



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

APLICAÇÃO DE ENSAIOS DE FADIGA POR FLEXÃO EM TRÊS
PONTOS EM CORPOS DE PROVA DE TUBOS CONTENDO A
SOLDA PARA UTILIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO EM FADIGA DE
MINERODUTOS

CÁSSIO HENRIQUE COSTA FÉLIX

Belo Horizonte, 14 de maio de 2019

Cássio Henrique Costa Félix

**APLICAÇÃO DE ENSAIOS DE FADIGA POR FLEXÃO EM TRÊS
PONTOS EM CORPOS DE PROVA DE TUBOS CONTENDO A
SOLDA PARA UTILIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO EM FADIGA DE
MINERODUTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

F316a

Félix, Cássio Henrique Costa.

Aplicação de ensaios de fadiga por flexão em três pontos em corpos de prova de tubos contendo a solda para utilização de avaliação em fadiga de minerodutos [recurso eletrônico] / Cássio Henrique Costa Félix. - 2019.

1 recurso online (115 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 94 -106.

Apêndices: f. 107-115.

Bibliografia: f. 89-93.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses.
3. Minérios – Tubulações - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

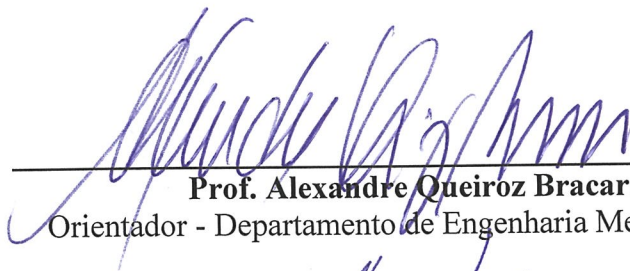
**"APLICAÇÃO DE ENSAIOS DE FADIGA POR FLEXÃO EM TRÊS
PONTOS EM CORPOS DE PROVA DE TUBOS CONTENDO A SOLDA
PARA UTILIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO EM FADIGA DE
MINERODUTOS"**

CASSIO HENRIQUE COSTA FÉLIX

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS".

Dissertação aprovada no dia 14 de maio de 2019.

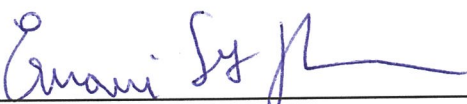
Por:



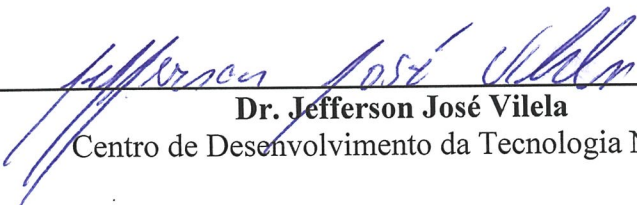
Prof. Alexandre Queiroz Bracarense
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Ariel Rodriguez Arias
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Prof. Ernani Sales Palma
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



Dr. Jefferson José Vilela
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Dedico este trabalho a minha mãe, Eliane Félix, razão fundamental de minha existência.

À minha esposa, Luciana Félix, pelo apoio incondicional e paciência.

Ao meu filho, Pedro Félix, pela inspiração.

Ao meu irmão, Ângelo Félix Neto, pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer:

Ao professor Alexandre Bracarense grande mestre que me orientou e suportou em todos os momentos e disponibilizou o Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem para realização deste trabalho.

Ao professor Ariel pela orientação e apoio em todos os trabalhos práticos.

À UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade.

À Anglo American Minério de Ferro Brasil pela confiança e suporte.

Ao gerente de Engenharia de Manutenção da Anglo American Minério de Ferro Brasil, Ramon Martins e o coordenador de Confiabilidade Kellson Menezes pelo apoio e liberação para conclusão deste mestrado.

Ao amigo Marcos Assumpção pela ajuda nas simulações e revisão deste trabalho.

A todos os alunos e professores do Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem da UFMG, em especial: Pedro Menezes, Henrique Assunção e Andrés Uribe.

A todos amigos da Anglo American, em especial: Altiberto Neto, Renier Swart, Raphael Miranda, Wallace Magalhães, Júlio Tôrres, Ricardo Grossi, Ronan Cezar e Cláudio Goulart que de alguma forma me ajudaram neste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para conclusão deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	26
LISTA DE FIGURAS	27
LISTA DE GRÁFICOS	29
LISTA DE TABELAS E QUADROS	30
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	31
RESUMO	32
1. INTRODUÇÃO	33
1.1 OBJETIVOS GERAIS	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 MINERODUTOS	20
2.1.1 Minerodutos no Brasil	21
2.1.2 Projeto	21
2.1.3 Fabricação	22
2.1.4 Montagem	23
2.1.5 Operação	23
2.1.6 Sistemas de bombeamento	24
2.1.7 Principais modos de Falhas	26
2.1.7.1 Corrosão	26
2.1.7.2 Erosão por abrasão	27
2.1.7.3 Amassamentos	27
2.1.7.4 Deformações e rupturas por flexão	27
2.1.7.5 Fadiga	27
2.1.7.6 Corrosão sob tensão	28
2.2 SOLDAGEM	28
2.2.1 Processo de soldagem com Arco Submerso em costura longitudinal de tubos	29
2.3 FADIGA	30

2.3.1 Ensaio de Fadiga – Curva S-N	33
2.3.1.1 Ensaio de fadiga em escala real	34
2.3.1.1 Ensaio de fadiga em corpos de prova	35
2.3.2 Metodologia de contagem de ciclos de fadiga – rainflow	36
2.3.3 Dano acumulado – Regra de Miner	37
2.3.4 Fadiga em juntas soldadas	39
2.3.4.1 Influência da geometria do reforço da solda	40
2.3.4.2 Influência das tensões residuais de soldagem	43
2.3.4.3 Influência da qualidade da solda	43
2.3.4.5 Tensões estruturais “hot spot”	44
2.4 SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	45
2.4.1 SIMULAÇÕES PELO MEF EM ENSAIOS DE FLEXÃO	46
2.4.2 SIMULAÇÕES PELO MEF EM TUBOS SUJEITOS A PRESSÃO INTERNA	47
2.4.3 SIMULAÇÕES PELO MEF PARA CÁLCULO DAS TENSÕES “HOT-SPOT”	48
2.5 EXTENSOMETRIA	49
2.5.1 Extensômetros	50
2.5.2 Ponte de Wheatstone	51
2.5.3 Instrumentação e sistema de aquisição	53
2.6 - CÁLCULOS ANALÍTICOS PARA VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	53
3. METODOLOGIA	55
3.1 ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	56
3.1.1 Simulação em elementos Finitos	56
3.1.2 Extensometria	57
3.1.3 Corpo de prova curvado	61
3.1.4 Material	61
3.1.5 Ensaio estático	63
3.1.6 Validação das simulações de flexão em três pontos pela Extensometria	64
3.2 SIMULAÇÃO DA TUBULAÇÃO COM PRESSÃO INTERNA	65
3.2.1 Simulação pelo MEF	65
3.2.2 Cálculos analíticos – Validação modelo do tubo com pressão interna	67
3.3 CORRELAÇÃO ENTRE A FORÇA APLICADA NO ENSAIO DE FLEXÃO E A PRESSÃO INTERNA NO TUBO	67
3.4 ENSAIOS DE FADIGA	67

3.5 CONTAGEM DE CICLOS	67
3.6 AVALIAÇÃO DE FADIGA DO MINERODUTO EM OPERAÇÃO.....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL	69
4.1.1 Ensaios de composição química	69
4.1.2 Ensaios de tração	69
4.1.3 Ensaios de impacto charpy “V”	70
4.1.4 Ensaios de dobramento guiado	70
4.1.5 Medição de microdureza.....	70
4.2 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS	71
4.3 RESULTADOS DA EXTENSOMETRIA DOS TESTES DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	72
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	73
4.5 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	74
4.6 RESULTADOS DOS CÁLCULOS ANALÍTICOS DO TUBO COM PRESSÃO INTERNA.....	75
4.7 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO TUBO COM PRESSÃO INTERNA	75
4.8 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS DO TUBO COM PRESSÃO INTERNA.....	75
4.9 CORRELAÇÃO ENTRE A FORÇA APLICADA NOS ENSAIOS DE FLEXÃO E AS PRESSÕES DE OPERAÇÃO	76
4.10 RESULTADOS TESTES DE FADIGA.....	78
4.11 CONVERSÃO DA CURVA F-N PARA P-N	80
4.12 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE FADIGA	81
4.13 EXEMPLOS DE ANÁLISE DE FADIGA EM MINERODUTO.....	82
4.13.1 Mineroduto operando em bateladas	82
4.13.1.1 Rainflow das pressões históricas	82
4.13.1.2 Análise de fadiga pelo dano acumulado	84
4.13.2 Mineroduto operando em bateladas com pulsações	85
4.13.2.1 Rainflow das pressões históricas	85
4.13.2.2 Análise de fadiga pelo dano acumulado	86
5. CONCLUSÕES	87
ABSTRACT.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO A.....	94

A.1 ENSAIOS DO MATERIAL	94
APÊNDICE A	107
A.1 RESULTADOS DA EXTENSOMETRIA DOS TESTES DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	107
A.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	110
A.3 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	111
A.4 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS DO TUBO COM PRESSÃO INTERNA	112
A.5 CORRELAÇÃO ENTRE A FORÇA APLICADA NOS ENSAIOS DE FLEXÃO E AS PRESSÕES DE OPERAÇÃO	113
A.6 RESULTADOS TESTES DE FADIGA.....	114
A.7 CONVERSÃO DA CURVA F-N PARA P-N	115

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Área [m ²]
P	Pressão [MPa]
D	Diâmetro [m]
E	Modulo de Elasticidade [GPa]
N	Número de ciclos [ciclos]
F	Carga [N]
S	Tensão (Stress) [MPa]

Letras Gregas

ε	Deformação [Strain]
π	Constante matemática
σ	Tensão [MPa]
ν	Coefficiente de Poisson

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1- Vazamento do mineroduto da Anglo American no Brasil	33
FIGURA 2. 1 – Exemplo de um mineroduto em construção	20
FIGURA 2. 2 – Comparação do dano ambiental de um mineroduto (A) e uma ferrovia (B)	21
FIGURA 2. 3 - Processo de fabricação de tubos pelo processo de soldagem SAW	22
FIGURA 2. 4 – Abaixamento de um mineroduto em construção	23
FIGURA 2. 5 – Variações de pressão devido à variação de densidade em bombeamento por bateladas	24
FIGURA 2. 6 – Bombas de deslocamento positivo operando em paralelo	25
FIGURA 2. 7 – Bomba de deslocamento positivo de diafragma	25
FIGURA 2. 8 – Efeito da dessincronização na pulsação de bombas de deslocamento positivo em paralelo	26
FIGURA 2. 9 - Trincas de fadiga nucleadas na margem da solda	28
FIGURA 2. 10 – Soldagem externa com arco submerso de uma tubulação	29
FIGURA 2. 11 – Metalografia de uma solda longitudinal por arco submerso em dois passes	30
FIGURA 2. 12 - Nucleação, propagação e fratura final de uma trinca de fadiga em um parafuso	31
FIGURA 2. 13 – Nucleação de uma trinca na intrusão de uma PSB	32
FIGURA 2. 14 - Nucleação de uma trinca na PSB	32
FIGURA 2. 15 – Curva típica de resultados de teste de fadiga em log de S por log de N.	33
FIGURA 2. 16 – Falha em fadiga da solda longitudinal de um teste em escala real	34
FIGURA 2. 17 – Ensaio de fadiga em tubos submetidos à pressão interna	35
FIGURA 2. 18 - Método de contagem de ciclos rainflow	37
FIGURA 2. 19 - Exemplo de cálculo do dano acumulado em fadiga	38
FIGURA 2. 20- Comparação de testes de fadiga com e sem concentradores de tensão	40
FIGURA 2. 21 - Concentração de tensão na margem da solda	41
FIGURA 2. 22 – Efeito do ângulo do reforço na vida em fadiga em soldas de topo	41
FIGURA 2. 23- Aumento do raio da margem da solda por esmerilhamento	42
FIGURA 2. 24 - Influência do aumento do raio da margem da solda por esmerilhamento	42
FIGURA 2. 25- Efeito da geometria do reforço de soldas de topo na vida em fadiga	43
FIGURA 2. 26- Distribuição típica de tensões na margem da solda	44
FIGURA 2. 27 – Demonstração da extrapolação das tensões para obtenção da tensão “hot-spot”	45
FIGURA 2. 28 - Metodologia geral de análise por elementos finitos	46

FIGURA 2. 29- Simulação em elementos finitos de um teste por flexão em quatro pontos	47
FIGURA 2. 30 - Modelamento pelo MEF de uma tubulação submetida a pressão interna	48
FIGURA 2. 31 - Modelos para cálculo das tensões de "hot-spot"	49
FIGURA 2. 32 - Desenho esquemático de um extensômetro	51
FIGURA 2. 33 - Circuito elétrico – Ponte de Wheatstone	52
FIGURA 2. 34 – Configurações típicas de pontes de Wheatstone para medição de deformações em tração	52
FIGURA 3. 1 - Fluxograma da Metodologia	55
FIGURA 3. 2 - Condições de contorno do modelo	56
FIGURA 3. 3- Malha utilizada na análise do modelo	57
FIGURA 3. 4 - Detalhe para refinamento da malha na região dos extensômetros	57
FIGURA 3. 5 - Módulos de Condicionamento e Aquisição de sinais da National Instruments	57
FIGURA 3. 6 - Extensômetro utilizado nos testes	58
FIGURA 3. 7 – Parte superior do corpo de prova com dois extensômetros instalados	58
FIGURA 3. 8 - Superfície inferior do corpo de prova com dois extensômetros instalados em cada lado da solda	59
FIGURA 3. 9- Circuito Meia Ponte de Wheatstone utilizado nos testes	59
FIGURA 3. 10 – Teste de funcionalidade – Dimensões da barra de teste	60
FIGURA 3. 11 – Teste para verificação do sistema de condicionamento e aquisição de sinais	60
FIGURA 3. 12 - Dimensional dos corpos de prova de flexão	61
FIGURA 3. 13 – Tubulação utilizada para corte dos corpos de prova	62
FIGURA 3. 14 - Corpos de prova conforme API 5L antes da usinagem.	62
FIGURA 3. 15 - Máquina de testes Instron 8802 do LRSS - UFMG	63
FIGURA 3. 16 - Corpo de prova posicionado para execução dos testes	64
FIGURA 3. 17 – Modelo em elementos finitos. As setas indicam onde foram instalados os extensômetros	64
FIGURA 3. 18 - Condições de contorno	65
FIGURA 3. 19 – Malha utilizada no modelo	66
FIGURA 3. 20 – Refinamento da malha na margem da solda	66
FIGURA 4. 1 - Correlação entre o estado de tensões na margem da solda devido á força na simulação de flexão e devido à pressão interna na simulação operacional	78
FIGURA 4. 2 – A Seta mostra uma trinca se propagando no ensaio de fadiga	79
FIGURA 4. 3 - Histórico de pressões hipotético de um mineroduto ao longo do ano	83

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4. 1 - Resultado do teste para verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados – Extensômetro submetido a tração	71
GRÁFICO 4. 2 - Resultado do teste para verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados – Extensômetro submetido a compressão	72
GRÁFICO 4. 3 – Resultados das tensões medidas por extensometria nos testes de flexão em três pontos	73
GRÁFICO 4. 4 - Simulações em elementos finitos de flexão em três pontos	73
GRÁFICO 4. 5 - Comparação entre os resultados da extensometria e simulação em elementos finitos	74
GRÁFICO 4. 6 - Comparação entre as tensões dos cálculos analíticos e das simulações em elementos finitos devido as pressões internas na tubulação	76
GRÁFICO 4. 7 - Resultado da tensão “hot-spot” para cada força aplicada nos ensaios de flexão em três pontos	77
GRÁFICO 4. 8 –Resultado ensaio de fadiga de flexão em três pontos – log da força pelo log dos ciclos até a falha	80
GRÁFICO 4. 9 –Curva do log de pressão pelo log dos ciclos até a falha	81
GRÁFICO 4. 10 – Comparação entre os ensaios de fadiga realizados e os resultados da norma DIN 2413-1 (1993)	82

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2. 1 Exemplo de cálculo do dano acumulado em fadiga	39
TABELA 4. 1 Valores médios de 03 ensaios de tração	69
TABELA 4. 2 Valores médios de 03 ensaios de Charpy	70
TABELA 4. 3 Resultados de microdureza por região	71
TABELA 4. 4 Resultados cálculos analíticos de tensão devido à pressão interna	75
TABELA 4. 5 Resultados das simulações em elementos finitos devido à pressão interna	75
TABELA 4. 6 Correlação entre força do ensaio de flexão em três pontos com a pressão interna no tubo que proporciona a mesma tensão “hot spot” na margem da solda	78
TABELA 4. 7 Resultado do Rainflow do histórico de pressões de um mineroduto ao longo do ano	83
TABELA 4. 8 Cálculo do dano acumulado em fadiga de um mineroduto ao longo do ano	84
TABELA 4. 9 Resultado do Rainflow do histórico de pressões de um mineroduto ao longo do ano incluindo pulsações	85
TABELA 4. 10 Cálculo do dano acumulado em fadiga de um mineroduto ao longo do ano incluindo pulsações	86
TABELA A. 1 Resultados obtidos na extensometria da superfície inferior	110
TABELA A. 2 Resultados obtidos na extensometria da superfície superior	110
TABELA A. 3 Resultados das simulações de elementos finitos superfície inferior	110
TABELA A. 4 Resultados das simulações de elementos finitos superfície superior	111
TABELA A. 5 Comparação das tensões na posição 0,4t da superfície Interna	111
TABELA A. 6 Comparação das tensões na posição 1,0t da superfície Interna	111
TABELA A. 7 Comparação das tensões na posição 0,4t da superfície Externa	112
TABELA A. 8 Comparação das tensões na posição 1,0t da superfície Externa	112
TABELA A. 9 Comparação entre as tensões calculadas e simuladas na superfície inferior do tubo	112
TABELA A. 10 Comparação entre as tensões calculadas e simuladas na superfície superior do tubo	113
TABELA A. 11 Tensão “hot spot” devido a força aplicada no ensaio de flexão em três pontos	113
TABELA A. 12 Resultados dos ensaios de fadiga de flexão em três pontos	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	American Petroleum Institute
ASME	American Society for Materials and Engineering
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
DIN	Instituto Alemão de Normatização
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
LRSS	Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação
SAW	Submerged-Arc Weld
ERW	Electric Resistance Weld
PSB	Persistent Slip Bands
FEM	Finite Element Method
MEF	Método dos Elementos Finitos
HV	Dureza Vickers

RESUMO

Minerodutos apesar de geralmente não serem projetados considerando fadiga, podem estar sujeitos a este tipo de mecanismo de falha, dependendo das suas condições operacionais. Bombeamento indesejável por bateladas de polpa de minério e água, paradas/partidas inesperadas devido à problemas de baixa confiabilidade das estações de bombas, problemas no sistema de amortecimento e falta de dessincronização de bombas de deslocamento positivo operando em paralelo podem ocasionar ciclos severos de pressão em todo o sistema do mineroduto e principalmente nas soldas longitudinais que é a parte mais sensível para degradação em fadiga. Para evitar sérios incidentes de vazamentos devido a trincas de fadiga, torna-se necessário a avaliação das soldas longitudinais sobre o ciclo real de carregamento de operação.

Este trabalho tem por objetivo demonstrar a aplicabilidade de testes de fadiga por flexão em três pontos utilizando corpos de prova curvos com a geometria original da tubulação e a solda longitudinal de fabricação para utilização em avaliações da vida em fadiga de minerodutos. As tensões atuantes na margem da solda devido a aplicação de carga estática no teste de flexão em três pontos utilizando o corpo de prova curvos foram correlacionadas com as tensões atuantes na margem da solda em um tubo submetido a pressão interna durante operação. Esta correlação foi feita através de simulações em elementos finitos, validados com extensometria e cálculos analíticos. Assim uma curva de fadiga por flexão em três pontos, onde o resultado é força por quantidade de ciclos até a falha, pode ser convertida em uma curva de pressão interna por quantidade de ciclos até a falha. Com todo histórico de pressões de operação do mineroduto, é possível realizar a contagem de ciclos de pressão pelo método do “rainflow”, e através da nova curva gerada é possível realizar a avaliação de fadiga pelo método do dano acumulado. Os resultados mostraram que é possível utilizar os testes propostos para avaliação de fadiga da solda longitudinal de minerodutos de forma satisfatória.

Palavras Chaves: Soldagem, Fadiga, Minerodutos

1. INTRODUÇÃO

Minerodutos são tubulações em aço para transporte de minérios diluídos em água com extensão de dezenas de quilômetros, impulsionados por grandes bombas de deslocamento positivo. Este tipo de transporte é vantajoso tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental se comparado a outros tipos de transporte, como por exemplo o de vagões em ferrovias (CHAPMAN et al., 2009).

Geralmente, minerodutos são projetados conforme a norma ASME B31.11 (CHAPMAN et al., 2009), e seus principais modos de falhas são: corrosão, abrasão, amassamentos, flexão, fadiga e corrosão sob tensão. Assim o controle da integridade de minerodutos se torna uma questão crucial, já que as vazões e pressões operacionais normalmente são muito elevadas. Um vazamento de mineroduto, como o da FIG. 1.1, pode resultar em sérios incidentes, com fatalidades devido as altas pressões de operação, e contaminação do meio ambiente e rios devido à alta vazão.



FIGURA 1. 1- Vazamento do mineroduto da Anglo American no Brasil

FONTE: Portal Estado de Minas – em.com.br. Acessado em 10/01/2019.

Apesar da fadiga ser considerado um dos possíveis modos de falhas de minerodutos, a sua avaliação durante a etapa de projetos normalmente não é feita. Isto porque, no bombeamento contínuo de polpa, não ocorre muita variação das pressões no mineroduto, deixando a contagem de ciclos de fadiga apenas por conta das paradas por manutenção e falhas, que normalmente são muito reduzidas. Porém em alguns casos pode ser necessária a avaliação da vida em fadiga de minerodutos devido à grande quantidade de ciclos de pressão:

- Bombeamento em bateladas de polpa e água, com alterações elevadas de pressões devido as diferenças de densidade;
- Muitas paradas de bombeamento devido a falhas inesperadas das bombas;
- Pulsações elevadas de pressão no mineroduto devido à problemas no sistema de amortecimento hidráulico das bombas de deslocamento positivo.
- Pulsações elevadas de pressão devido à falta de dessincronização de bombas de deslocamento positivo operando em paralelo.

Nestas situações é recomendável que seja feita uma avaliação de fadiga com os dados operacionais existentes. Devido à necessidade de controle da pressão de operação, todos os minerodutos possuem transdutores de pressão nas saídas das estações de bombeamento e ao longo da linha. Estes dados de pressão normalmente são coletados e arquivados em sistemas eletrônicos. Sendo assim, através de metodologias de contagem de ciclos, como o “rainflow”, é possível avaliar os ciclos de pressão do duto ao longo dos anos de operação e comparar com uma curva S-N para avaliação em fadiga.

Ensaios de fadiga tradicionais para obtenção da curva S-N são feitos com pequenos corpos de prova planos em tração cíclica, reduzindo o tempo e custo se comparados com os testes em escala real. Para confecção de corpos de prova contendo a solda longitudinal de tubos para ensaios de fadiga em tração é preciso que seja feita a sua planificação com deformação plástica, descaracterizando a sua condição original e influenciando nos resultados. Uma alternativa proposta neste trabalho é a utilização de corpos de prova do tubo com sua curvatura original em ensaios de fadiga por flexão em três pontos.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho propõe uma metodologia para avaliação da vida em fadiga de minerodutos em operação.

1.2 Objetivos Específicos

- 1) Obtenção da curva S-N da tubulação a partir de ensaios de fadiga por flexão em três pontos de corpos de prova curvos contendo a solda longitudinal, com a geometria real da tubulação.

- 2) Correlacionar as tensões atuantes na margem da solda devido a aplicação de carga estática no ensaio de flexão em três pontos do corpo de prova curvado, e as tensões atuantes na margem da solda de um tubo submetido a pressão interna durante operação, através do método de elementos finitos e assim construir uma curva de fadiga que correlaciona a pressão com ciclos até a falha.

- 3) Avaliar o efeito da operação do mineroduto em bateladas e das pulsações devido às bombas de deslocamento positivo operando em paralelo na vida em fadiga da solda longitudinal da tubulação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minerodutos

Minerodutos são tubulações em aço para transporte de minérios diluídos em água com extensão de dezenas de quilômetros (FIG. 2.1), impulsionados por grandes bombas de deslocamento positivo. Segundo Chapman et al. (2009), este tipo de transporte é vantajoso tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental se comparado a outros tipos de transporte, como por exemplo o de vagões em ferrovias. Na FIG. 2.2 é possível observar que o dano ambiental pelo transporte por ferrovias é maior do que o de minerodutos.



