



Leonardo Dantas Rodrigues

**Medição de Tensões Residuais em Tubos
Visando a Determinação de Esforços em
Dutos Enterrados**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: José Luiz de França Freire
Co-orientador: Ronaldo Domingues Vieira

Rio de Janeiro
Abril de 2007



Leonardo Dantas Rodrigues

**Medição de Tensões Residuais em Tubos
Visando a Determinação de Esforços em
Dutos Enterrados**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

José Luiz de França Freire

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Ronaldo Domingues Vieira

Co-orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Arthur Martins Barbosa Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Marcos Venicius Soares Pereira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Jorge Carlos Ferreira Jorge

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca –
CEFET/RJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Leonardo Dantas Rodrigues

Graduou-se em Engenharia Mecânica na UFPA (Universidade Federal do Pará) em 2002. Foi aluno de iniciação científica, desenvolvendo pesquisas na área de energia alternativa. Foi monitor de algumas disciplinas da área de Mecânica dos Sólidos e participou de congressos nesta área e na área de dutos especificamente.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Leonardo Dantas

Medição de tensões residuais em tubos visando a determinação de esforços em dutos enterrados / Leonardo Dantas Rodrigues ; orientador: José Luis de França Freire; co-orientador: Ronaldo Domingues Vieira. – 2007.
155 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Tensões residuais. 3. Dutos enterrados. 4. Movimento de solo. 5. Furo cego. 6. Furo elíptico. I. Freire, José Luiz de França. II. Vieira, Ronaldo Domingues. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A Deus por tudo que me proporciona e pelas pessoas que pôs em minha vida, em especial minha mãe, a dona Dalva do Céu e minha irmã Larissa.

Ao professor José Luiz Freire, pela paciência na orientação deste trabalho, pela grande contribuição no meu crescimento profissional e pessoal e por todos os conselhos iniciados por “eu sempre digo isso aos meus filhos...”.

Ao professor Ronaldo Vieira, também pela grande paciência e generosidade na orientação deste trabalho e por me mostrar a beleza do amor pela engenharia.

Ao professor Arthur, pela receptividade e pela eterna disposição em ajudar.

À ANP pelo apoio financeiro.

A todos os professores do departamento, principalmente: Márcio, Luiz Fernando, Marcos Sebastião, Jaime e Almeida.

Aos professores da UFPa, destaquem-se: Carlos Maneschy e Daniel Cruz, que me guiaram para o melhor caminho.

A todos os funcionários do Departamento de Mecânica.

À Fluke Engenharia pela construção da bancada para medição de tensões em dutos projetada nesta dissertação.

A todos os meus familiares que, por vezes me carregaram no colo, por vezes nos ombro e, certamente, sempre no coração.

A todos os grandes amigos que deixei no meu amado Estado, o Pará, aos quais devo, indubitavelmente, grande parte dos meus momentos mais felizes.

Desculpem não listar nomes, mas graças a Deus não caberiam em uma página.

À galera da “favelinha”, dentre eles Barral (o primo) e José Antônio, sempre me apoiando nos momentos difíceis.

Aos amigos conquistados aqui no Rio, essas pessoas incríveis que me fazem manter a fé no ser humano.

Aos meus companheiros de laboratório, meus grandes amigos Marco, Jesus, Habib e Sérgio, e ainda, Jaiminho e Maira.

Ao meu mestre Antônio Garcia (grande “Biga”), verdadeira lição de vida.

Aos amigos com os quais morei durante esse período.

Ao meu irmão Erb: perder-me-ia listando os porquês.

