do mapa de diferença de fase da posição 0° , linha neutra, até o ponto máximo de 90° .

Figura 45 - Mapas de diferença de fase dos ensaios realizados na seção S4.

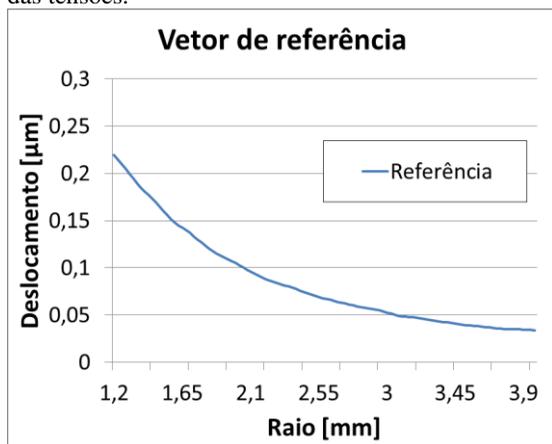


Fonte: Próprio autor.

Para se calcular o valor de tensão de flexão atuante em cada seção é necessário primeiramente obter o valor de tensão de cada ponto de indentação. Para a realização desse processo foi escolhida a indentação na posição de 90° da seção S4 para ser utilizado como referência. A partir do vetor de deslocamento obtido com o software

RSindent, foi estabelecido um perfil de referência para a tensão de referência (253 MPa). Esse vetor possui dados referentes à imagem de diferença de fase do ensaio, a fim de obter apenas dados significativos e evitar ruídos o vetor restringe-se a dados obtidos entre os valores de raio de 1,2 mm e 4,0 mm, formando um vetor com 112 dados de deslocamento. Todos os outros pontos da imagem fora dessa seleção não são utilizados para os cálculos. O vetor utilizado como referência para os posteriores cálculos de tensão está representado na Figura 46. Ele corresponde à intensidade do segundo harmônico do sinal de deslocamento radial em função do raio. Esta componente corresponde à diferença entre as tensões principais que, no caso, está relacionada com a tensão de flexão. É possível observar que na região com menor raio os deslocamentos são maiores, pelo fato de estarem mais próximos da região da indentação.

Figura 46 - Vetor de deslocamentos utilizados como referência para o cálculo das tensões.

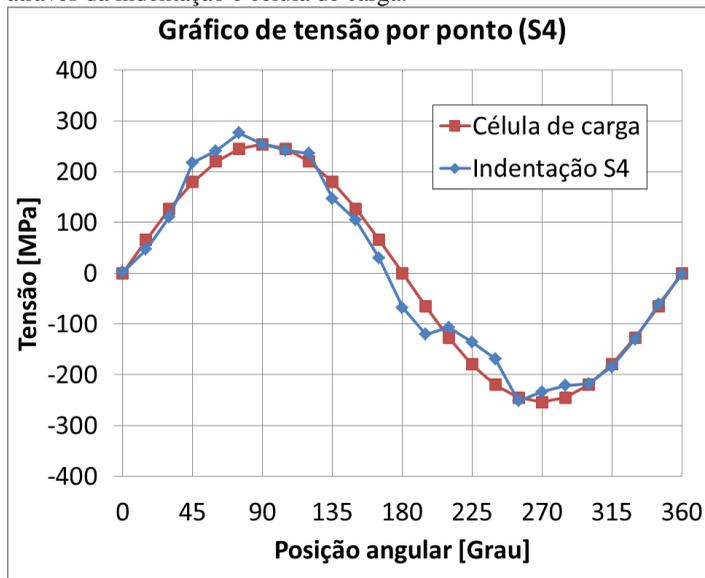


Fonte: Próprio autor.

Para as demais indentações, realizadas ao longo de todo o tubo, o valor de tensão foi determinado a partir do vetor referência. Para isso, foi calculada pelo método dos mínimos quadrados a constante multiplicativa que melhor ajustava as duas curvas, utilizando os caminhos descritos no item 4.3 desse documento. O valor da tensão corresponde à constante multiplicativa encontrada multiplicada pelo valor da tensão de referência (253 MPa). Como exemplo, o gráfico da Figura 47 mostra os valores de tensão calculados para os demais pontos

de medição da seção S4 e os valores de tensão determinados a partir da força medida com a célula de carga presente na bancada.