FIGURA 2. 1 – Exemplo de um mineroduto em construção

FONTE: www.Ausenco.com – Slurry Pipelines – Acessado em 10/01/2019

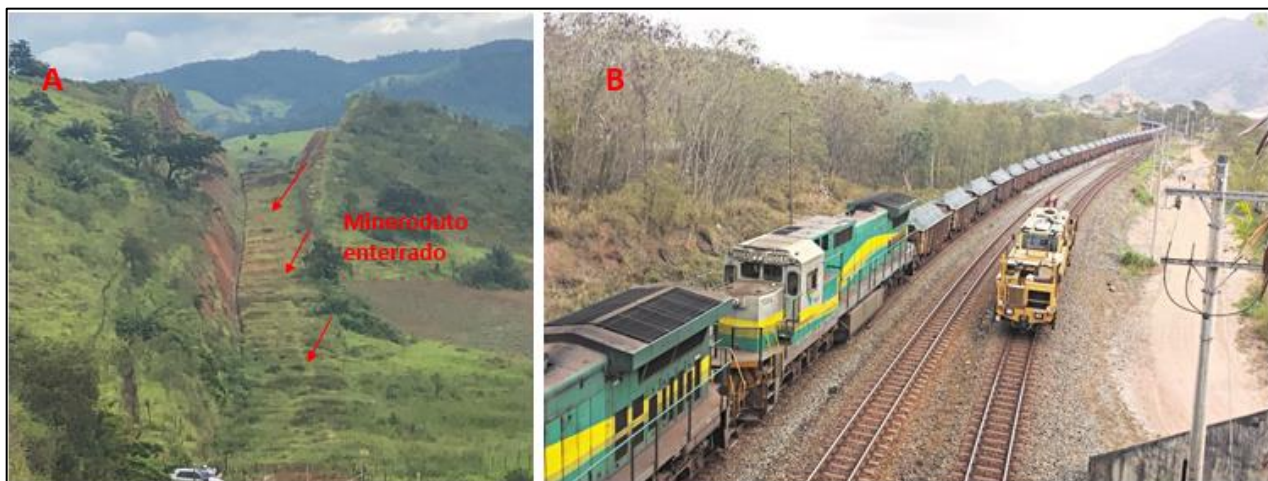


FIGURA 2. 2 – Comparação do dano ambiental de um mineroduto (A) e uma ferrovia (B)

FONTE: (A) AUTOR; (B) www.portaltenponovo.com. Acessado em 15/01/2019

2.1.1 Minerodutos no Brasil

No trabalho de Mattioli (2016), são apresentados os minerodutos brasileiros, dentre os principais os da Samarco com cerca de 400 quilômetros transportando polpa de minério de ferro, da Hydro com 244 quilômetros transportando polpa de bauxita e o da Anglo American, maior mineroduto de polpa de minério de ferro do mundo com 529 quilômetros de extensão.

Normalmente minerodutos de longa distância e com perfil acentuado como é o caso do Brasil, utilizam bombas de deslocamento positivo devido às elevadas pressões e vazões de operação, com a desvantagem dos transientes hidráulicos e pulsações de pressão ao longo da linha (CHAPMAN et al., 2009).

2.1.2 Projeto

Chapman et al. (2009), explica que geralmente minerodutos são projetados conforme a norma ASME B31.11 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2002) que especifica todos os requisitos de projeto, materiais, fabricação, montagem, inspeção, testes, operação e manutenção. Os projetos de minerodutos não são calculados para fadiga, já que não a previsão deste item na norma e o histórico de muitos anos de operação não evidenciam este tipo de falha.

Kiefner e Rosenfeld (2006) comentam em seu trabalho que fadiga nas soldas longitudinais em dutos de líquidos e gases não é uma preocupação pois os mesmos não experimentam uma quantidade suficiente de elevados ciclos de pressão não sendo assim capazes de nuclear ou propagar uma trinca até a falha dentro do período de vida de projeto.

2.1.3 Fabricação

Os tubos normalmente são fabricados conforme a norma API 5L (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2007), onde a chapa base é conformada, soldada, expandida e inspecionada para aplicação do revestimento (CHAPMAN et al., 2009). A FIG. 2.3 exemplifica o processo de fabricação de um tubo.

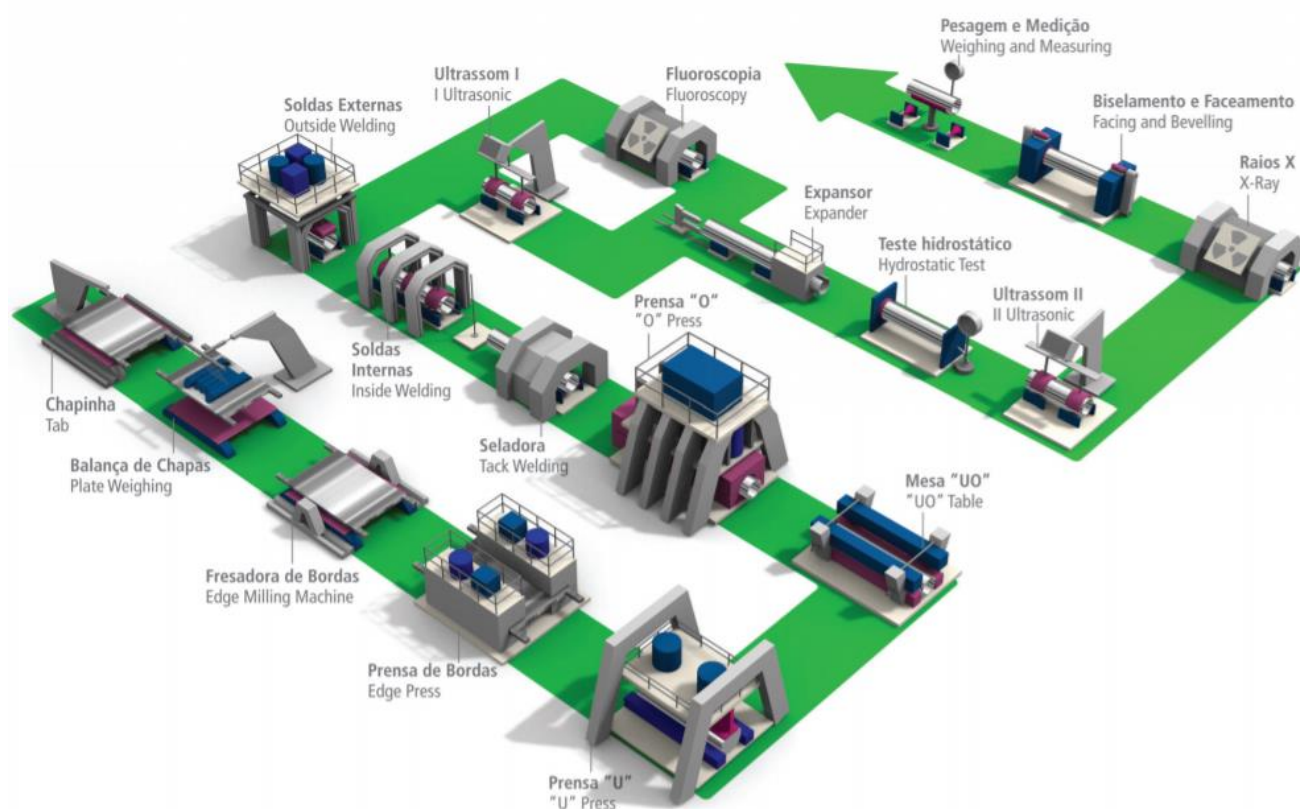


FIGURA 2. 3 - Processo de fabricação de tubos pelo processo de soldagem SAW

FONTE – www.tenaris.com/pt-br. Acessado em 15/01/2019

2.1.4 Montagem

Durante a montagem em campo os tubos do mineroduto normalmente são alinhados e soldados conforme a norma API 1104 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2005) e posteriormente são enterrados em valas recobertas por terra (FIG. 2.4).



FIGURA 2. 4 – Abaixamento de um mineroduto em construção

FONTE: www.ausenco.com. Acessado em 16/012/2019

2.1.5 Operação

Geralmente minerodutos são projetados para operação contínua com uma polpa com pouca variação de densidade. Porém em alguns casos, a falta de produção de minério a montante pode ser um limitador para operação contínua com polpa. O início de operação de qualquer mineração normalmente começa com uma taxa de produção baixa que ao longo do tempo vai aumentando até atingir a capacidade nominal. Porém o bombeamento de polpa em minerodutos deve começar sempre nas vazões próximas as nominais de projeto, já que existe uma velocidade mínima crítica na qual a polpa começa a sedimentar. Sendo assim para se manter a vazão nominal no início de

operação de uma mineração é necessário o bombeamento por bateladas de polpa e água. Como a polpa de minério tem uma densidade bem maior que a água, as pressões durante o bombeamento de polpa são bastante diferentes das pressões durante o bombeamento de água (FIG. 2.5).

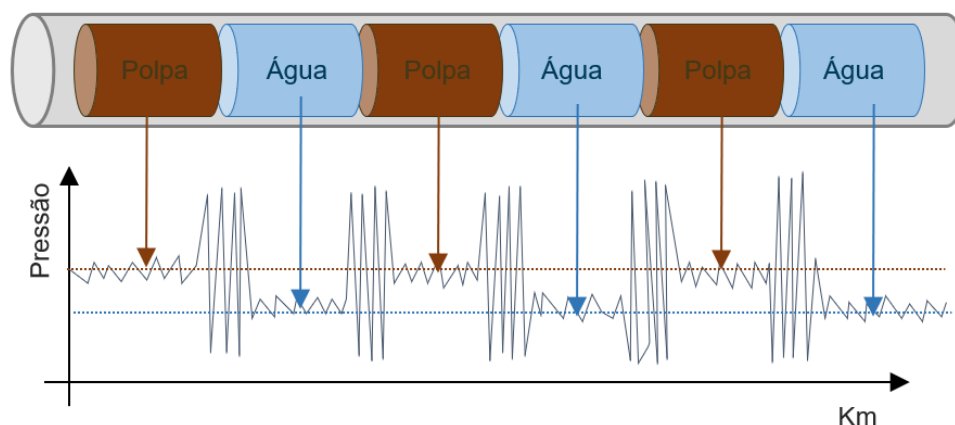


FIGURA 2. 5 – Variações de pressão devido à variação de densidade em bombeamento por bateladas
 FONTE: AUTOR

2.1.6 Sistemas de bombeamento

Em minerodutos de longa distância que necessitam transportar uma grande produção de minério são requeridas pressões elevadas para operação. Para possibilitar o bombeamento nestes minerodutos, são empregadas várias bombas de deslocamento positivo em paralelo conforme mostrado na FIG. 2.6. Na FIG. 2.7 é mostrado um tipo de bomba de deslocamento positivo de diafragma, onde são empregados amortecedores de pulsação em sua descarga.

As pulsações geradas nas bombas de deslocamentos positivos se propagam ao longo do mineroduto e por isso é importante conhecer e controlá-las, já que as mesmas são traduzidas em tensões nas paredes das tubulações com frequências. Corbo e Stearns (2005) e Miller (1976) explicam como são geradas as pulsações em bombas de deslocamento positivo. Miller (1976), Vetter e Seidl (1981) explicam como funcionam os amortecedores a gás nestes tipos de bombas, que reduzem as amplitudes de pulsações pressão para níveis mínimos. Considerando que bombas de deslocamento positivo utilizadas em minerodutos tem uma frequência de rotação variando de 0,5 a 1 Hz, as pulsações de pressão na descarga da bomba são também da ordem de 0,5 a 1 Hz e seus harmônicos,

ou seja, podem variar de 0,5 a 10 Hz. Rijswick e Vlot (2017) demonstra em seu trabalho que bombas de deslocamento positivo em paralelo operando em fase geram pulsações elevadas sendo necessário a dessincronização das mesmas. Na FIG. 2.8 é possível verificar o efeito da dessincronização na pulsação de bombas operando em paralelo; quando o sistema é ativado em aproximadamente 45 segundos a amplitude de pressões da descarga da bomba diminuiu de 19,5 bar para 3,5 bar. Quando os amortecedores de pulsação das bombas apresentam problemas, deixando assim de atenuar as pulsações, e quando não existe um sistema de dessincronização entre as bombas, a soma das pulsações das bombas podem chegar à níveis de 80 a 100% pico a pico da pressão de operação.



FIGURA 2. 6 – Bombas de deslocamento positivo operando em paralelo

FONTE: Adaptado de <https://www.global.weir/products/product-catalogue> - GEHO TZPM – 17/01/2019

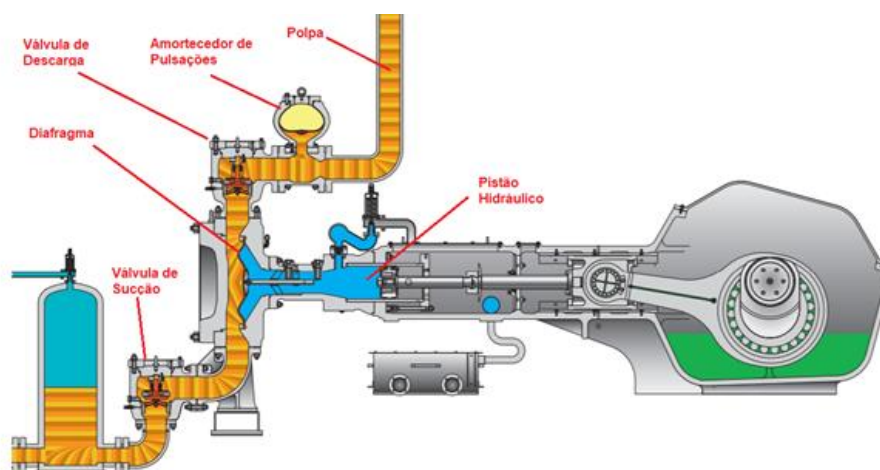


FIGURA 2. 7 – Bomba de deslocamento positivo de diafragma

FONTE: Adaptado de <https://www.global.weir/products/product-catalogue> - GEHO TZPM – 17/01/2019

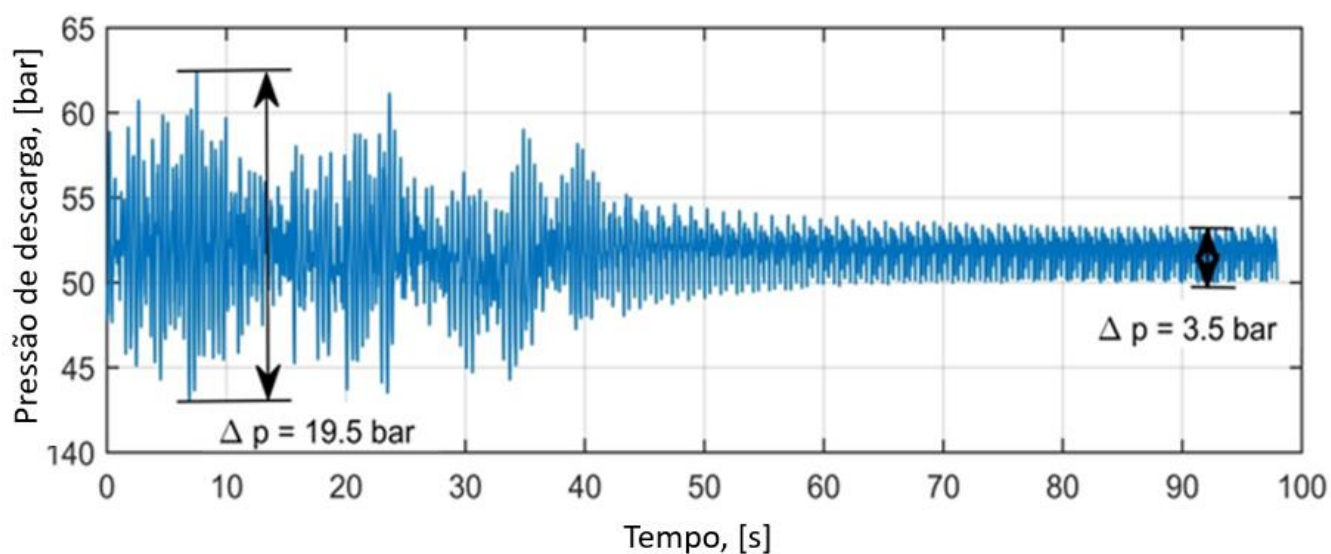


FIGURA 2. 8 – Efeito da dessincronização na pulsação de bombas de deslocamento positivo em paralelo
 FONTE: RIJSWICK e VLOT (2017)

2.1.7 Principais modos de Falhas

Minerodutos em operação estão sujeitos a diversos modos de falhas, dentro os principais: corrosão, erosão por abrasão, amassamentos, flexão, fadiga e corrosão sob tensão.

2.1.7.1 Corrosão

A corrosão pode acontecer na superfície interna e/ou externa do mineroduto. Para se evitar a corrosão externa os minerodutos são revestidos com tripla camada de epóxi e polietileno e são ligados a retificadores de corrente impressa para manter a proteção catódica. A corrosão interna é amplamente discutida no trabalho de Mattioli (2016) e pode ser evitada adicionando reagentes para remoção de oxigênio e controle do PH do fluido bombeado. Também é importante que a distribuição granulométrica da polpa bombeada seja muito bem controlada, evitando sedimentação no fundo da tubulação, o que propicia a corrosão por aeração diferencial.

2.1.7.2 Erosão por abrasão

Todo fluxo de polpa de minério é altamente abrasivo, podendo ocasionar erosão e perda de massa na parede interna da tubulação, acarretando em furos e vazamentos. De acordo com Huang et al. (2010), para que a erosão em minerodutos seja minimizada é muito importante o controle da vazão e distribuição granulométrica do minério diluído na polpa.

2.1.7.3 Amassamentos

Dutos estão sujeitos a amassamentos durante a construção, devido a colisões de máquinas e assentamento em rochas. Também estão sujeitos a amassamentos quando em operação em caso de escavações por terceiros. Amassamentos podem ocasionar erosões internas devido à alteração no fluxo da polpa, corrosão devido à danos no revestimento externo e nucleação de trincas de fadiga devido à concentração de tensão gerada.

2.1.7.4 Deformações e rupturas por flexão

Flexão de duto ocorre quando existe algum movimento dos taludes a sua volta, gerando deformações e amassamentos (MICHAELSEN, 2011) que podem ocasionar rupturas por tração, nucleação de trincas de fadiga e corrosão sob tensão.

2.1.7.5 Fadiga

Alterações elevadas de pressão podem levar à esforços cíclicos nas tubulações acima do limite de resistência à fadiga, podendo nuclear e propagar trincas até o vazamento do fluido. Trincas de fadiga geralmente são nucleadas em concentradores de tensões, que em tubulações podem ser nas juntas soldadas, amassamentos e corrosão. Os aspectos discutidos nos itens 2.1.5 e 2.1.6 influenciam diretamente na vida em fadiga, principalmente os ciclos de pressão devido as pulsações que são em frequências elevadas. Na FIG. 2.9 é possível observar trincas de fadiga que se nuclearam na margem da solda longitudinal de uma tubulação. Os conceitos de fadiga são discutidos de forma mais aprofundada no item 2.3.

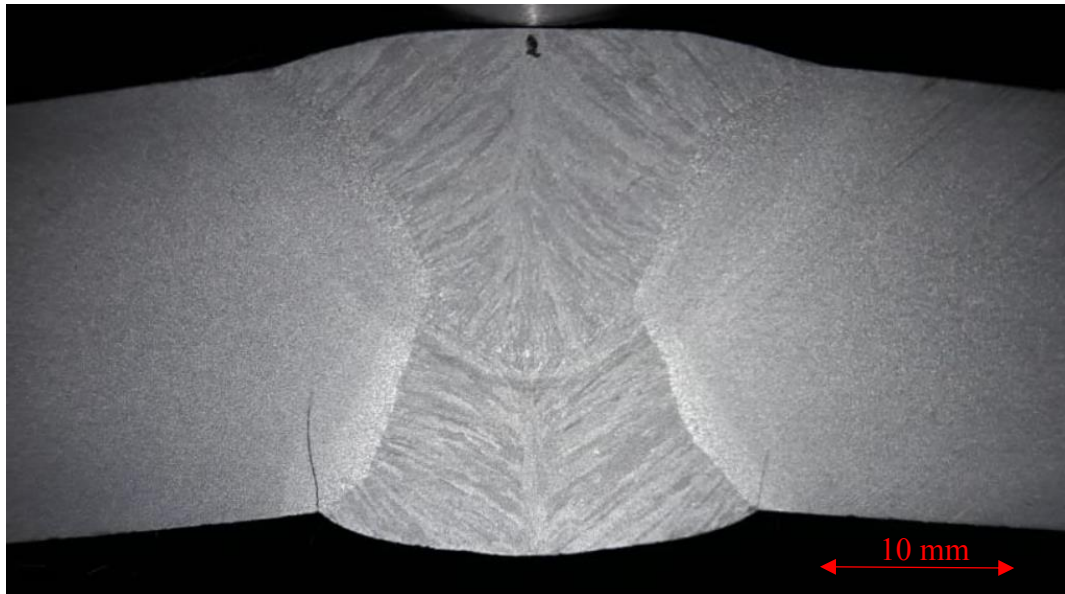


FIGURA 2. 9 - Trincas de fadiga nucleadas na margem da solda

FONTE – LABORATÓRIO DE ROBÓTICA, SIMULAÇÃO E SOLDAGEM - UFMG

2.1.7.6 Corrosão sob tensão

Minerodutos que apresentam problemas na proteção de corrosão externa podem apresentar nestas regiões trincas de corrosão sob tensão. Segundo Bueno (2007), este tipo de falha pode ocorrer devido a deslizamento de taludes que adicionam uma tensão residual na tubulação e através de reações químicas e eletroquímicas da corrosão resultam no aparecimento de microtrincas, que podem se coalescer e propagar até a falha. Estas microtrincas também podem se propagar pelo efeito da fadiga.

2.2 Soldagem

A soldagem é amplamente utilizada na fabricação de tubos, sendo economicamente viável em relação aos tubos sem costura. Nos tubos utilizados em minerodutos, com chapas de espessuras elevadas, normalmente são utilizadas costuras longitudinais com o processo de soldagem com arco submerso (SAW) ou com o processo de soldagem por resistência elétrica (ERW).

Segundo Marques et al. (2011), “soldagem consiste no processo de junção de materiais no qual as forças de ligação química mantem a união sólida com natureza similar àquelas existentes no interior das partes, sendo o processo mais utilizado na indústria para união de peças metálicas”.

2.2.1 Processo de soldagem com Arco Submerso em costura longitudinal de tubos

Um dos processos de soldagem mais utilizados na fabricação de tubos para minerodutos, é o processo de soldagem com arco submerso. Marques et al. (2011) explica que o arco elétrico neste caso é protegido por uma camada de material granulado que após fundido protege a solda, formando uma camada externa de escoria. Este processo é vantajoso pois possibilita uma alta taxa de deposição com elevada produtividade, ideal na produção de tubos. Em tubos de espessura elevada, como é o caso de tubos para mineroduto, primeiro é feito um único passe interno e posteriormente um único passe externo com a utilização de vários eletrodos de uma vez. A FIG 2.10 mostra a soldagem externa de um tubo com arco submerso e a FIG. 2.11 apresenta uma metalografia deste tipo de solda.

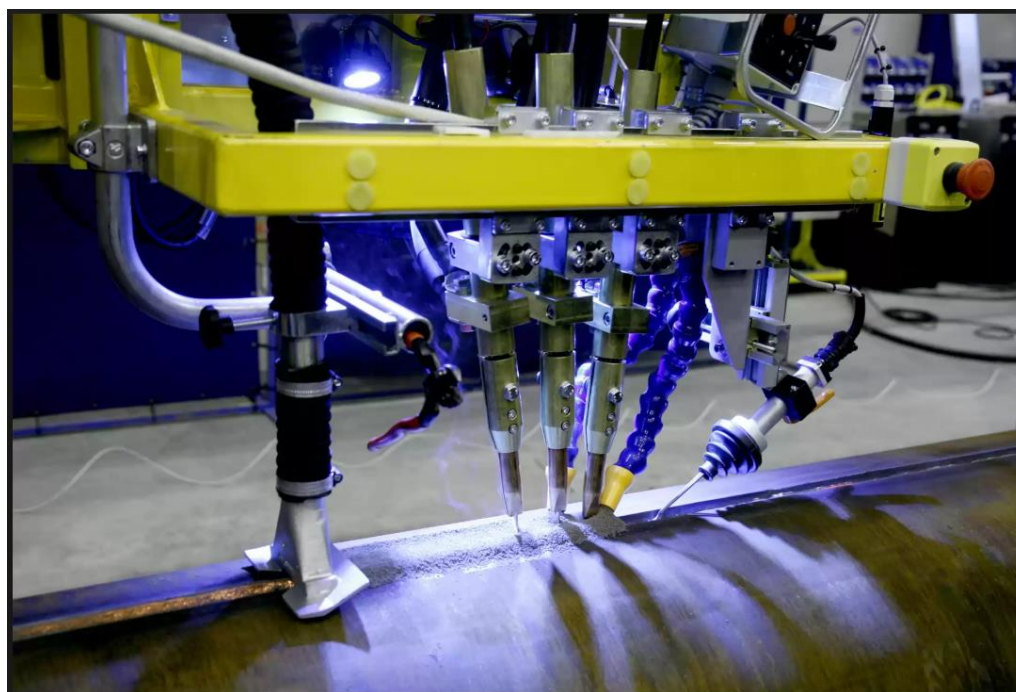


FIGURA 2. 10 – Soldagem externa com arco submerso de uma tubulação

Fonte: <https://www.topsimages.com/images/robotic-welding-automation-c8.html> . Acessado em 23/01/2019.