Resumo

Rodrigues, Leonardo Dantas; Freire, José Luiz de França; Vieira, Ronaldo Domingues. **Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados**. Rio de Janeiro, 2007. 155p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O conhecimento dos esforços de flexão e normal provocados por movimentação de solo é importante para a análise de integridade estrutural de dutos. A existência de tensões residuais é um dos principais obstáculos para obtenção de resultados precisos na determinação de tais esforços. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar o comportamento das tensões residuais de fabricação em tubos ao longo de sua circunferência e de seu comprimento. Foram feitas medições de tensões residuais em corpos de prova de um tubo novo e de outros retirados de operação utilizando a técnica de furo cego e uma nova técnica de seccionamento. As medições foram realizadas ao longo da circunferência e em diferentes seções dos tubos. As medições com a técnica de seccionamento proposta, denominada técnica do furo elíptico, mostraram-se coerentes com as medições com o furo cego, principalmente para as tensões longitudinais. A partir dos resultados obtidos nos experimentos realizados, foram feitas recomendações e propostas metodologias para separar as tensões residuais de fabricação das tensões atuantes no duto em operação. Para cada método proposto foi feita uma simulação para avaliar seus erros. As tensões residuais de fabricação circunferenciais e longitudinais possuem magnitudes consideráveis (por vezes até próximas à resistência ao escoamento dos tubos). Desprezá-las em medições realizadas em campo, como é feito na maioria das vezes para calcular os esforços existentes, pode acarretar grandes erros na determinação dos esforços agindo sobre o duto. Os resultados das simulações mostraram que, se as tensões residuais forem baixas, os esforços de trabalho obtidos desconsiderando-as são próximos dos valores reais. No mais, os procedimentos propostos para a determinação dos esforços, mediante a separação das tensões residuais existentes, apresentaram erros menores ou, no mínimo, próximos aos encontrados quando o cálculo foi feito negligenciando-se as tensões residuais.

Palavras-chave:

Tensões Residuais, Dutos Enterrados, Movimento de Solo, Furo Cego, Furo Elíptico.

Abstract

Rodrigues, Leonardo Dantas; Freire, José Luiz de França; Vieira, Ronaldo Domingues. **Measurement of Residual Stresses in Pipes Driving the Determining of Efforts in Buried Pipelines**. Rio de Janeiro, 2007. 155p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The knowledge of the bending and axial efforts caused by soil movement is important for the structural integrity analysis of pipelines. The existence of residual stresses is one of the main obstacles for obtaining good results in the determination of such efforts. This work was developed to analyze the behavior of the residual stresses of manufacturing in pipes throughout its circumference and length. Measurements of residual stresses had been made in samples of a new pipe and others samplers removed from operation, using the hole drilling technique and a new sectioning technique. The measurements had been carried throughout the circumference and different sections of the pipes. The measurements with the sectioning technique proposed, called elliptical hole technique, are coherent with the measurements of the hole drilling technique, mainly for the longitudinal stresses. From the experimental results, recommendations had been made and methodologies had been proposed to separate the manufacturing residual stresses from the operating stresses in the pipelines. For each method considered in this work, a simulation was made to evaluate its errors. The circumferential and longitudinal residual stresses of manufacturing have considerable magnitudes (sometimes next to the yield strength of the pipes). Not considering the residual stresses in measurements carried through *in situ* to calculate the existing loads, as it is made most of the time, can cause significant errors in the determination of the efforts acting on the pipeline. The results of the simulations had shown that, if the residual stresses are low, the work loads obtained when the residual stresses are not considered are comparable with the correct loads. The procedures proposed for the determination of loads, considering the separation of the existing residual stresses, had presented smaller errors or closer to those when the calculation was made neglecting the residual stresses.

Keywords:

Residual Stresses, Buried Pipelines, Soil Movement, Hole Drilling, Elliptical Hole.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1. Introdução	17
1.1. Comentários Preliminares e Motivação do Estudo.....	17
1.2. Objetivo	17
1.3. Principais Processos de Fabricação de Tubos	18
1.3.1. Processo UOE.....	18
1.3.2. Processo ERW	19
1.3.3. Processo Mannesmann – Laminador Oblíquo.....	20
1.4. Trabalhos Recentes em Determinação de Tensões Residuais em Tubos.	21
1.5. Apresentação dos próximos capítulos	27
2. Tensões Residuais.....	29
2.1. Tipos de Tensões Residuais.....	30
2.1.1. Tensões Residuais Macroscópicas.....	30
2.1.2. Tensões Residuais Microscópicas	31
2.1.3. Tensões Residuais Submicroscópicas	31
2.2. Alguns Processos e Mecanismos Geradores de Tensões Residuais	32
2.2.1. Soldagem	32
2.2.2. Tratamentos Térmicos e Termoquímicos de Endurecimento Superficial.....	33
2.2.3. Fundição	34
2.2.4. Conformação Mecânica.....	35
2.2.5. Processo de Jateamento de Granalhas - <i>Shot Peening</i>	36
2.3. Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais.....	37
2.3.1. Técnica do furo cego ou hole drilling.....	38
2.3.2. Técnicas de seccionamento	38
2.3.3. Técnica da Remoção de Camadas ou da Deflexão.....	40
2.3.4. Técnica da Difração de Raios-X [7].....	41
2.3.5. Técnica da Difração de Nêutrons [7].....	44