Figura 47 - Valores de tensão calculados para os pontos de medição da seção S4 através da indentação e célula de carga.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando os valores de tensão obtidos e a posição angular de cada ensaio, é possível alimentar a matriz SL e θ presentes na equação 37 e calcular, através do método dos mínimos quadrados, os valores dos coeficientes β . Após o cálculo desses coeficientes, utiliza-se a equação 31 para calcular o valor de tensão de flexão (S^{flex}) atuante na seção.

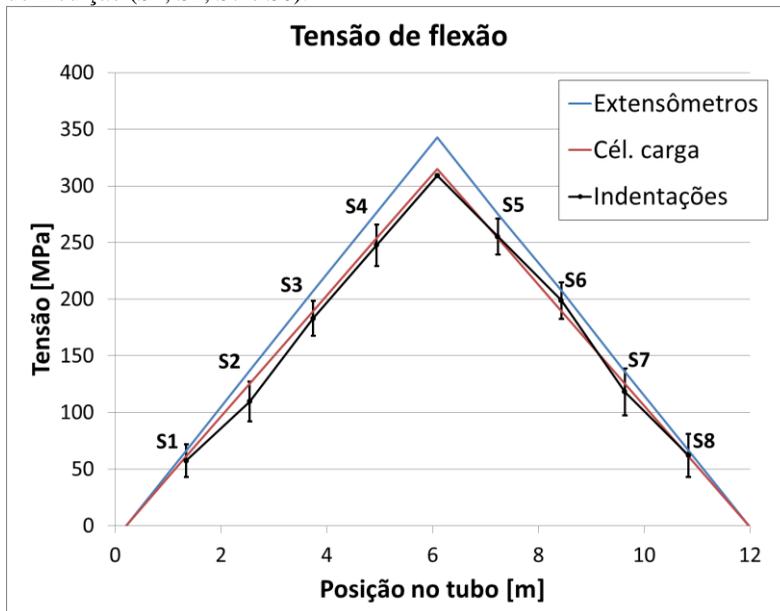
Os resultados obtidos, utilizando vinte e quatro pontos de medição nas seções S3, S4, S5 e S6 e dezesseis pontos de medição nas seções S1, S2, S7 e S8, de tensão de flexão (S^{flex}) e suas incertezas estão representados na Tabela 3. Na Figura 48, estão reunidos os resultados da Tabela 3 e os valores calculados para tensão de flexão das leituras feitas pelo extensômetros e pela célula de carga em função da posição da seção no tubo.

Tabela 3 - Resultados obtidos de tensão de flexão e incerteza de medição (IM) nas oito seções do tubo.

Seção	S^{flex} [MPa]	IC [MPa]
S1	57	± 15
S2	110	± 18
S3	183	± 15
S4	248	± 18
S5	255	± 16
S6	199	± 16
S7	118	± 21
S8	62	± 19

Fonte: Próprio autor.

Figura 48 - Resultados da medição de tensão de flexão nas oito seções do tubo, utilizando vinte e quatro pontos de medição (S3, S4, S5 e S6) e dezesseis pontos de medição (S1, S2, S7 e S8).



Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar um bom resultado na medição de tensão de flexão utilizando o método de indentação instrumentada proposto nesse trabalho em relação à medição feita com a célula de carga. Os valores obtidos através da leitura dos extensômetros, como observado no item 5.1.1 deste trabalho, apresentam um erro proporcional ao valor de tensão medido, associado a um provável erro no valor do módulo de elasticidade do material (PACHECO, 2014). Em função de a calibração ter sido realizada com base nos valores de referência calculados a partir da força medida pela célula de carga, as tensões e momentos fletores determinados pelo método de indentação não usam o valor do módulo de elasticidade do material e não são afetados por eventuais erros no seu valor.