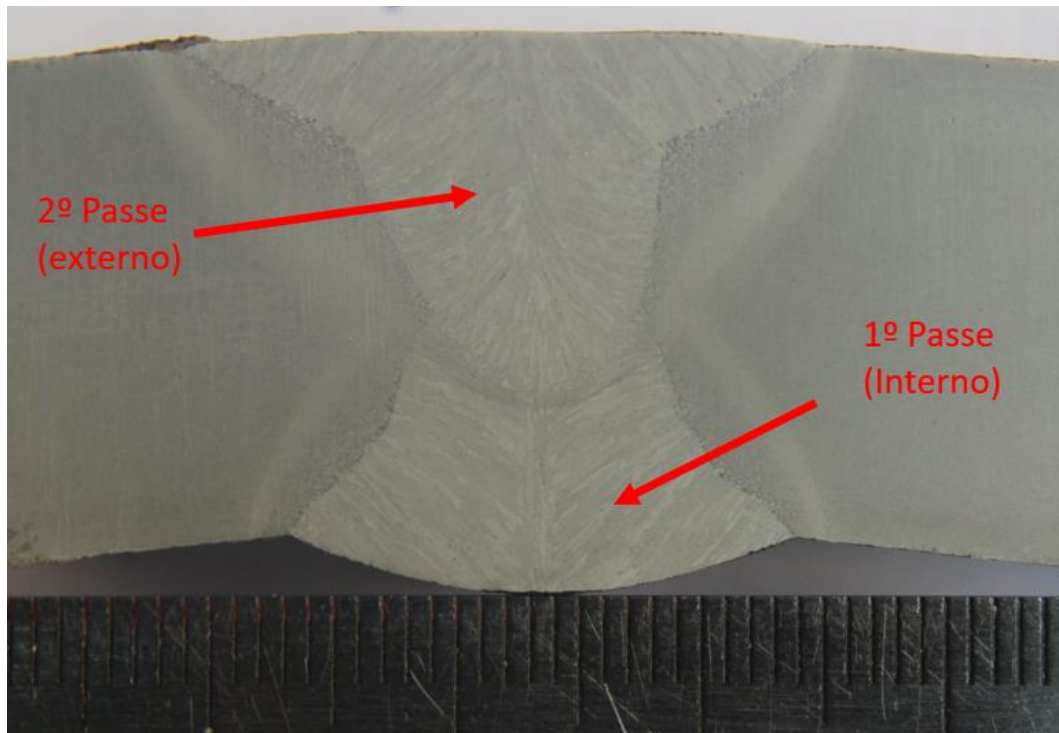


FIGURA 2. 11 – Metalografia de uma solda longitudinal por arco submerso em dois passes
FONTE – LABORATÓRIO DE ROBÓTICA, SIMULAÇÃO E SOLDAGEM - UFMG

2.3 Fadiga

Em minerodutos, alterações elevadas de pressão devido a paradas de bombeamento, bombeamento em bateladas de densidade diferentes, pulsações devido à falta de amortecimento das bombas e falta de controle de dessincronização de bombas de deslocamento positivo em paralelo podem levar a esforços cíclicos nas tubulações causando a nucleação de trincas por fadiga.

Fadiga é um processo de dano localizado e progressivo onde uma trinca se nucleia e propaga pela atuação de tensões cíclicas (GURNEY, 2006; LEE et al., 2005; MADDOX, 2002). O processo de fadiga envolve os seguintes estágios: 1) nucleação da trinca; 2) propagação da trinca; 3) fratura final (FIG. 2.12).

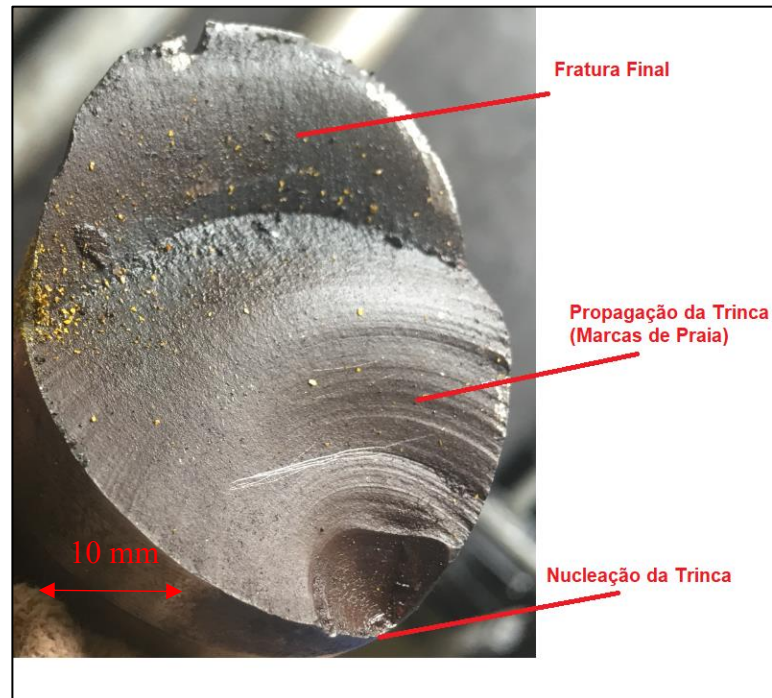


FIGURA 2. 12 - Nucleação, propagação e fratura final de uma trinca de fadiga em um parafuso
 FONTE: AUTOR

1) - Nucleação: Trincas se iniciam em regiões de altas concentrações de tensões como intrusões e extrusões de bandas de escorregamento persistentes (PSB – Persistent Slip Bands), inclusões, porosidades ou descontinuidades e são localizados normalmente na superfície do material (SCHIJVE, 2001; MA, 1989). Nas FIG. 2.13 e 2.14 é possível verificar a nucleação de uma trinca em uma PSB. No caso de tubulações sujeitas às pressões internas, a maior tensão atuante é a circunferencial do lado interno, atuando diretamente na solda longitudinal da tubulação. Como a solda é um concentrador de tensões, as trincas de fadiga tendem a se nuclear neste local.

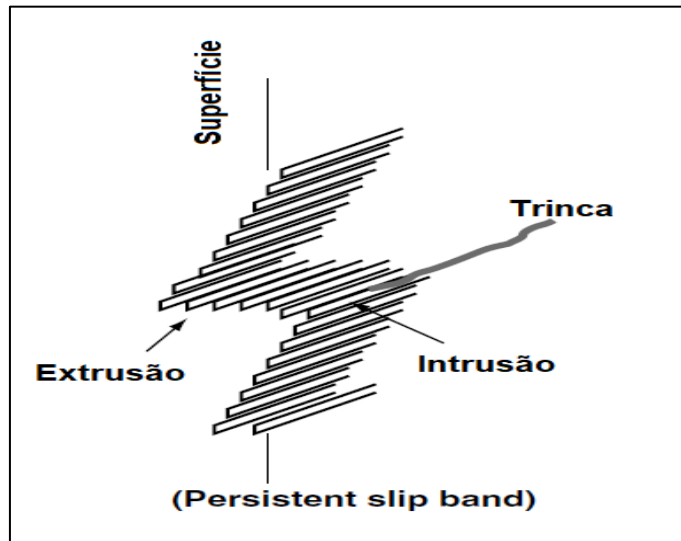


FIGURA 2. 13 – Nucleação de uma trinca na intrusão de uma PSB
 FONTE: Adaptado de LEE et al. (2005)

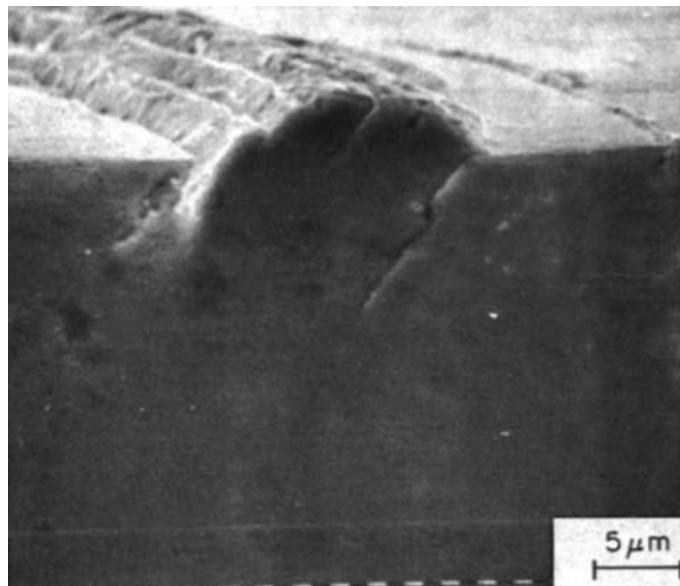


FIGURA 2. 14 - Nucleação de uma trinca na PSB
 FONTE: MA e LAIRD (1989)

2) – Propagação: No estágio de propagação a trinca tende a crescer num plano perpendicular à direção da força aplicada com uma taxa de crescimento constante que depende da resistência à propagação de trincas do material. Nesta etapa é possível observar a formação de linhas denominadas “marcas de praia”, onde cada linha está associada à uma mudança no nível de tensões atuando no material (SCHIJVE, 2001).

3) – Fratura Final: Propagação instável da trinca, após ser atingindo um tamanho crítico, onde a área remanescente não resiste a carga aplicada e a fratura ocorre bruscamente.

2.3.1 Ensaio de Fadiga – Curva S-N

Nos ensaios de fadiga, corpos de provas são submetidos a tensões cíclicas com amplitude constante, e tensão média específica, onde o número de ciclos até a falha é registrado. O gráfico resultante da amplitude de tensão (S) pelo número de ciclos (N) é conhecido como diagrama de Wöhler ou S-N (BANNANTINE et al., 1989). Para o levantamento destas curvas são necessários vários corpos de prova devido a dispersão dos resultados relacionados a grande variação das propriedades microestruturais dos materiais. A curva S-N normalmente é plotada em escala logarítmica, onde o \log da amplitude versus o \log dos ciclos gera um gráfico (FIG. 2.15) onde a equação é do tipo $S_a = S_f(N)^b$ conhecida como relação de Basquin, sendo S_a a amplitude de tensão, S_f o coeficiente de resistência a fadiga, N o número de ciclos até a falha e b o expoente de resistência à fadiga. A parte inferior da curva onde é formado um platô é denominado limite de resistência a fadiga do material, no qual um material submetido a tensões inferiores a este limite não irá nuclear trincas de fadiga (LEE et al., 2005).

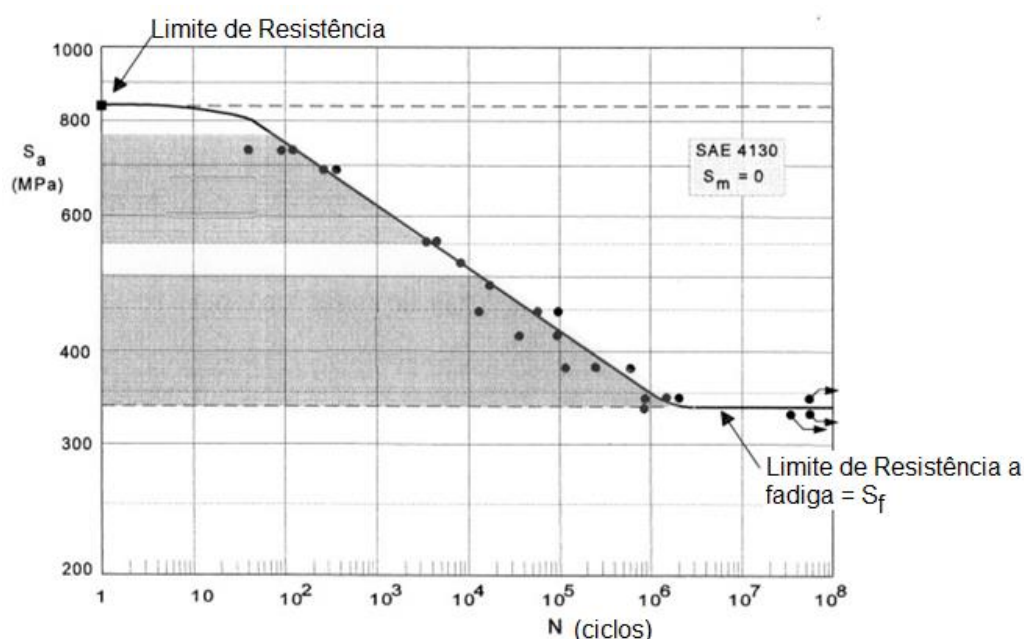


FIGURA 2. 15 – Curva típica de resultados de teste de fadiga em log de S por log de N.

FONTE: Adaptado de SCHIJVE (2001)

2.3.1.1 Ensaio de fadiga em escala real

Ensaio de fadiga em escala real geram resultados exatos, porém são extremamente complexos, necessitando de uma infraestrutura de proteção robusta contra projeções devido as pressões elevadas de teste e bombas especiais para variação da pressão interna na tubulação. Sendo assim os ensaios de fadiga em escala real exigem custos e tempo elevados para sua execução. Na FIG. 2.16 é mostrando um ensaio de fadiga em escala real do trabalho de Reepmeyer et al. (2004) e na FIG 2.17 são mostrados os resultados do limite inferior de uma série de ensaios de fadiga em escala real de tubos com solda SAW e com limites de resistência variados submetidos à pressão cíclica interna da norma DIN 2413-1 (1993).



FIGURA 2. 16 – Falha em fadiga da solda longitudinal de um teste em escala real

FONTE: REEPMAYER et al. (2004)

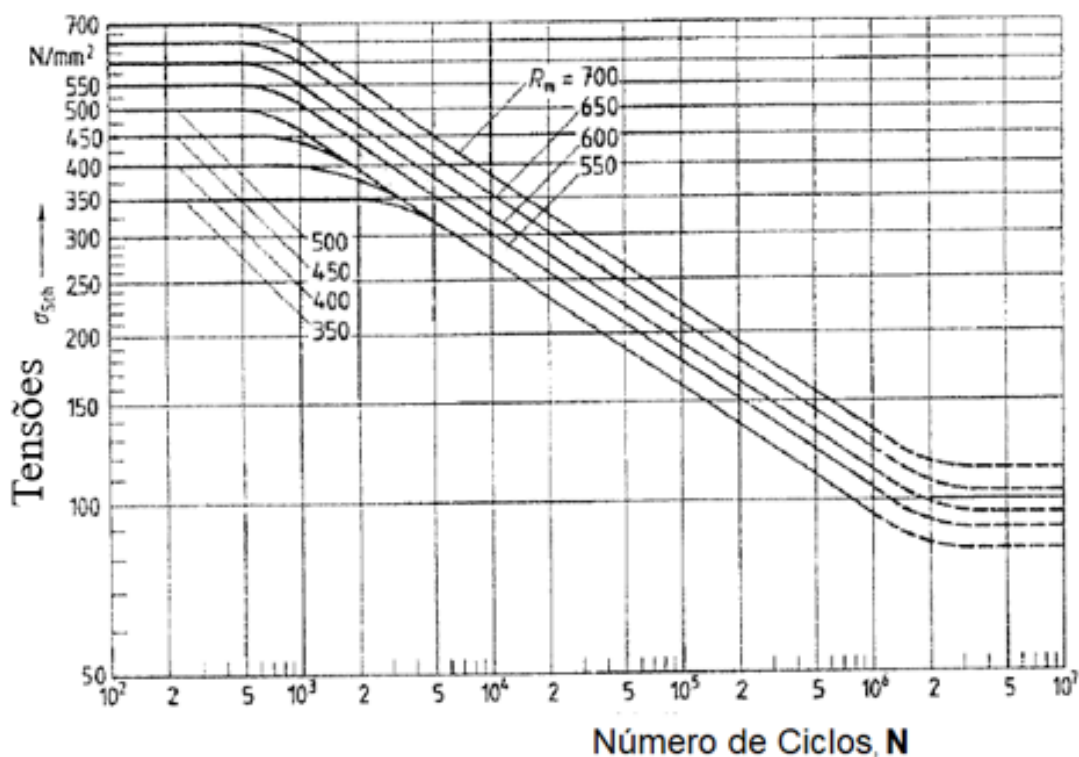


FIGURA 2. 17 – Ensaio de fadiga em tubos submetidos à pressão interna

FONTE: DIN 2413-1 (2013)

2.3.1.1 Ensaio de fadiga em corpos de prova

Ensaio de fadiga em corpos de prova são mais simples e com um custo e tempo para execução menor que os ensaios em escala real. São amplamente utilizados para determinação de resistência em fadiga de estruturas com resultados altamente representativos e normalmente são feitos através de corpos de prova planos. Nos ensaios de solda longitudinal de tubos, os corpos de prova são curvados, necessitando que sejam planificados com deformação plástica, impactando assim nos resultados de fadiga, conforme discutido no trabalho de Reepmeyer et al. (2004). No trabalho de Maddox e Zhang (2008), foi demonstrado que os ensaios em corpos de prova resultam em vidas em fadiga maiores que os testes em escala real, sendo assim não conservadores. Estes resultados podem estar relacionados principalmente com o alívio das tensões residuais nos corpos de prova e mais defeitos no corpo em escala real devido ao maior volume de material.

Os ensaios de fadiga por flexão em três pontos propostos neste trabalho mantem a geometria original do tubo utilizado na confecção dos corpos de prova, estando mais próximos da condição real de um tubo submetido a pressão interna.

2.3.2 Metodologia de contagem de ciclos de fadiga – rainflow

O método de contagem de ciclos Rainflow foi desenvolvido por Matsuishi e Endo (1968), sendo baseado numa analogia de chuva escoando sobre um telhado. Para Lee et al. (2005), o método rainflow é o que oferece os melhores resultados na previsão de vida à fadiga. Segundo Bannantine et al. (1989) o primeiro passo é desenhar o histograma de deformações ao longo do tempo, onde o eixo tempo fica orientado verticalmente conforme a FIG. 2.18. O segundo passo é imaginar a água de chuva caindo sobre o desenho, de forma que o caminho da água deve seguir as seguintes regras:

- 1 - Iniciar em um pico até atingir um pico mais positivo (A-D; C-B; E-F; G-H);
- 2 - Iniciar em um vale até atingir um vale mais negativo (B-C; D-A; F-E; H-G);
- 3 - Encontrar água anterior (B até C);
- 4 – Todo o ciclo é avaliado;
- 5 – Cada parte é contada uma única vez.

Agrupando as contagens acima é possível construir os seguintes ciclos completos: A-D e D-A, C-B e B-C, E-F e F-E, G-H e H-G.

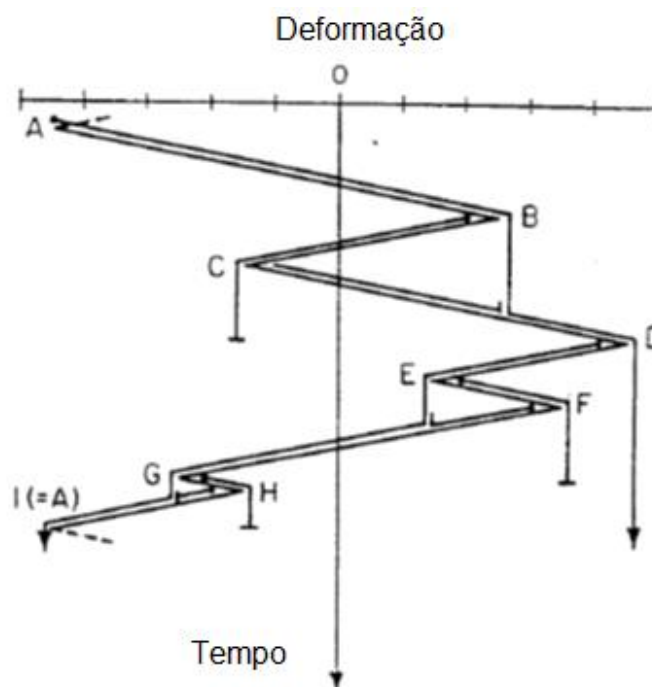


FIGURA 2. 18 - Método de contagem de ciclos rainflow

FONTE: Adaptado de BANNANTINE et al. (1989)

2.3.3 Dano acumulado – Regra de Miner

Equipamentos normalmente são submetidos a esforços cíclicos com amplitudes de tensões variadas. Desta forma cada amplitude de tensão provoca um certo dano à fadiga no material. A regra de dano acumulado linear que foi proposta inicialmente por Palmgren (1924) e reescrita por Miner (1945) é a regra mais simples e utilizada para se quantificar o dano em fadiga, onde são contados o número de ciclos para cada amplitude de tensão e comparados com o número de ciclos que leva a falha para aquela amplitude no diagrama S-N (GURNEY, 2006). A regra de Miner (1945) é utilizada por vários códigos de avaliação de trincas como a API 579 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2016) e a BS 7910 (BRITISH STANDARD, 2013). A falha pode ser prevista quando o somatório de cada dano for igual a um (1,0):

$$D_i = \sum \frac{n_i}{N_{i,f}} \geq 1,0 \quad (2.1)$$

Onde:

D = Dano acumulado

n = número de ciclos

N = número de ciclos até a falha

Um exemplo de aplicação da regra do dano acumulado de Miner é mostrado na FIG. 2.19, onde os pontos n_1 , n_2 , n_3 e n_4 são os ciclos de projeto que se deseja avaliar a vida em fadiga. Já os pontos N_1 , N_2 , N_3 e N_4 são os ciclos até a falha dos testes de fadiga.

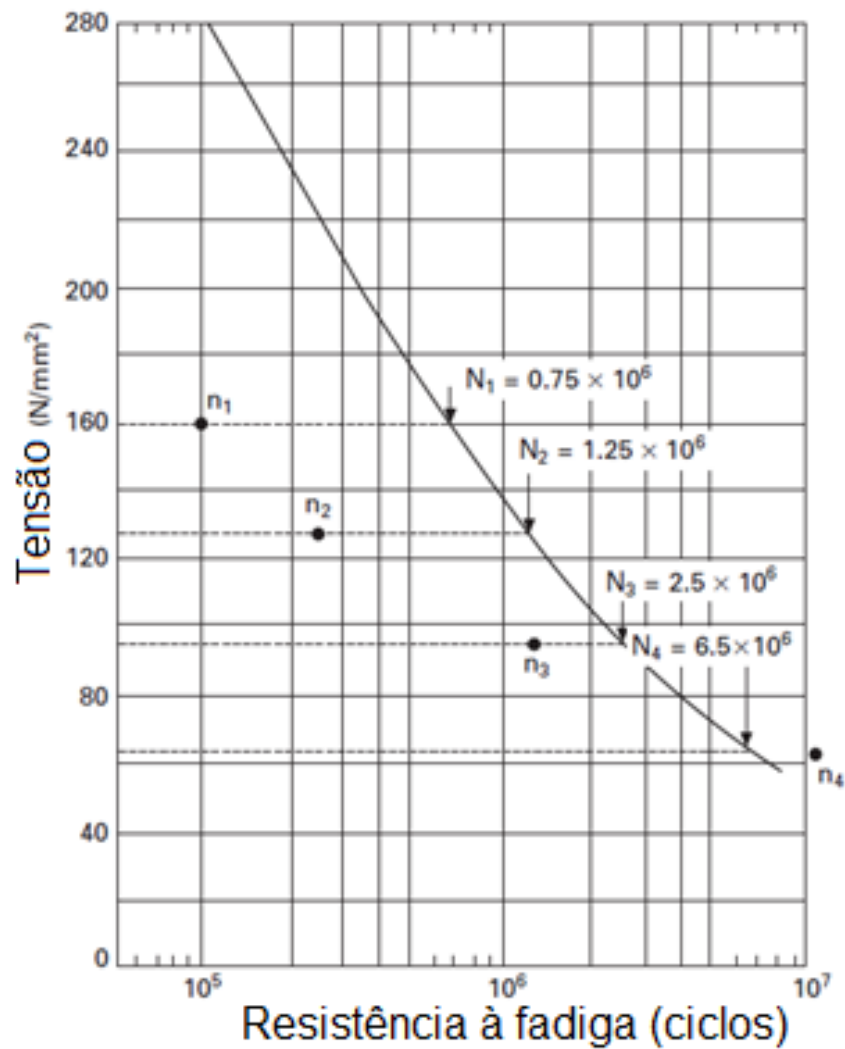


FIGURA 2. 19 - Exemplo de cálculo do dano acumulado em fadiga

FONTE: GURNEY (2006)

Na TAB. 2.1 são apresentados os valores de cada ponto do gráfico da FIG. 2.19 e através da EQ. 2.1 o dano acumulado é calculado. O resultado do dano acumulado de 2,45 (dano maior que 1) indica que o projeto precisa ser revisado de forma a diminuir as amplitudes de tensões e/ou os ciclos de projeto.