2.3.6.	Técnica de Ultra-som.....	44
2.3.7.	Técnica de Barkhausen [7]	45
2.3.8.	Tabela Comparativa das Técnicas	46
3.	Técnica do Furo Cego ou Hole Drilling	48
3.1.	Extensometria	48
3.2.	Histórico da Técnica	49
3.3.	Princípios Fundamentais e Modelamento Matemático.....	50
3.3.1.	Cálculo de Tensões para Furo Passante.....	51
3.3.2.	Considerações sobre a Técnica com Furo Passante Associada à Extensometria	55
3.3.3.	Análise Extensométrica para o Furo Cego	57
3.4.	Etapas de execução da técnica do furo cego.....	61
3.4.1.	Preparação da superfície	61
3.4.2.	Colagem, Cabeamento e Teste das Rosetas.....	62
3.4.3.	Balanceamento e Calibração do Indicador de Deformações	62
3.4.4.	Alinhamento da guia de furação	62
3.4.5.	Execução do furo	63
3.4.6.	Tratamento dos Dados (Norma ASTM E837).....	64
4.	Técnica do Furo Elíptico	68
4.1.	Princípios Fundamentais.....	68
4.2.	Problema da Concentração de Tensões	69
4.2.1.	Equações de Inglis	70
4.3.	Problema do alívio de tensões: Coeficientes de Alívio Pontuais	79
4.3.1.	Carregamento Perpendicular ao Maior Semi-eixo do Corte	80
4.3.2.	Para o Carregamento Paralelo ao Maior Semi-eixo do Corte	81
4.4.	Problema do alívio de tensões: - Coeficientes de Alívio sob a Área da <i>Grid</i> do Extensômetro	82
4.4.1.	Carregamento Perpendicular ao Maior Semi-eixo do Corte	83
4.4.2.	Carregamento Perpendicular ao maior semi-eixo do corte	83
4.5.	Outros Parâmetros de influência nas Deformações Medidas	84
4.5.1.	Ordem de realização dos cortes	84
4.5.1.1.	Primeiro Corte: perpendicular ao extensômetro	84

4.5.1.2. Primeiro corte: paralelo ao extensômetro	85
4.5.2. Profundidade do Corte.....	86
4.6. Procedimento experimental	87
5. Tensões Residuais em Tubos.....	88
5.1. Existência.....	88
5.2. Medições Laboratoriais	88
5.2.1. Medições com a Técnica do Furo Elíptico	88
5.2.1.1. Cortes com a fresa.....	88
5.2.1.2. Cortes com a serra manual.....	91
5.2.1.2.a. Cortes com a serra manual: parte I.....	92
5.2.1.2.b. Cortes com a serra manual: parte II	93
5.3. Medições com a Técnica do Furo Cego	94
5.4. Apresentação e Análise dos Resultados	97
5.4.1. Cortes com a fresa: resultados	98
5.4.2. Cortes com a serra manual: resultados	99
5.4.3. Furo cego: resultados.....	104
6. Determinação de Esforços em Dutos Usando Resultados da Técnica do Furo Cego (Método ASTM E 837)	112
6.1. O Problema	112
6.2. Situações Críticas com Relação às Tensões em uma Seção.....	112
6.2.1. Estado Autoequilibrante	113
6.2.2. Tensão Trativa Uniforme em Toda a Seção	113
6.2.3. Tensões Altas e de Sinais Contrários em Pontos Simétricos da Seção.	114
6.3. Matrizes para Separação dos Esforços	115
6.3.1. Tubo sem Tensões Residuais.....	115
6.3.2. Tubo com Tensões Residuais	117
6.4. Recomendações de Medição.....	118
6.4.1. Representação das Tensões Residuais por uma Margem de Incerteza nas Medições em Campo	119
6.4.2. Estabelecimento de uma Relação Entre as Tensões Residuais Longitudinais e Circunferenciais	121
6.5. Simulações.....	123