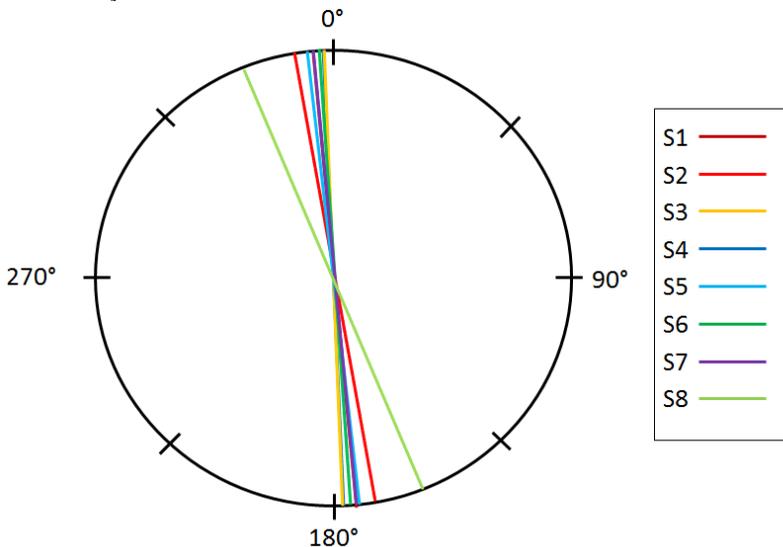
O método utilizado, para o cálculo da tensão de flexão nas seções do tubo, partiu do princípio da interpolação onde a tensão no ponto de referência era maior que as tensões calculadas a partir dessa. A extrapolação dos resultados, ou seja, a utilização de uma referência com valor de tensão menor que os pontos onde se deseja calcular a tensão não foi analisado. Porém, a realização deste estudo seria de grande importância para a análise de resultados obtidos em campo.

As incertezas presentes se mostraram relativamente baixas, com valores entre 15 MPa e 21 MPa. Nas seções menos carregadas (S1, S2, S7 e S8) devido às baixas tensões, as incertezas representam um erro relativo maior de medição, em torno de 25% do valor medido. Nas seções mais carregadas (S3, S4, S5 e S6), os maiores valores de tensão fazem com que a incerteza não represente um erro relativo tão grande quanto nas outras seções, representando um erro médio de 7% em relação ao valor medido.

6.2 ORIENTAÇÃO DA LINHA NEUTRA

Outro parâmetro avaliado foi a orientação da linha neutra no tubo. Os resultados apresentados na Figura 49 mostram uma pequena dispersão nas medições. Destaca-se a seção S8 que apresentou maior desvio em relação às outras. Uma possível causa é relação sinal/ruído desfavorável em função dos baixos níveis de tensão de flexão atuantes. Porém de modo geral os resultados se mostraram condizentes com o esperado, com desvios médios de 5° em relação à orientação esperada de 0°.

Figura 49 - Mapa de orientação da linha neutra calculada a partir da medição das oito seções.



Fonte: Próprio autor.

6.3 AVALIAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS

A opção pela realização de vinte e quatro pontos de medição nas seções mais carregadas do tubo teve como objetivo investigar o número mínimo de pontos para a caracterização das tensões de flexão atuantes na seção. Através do denso número de dados adquiridos foram feitas análises de tensão de flexão nas seções S3, S4, S5 e S6, utilizando seis, oito, doze e vinte e quatro pontos de medição. Realizados os cálculos, foi feita uma comparação entre os resultados adquiridos utilizando-se como referência o valor de tensão calculado a partir da leitura da célula de carga.

Na Tabela 4 se encontram os resultados, dos cálculos do nível de tensão de flexão, utilizados para a análise do número mínimo de pontos.

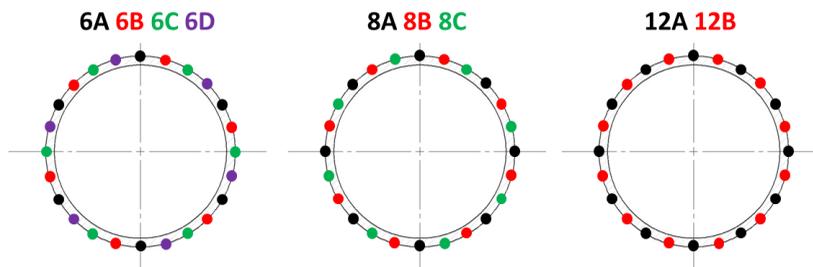
Tabela 4 - Cálculos de tensão de flexão e IM para a análise do número mínimo de pontos por seção de medição.