TABELA 2. 1
Exemplo de cálculo do dano acumulado em fadiga

Amplitude de tensões	Ciclos de Projeto (n)	Ciclos até a Falha (N)	Dano acumulado (n/N)
160	$0,1 \times 10^6$	$0,75 \times 10^6$	0,134
128	$0,25 \times 10^6$	$1,25 \times 10^6$	0,2
96	$1,25 \times 10^6$	$2,5 \times 10^6$	0,5
64	$10,5 \times 10^6$	$6,5 \times 10^6$	1,616
Dano Acumulado $\Sigma(n/N)$			2,45

FONTE: GURNEY (2006)

2.3.4 Fadiga em juntas soldadas

Maddox (2000) comenta que a maioria das falhas em estruturas são causadas por fadiga, principalmente em juntas soldadas, por serem concentradores de tensões. Testes em fadiga demonstram que corpos de prova de um mesmo material, com e sem solda, tem uma grande diferença no número de ciclos até a falha. A aplicação da junta soldada proporciona uma redução significativa na vida em fadiga (FIG. 2.20).

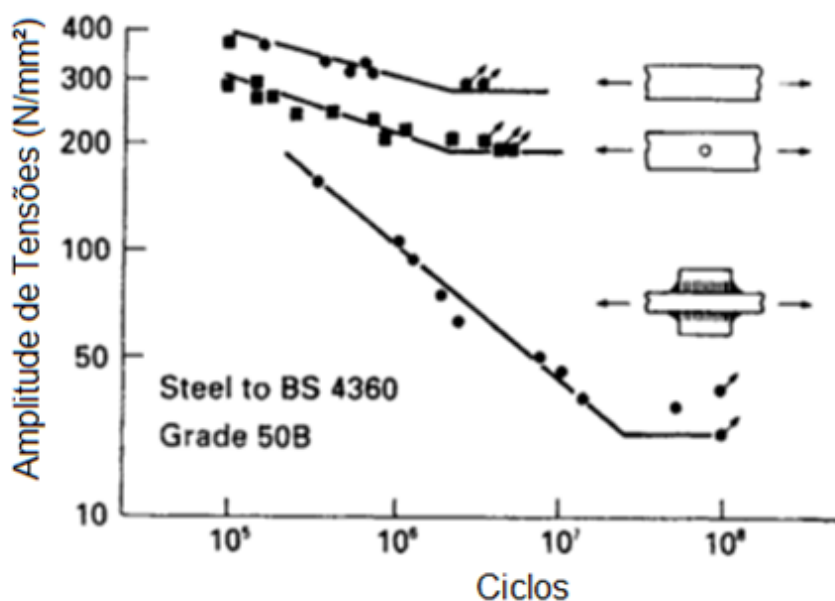


FIGURA 2. 20- Comparação de testes de fadiga com e sem concentradores de tensão
 FONTE: MADDOX (2000)

2.3.4.1 Influência da geometria do reforço da solda

Segundo Maddox (2002), a geometria do reforço da solda está diretamente relacionada à vida em fadiga, devido a concentração de tensões na margem da solda conforme mostrado na FIG. 2.21. Schijve (2001) explica que para soldas de boa qualidade, a vida em fadiga é influenciada pelo ângulo entre a chapa e o reforço da solda. Conforme demonstrado na FIG. 2.22 a remoção do reforço pode mais que dobrar a vida em fadiga. A geometria formada na margem da solda também influencia diretamente na vida em fadiga. Quanto maior o raio de concordância neste local menor é a concentração de tensão fazendo com que a vida em fadiga seja maior (FIG. 2.23 e 2.24). Um dos motivos da grande dispersão dos ensaios de fadiga se deve ao fato que a repetibilidade da geometria da solda ser muito difícil de ser obtida. Pequenas alterações na geometria do cordão de solda provocam grandes alterações na vida em fadiga. Na FIG. 2.25 Maddox (2002) mostra que soldas com pouco material de reforço e um ângulo de transição suave tem a vida em fadiga aprimorada.

Em tubos sujeitos a pressões internas as trincas se iniciam na margem da solda na grande maioria dos casos, considerando que não existam defeitos do processo de fabricação.

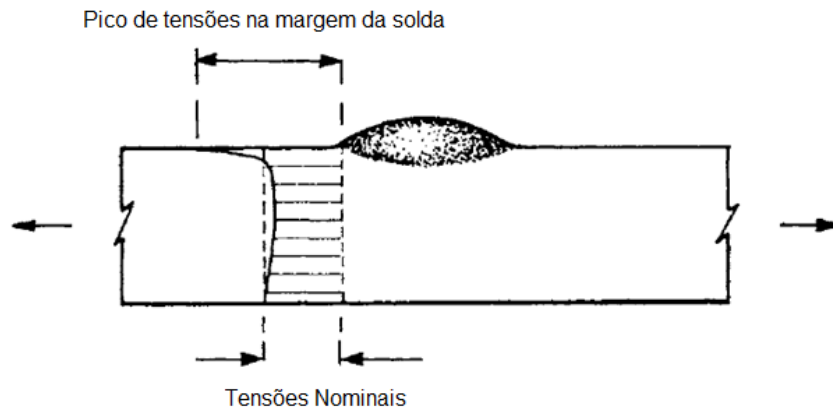


FIGURA 2. 21 - Concentração de tensão na margem da solda

FONTE: Adaptado de MADDOX (2002)

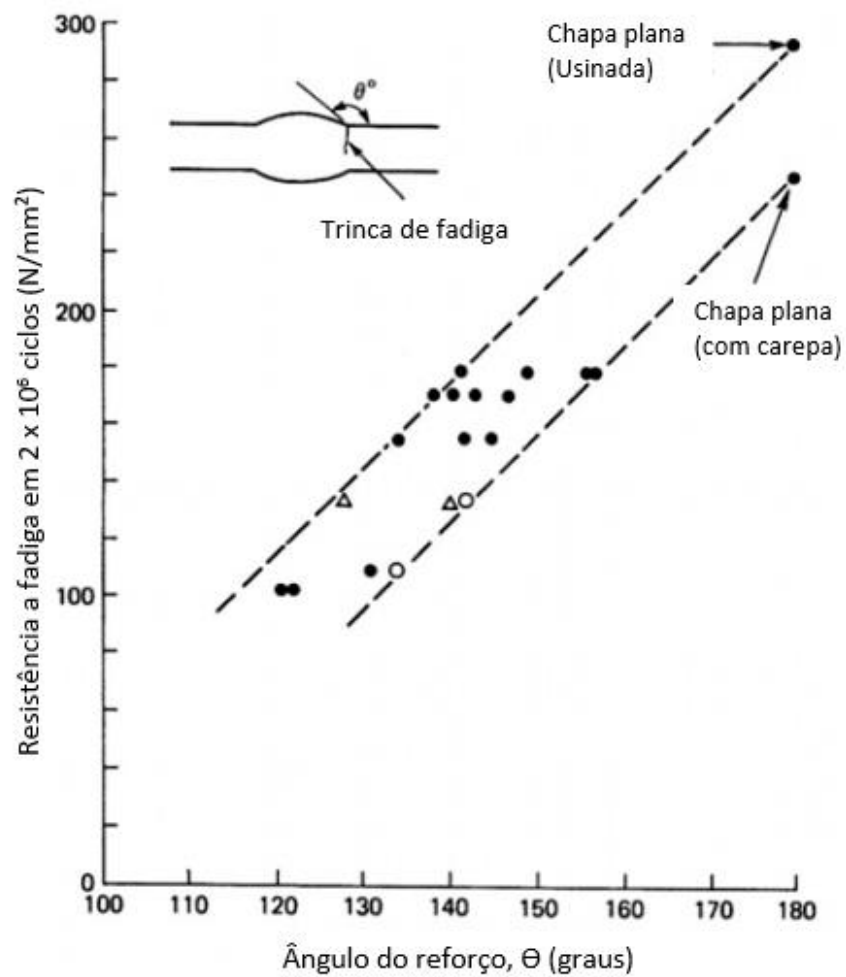


FIGURA 2. 22 – Efeito do ângulo do reforço na vida em fadiga em soldas de topo

FONTE: Adaptado de SCHIJVE (2001)

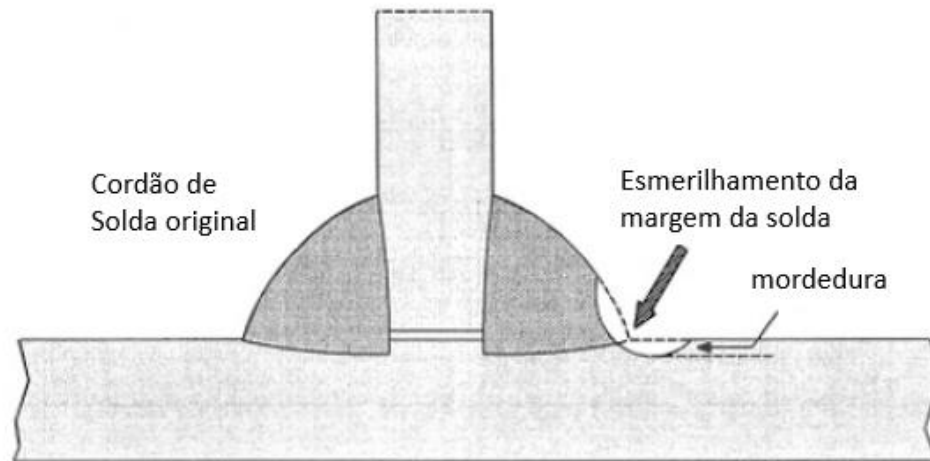


FIGURA 2. 23- Aumento do raio da margem da solda por esmerilhamento

FONTE: Adaptado de SCHIJVE (2001)

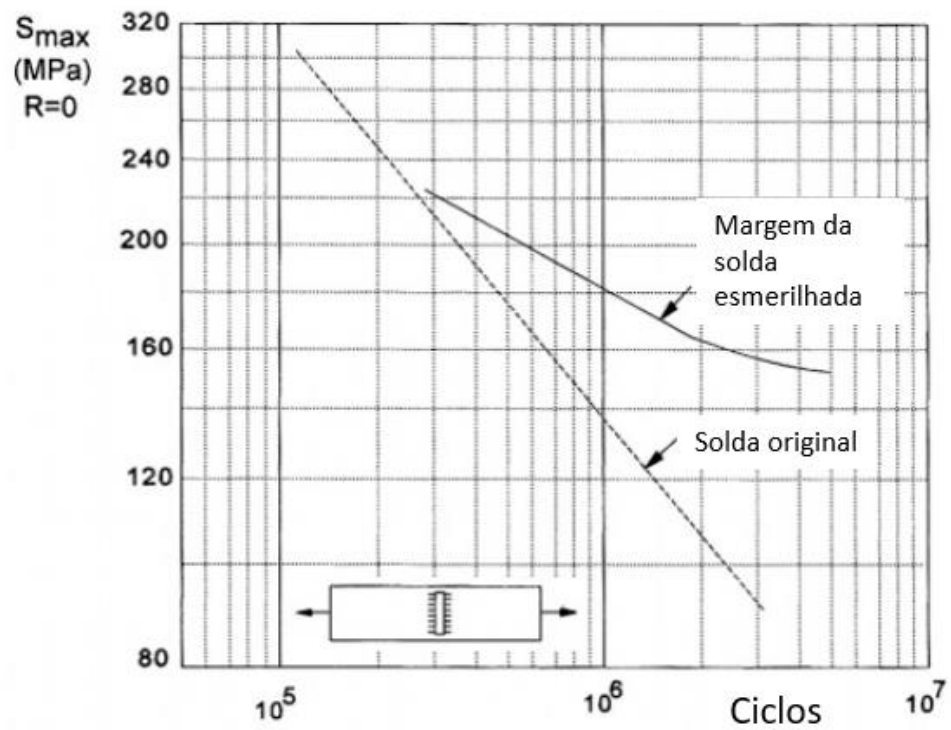


FIGURA 2. 24 - Influência do aumento do raio da margem da solda por esmerilhamento

FONTE: Adaptado de SCHIJVE (2001)

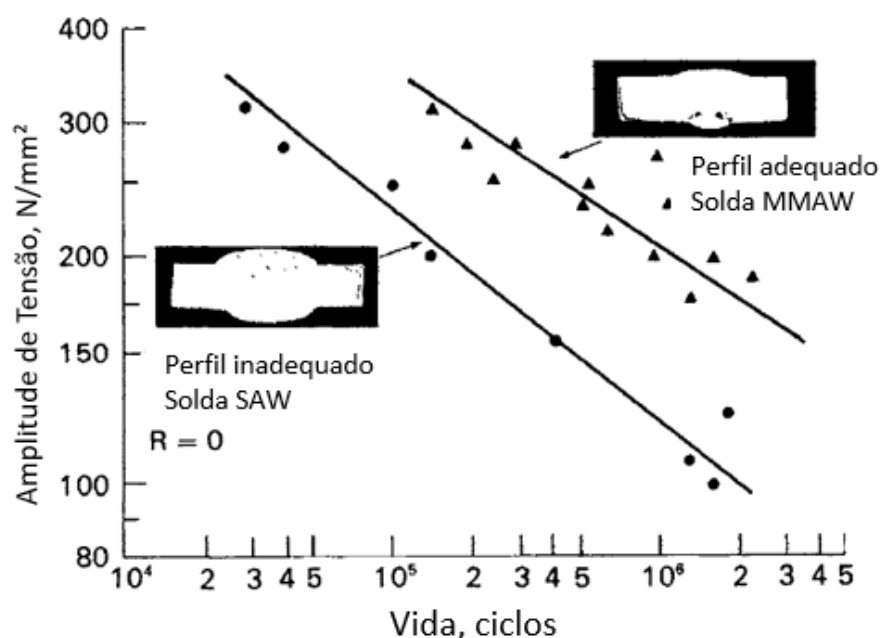


FIGURA 2. 25- Efeito da geometria do reforço de soldas de topo na vida em fadiga
 FONTE: Adaptado de MADDOX (2002)

2.3.4.2 Influência das tensões residuais de soldagem

Maddox (2000, 2002) explica que as tensões residuais do processo de soldagem são da magnitude do limite de escoamento, e assim as tensões de tração aplicadas no material propiciam o relaxamento das tensões residuais, fazendo com que o seu efeito na vida em fadiga seja reduzido. Considerando o efeito concentrador de tensão da margem da solda e o teste hidrostático aplicado após a fabricação pode-se considerar que as tensões residuais devido ao processo de soldagem em tubulações têm pouca influência na vida em fadiga.

2.3.4.3 Influência da qualidade da solda

A qualidade da solda é outro fator que influencia na grande dispersão dos resultados de fadiga. Vários tipos de defeitos na solda (porosidades, mordeduras, falta de fusão, inclusões de escória, falta de penetração, etc.) podem provocar concentradores de tensão que irão potencializar o dano em fadiga reduzindo drasticamente o tempo de nucleação das trincas (MADDOX, 2000).

2.3.4.5 Tensões estruturais “hot spot”

Conforme a norma DNV-RP-C203 (DET NORSKE VERITAS, 2011), as concentrações de tensões na margem da solda podem variar muito devido a variações de geometrias e descontinuidades inerente dos processos de soldagem. Sendo assim foi criado um método alternativo, chamado “hot-spot”, para determinação destas tensões e utilização nos cálculos de fadiga. Segundo Niemi et al. (2018) hot-spot é o concentrador de tensão da margem da solda onde as trincas de fadiga irão nuclear. Maddox (2002) explica que a tensão “hot-spot” considera as tensões de membrana (σ_m) e de flexão (σ_b), desprezando o pico de tensão não linear provocado pela geometria da solda (σ_{nlp}) conforme mostra a FIG. 2.26.

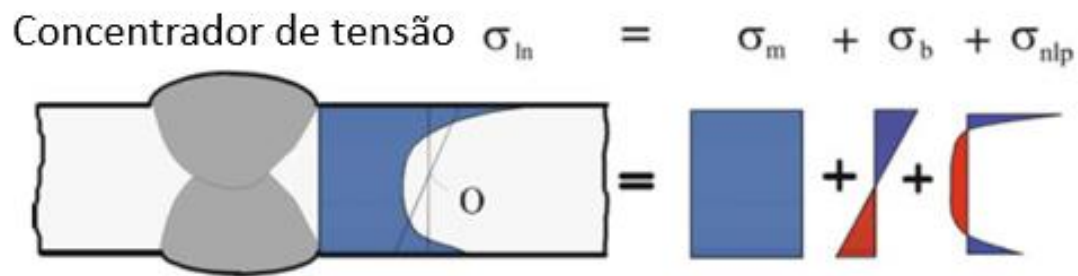


FIGURA 2. 26- Distribuição típica de tensões na margem da solda

FONTE: Adaptado de MADDOX (2002)

As tensões “Hot-Spot”, σ_{HS} , podem ser calculadas baseadas na extrapolação linear da EQ. (2.2) abaixo:

$$\sigma_{HS} = 1,67 \sigma_{0,4t} - 0,67 \sigma_{1,0t} \quad (2.2)$$

onde:

$\sigma_{0,4t}$ = Tensão distante da margem da solda a 0,4 vezes a espessura

$\sigma_{1,0t}$ = Tensão distante da margem da solda a 1,0 vezes a espessura

Para o cálculo da tensão “hot-spot” da EQ. 2.2, é necessário a obtenção das tensões nas posições mostradas na FIG. 2.27, que podem ser medidas por extensômetros ou simuladas através do método de elementos finitos.

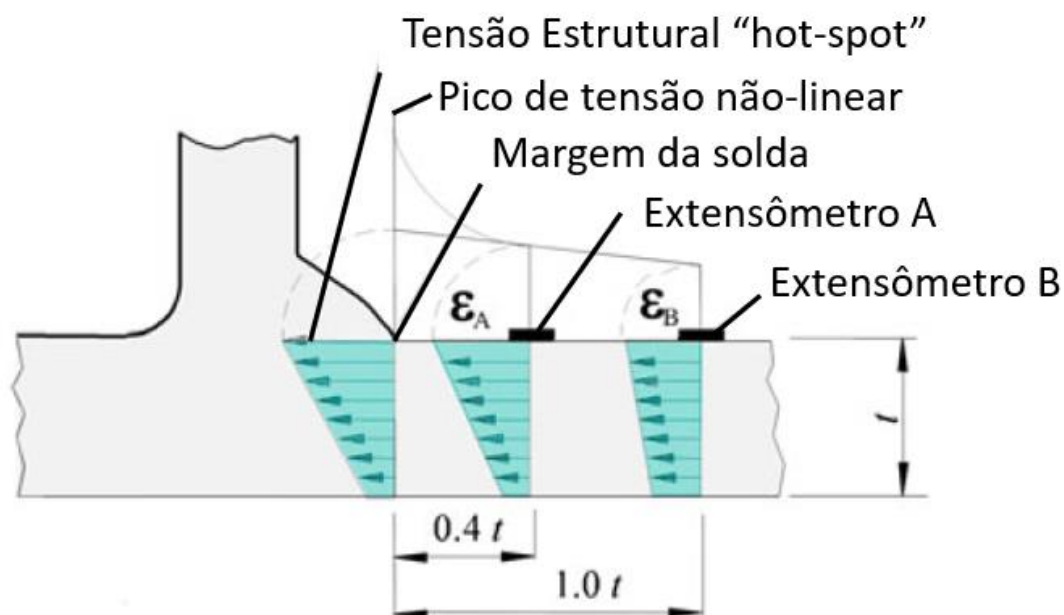


FIGURA 2. 27 – Demonstração da extrapolação das tensões para obtenção da tensão “hot-spot”
 FONTE: MADDOX (2002)

2.4 Simulações pelo método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) pode ser utilizado com muita eficácia para o cálculo das tensões atuantes em simulações de ensaios de flexão e de tubulações submetidas a pressões internas. Estas simulações se tornam importantes pois reduzem necessidades de ensaios práticos que demandam muito tempo e recursos financeiros elevados. Filho (2000), explica que o método dos elementos finitos consiste em subdividir a estrutura a ser analisada em um número finito de partes conectados entre si por nós e inter-relacionados por um modelo matemático adequado à resolução do problema físico proposto. A FIG. 2.28 ilustra a metodologia geral de análise por elementos finitos.

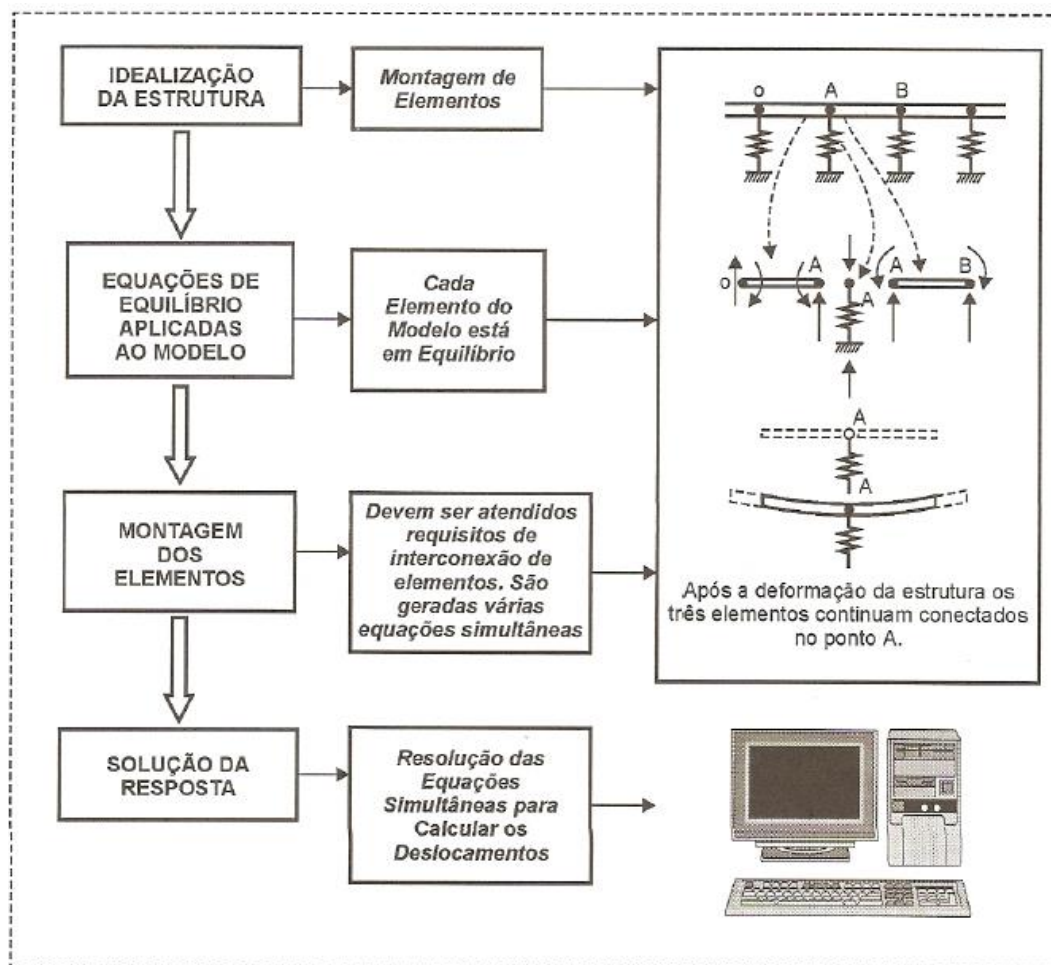


FIGURA 2. 28 - Metodologia geral de análise por elementos finitos

FONTE – FILHO (2000) p. 10

2.4.1 Simulações pelo MEF em ensaios de flexão

Simulações de elementos finitos foram utilizadas em muitos trabalhos de flexão em três ou quatro pontos que são muito comuns nos testes de levantamento de módulo de resistência à flexão. Os resultados obtidos nestes dois tipos de ensaios são semelhantes e mostram que a tensão de flexão é máxima no centro do corpo de prova submetido a flexão em três pontos, enquanto que no ensaio de flexão em quatro pontos, as tensões de flexão são constantes entre os dois suportes internos. Em ensaios de levantamento do módulo de resistência à flexão em quatro pontos os valores encontrados são menores se comparado aos ensaios de flexão em três pontos, isto porque o volume de atuação das máximas tensões é maior, tendo assim uma maior quantidade de micro defeitos que levaram à falha do material (HEIN e BRANCHERIAU, 2018). Nos ensaios de corpos de prova com soldas,

a sua geometria é um concentrador natural de tensões, e assim, ensaios de flexão em três ou quatro pontos tendem a ter resultados semelhantes já que a trinca sempre irá se nuclear na margem da junta soldada.