6.6. Análise de Criticidade dos Perfis de Tensões Medidos.....	132
6.6.1. Para as simulações relativas ao tubo API 5L X46	132
6.6.2. Para as simulações relativas ao tubo API 5L X60	133
7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	136
7.1. Comentário Geral.....	136
7.2. Das Técnicas de Medição Utilizadas	136
7.3. Dos Resultados	138
7.4. Das Recomendações	138
7.5. Sugestões para Trabalhos Futuros	140
Referências Bibliográficas.....	141
APÊNDICE A – Propriedades dos Espécimes Retirados do Trecho do Duto de Origem do Tubo X46 Analisado na Tese.	146
A.1. Resultados dos Ensaios de Tração	146
A.2. Resultados das Análises Químicas	147
A.3. Resultados dos Ensaios de Impacto	147
APÊNDICE B - Bancada para Aplicação de Esforços de Flexão, Axial e de Pressão Interna em Tubos.....	149
APÊNDICE C – Avaliação do Efeito das etapas do Processo de Fabricação UOE na Tensão Residual Circunferencial do Ponto Simétrico à Solda	151
C.1. Análise do Dobramento em “U”	151
C.2. Análise por Elementos Finitos do Fechamento Final do Tubo	152

Lista de Figuras

Figura 1.1. Apresentação esquemática das etapas do processo UOE [30].	19
Figura 1.2. Apresentação esquemática das etapas do processo ERW [30].	20
Figura 1.3. Apresentação esquemática das etapas do processo Mannesmann: (a) Vista bidimensional do procedimento e (b) Vista tridimensional detalhada dos elementos do processo [31].	20
Figura 1.4. Modelos de: (a) paredes finas com 4 passes e (b) paredes grossas com 36 passes [38].	22
Figura 1.5. Perfil de tensões na chapa bobinada (espessura de parede de 6,4 mm)	23
Figura 1.6. Tensão residual circunferencial na solda circunferencial e nas suas vizinhanças [39].	24
Figura 1.7. Pontos e regiões medidos nos tubos [23].	25
Figura 1.8. Resultados da avaliação acustoelástica na direção circunferencial em tubos API X 70: (a) Tubo de menor espessura, (b) Tubos de mesma espessura, (c) Tubo de maior espessura [23].	26
Figura 2.1. Superposição de um carregamento de flexão a um estado de tensões residuais.	30
Figura 2.2. Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldagem de chapas finas.	31
Figura 2.3. Aquecimentos por: (a) Chama oxiacetilênica e (b) Indução eletromagnética	33
Figura 2.4. Surgimento de fissuras a quente na fundição de uma barra metálica.	35
Figura 2.5. Barra cilíndrica trabalhada a frio.	36
Figura 2.6: (a) Um equipamento de <i>shot peening</i> , (b) Representação do efeito do impacto das esferas no <i>shot peening</i> , que é semelhante ao do martelamento [33] e (c) <i>Hammer peening</i> com martelo pneumático em uma junta soldada [34].	36
Figura 2.7. Representação da técnica de seccionamento para determinação de tensão circunferencial	39
Figura 2.8. Representação do princípio do método de remoção de camadas [6].	40
Figura 2.9. Distâncias entre planos num material isento de tensões [7].	41
Figura 2.10. Variação das distâncias interplanares no material tencionado [7].	42