Nº de pontos	S3			S4			S5			S6		
	σ [MPa]	$\Delta\%$	IM [MPa]	σ [MPa]	$\Delta\%$	IM [MPa]	σ [MPa]	$\Delta\%$	IM [MPa]	σ [MPa]	$\Delta\%$	IM [MPa]
6A	192	1,1	59	272	7,2	73	277	9,0	74	214	12,9	18
6B	181	-4,5	151	278	9,8	222	275	8,6	243	147	-22,5	175
6C	212	12,0	98	238	-6,3	115	277	9,1	171	188	-0,7	102
6D	158	-16,9	102	199	###	182	282	11,4	216	145	-23,5	157
Média	186	-2,0	103	247	-2,7	148	278	9,5	176	173	-8,4	113
8A	194	2,4	40	256	1,1	63	275	8,4	60	197	3,8	43
8B	208	10,0	45	265	4,6	70	280	10,4	64	197	4,1	45
8C	179	-5,6	60	261	2,8	92	276	8,7	122	184	-2,7	67
Média	194	2,3	48	261	2,8	75	277	9,2	82	193	1,7	52
12A	211	11,2	30	266	4,7	28	279	9,9	32	209	10,5	22
12B	188	-0,7	26	273	7,6	44	277	9,1	43	185	-2,6	34
Média	199	5,2	28	269	6,2	36	278	9,5	38	197	4,0	28
24	200	5,3	15	270	6,4	18	279	10,0	16	199	4,9	16
REF.	189			254			254			189		

Fonte: Próprio autor.

De cada seção medida foram obtidos vinte e quatro pontos de medição. Inicialmente, esses foram subdivididos em quatro conjuntos de dados, cada um com seis pontos de medição (6A, 6B, 6C e 6D), três conjuntos com oito pontos de medição (8A, 8B, 8C) e dois conjuntos com doze pontos de medição (12A e 12B), conforme a Figura 50. Desses dez resultados para cada seção foi analisado o desvio em relação à tensão de referência ($\Delta\%$) e a incerteza do resultado da medição (IM).

Figura 50 – Distribuição dos conjuntos de dados para análise do número mínimo de pontos.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados coletados na Tabela 4 observa-se que o valor médio de $\Delta\%$ para as medições com seis, oito, doze e vinte e quatro pontos não possui apresenta valores com diferença significativa. Porém

ao observar a incerteza de medição, nota-se que os maiores níveis de incerteza de medição estão presentes nos ensaios com menor número de pontos, o que é natural, uma vez que o maior número de pontos tende a atenuar a influência dos erros aleatórios.

Para facilitar a visualização dos resultados, foi criada a Tabela 5 que considera idealmente iguais as tensões medidas nas seções S3 e S6 e também nas seções S4 e S5. Para analisar esses dados, foi calculada a média das medições das duas seções, a média dos desvios em relação à referência ($\Delta\%$) e o desvio padrão experimental dos desvios percentuais ($s\Delta\%$).

Tabela 5 - Resumo do processamento de dados para análise do número mínimo de pontos de medição por seção.

Nº de pontos	S3 - S6				S4 - S5			
	σ [Mpa]	$\Delta\%$	$s\Delta\%$	IM [MPa]	σ [Mpa]	$\Delta\%$	$s\Delta\%$	IM [MPa]
6 - Média	180	-5,2	14,4	108	262	3,4	11,4	162
8 - Média	193	2,0	5,5	50	269	6,0	3,7	78
12 - Média	198	4,6	7,2	28	274	7,8	2,3	37
24 - Média	199	5,1	0,3	16	275	8,2	2,5	17
Ref	189				254			

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5 também não é possível observar uma diferença considerável da média dos desvios ($\Delta\%$) para as medições com seis pontos (6-Média) e as medições realizadas com maior número de pontos. Porém, se for analisada a incerteza de medição (IM) é possível observar que os ensaios com seis pontos possuem uma incerteza de medição significativamente maior que os ensaios utilizando vinte e quatro pontos de medição.

Tendo em vista todos os ensaios e análises realizadas, a conclusão é que não existe uma resposta única sobre o número ótimo de indentações. Deve ser definido para cada ensaio um número recomendado baseado em dois parâmetros, são estes:

- Tempo disponível para medição: Deve-se levar em consideração a disponibilidade de tempo do usuário para a obtenção dos resultados. Ensaios com mais pontos resultam em melhores resultados, porém, demandam mais tempo para realização da medição e processamento de dados.
- Nível de incerteza: Fator importante para a definição do número ótimo de indentações a serem realizadas é a necessidade do usuário em relação à incerteza de medição. Se o objetivo da medição é apenas uma caracterização rápida do tubo onde não

exista um compromisso grande em relação à incerteza, ensaios com menor número de pontos de medição se tornam uma opção.