Nos trabalhos de Dong et al. (2016), Crocker e Turnbull(2014) é possível verificar uma metodologia de simulação em elementos finitos de ensaios de flexão em 04 pontos (FIG. 2.29) semelhante a simulação feita neste trabalho, onde foram utilizados elementos de sólido tridimensional, suportes fixos, contato entre os suportes e o corpo de prova com coeficiente de atrito variando de 0,001 a 0,02 e aplicação de força permitida somente em uma direção.

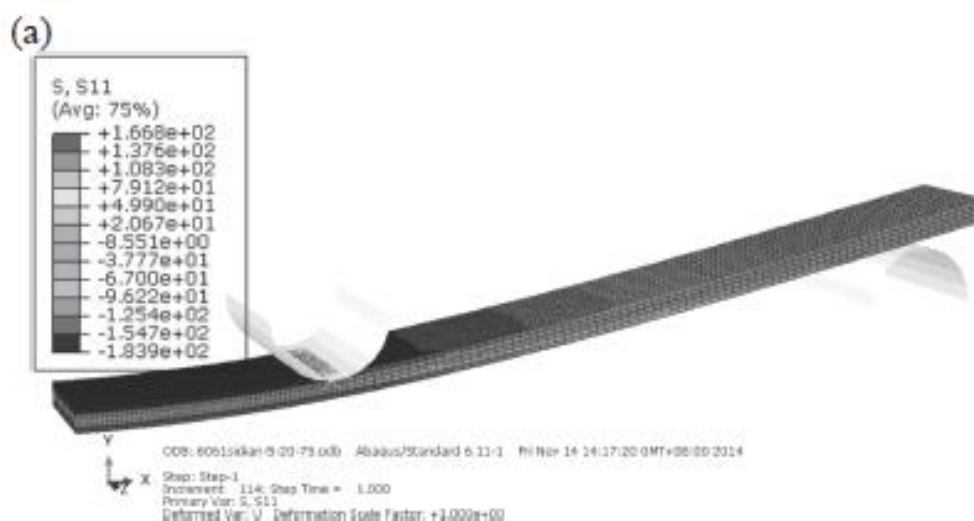


FIGURA 2. 29- Simulação em elementos finitos de um teste por flexão em quatro pontos

FONTE: DONG et al. (2016)

2.4.2 Simulações pelo MEF em tubos sujeitos a pressão interna

Nos trabalhos de Fernández-Cueto et al. (2018), Karuppanan et al. (2014), Sun e Cheng (2018), Khademi-Jahedi e Shishesaz (2018) são apresentados modelamentos em elementos finitos de tubos submetidos à pressão interna, semelhante a simulação feita neste trabalho, com utilização de elementos de sólido tridimensional e condições de contorno de simetria no tubo (FIG 2.30). Com este tipo de modelamento, torna-se possível a verificação de concentradores de tensões atuando na parede do tubo, como a geometria da solda, perda de espessura localizada e reparos.

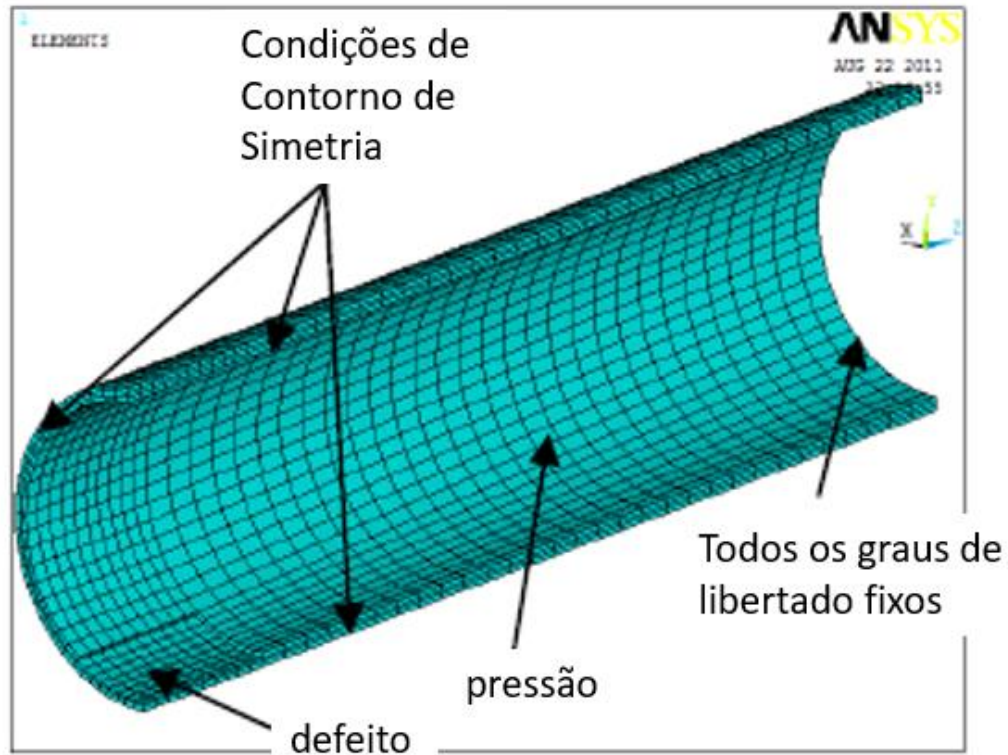


FIGURA 2. 30 - Modelamento pelo MEF de uma tubulação submetida a pressão interna
 FONTE: KARUPPANAN et al. (2014)

2.4.3 Simulações pelo MEF para cálculo das tensões “hot-spot”

A simulação em elementos finitos também se torna uma importante ferramenta para possibilitar o cálculo das tensões estruturais “hot-spot”. Niemi et al. (2018) explica que o objetivo neste caso não é calcular o pico de tensões não linear na margem da solda, e sim as tensões nos arredores que possibilitem o cálculo das tensões estruturais de “hot-spot”. Para se evitar a influência do pico de tensões na margem das soldas são utilizados principalmente 03 modelos mostrados da FIG. 2.31: a) linearizar as tensões ao longo da espessura; b) extrapor linearmente as tensões na superfície e c) usar a tensão em um único local próxima da margem da solda.

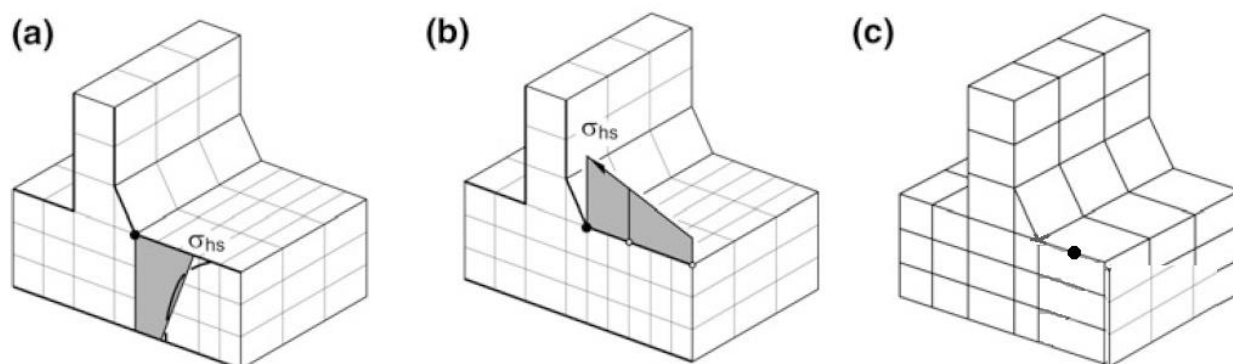


FIGURA 2. 31 - Modelos para cálculo das tensões de "hot-spot"

FONTE: Adaptado de NIEMI et al. (2018)

O tipo de malha utilizada influência diretamente nos resultados das tensões “hot-spot”. Para malhas grossas é indicado o cálculo de extrapolação pela EQ. 2.6, enquanto para malhas finas é indicado o cálculo de extrapolação pela EQ. 2.2.

$$\sigma_{HS} = 1,5 \sigma_{0,5t} - 0,5 \sigma_{1,5t} \quad (2.6)$$

onde:

$\sigma_{0,5t}$ = Tensão distante da margem da solda a 0,4 vezes a espessura

$\sigma_{1,0t}$ = Tensão distante da margem da solda a 1,0 vezes a espessura

2.5 Extensometria

A extensometria é muito utilizada para a validação de simulações em elementos finitos, pois propicia a medição das deformações reais atuantes nos materiais com muita confiabilidade e exatidão. Para realizar a medição destas deformações são usados sensores denominados extensômetros que são pequenos resistores. Estes sensores são colados no componente, de forma que variações de tamanho no mesmo provocam variações na resistência elétrica, tornando possível a medição da deformação mecânica que posteriormente é transformada em tensão mecânica.

2.5.1 Extensômetros

Segundo (LEE et al., 2005), a resistência elétrica de um extensômetro é dependente da sua geometria e material, seguindo a seguinte relação:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

R: Resistência elétrica;

L: Comprimento da resistência;

A: Área da seção transversal da resistência;

ρ : resistividade elétrica.

Sendo assim é possível relacionar a deformação com a variação de resistência elétrica conforme EQ. 2.4.

$$\frac{\Delta R}{R} = FS \times \varepsilon \quad (2.4)$$

Onde:

FS: Fator de serviço do extensômetro

ε : deformação mecânica

Um tipo comum de extensômetro é mostrado na FIG. 2.32. Uma lâmina metálica resistiva de espessura de alguns micras é fixada em um material eletricamente isolado chamado base. Os extensômetros mais usuais são de 120, 350, 500 e 1000 ohms.

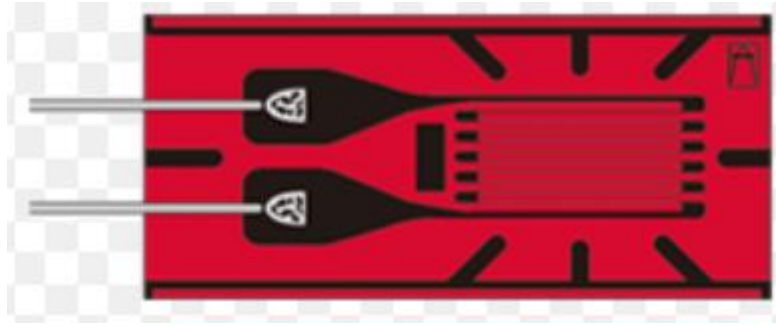


FIGURA 2. 32 - Desenho esquemático de um extensômetro

FONTE – Site Kyowa Brasil

2.5.2 Ponte de Wheatstone

Conforme explicado por Lee et al. (2005), variações de resistência que ocorrem em extensômetros são muito baixas, sendo difíceis de medir. Sendo assim uma ponte com 4 resistências é utilizada para se medir variações de tensões devido a variações na resistência. Esta ponte é um divisor de tensão conforme visto na FIG. 2.33. Através deste circuito é possível mostrar que:

$$\frac{e_o}{E_{ex}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) \quad (2.5)$$

Utilizando a EQ. 2.4 na EQ. 2.5 tem-se:

$$\frac{e_o}{E_{ex}} = \frac{FS}{4} (\varepsilon1 - \varepsilon2 + \varepsilon3 - \varepsilon4) \quad (2.6)$$

E assim a EQ. (2.6) pode ser utilizada para medição de deformação através de medições de tensão elétrica em pontes de Wheatstone.

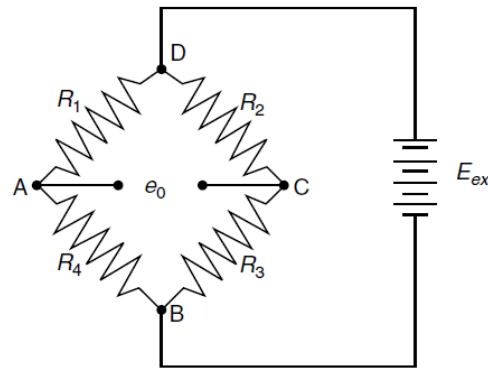


FIGURA 2. 33 - Circuito elétrico – Ponte de Wheatstone

FONTE – LEE et al. (2005)

Na FIG. 2.34 são apresentadas algumas configurações comuns para medição de tensões de tração, no qual 2 (dois) ou 3 (três) extensômetros são mantidos fixos sem alteração em sua resistência.

Configuração	Extensômetros	Configuração da ponte	Sinal de saída
	Ligação		
¼ de Ponte			
	1 Ativo		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon$
	2 Fios		
	Sem compensação de temperatura		
½ Ponte			
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+\nu)K_G}{4} \cdot \varepsilon$
	1 Ativo 1 Compensador		
	1 Ativo 1 Compensador		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon$
	Compensação de Temperatura		

FIGURA 2. 34 – Configurações típicas de pontes de Wheatstone para medição de deformações em tração

FONTE: MINELA (2017)

2.5.3 Instrumentação e sistema de aquisição

Lee et al. (2005) explica que como o valor de tensão elétrica resultante da ponte de Wheatstone é muito pequena é necessário realizar a sua amplificação e filtragem através de instrumentação específica. Após este processo o sinal é convertido de analógico para digital e gravado com uma frequência de amostragem que possibilite capturar todos os picos e vales, através de um sistema de aquisição de dados.

2.6 - Cálculos analíticos para validação de simulações numéricas

Cálculos analíticos baseados em teorias bem estabelecidas da engenharia podem ajudar a validar as simulações pelo método de elementos finitos ou medições experimentais através de extensômetros. As tensões circunferenciais atuantes em uma tubulação submetida a pressões internas podem ser calculadas pela equação de Lamé (1866) conforme EQ. 2.7.

$$\sigma = \frac{p_i * r_i^2 - p_o * r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 * r_o^2 * (p_o - p_i)}{r^2 * (r_o^2 - r_i^2)} \quad (2.7)$$

Onde:

σ = Tensão circunferencial;

p_i = pressão interna;

r_i = raio interno;

p_o = pressão externa;

r_o = raio externo;

r = raio desejado.

As tensões de flexão de uma barra retangular engastada podem ser calculadas pela EQ. 2.8 (HIBBLER, 2006).

$$\sigma = \frac{P \times d \times c}{I} \quad (2.8)$$

Onde:

P = peso da massa

d = distância do peso até o centro do extensômetro

c = distância perpendicular do eixo neutro até a extremidade da barra

I = Momento de inércia

3. METODOLOGIA

A metodologia consistiu em realizar os ensaios em flexão por três pontos em um corpo de prova curvado aplicando cargas estáticas e medindo-se as deformações através extensômetros de forma a validar os modelos de elementos finitos. Após a validação dos modelos, foi possível correlacionar a tensão da margem da solda devido a força aplicada com a tensão devido à pressão interna em um tubo. Desta forma pode-se criar uma curva S-N experimental correlacionado as forças aplicadas com as pressões atuantes na tubulação. Com o histórico de pressões de operação, é possível utilizar a metodologia de contagem de ciclos, rainflow, e através da curva S-N experimental, realizar a avaliação de fadiga do duto pelo método do dano acumulado. O fluxograma apresentado na FIG. 3.1 resume a metodologia adotada para execução de todo o trabalho. Não foram consideradas as influências das tensões residuais de conformação e soldagem da tubulação.

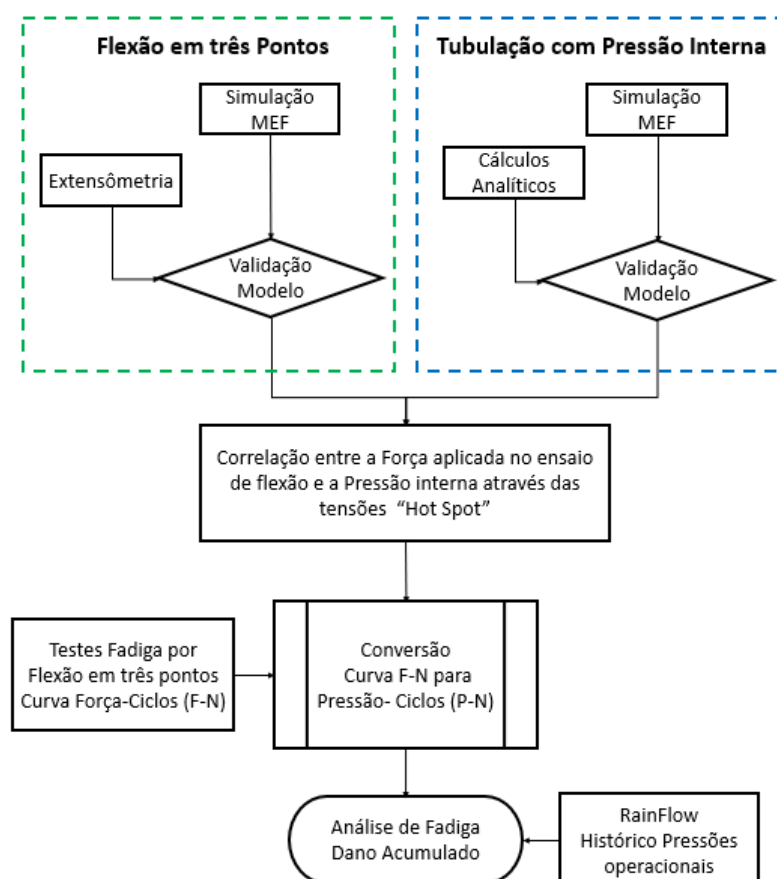


FIGURA 3. 1 - Fluxograma da Metodologia

3.1 Ensaio de flexão em três pontos

3.1.1 Simulação em elementos Finitos

Foi utilizado o software Ansys 18.2 licenciado para Anglo American Brasil para realizar as simulações em elementos finitos. O corpo de prova apresentado na FIG. 3.14 foi modelado no “SpaceClaim” e depois carregado no “mechanical static structural”, ambos do pacote Ansys. Os dois suportes cilíndricos mostrados na FIG. 3.2 foram engastados, e o contato entre estes e o corpo de prova foi considerado com um coeficiente de atrito de 0,02 devido à boa condição superficial das peças. A força foi aplicada na parte central superior do corpo de prova com condição de deslocamento apenas na vertical. Na simulação foi utilizado o elemento sólido 3-D “solid187” de estrutura tetraédrica com um total de 98040 elementos e 144585 nós, conforme FIG. 3.3. Foi utilizado um tamanho de elemento de 2 mm com refinamento de malha na margem da solda e nas regiões onde foram colados os extensômetros, conforme observado na FIG. 3.4.

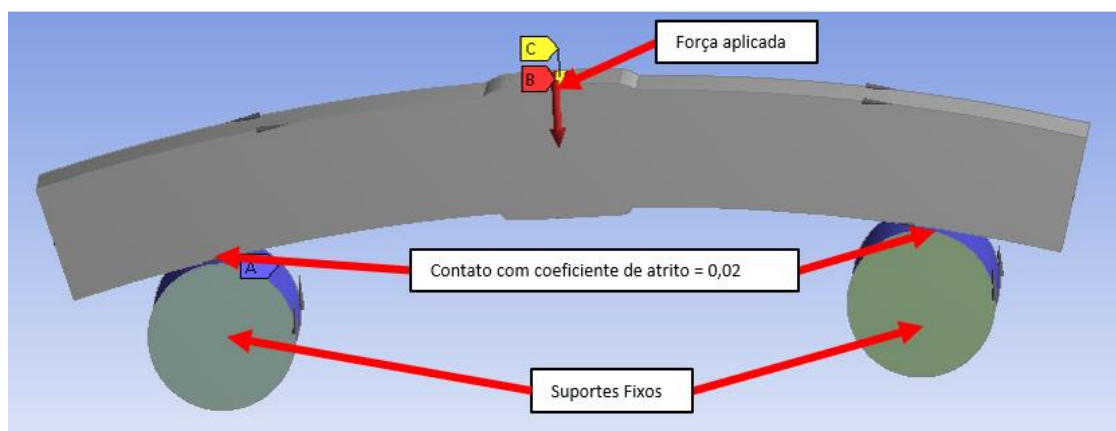


FIGURA 3. 2 - Condições de contorno do modelo

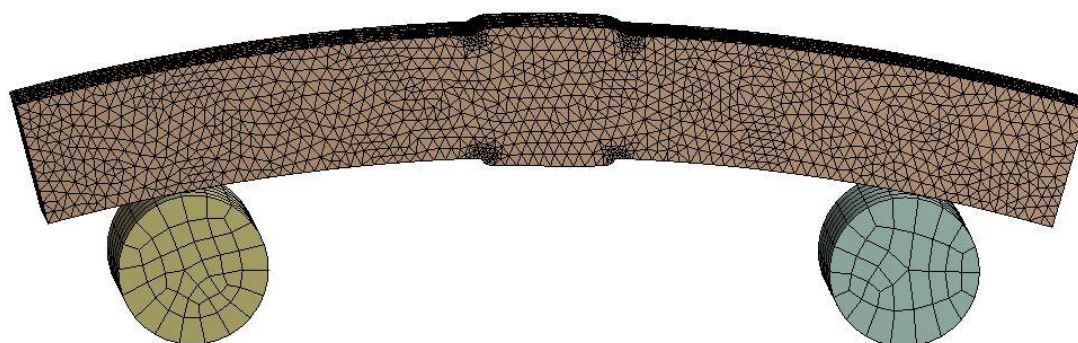


FIGURA 3. 3- Malha utilizada na análise do modelo

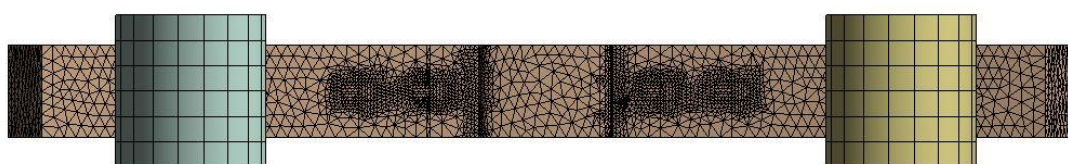


FIGURA 3. 4 - Detalhe para refinamento da malha na região dos extensômetros

3.1.2 Extensometria

Para o condicionamento e aquisição dos sinais dos extensômetros foram utilizados os módulos NI-9237 e NI-9171 da National Instruments (FIG. 3.5), com quatro canais, taxa de aquisição máxima de 50kS/s, resolução de 24 bits. Foi utilizado o driver “N-drive” para realizar a aquisição de dados junto a um programa desenvolvido no Labview para armazenamento dos dados no HD do computador. Todos os testes foram realizados com uma frequência de aquisição de 25 kHz.



FIGURA 3. 5 - Módulos de Condicionamento e Aquisição de sinais da National Instruments

Nos testes foram utilizados extensômetros do fabricante Excel, tipo PA-06-250BA-350-LLEN, lote 181101, com resistência de 350 ohms, fator de serviço de 2,15, comprimento da grelha de 6 mm e largura de 3 mm (FIG. 3.6). Foram colados 6 (seis) extensômetros no corpo de prova, sendo quatro na parte inferior e dois na parte superior, distantes à 0,4t e a 1,0 t (espessura) da margem da solda (FIG. 3.7 e 3.8).