Figura 2.11. Arranjo das direções preferenciais de magnetização de domínios num material policristalino [7].....	46
Figura 3.1 – Esquema simplificado de uma ligação de um extensômetro a uma Ponte de Wheatstone	49
Figura 3.2. Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo.	51
Figura 3.3. Variação das relações entre tensões radial e circunferencial e tensão nominal.....	52
Figura 3.5. Configuração da roseta proposta por Rendler e Vigness	54
Figura 3.6. Representação dos parâmetros geométricos finitos do extensômetro.	55
Figura 3.7. Gráfico para determinação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ para furos usinados em passo único para rosetas tipo RE e UL.....	59
Figura 3.8. Variação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ com a profundidade do furo [7].....	60
Figura 3.9. Fluxograma de aplicação da técnica do furo cego	61
Figura 3.10. Alinhamento do suporte da furadeira com o centro da roseta.....	63
Figura 3.11. Duas Fresas de Topo do tipo Cônica Invertida, sendo que a da direita encontra-se bem desgastada, já imprópria para a técnica do furo cego	64
Figura 3.12. Gráfico comparativo para verificação da uniformidade das tensões ao longo da espessura do espécime avaliado	65
Figura 4.1. Foto do experimento com a técnica do furo elíptico: cortes perpendicular e paralelo ao extensômetro.....	68
Figura 4.2. Variação das elipses e das hipérboles, com as coordenadas α e β	70
Figura 4.3. Carregamento perpendicular ao maior semi-eixo da elipse	72
Figura 4.4. Variação das tensões com relação à distância da borda de um furo circular para (a) na direção do carregamento e (b) na direção perpendicular ao carregamento.	74
Figuras 4.5. Variação das tensões com relação à distância da borda de um furo elíptico para (a) na direção perpendicular ao carregamento e (b) na direção do carregamento.	75
Figura 4.6. Carregamento paralelo ao semi-eixo maior da elipse como resultado da subtração do <i>caso 1</i> do <i>caso 2</i>	77

Figuras 4.7. Variação das tensões com relação à distância do furo elíptico para o (a) eixo paralelo ao carregamento e (b) eixo perpendicular ao carregamento.	77
Figura 4.8. Estado de tensões originado pela concentração tensão ao redor do furo elíptico na direção dos carregamentos.....	78
Figura 4.9. Princípio da superposição aplicado ao método do furo elíptico	79
Figura 4.10. Comportamento dos coeficientes de alívio pontuais com a distância normalizada (y/b) para o carregamento na direção y : (a) para o furo circular e (b) para o furo elíptico.....	81
Figura 4.11. Comportamento dos coeficientes de alívio pontuais com a distância normalizada (y/b) para o carregamento na direção x : (a) para o furo circular e (b) para o furo elíptico.....	82
Figura 4.11. Placa carregada biaxialmente com primeiro corte: (a) perpendicular e (b) paralelo ao <i>strain gage</i>	84
Figura 5.1. Fresadora com o tubo posicionado para cortes longitudinais.	89
Figura 5.2. Equipamentos para a aquisição das deformações medidas.	90
Figura 5.3. Vista completa dos equipamentos utilizados e do tubo posicionado. .	91
Figura 5.4. Imagem de alguns cortes e sua posição em relação aos extensômetros.....	91
Figura 5.5. Indicador de deformações Vishay Modelo P3	92
Figura 5.6. Os dois extensômetros do experimento da Parte I dos cortes com a serra.....	93
Figura 5.7. Fotos dos gages (a) externo e (b) interno do experimento corte com a serra: parte II	94
Figura 5.8. Roseta extensométrica triaxial PA-06-062RE-120	95
Figura. 5.9. Da esquerda para a direita: Guia de furação, blocos padrões em U, lupa e furadeira.....	95
Figura 5.10. Rosetas posicionadas em uma no espécime do tubo API 5L X46	96
Figura 5.11. Furos realizados no espécime em pontos afastados de 16,6 mm na direção longitudinal do tubo API 5L X60.....	97
Figura 5.12. Gráfico comparativo das tensões calculadas pela simples multiplicação das deformações medidas pelo módulo de elasticidade do espécime e das calculadas com as equações do furo elíptico com simplificações (representados pelo índice “e”) *.	98