Com base nas exigências típicas da inspeção de dutos enterrados, recomenda-se a utilização de oito pontos de medição para cada seção. Esse número proporciona um bom equilíbrio entre o tempo necessário para realização da medição e qualidade dos resultados obtidos. Nas condições em que foram realizados os ensaios de avaliação, o nível de incerteza adquirido com a análise de oito pontos por seção atinge níveis comparáveis aos níveis de incertezas obtidos por Pacheco (2014) com o método do furo cego.

7 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta dissertação e os objetivos específicos foram alcançados. A utilização da bancada-padrão de flexão possibilitou a comparação dos resultados obtidos, através da medição de tensões combinadas utilizando a indentação instrumentada, com o valor de referência estabelecido pela bancada. Utilizando o processamento matemático apresentado no capítulo 4, e com oito indentações por seção, foram obtidos resultados para os esforços de flexão atuantes com níveis de incerteza comparáveis aos dos ensaios realizados com o método do furo cego, considerado um método bastante confiável e regido por norma. Os ensaios exploratórios e ensaios com carga, realizados na bancada padrão de flexão, e discutidos nos itens 5.2 e 5.4, e o procedimento de calibração baseado em uma seção com carregamento conhecido, auxiliaram no desenvolvimento de um procedimento de medição para a medição de esforços de flexão e da orientação da linha neutra em uma seção transversal, um dos principais objetivos desse trabalho.

O desenvolvimento de uma técnica, de medição de esforços de flexão, com nível de invasividade e tempo de medição reduzidos, tem como grande vantagem a caracterização rápida e segura de dutos em estado crítico de segurança. Em casos nos quais o risco de colapso é iminente, a realização de processos de medição que geram danos ao duto torna-se arriscado. A utilização do procedimento de indentação instrumentada aplica-se a essas situações, nas quais pode-se realizar uma caracterização do estado de tensões do duto para se avaliar o nível de segurança operacional desse. A partir dessa pode-se optar por uma análise mais profunda do nível de tensões presentes no duto a partir de métodos mais consagrados, como por exemplo o método do furo cego.

Nos itens a seguir serão apresentadas as conclusões sumarizadas a respeito da medição da tensão de flexão, orientação da linha neutra, número recomendado de pontos de medição, o procedimento de medição desenvolvido e as propostas para trabalhos futuros.

7.1 MEDIÇÃO DA TENSÃO DE FLEXÃO

Os ensaios realizados para medição da tensão de flexão obtiveram excelentes resultados, com medições apresentando incerteza de medição inferior a 21 MPa. Através da instrumentação presente no tubo, o qual foi utilizado para a realização das medições, foi possível comparar os resultados obtidos através do método proposto com valores considerados

padrões de tensão. Os resultados dessa comparação, presentes no item 6.1, mostraram uma baixa dispersão dos valores obtidos através da indentação instrumentada, comparado aos valores de tensão obtidos através da leitura da célula de carga.

7.2 ORIENTAÇÃO DA LINHA NEUTRA

A orientação da linha neutra é parâmetro importante para análises de integridade do ponto de vista geotécnico. As medições realizadas apresentaram erros de até 11° na determinação desse parâmetro, considerados suficientes para análises em campo que buscam identificar a direção de movimentação do solo transversalmente ao tubo.

7.3 NÚMERO RECOMENDADO DE PONTOS DE MEDIÇÃO

A definição do número recomendado de pontos de medição por seção foi possível devido à alta densidade de dados capturada nos ensaios realizados com carga. A aplicação do procedimento matemático proposto, utilizando análise estatística e de incertezas dos diferentes números de pontos de medição, possibilitou a realização dessa análise. Não foi possível determinar um número ótimo único que pudesse ser utilizado para qualquer medição, pois esse depende de alguns fatores discutidos no item 6.3. Para a realização de ensaios no tubo analisado nesse trabalho, o número considerado suficiente para a caracterização das tensões de flexão foi de oito pontos de medição por seção. Por ser um método rápido, se comparado a outros métodos de análise de tensões, a execução de oito pontos de medição por seção não alonga demasiadamente o tempo necessário para a realização dos ensaios.