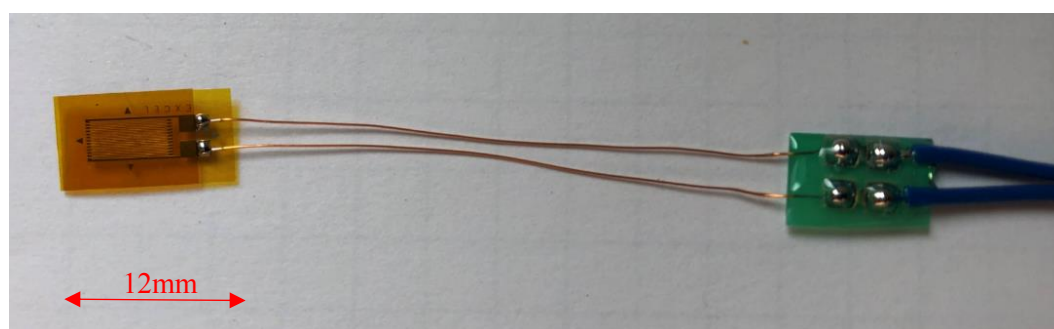


FIGURA 3. 6 - Extensômetro utilizado nos testes

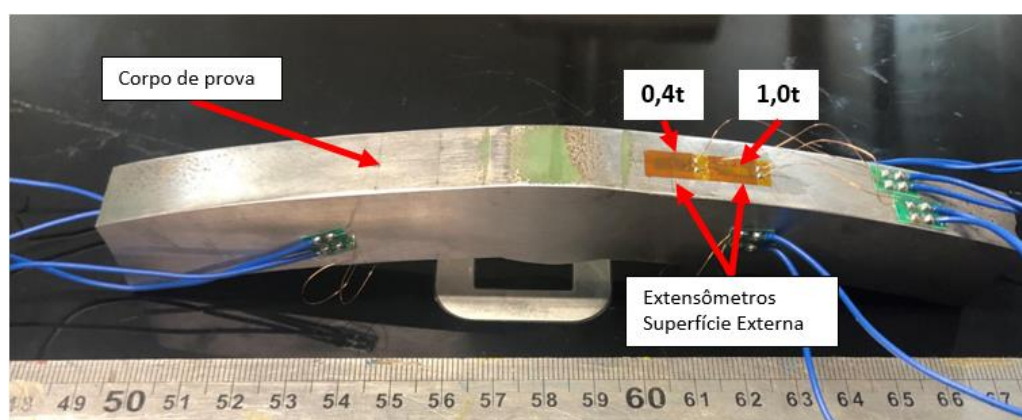


FIGURA 3. 7 – Parte superior do corpo de prova com dois extensômetros instalados

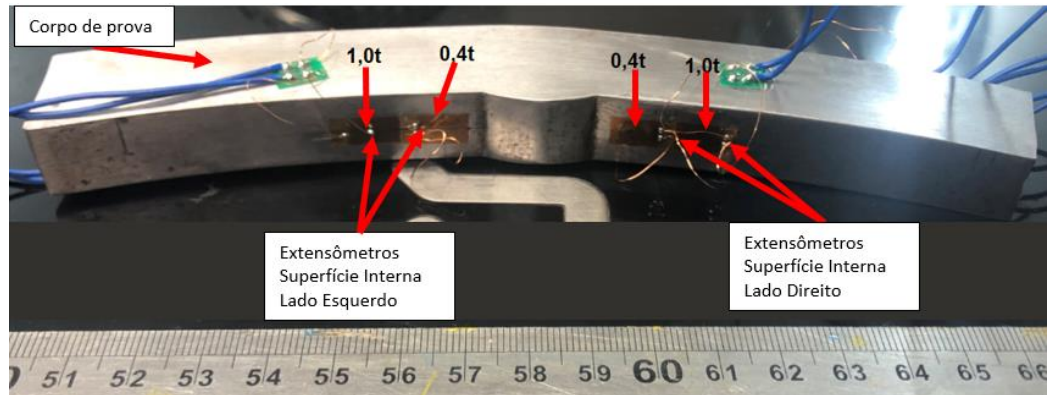


FIGURA 3. 8 - Superfície inferior do corpo de prova com dois extensômetros instalados em cada lado da solda

Nos testes foram utilizados circuitos de meia ponte com o extensômetro responsável pelas medições de deformação (Active Gage da FIG. 3.9) no corpo de prova de teste, e outro (Dummy Gage da FIG. 3.9) colado em um corpo de prova não sujeito a esforços. Esta configuração possibilita cancelar qualquer alteração de resistência devido as alterações na temperatura ambiente (MINELA, 2017). Durante a aplicação de carga estática o sistema de aquisição ficou ligado até à estabilização das deformações.

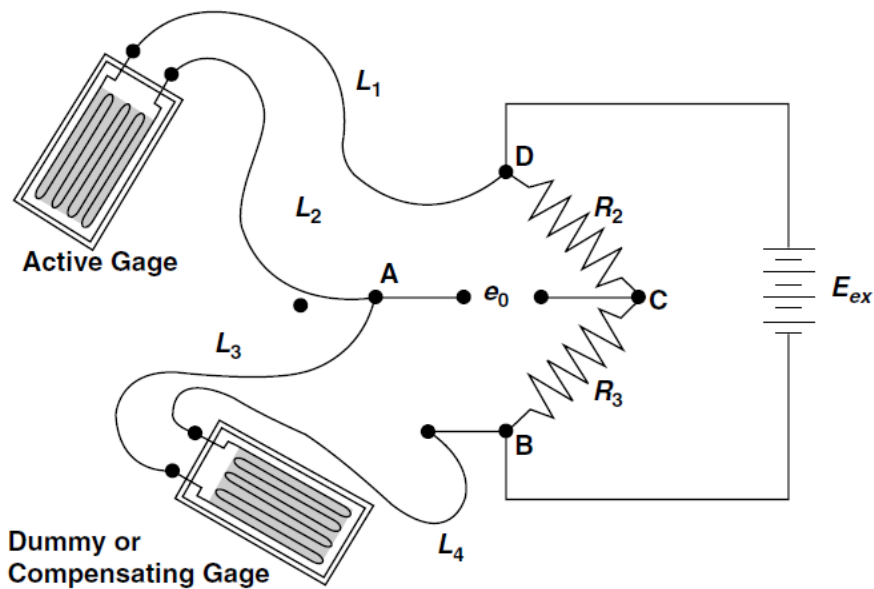


FIG.URA 3. 9- Circuito Meia Ponte de Wheatstone utilizado nos testes

Para verificação da funcionalidade do sistema, um extensômetro foi instalado numa barra retangular conforme FIG. 3.10 e foram aplicadas duas cargas com massa conhecidas, conforme FIG. 3.11. As tensões calculadas através da EQ. 2.8 foram comparadas com as tensões gravadas no sistema de aquisição.

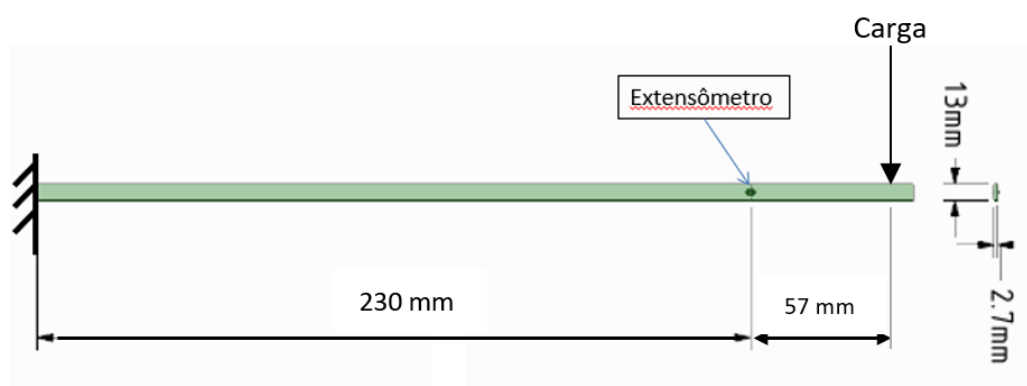


FIGURA 3. 10 – Teste de funcionalidade – Dimensões da barra de teste

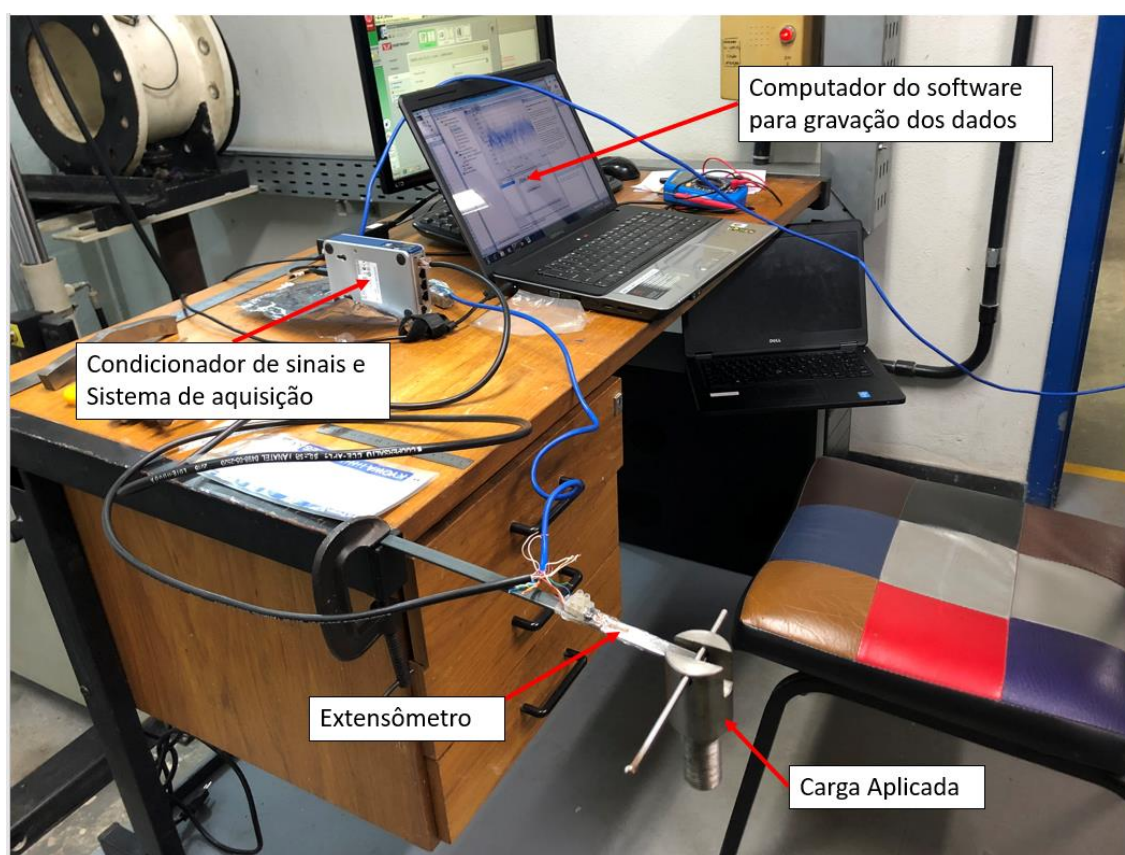


FIGURA 3. 11 – Teste para verificação do sistema de condicionamento e aquisição de sinais

3.1.3 Corpo de prova curvado

Os corpos de prova utilizados nos ensaios por flexão em três pontos foram cortados e usinados conforme desenho apresentado na FIG. 3.12. Em todos os corpos de prova foram mantidas a geometrias originais do tubo com o mesmo raio de curvatura.

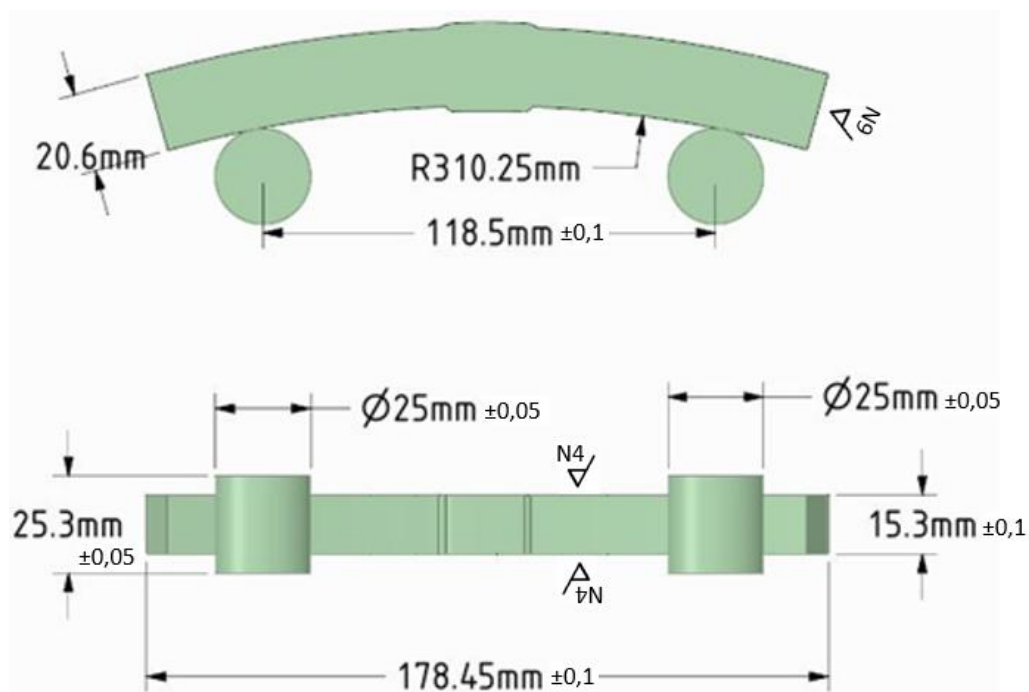


FIGURA 3. 12 - Dimensional dos corpos de prova de flexão

3.1.4 Material

Os corpos de prova dos testes foram retirados de um tubo API X70 com solda SAW em dois passes (interno e externo), com diâmetro de 660,4 mm e espessura de 20,6 mm. Nas FIG. 3.13 é mostrado o tubo de onde foram retirados os corpos de prova. Para verificação da especificação do tubo, foram realizados ensaios conforme os requisitos da norma API 5L, que prevê: Composição química, ensaios de tração, ensaios de charpy, ensaios de dobramento guiado e medição de microdureza (FIG 3.14).



FIGURA 3. 13 – Tubulação utilizada para corte dos corpos de prova

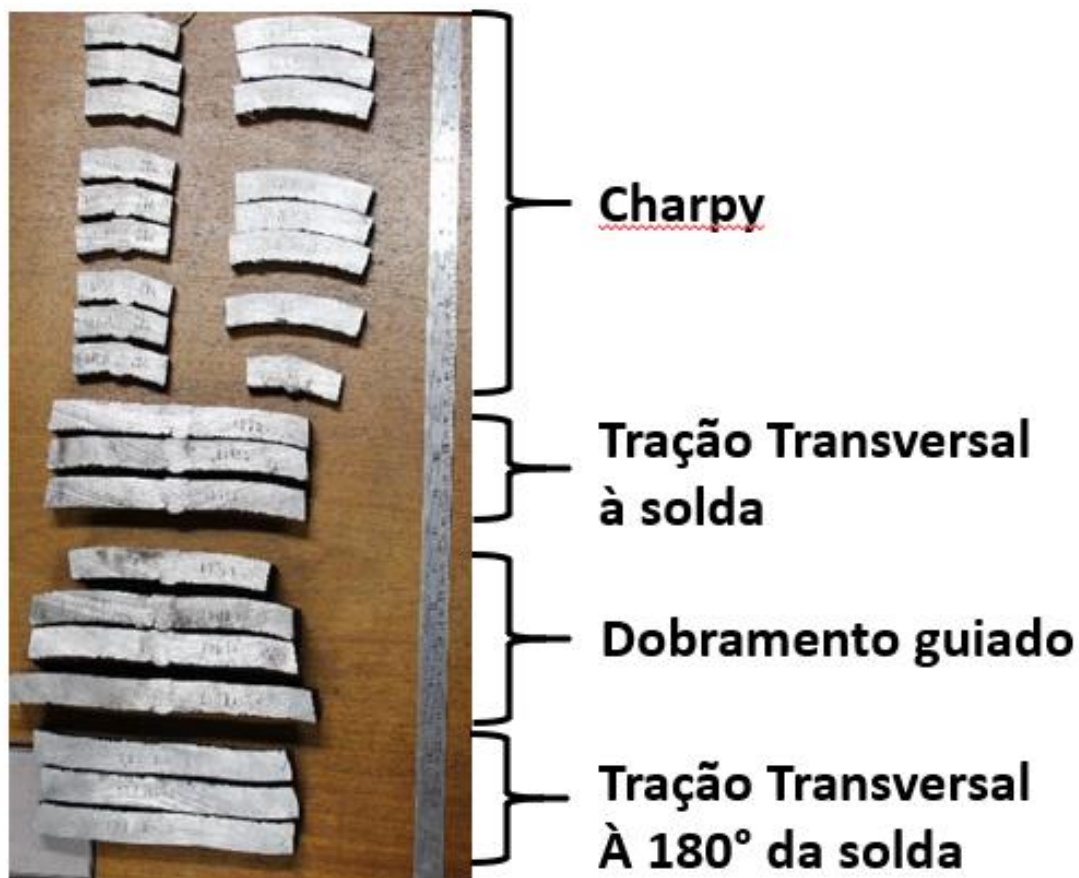


FIGURA 3. 14 - Corpos de prova conforme API 5L antes da usinagem.

3.1.5 Ensaio estático

Os ensaios estáticos de flexão em três pontos foram realizados em uma máquina Instron 8802 com célula de carga de 25 kN do Laboratório de Soldagem e Simulação (LRSS) da UFMG. Na FIG. 3.15 é possível ver a máquina com o corpo de prova instrumentado. Na FIG. 3.16 é possível ver o corpo de prova posicionado para execução do ensaio de flexão em 03 pontos. Foram aplicadas as seguintes forças (kN) nos testes: 02, 04, 06, 08, 10, 12 e 14. Para medição das deformações nos testes de carga estática foi realizada a aplicação de extensômetros conforme o item 3.1.2.

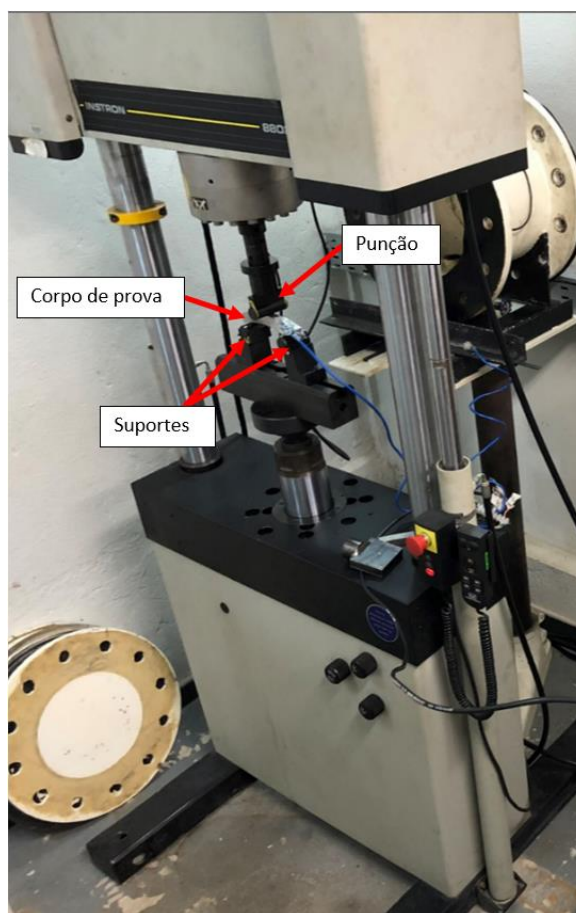


FIGURA 3. 15 - Máquina de testes Instron 8802 do LRSS - UFMG

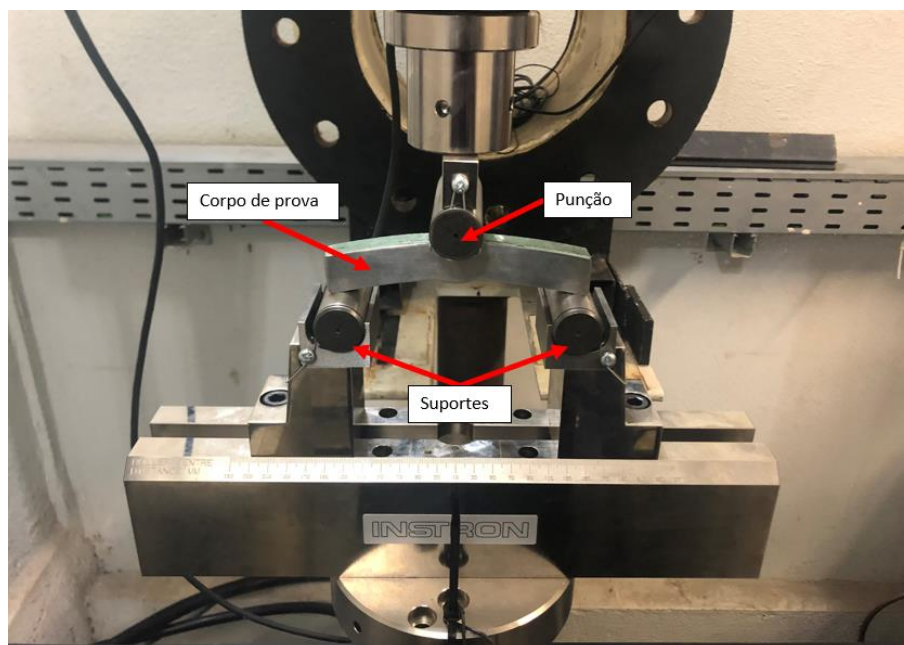


FIGURA 3. 16 - Corpo de prova posicionado para execução dos testes

3.1.6 Validação das simulações de flexão em três pontos pela Extensometria

Para validação dos modelos de flexão em três pontos, foram comparadas as tensões medidas pelos extensômetros com a média das tensões da simulação em uma área com a mesma dimensão do extensômetro, conforme mostrado na FIG. 3.17.

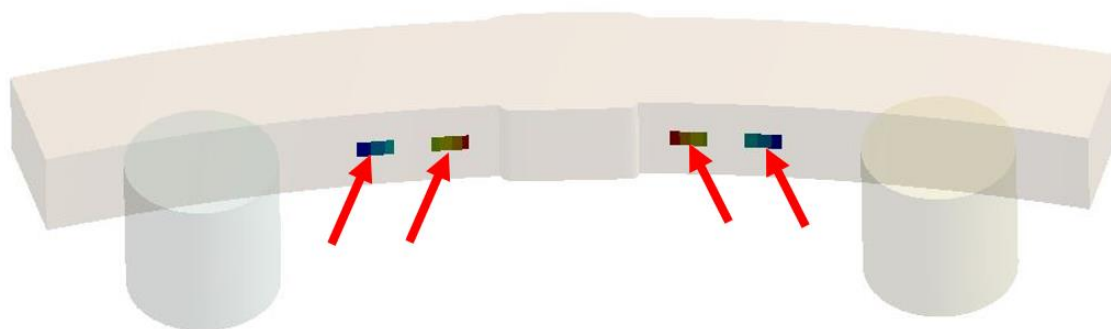


FIGURA 3. 17 – Modelo em elementos finitos. As setas indicam onde foram instalados os extensômetros

3.2 Simulação da tubulação com pressão interna

3.2.1 Simulação pelo MEF

O tubo utilizado no mineroduto com a geometria da solda longitudinal foi modelado em 3D. Para tornar os cálculos do software mais rápidos foi utilizada a metade do tubo, onde foram aplicadas condições de contorno de simetria, com restrição de deslocamento normal na face do corte longitudinal do tubo e em uma face da seção transversal. Para evitar movimento de translação do corpo, o vértice interno de um dos lados do corte longitudinal foi restringido na direção X, conforme mostrado na FIG. 3.18. Foi utilizado o elemento 3-D solid187 de estrutura Tetraédrica com um total de 247028 elementos e 372476 nós, conforme FIG. 3.19. Foi utilizado um tamanho de elemento de 8 mm com refinamento de malha na margem da solda (FIG. 3.20).