Figura 5.13. Gráfico da variação das deformações lidas com a profundidade do corte (2) realizado a 1mm do extensômetro 2 no tubo X46.....	100
Figura 5.14. Gráfico das deformações medidas nos <i>gages</i> localizados nas superfícies interna e externa do tubo X46.....	102
Figura. 5.15. Comportamento das deformações medidas nos <i>gages</i> localizados nas superfícies externa e interna em cada corte com relação à profundidade de corte.....	103
Figura 5.16. Comportamento das tensões residuais de fabricação do tubo API 5L X46	106
Figura 5.17. Gráfico comparativo das tensões máximas e mínimas encontradas no cordão de solda para diferentes tubos do trecho do duto de onde foi retirado o tubo X46 aqui analisado	107
Figura 5.18. Comparação entre o comportamento das tensões residuais: (a) longitudinais e (b) circunferenciais para as duas seções medidas no tubo X60.....	109
Figura 5.19. Comparação entre as curvas de medições com os furos cego e elíptico para o tubo X60: (a) Tensões longitudinais e (b) Tensões circunferenciais	110
Figura 6.1. Perfil de tensões auto-equilibrantes: a tração nas extremidades é equilibrada por tensões compressivas no restante da seção.....	113
Figura 6.2. Tensões superficiais trativas em toda a seção.	114
Figura 6.3. Perfil de tensão de um corpo sujeito à flexão: (a) no limite elástico, (b) plastificado e (c) no momento último.	114
Figura 6.4. Dimensões e carregamento de um hipotético usado nas análises deste capítulo.....	115
Figura 6.5. Curvas das médias entre as tensões medidas com as técnicas dos furos cego e elíptico para o tubo X60	119
Figura 6.6. Perfis de tensões medidas na superfície do tubo X46: valores da tabela 6.2.	133
Figura 6.7. Perfis de tensões medidas na superfície do tubo X60: valores da tabela 6.4.	134
Figura. A.1. Valores de Energia absorvida a +22° C no Ensaio Charpy dos CP's com entalhes posicionados em 5 regiões ¹	148

Figura A.2. Junta soldada mostrando os passes interno (inferior) e externo (superior) e a ZTA ¹	148
Figura B.1. Bancada para aplicação de pressão interna, flexão e esforço axial no tubo.....	149
Figura B.2. Desenho detalhado da bancada, usado na sua construção.....	150
Figura C.1. Malha do modelo de simulação do fechamento final da chapa em fora de tubo	153
Figura C.2. Distribuição de tensões em y, com detalhe no ponto simétrico à solda.	153
Figura C.3. Perfil de tensões residuais na espessura do tubo no ponto simétrico à solda, resultante dos processos “U” e de fechamento final: (a) quando $ \sigma_{r(\text{etapa U})} < \sigma_{r(\text{fechamento})} $ e (b) quando $ \sigma_{r(\text{etapa U})} > \sigma_{r(\text{fechamento})} $	154

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Caracterização dos espécimes analisados [23].	25
Tabela 2.1. Mecanismos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabricação e beneficiamento [6].	37
Tabela 2.2 – Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais [7].	47
Tabela 3.1. Determinação dos coeficientes $\bar{a}$ e $\bar{b}$ para rosetas do Tipo A [19]...	60
Tabela 5.1. Parâmetros dimensionais usados nos experimentos e os respectivos coeficientes de alívio, a serem usados no cálculo das tensões.	97
Tabela 5.2. Deformações lidas com o corte (1) a 1mm do extensômetro 1 (X46)	100
Tabela 5.3. Avaliação da uniformidade das tensões na profundidade de medição para o tubo API 5L X46	104
Tabela 5.4. Medições no cordão de solda do tubo API 5L X46.	105
Tabela 5.5. Avaliação da uniformidade das tensões na profundidade de medição para o tubo API 5L X60	108
Tabela 6.1. Tensões lidas em medições hipotéticas para um tubo sem tensões residuais	124
Tabela 6.2. Tensões obtidas em medições simuladas para um tubo com as curvas de tensões residuais do tubo X46.	126
Tabela 6.3. Comparação entre os erros obtidos para os diferentes métodos de determinação de esforços em relação aos valores exatos para o tubo X46.	128
Tabela 6.4. Tensões obtidas em medições simuladas para um tubo com as curvas de tensões residuais do tubo X60.	130
Tabela 6.5. Comparação entre os erros obtidos para os diferentes métodos de determinação de esforços em relação aos valores exatos para o tubo X60	131
Tabela. A.1. Corpos de prova longitudinais contendo apenas o metal de solda (valores em MPa)	146
Tabela. A.2. Corpos de prova longitudinais contendo apenas o metal base (valores em MPa) ¹	146
Tabela. A.3. Corpos de prova transversais contendo apenas o metal base (valores em MPa) ¹	146
Tabela. A.4. Composição química do metal base dos espécimes ¹ .	147