7.4 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

A definição e adoção de um procedimento-padrão de medição é essencial para se obter resultados de medição comparáveis. O procedimento de medição proposto nessa dissertação foi definido com base nos ensaios realizados na bancada padrão de flexão. Foi definida a utilização de força de indentação de 900 N e recomendado o número de pontos por seção de medição (oito pontos), conforme discutido nos itens 5.2 e 6.3 desse trabalho.

7.5 GRAU DE INVASIVIDADE

O ponto positivo muito forte na indentação instrumentada é o grau de invasividade extremamente reduzido. A marca de indentação deixada na superfície do duto é tipicamente de 0,9 mm de diâmetro e profundidade de 0,06 mm. As tensões residuais induzidas pela indentação são predominantemente compressivas. Assim, o dano provocado no tubo é negligenciável, o que é um ponto forte que se destaca quando a comparação é feita com o método do furo cego.

7.6 DEPENDÊNCIA DE UM ENSAIO DE REFERÊNCIA

Da forma como foi implementada, a metodologia desenvolvida depende de um ensaio de referência, realizado em um material com características e geometria similares às do tubo a ser ensaiado, para que os parâmetros extraídos do ensaio com indentação possam ser relacionados com as tensões. Esta limitação pode ser contornada com a formação de um banco de dados para os modelos de tubos mais utilizados. Porém, ainda não seria uma solução universal.

7.7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A conclusão desse trabalho deixa aberta a porta para diversos outros trabalhos futuros, segue abaixo como sugestão algumas ideias:

- Caracterização de tubos com outros materiais e diâmetros para o estabelecimento de parâmetros mais gerais de indentação e validação do método em tubos com outras configurações de tensões residuais.
- Utilização de simulação numérica para a criação da tensão de referência utilizada para o cálculo das tensões atuantes para que o modelo matemático não dependa de um ensaio realizado no tubo sob um carregamento conhecido.
- Investigar a possibilidade de quantificar os esforços axiais em tubulações com indentação instrumentada.
- Utilização das curvas carga de indentação versus profundidade de indentação para a determinação do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material. Essa característica é muitas vezes desconhecida e de suma importância para o cálculo das tensões utilizando o método do furo cego.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI JR, A. et al. A Radial in-Plane Interferometer for ESPI Measurement. **Spie Vol. 4101**, p.77-88, 2000.

ALBERTAZZI JR, A.; VEIGA, C. L. N.; WILLEMANN, D. P. **Evaluation of the optical rosette for translation, stresses, and stresses gradients measurement.** In: OPTICAL MEASUREMENT SYSTEMS FOR INDUSTRIAL INSPECTION III, Munich, 2003.

ALBERTAZZI JR., A. et al. **A portable residual stresses measurement device using ESPI and a radial in-plane interferometer.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LASER METROLOGY FOR PRECISION MEASUREMENT AND INSPECTION IN INDUSTRY. Florianópolis, 1999.

ALBERTAZZI JR, A. et al. Evaluation of a Residual Stresses Measurement Device Combining a Radial In-Plane ESPI and the Blind Hole Drilling Method. **Spie - The International Society For Optical Engineering, Europe International Symposium Photonics**, Strasbourg, France, p. 0-0. 26 abr. 2004.

ALBERTAZZI JR, A.; SOUZA, A. **Fundamento de Metrologia Científica & Industrial.** Barueri, Sp: Manole Ltda, 2008. 403 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-837A:** Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. West Conshohocken, Pa: Astm International, 2013.

BISRAT, Y; ROBERTS, S.G. Residual stress measurement by Hertzian indentation. **Materials Science And Engineering: A**, v. 288, n. 2, p.148-15, 15 set. 2000.

BOETTGER, J. **Desenvolvimento de um Sistema Portátil para Medição de Tensões Residuais em Campo Utilizando a Holografia Eletrônica e o Método do Furo.** 1998. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

BOLSHAKOV, A.; OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part II. Finite element simulations. **Journal Of Materials Research**. p. 760-768. 1996.

BORGES, M. R. **Otimização de um Medidor Portátil de Tensões Residuais.** 2000. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica

Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

BUCAILLE, J. L. et al. Determination of Plastic Properties of Metals by Instrumented Indentation Using Different Sharp Indenters. **Acta Materialia**, v. 51, n. 6, p.1663-1678, abr. 2003.

CARLSSON, S.; LARSSON, P. -I. On the Determination of Residual Stress and Strain Fields by Sharp Indentation Testing. Part I: Theoretical and Numerical Analysis. **Acta Materialia**, v. 49, n. 12, p.2179-2191, jul. 2001.