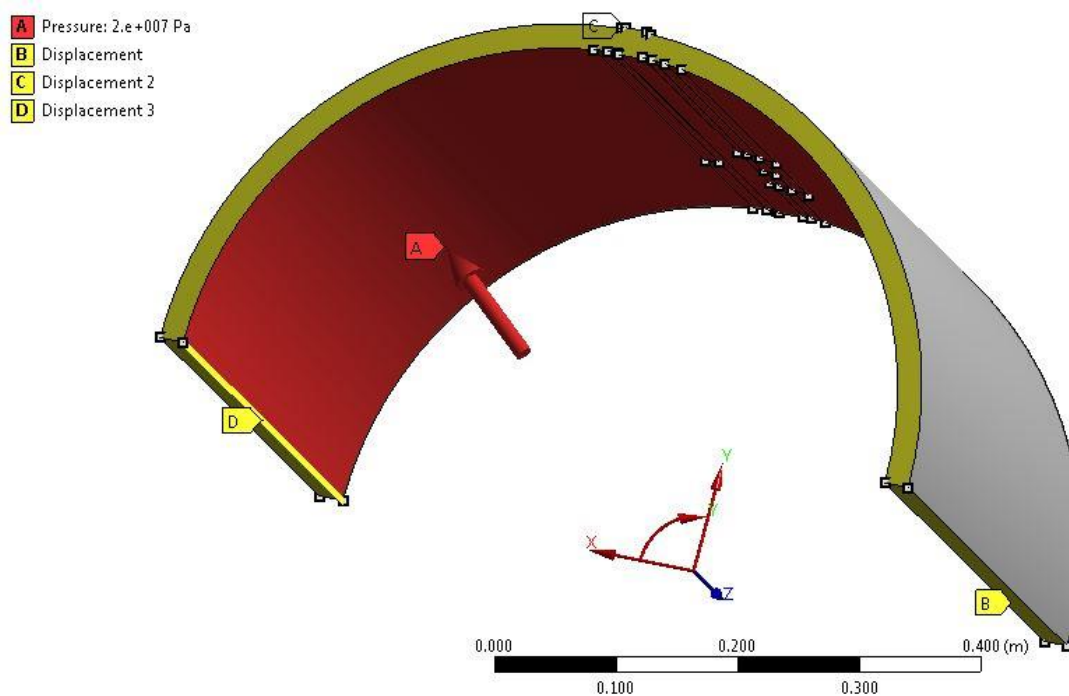


FIGURA 3. 18 - Condições de contorno

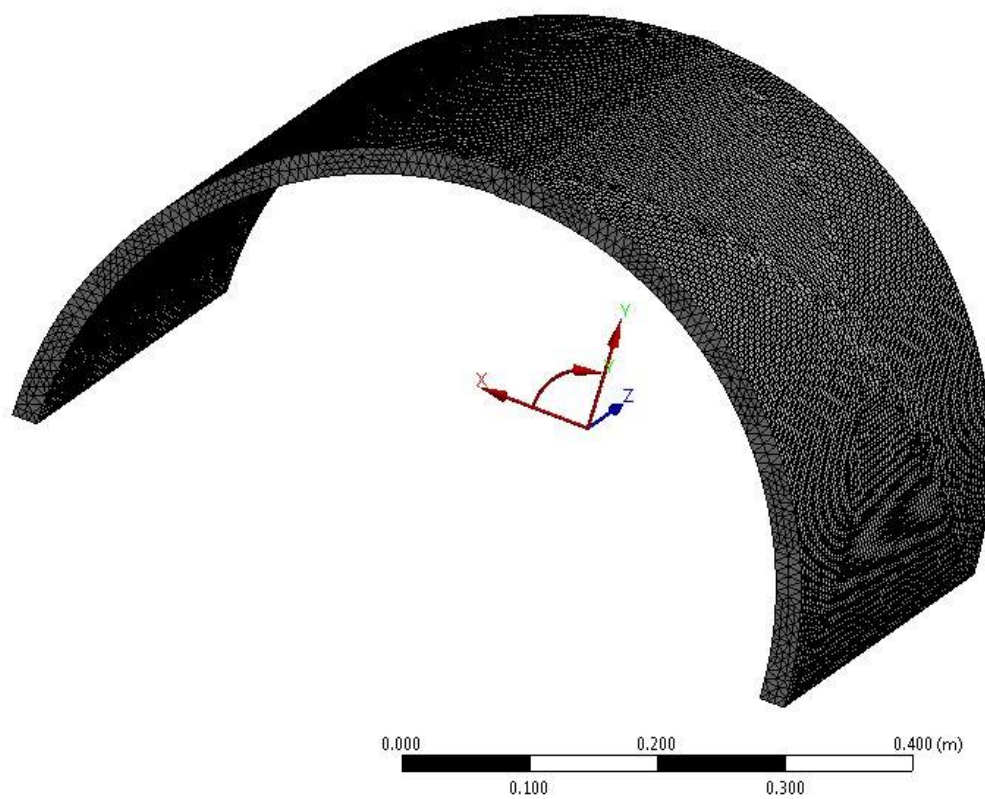


FIGURA 3. 19 – Malha utilizada no modelo

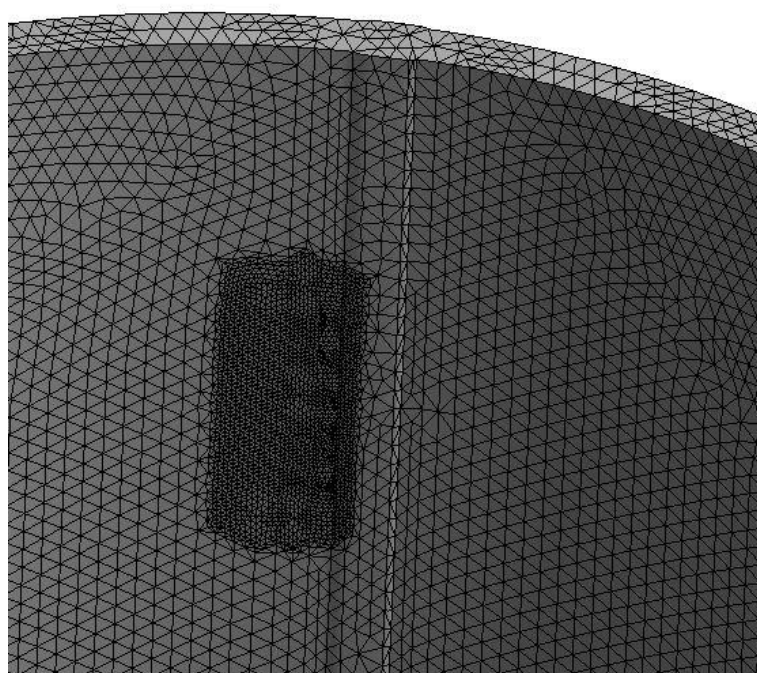


FIGURA 3. 20 – Refinamento da malha na margem da solda

3.2.2 Cálculos analíticos – Validação modelo do tubo com pressão interna

Para validação das simulações em elementos finitos da tubulação submetida a pressões internas, foram realizados cálculos analíticos utilizando a EQ. (2.7).

3.3 Correlação entre a força aplicada no ensaio de flexão e a pressão interna no tubo

Após a validação dos modelos, para cada carga aplicada na simulação por flexão em três pontos foram calculadas (EQ. 2.2) as tensões “hot spot” atuantes na margem da solda, e posteriormente através de interações, foram obtidas as pressões internas responsáveis por gerar o mesmo nível de tensões “hot spot” na margem da solda do tubo.

Desta forma foi possível correlacionar cada carga estática aplicada no ensaio de flexão por três pontos com a pressão interna responsável por gerar o mesmo estado de tensões na margem da solda. Assim é possível traduzir a curva de fadiga levantada no item 3.4 em uma curva de pressão por ciclos até a falha.

3.4 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga são realizados com a mesma configuração dos ensaios do item 3.1, porém com aplicação de cargas cíclicas com razão de tensões igual a 0,1 ($R=0,1$) que representa as razões de tensões atuantes no mineroduto e frequência= 15 Hz. Através destes ensaios foi levantada a curva força por ciclos até a falha, F-N, que pode ser utilizada na avaliação de fadiga. Esta curva é transformada posteriormente em curva de pressão por ciclos até a falha, P-N.

3.5 Contagem de ciclos

De posse dos dados históricos de pressão, é possível realizar a contagem de ciclos pelo método Rainflow, através de uma planilha em Excel automatizada, onde inserindo os dados de pressão em uma base de tempo fixa, por exemplo, de segundo em segundo, é gerado o resultado das pressões agrupadas em classes.

3.6 Avaliação de fadiga do mineroduto em operação

Através dos resultados do rainflow e da curva de fadiga, é possível obter uma estimativa do dano em fadiga do duto através da contagem de dano acumulado (EQ. 2.1).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio para verificação da especificação do material

Os ensaios mecânicos e de composição química foram realizados no laboratório de ensaios e análise de materiais do Senai de Itaúna-MG. Todos os resultados do material do tubo utilizado na confecção dos corpos de prova ensaiados estão conforme a especificação da norma API 5L para o material API X70.

4.1.1 Ensaio de composição química

No anexo A é possível verificar o resultado da composição química do material onde a proporção de todos os elementos estão conforme a especificação da API 5L.

4.1.2 Ensaio de tração

A TAB. 4.1 apresenta os valores médios de 03 ensaios de tração, estando todos conforme a especificação da API 5L que prevê um limite de resistência mínimo à tração transversal à solda de 570 MPa, limite de resistência mínimo à tração transversal à 180° da solda de 570 MPa e máximo de 760 MPa e alongamento mínimo de 20%.

TABELA 4. 1
Valores médios de 03 ensaios de tração

Resistência à Tração Transversal a Solda (MPa)	657
Resistência à Tração Transversal na posição 180° em relação a solda (MPa)	656
Limite de Escoamento Transversal na posição 180° em relação a solda (MPa)	581
Alongamento Percentual Após Ruptura (%) transversal na posição 180° em relação a solda	27,7

FONTE – Anexo A

4.1.3 Ensaio de impacto Charpy “V”

A TAB. 4.2 apresenta os valores médios de 03 ensaios de Charpy “V” onde todos os resultados estão conforme a especificação da API 5L que prevê uma energia mínima de 27J. Como a escala máxima da máquina é de 300 J, resultados acima de 80% tornam-se imprecisos, sendo considerados maiores que 240 J.

TABELA 4. 2
Valores médios de 03 ensaios de Charpy

Amostras CVN na região da solda		
	Energia Absorvida Kv (J)	Energia Absorvida (J/mm ²)
Amostras com entalhes no sentido longitudinal a solda	123	1,54
Amostras com entalhes no sentido longitudinal na ZTA	>240	3,66
Amostras com entalhes no sentido Radial na ZTA (FIG. R) da face interna do tubo para fora	>240	3,67
Amostras CVN no corpo do tubo (90° em relação a solda)		
Amostras com entalhes no sentido longitudinal.	>240	3,69
Amostras com entalhes no sentido radial. (Da face interna do tubo para fora)	>240	3,69

FONTE – Anexo A

4.1.4 Ensaio de dobramento guiado

Todos os corpos de prova utilizados nos ensaios de dobramento guiado estavam em conformidade com os critérios especificados na API 5L, não apresentando fraturas ou trincas acima dos critérios determinados.

4.1.5 Medição de microdureza

Na TAB. 4.3 são mostradas as médias dos resultados de medição de microdureza, estando todas em conformidade com a especificação da norma API 5L que prevê uma microdureza máxima de 300 HV.

TABELA 4. 3
Resultados de microdureza por região

Região	Dureza média (HV)
Metal de Base (MB)	229
Zona Termicamente Afetada (ZTA)	221
Metal de Solda (MS)	253

4.2 Verificação do sistema de condicionamento e aquisição de dados

No GRA. 4.1 são mostrados os resultados obtidos nos testes para verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados da FIG. 3.13 com o extensômetro submetido a tração e no GRA. 4.2 são mostrados os resultados com o extensômetro submetido a compressão. Foram utilizadas massas variando de 755 a 7760 gramas nestes testes e as deformações medidas foram transformadas em tensões com um módulo de elasticidade igual a 200 GPa.

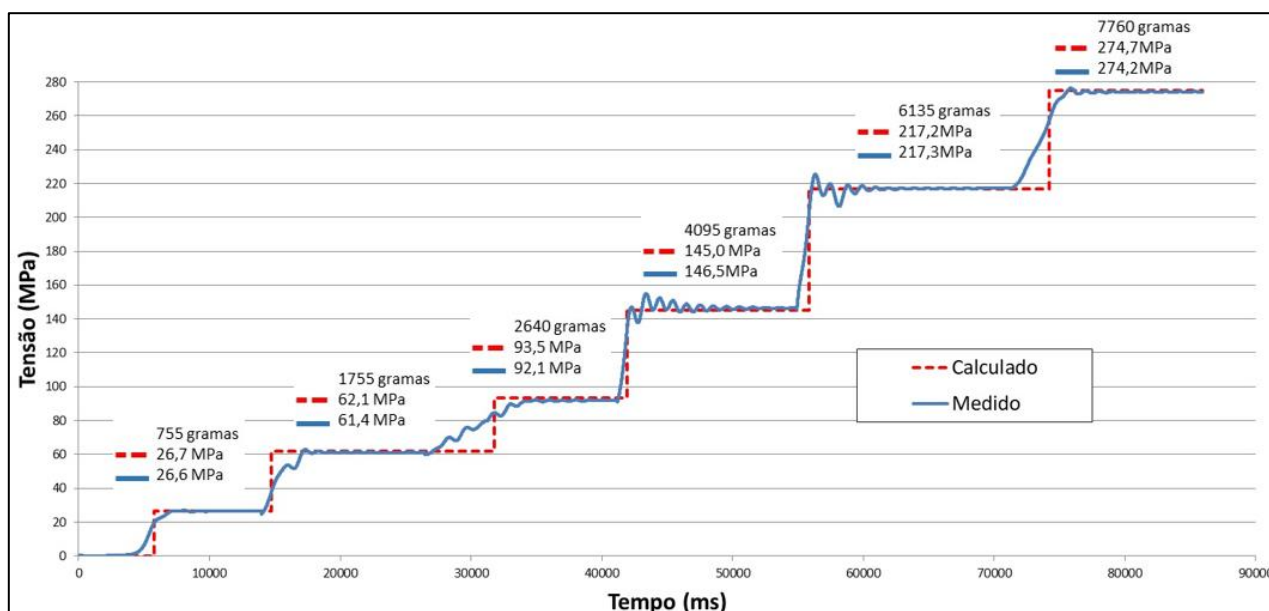


GRÁFICO 4. 1 - Resultado do teste para verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados – Extensômetro submetido a tração

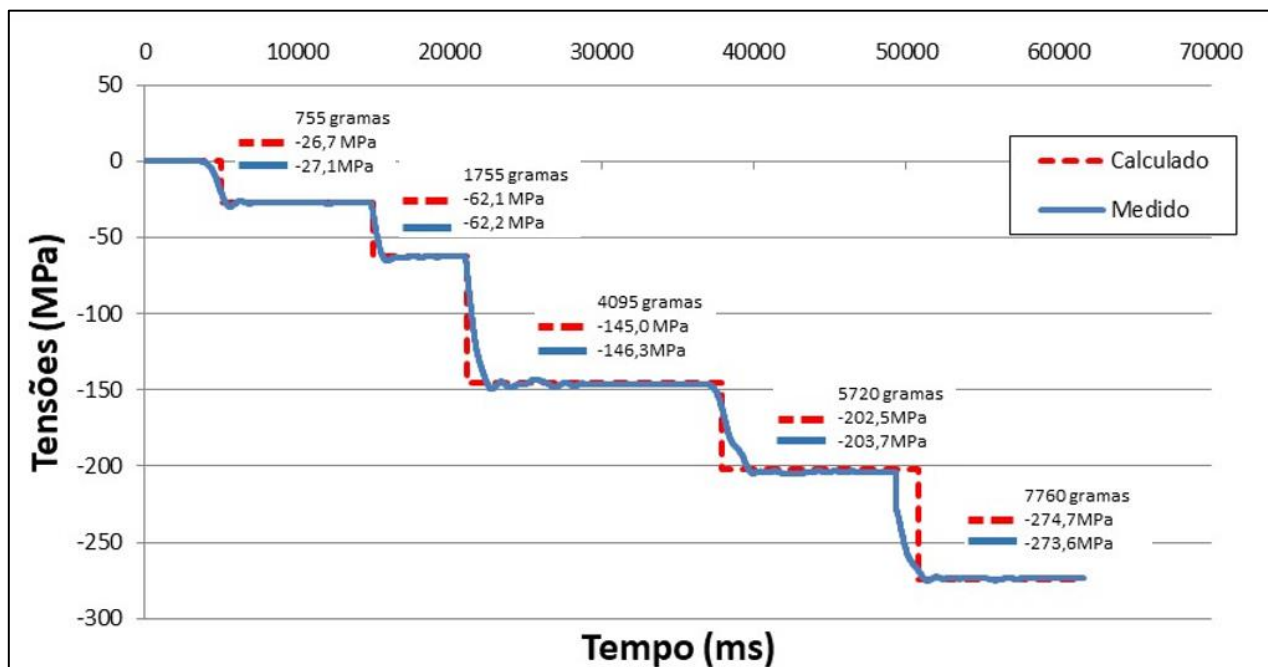


GRÁFICO 4. 2 - Resultado do teste para verificação do funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados – Extensômetro submetido a compressão

Os resultados mostram que o sistema de condicionamento e aquisição de sinais estavam funcionando de forma satisfatória.

4.3 Resultados da extensometria dos testes de flexão em três pontos

No GRA. 4.3 estão sumarizados os resultados apresentados no apêndice A1 das medições de deformação dos extensômetros para cada carga aplicada nos testes de flexão em três pontos. As deformações obtidas foram convertidas em tensões mecânicas considerando módulo de elasticidade igual a 200 GPa. Durante a realização dos testes, houve rompimento do terminal do extensômetro do lado esquerdo na posição 1,0t, impossibilitando a aquisição de deformações nesta posição; entretendo a falta destes dados não atrapalhou nas análises dos resultados. É possível observar uma pequena diferença entre as tensões entre o lado direito e o esquerdo, que pode ser resultante de uma pequena descentralização da aplicação da força no corpo de prova ou da irregularidade de sua própria geometria.

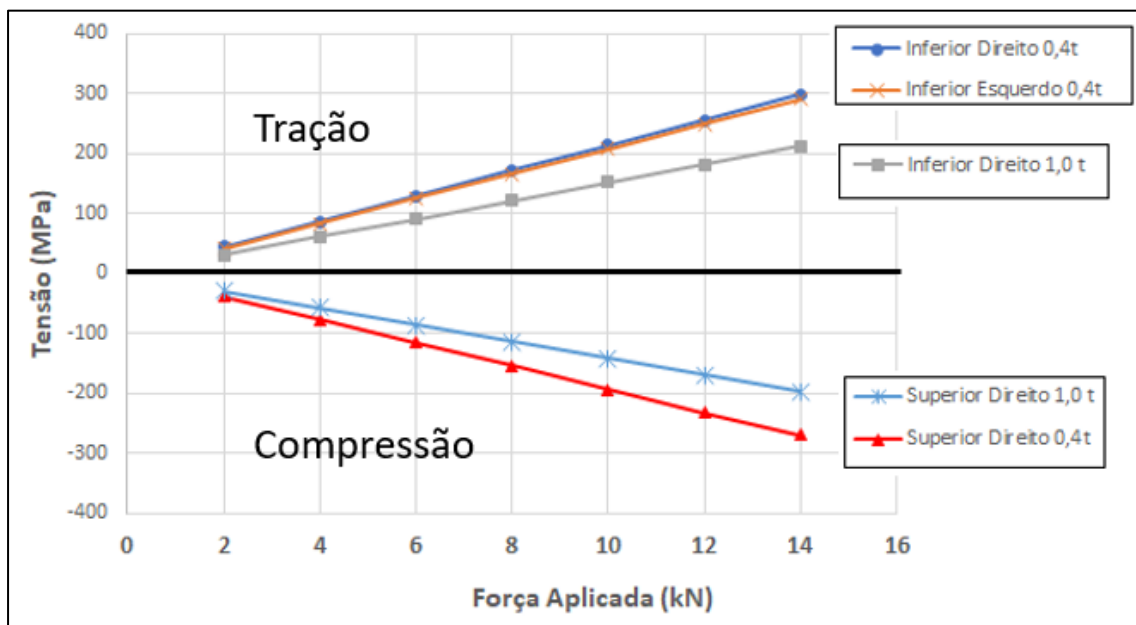


GRÁFICO 4. 3 – Resultados das tensões medidas por extensometria nos testes de flexão em três pontos

4.4 Resultados das simulações em Elementos Finitos de flexão em três pontos

No GRA. 4.4 estão sumarizados os resultados apresentados no apêndice A2 das simulações em elementos finitos de flexão em três pontos na superfície inferior e superior .

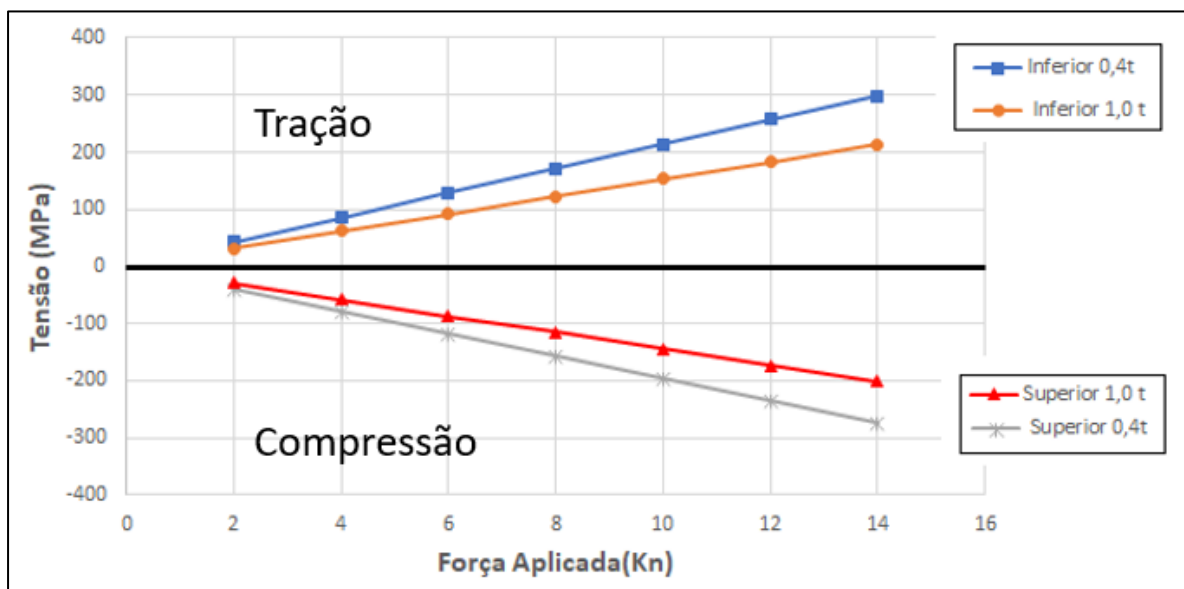


GRÁFICO 4. 4 - Simulações em elementos finitos de flexão em três pontos

4.5 Validação das simulações de flexão em três pontos

No GRA. 4.5 estão sumarizados os resultados das comparações entre os resultados da extensometria e das simulações dos elementos finitos apresentados no apêndice A3.

Como a diferença dos resultados da medição com extensômetros e simulações foi mínima, a simulação em elementos finitos foi validada.

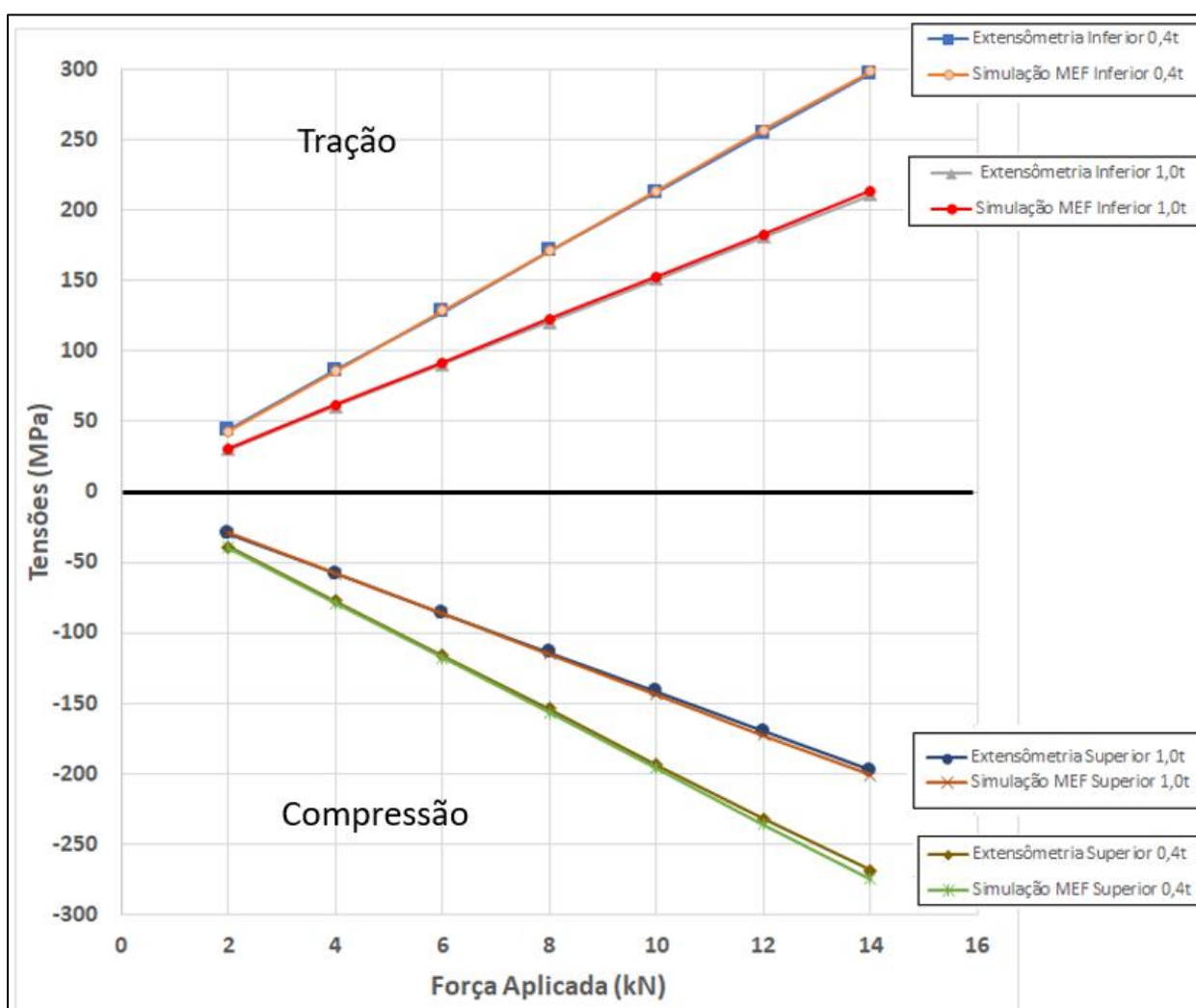


GRÁFICO 4. 5 - Comparação entre os resultados da extensometria e simulação em elementos finitos

4.6 Resultados dos cálculos analíticos do tubo com pressão interna

Na TAB. 4.4 são apresentados os resultados dos cálculos da tensão devido à pressão interna pela equação 2.7.