CARLSSON, S.; LARSSON, P. -I. On the Determination of Residual Stress and Strain Fields by Sharp Indentation Testing. Part II: Experimental Investigation. **Acta Materialia**, v. 49, n. 12, p.2193-2203, jul. 2001.

FENG, G. et al. An Analytical Expression for the Stress Field Around an Elastoplastic Indentation/Contact. **Acta Materialia**, v. 55, n. 9, p.2929-2938, maio 2007.

FREIRE, José Luiz França (Org.). **Engenharia de dutos**. Rio de Janeiro: Abcm, 2009

GASVIK, K. J. **Optical Metrology**. 3. ed.: John Wiley & Sons Ltd, 2002. 359 p.

HARIHARAN, P. **Basics of Interferometry**. 2. ed.: Academic Press, 2006. 248 p.

HARIHARAN, P.; OREB, B. F.; EIJU, T. Digital phase-shifting interferometry: a simples error-compensating phase calculation algorithm. **Applied Optics**. p. 2504-2506. 1987.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 637 p.

HUNG, M. Y. Y.; LONG, K. W.; WANG, J. Q. Measurement of Residual Stress by Phase Shift Shearography. **Optics And Lasers In Engineering**, p. 61-73. Maio 1997.

JANG, J. Estimation of residual stress by instrumented indentation: A review. **Journal Of Ceramic Processing Research**. p. 391-400. 2009.

KAPP, W. A. **Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para medição de deslocamentos, deformações, tensões mecânicas e tensões residuais**

mecânicas. 2010. 227 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KAPP, W. A. **Otimização do Desempenho Metroológico do Sistema de Medição Estação Holográfica**. 1997. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

KAUFMANN, G. H. (Ed.). **Advances in Speckle Metrology and Related Techniques**. Weinheim, Germany: Wiley-vch Verlag & Co. Kga, 2011. 309 p.

LEE, Y.; KWON, D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. **Acta Materialia**. p. 1555-1563. 6 abr. 2004.

LU, J. (Ed.). **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Fairmont Press, 1996. 238 p.

MACHERAUCH, E. Introduction to residual stress. In: NIKU-LARI, A. (Ed.). **Advances in surface treatments, Volume 4**: International guide book on residual stress. Pergamon Press, 1986. p. 38.

PACHECO, A. **Medição de momento fletor em dutos utilizando o método do furo cego com interferometria laser**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

RODACOSKI, M. R. **Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica**. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ROSSINI, N.s. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials & Design**. p. 572-588. mar. 2012.

RUUD, C. O. Residual Stress Measurement. In: MACKENZIE, D. S; TOTTEN, G. E. (Ed.). **Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys**. Boca Raton, Fl: Crc Press, 2006. p. 429-472.

SAKHAROVA, N. A.; PRATES, P. A.; OLIVEIRA, M. C. A Simple Method for Estimation of Residual Stresses by Depth-Sensing Indentation. **Strain**, v. 48, n. 1, p.75-87, fev. 2012.

SERVIN, M.; GONZALEZ, A. Linear analysis of the 4-step Carré phase shifting algorithm: spectrum, signal-to-noise ratio, and harmonics response. **Arxiv:1203.1947**, p. 6, 2012.

STEINZIG, M.; PONSLET, E., Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part 1. **Experimental Techniques**, 27: 43–46.(2003).

SUN, Y. Application of Digital Holography in Displacement Measurement. **Image And Signal Processing, 2009. Cisp '09. 2nd International Congress On**, Tianjin, p.1-5, out. 2009.

SUTERIO, R. et al. Avaliação Preliminar de Métodos Alternativos de Medição de Tensões Residuais por Indentação e por Aquecimento Localizado, combinados à Holografia Eletrônica. **Coteq / Vii Saet - Simpósio de Análise Experimental de Tensões**, Salvador, BA. ago 2002.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica**. 2005. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SWADENER, J.G.; TALJAT, B.; PHARR, G.M. Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters. **Journal Of Materials Research**, v. 16, n. 7, p.2091-2102, 7 jul. 2001.

TSUI, T. Y.; OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy. **Journal Of Materials Research**. p. 752-759. 1996.

VEIGA, Celso Luiz Nickel. **Aplicações do Interferômetro Radial Plano na Medição de Translação, Deformações e Tensões Mecânicas**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A.. **Robust Speckle Metrology: Techniques for stress analysis and NDT**. Bellingham, Washington: Spie, 2014.

WILLEMANN, Daniel Pedro. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica**. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ANEXO A – Certificado de calibração da célula de carga

Laboratório de FORÇA

certi.

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 19/07/13

Data da Emissão: 19/07/13

n. 3412/13

Página: 1 de 2

1. CONTRATANTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Conjunto Universitário, s/n - FLORIANÓPOLIS - SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. DINAMÔMETRO ELETRÔNICO CALIBRADO

<p>3.1 Transdutor de Força</p> <p>Tipo de Carregamento: Compressão</p> <p>n. Série (fabricante): 20130852</p> <p>n. Identificação (solicitante): 237020</p> <p>Intervalo de Indicação: 0 a 50000 N</p>	<p>3.2 Sistema de Indicação: Mostrador Digital</p> <p>n. Série (fabricante): Não consta</p> <p>n. Identificação (solicitante): Não consta</p> <p>Resolução: 0,001 mNv</p> <p>Fator de Ajuste: Não Consta</p>
--	--

4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

Identific.	Padrão	Certificados	Órgão	Data	Validade	Classe
RC 3005	Dinamômetro Eletrônico	124125	CETEC-MG	14/03/12	03/14	0

5. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

PC-155

O dinamômetro eletrônico a calibrar foi montado em série com o dinamômetro eletrônico do SM Padrão, simulando a condição normal de trabalho do mesmo, sendo os valores de força pré-estabelecidos referenciados no indicador do SMC, realizando-se as leituras (3 ciclos de medição) no sistema de indicação do SMP.

Observações:
A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição (U) multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos ν_{eff} corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e ν_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

Correção = -(Valor Medido no SMC - Valor Nominal do SMP). O valor da correção deverá sempre ser somado algebricamente à força calculada pela equação do SMC.
As indicações em unidade de força do dinamômetro eletrônico calibrado foram calculadas através da equação característica de resposta apresentada na página 02/02.

Condições Ambientais Durante a Calibração:
Temperatura: 21 +/- 1 °C

O resultado deste certificado refere-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, e não sendo extensivo a quaisquer outros. Esta calibração não tem o instrumento de controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	Senhor C CEP: 65040-070 Florianópolis - SC Caixa Postal 5053	Tel.: +48 3239 2121 Fax: +48 3239 2119 metrologia@certi.org.br www.certi.org.br
		Fundação CERTI CNPJ 78.620.383/0001-24 Insc. Est. 251.378.241 Insc. Mun. 50.111-5



Laboratório de FORÇA

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 19/07/13

Data da Emissão: 19/07/13

n. 3412/13

Página: 2 de 2

6. RESULTADOS:

TABELA DE RESULTADOS						
Valor Nominal	Valor Medido SMC	Correção	U	k	V_{rel}	
SMP [N]	[mV/v]	[N]	[N]	[N]		
5002	-0,205	5001	1	62	2,15	18
15000	-0,618	14998	2	50	2,02	128
20000	-0,824	20015	-15	73	2,28	10
24999	-1,029	24988	13	78	2,01	307
29999	-1,235	29997	2	80	2,01	258
34999	-1,441	35000	-1	53	2,02	146
44998	-1,854	45004	-6	72	2,07	38
49998	-2,060	49994	4	70	2,07	36

Equação Característica de Resposta:

$$F = a \cdot X^2 + b \cdot X + c \cdot X^3 + d \cdot X^4$$

F: Força aplicada ao instrumento calibrado [N]

X: Leitura no instrumento calibrado [mV/v]

a=	3,2721694E+01
b=	-2,4176961E+04
c=	1,0212061E+02
d=	3,8687122E+01

Everton Idalicio Caetano
Responsável pela Calibração

Everton Idalicio Caetano
Técnico Metrologista

Qualidade deste certificado refere-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensiva a quaisquer fatos. Esta calibração não garante o desempenho do controle metrologico estabelecido na Regulamentação Metrologica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Setor C
CEP: 88040-878
Florianópolis - SC
Caixa Postal 5063Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2119
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.brFundação CERTI
CNPJ 78.826.363/0001-24
Insc. Est. 251.378.241
Insc. Mun. 50.111-5