TABELA 4. 4
Resultados cálculos analíticos de tensão devido à pressão interna

Pressão (MPa)	Tensão parede interna (MPa)	Tensão parede externa (MPa)
1,00	15,55	14,55
5,00	77,72	72,72
10,00	155,45	145,45
15,00	233,17	218,17
20,00	310,90	290,90

4.7 Resultados das simulações do tubo com pressão interna

Na TAB. 4.5 são apresentados os resultados das simulações em elementos finitos do tubo submetido à pressão interna.

TABELA 4. 5
Resultados das simulações em elementos finitos devido à pressão interna

Pressão (MPa)	Tensão parede interna (MPa)	Tensão parede externa (MPa)
1,00	15,55	14,53
5,00	77,75	72,65
10,00	155,50	145,35
15,00	233,25	218,05
20,00	310,95	290,80

4.8 Validação das simulações em elementos finitos do tubo com pressão interna

No GRA. 4.6 estão sumarizados os resultados apresentados no apêndice A.4 das comparações entre as tensões dos cálculos analíticos e das simulações em elementos finitos devido as pressões internas

atuando na tubulação. É possível verificar uma diferença mínima nos valores obtidos, validando assim o modelo em elementos finitos.

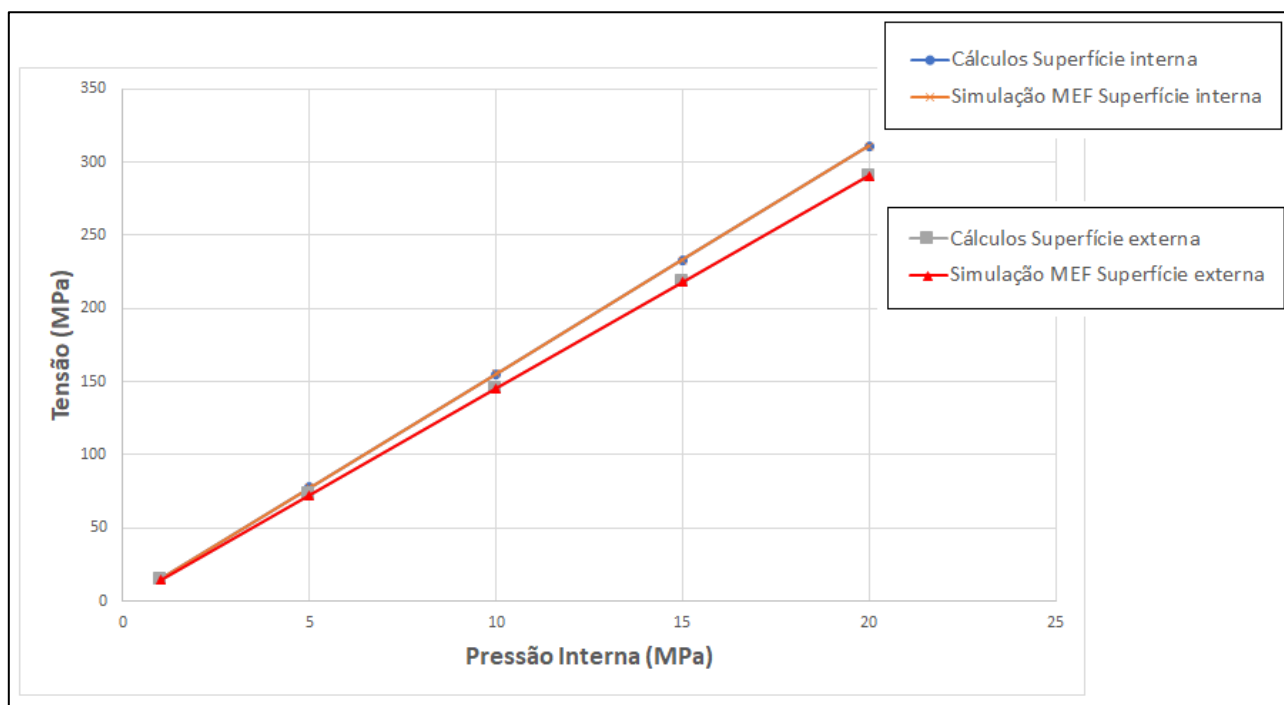


GRÁFICO 4. 6 - Comparação entre as tensões dos cálculos analíticos e das simulações em elementos finitos devido as pressões internas na tubulação

4.9 Correlação entre a força aplicada nos ensaios de flexão e as pressões de operação

Através da EQ. 2.2 foram calculadas as tensões “hot spot” das simulações de flexão em três pontos e os resultados apresentados no apêndice A.5 estão sumarizados no GRA. 4.7.

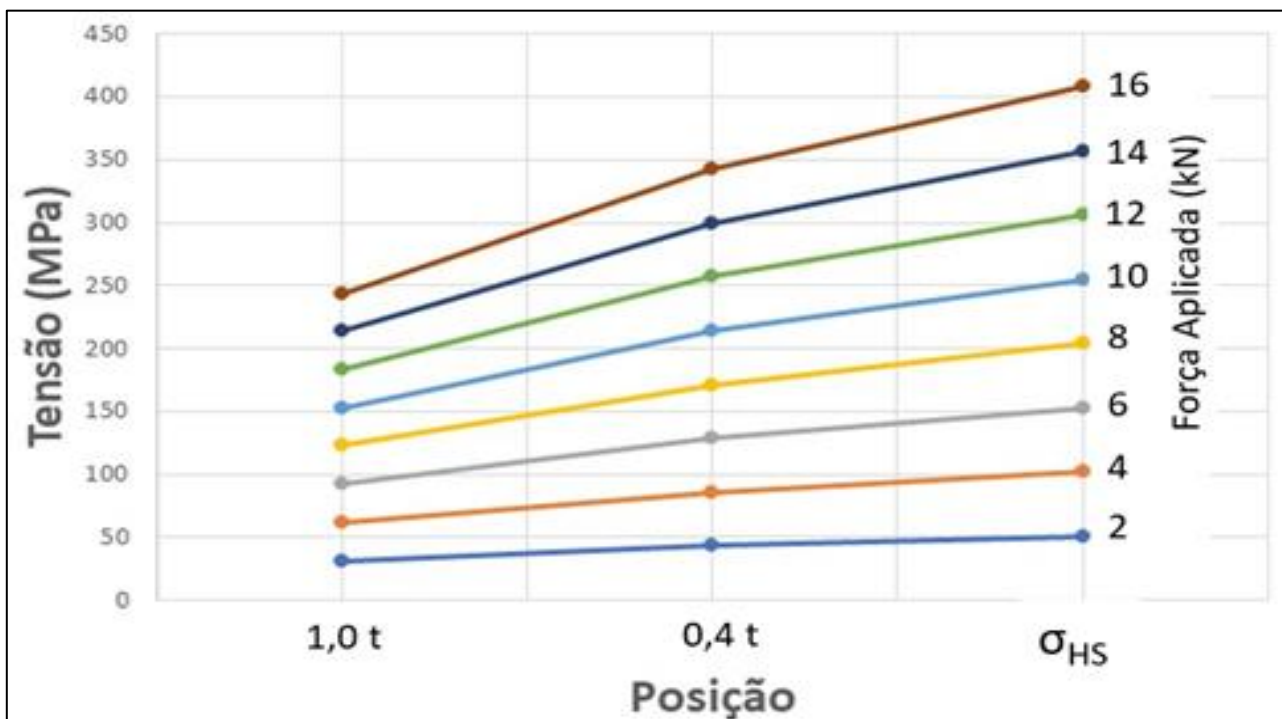


GRÁFICO 4.7 - Resultado da tensão “hot-spot” para cada força aplicada nos ensaios de flexão em três pontos

Conforme demonstrado na FIG. 4.1, através de interações nas simulações do tubo com pressão interna, foram encontradas as pressões que resultavam nas mesmas tensões “hot spot” do GRA. 4.7. Assim foi possível correlacionar a pressão interna no tubo que proporciona a mesma tensão “hot spot” na margem da solda provocada pela força aplicada no ensaio de flexão em três pontos (TAB. 4.6).

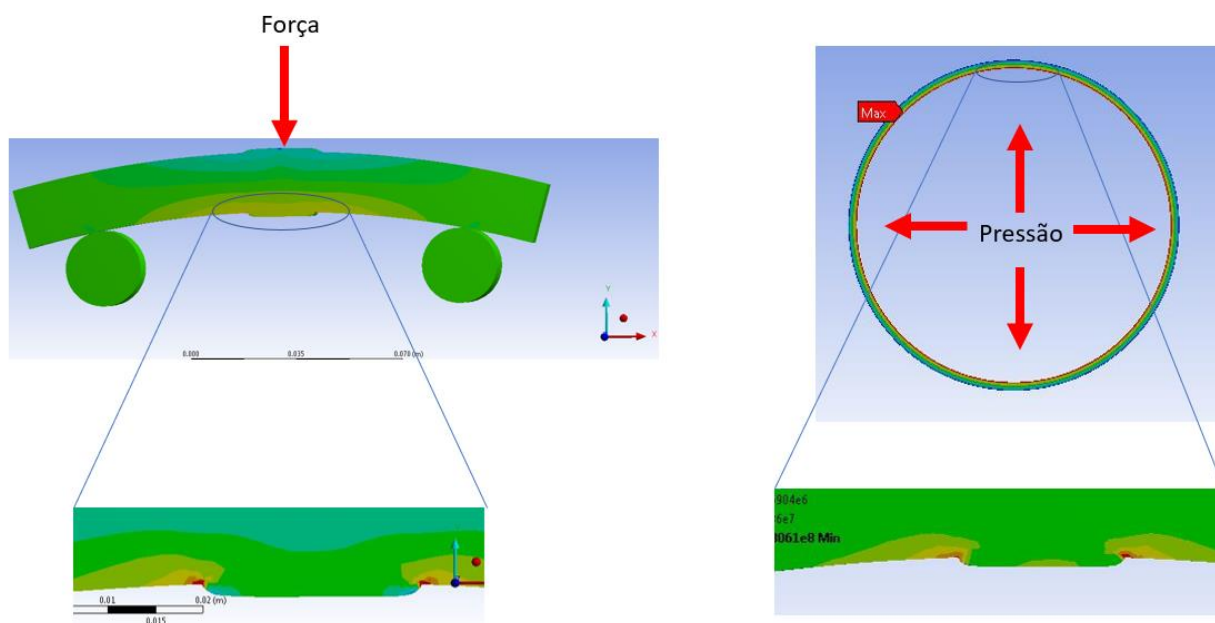


FIGURA 4. 1 - Correlação entre o estado de tensões na margem da solda devido á força na simulação de flexão e devido à pressão interna na simulação operacional

TABELA 4. 6

Correlação entre força do ensaio de flexão em três pontos com a pressão interna no tubo que proporciona a mesma tensão “hot spot” na margem da solda

Força Flexão Três pontos (kN)	Tensão “Hot Spot” (MPa)	Pressão Interna no tubo (MPa)
2,00	51,20	3,20
4,00	102,00	6,40
6,00	153,00	9,59
8,00	204,00	12,80
10,00	255,00	16,00
12,00	306,00	19,17
14,00	357,00	22,36
16,00	408,00	25,55

4.10 Resultados testes de fadiga

Para obtenção da curva de fadiga por flexão em três pontos foram ensaiados 24 (vinte e quatro) corpos de prova com a dimensão da FIG 3.7 até a falha. A FIG. 4.2 mostra uma trinca se propagando em um destes ensaios e no apêndice A.6 são apresentados os números de ciclos até a falha para cada força aplicada. No GRA. 4.8 estão plotados os resultados do log da força pelo log de ciclos (curva F-N) e o limite inferior à 2 (dois) desvios padrões da média. Apesar da dispersão

dos resultados, que é um fato normal nos ensaios de fadiga, o coeficiente de determinação (R^2) encontrado foi igual a 0,9864, indicando uma boa regressão linear dos resultados dos testes.

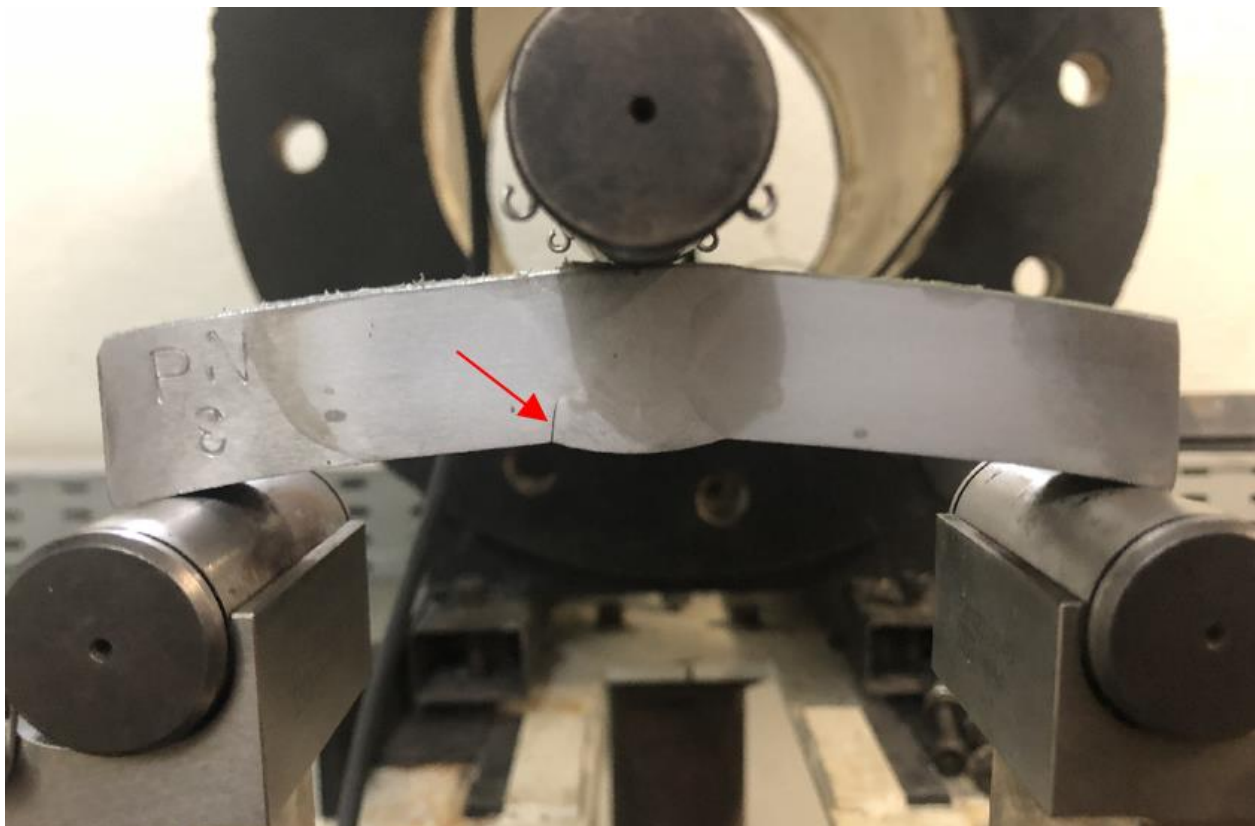


FIGURA 4. 2 – A Seta mostra uma trinca se propagando no ensaio de fadiga

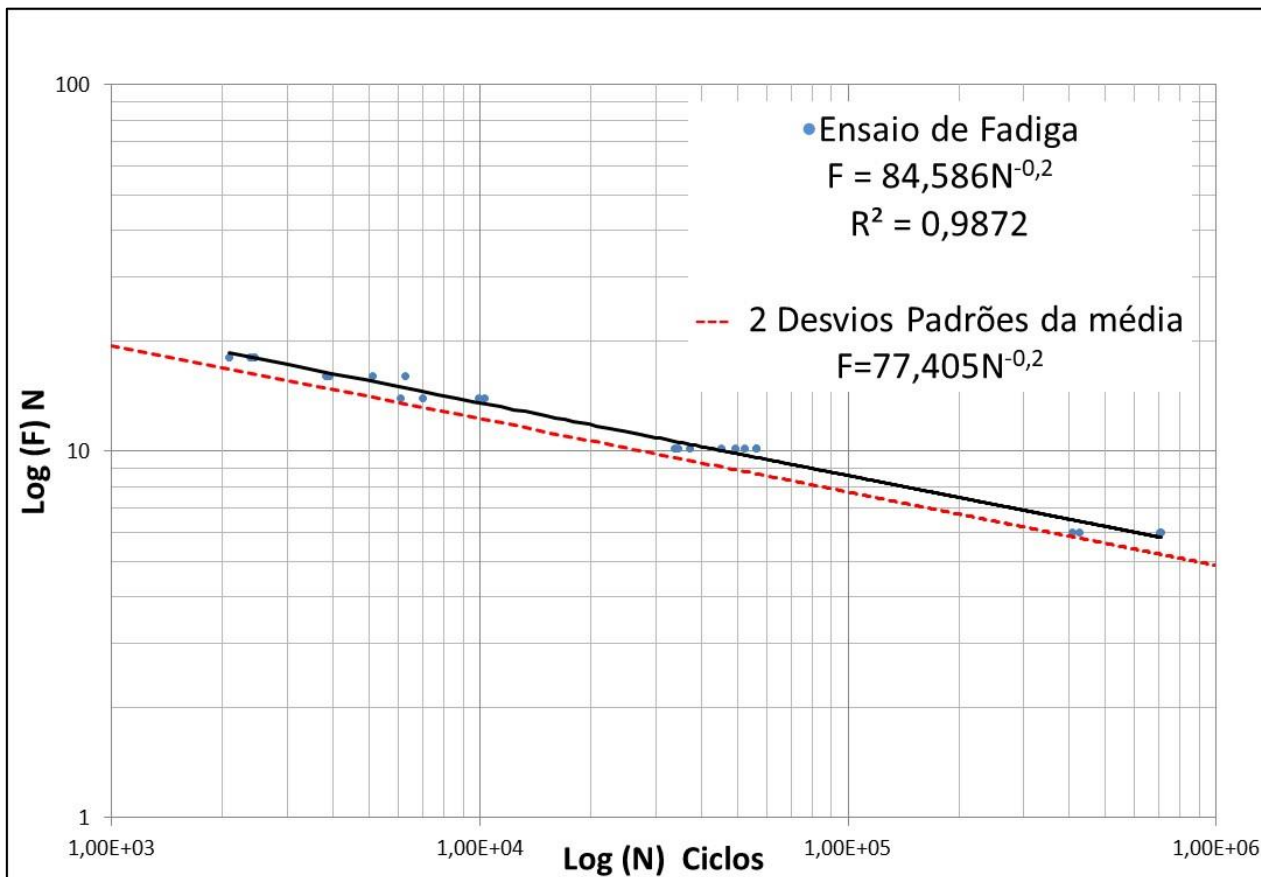


GRÁFICO 4. 8 –Resultado ensaio de fadiga de flexão em três pontos – log da força pelo log dos ciclos até a falha

4.11 Conversão da Curva F-N para P-N

Com a correlação encontrada no item 4.9 foi possível realizar a conversão da força utilizada nos ensaios de flexão em três pontos em pressão interna na tubulação conforme apêndice A.7. No GRA. 4.9 estão plotados os resultados do log da pressão pelo log de ciclos até a falha.

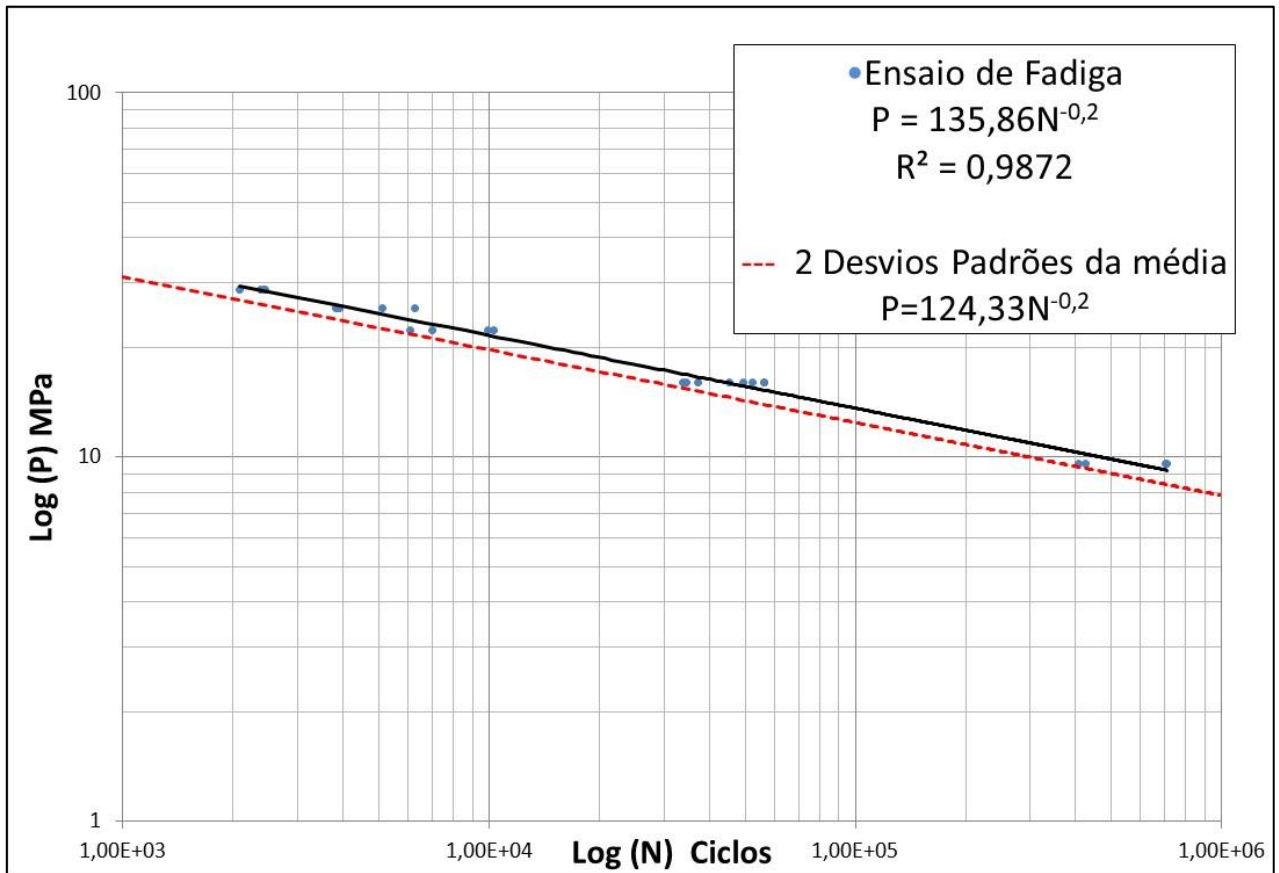


GRÁFICO 4. 9 –Curva do log de pressão pelo log dos ciclos até a falha

4.12 Comparação dos resultados de fadiga

Para cada pressão do GRA. 4.9, foram calculadas as tensões nominais na parede interna do tubo e os resultados foram plotados no GRA. 4.10. A curva gerada foi comparada com a curva de fadiga da FIG 2.17 da norma DIN 2413-1 (1993), onde é possível verificar que os resultados foram aproximados. Considerando que os resultados da DIN 2413-1 (1993) são de testes em tubos em escala real, a correlação encontrada no item 4.9 obtém valores próximos a realidade.

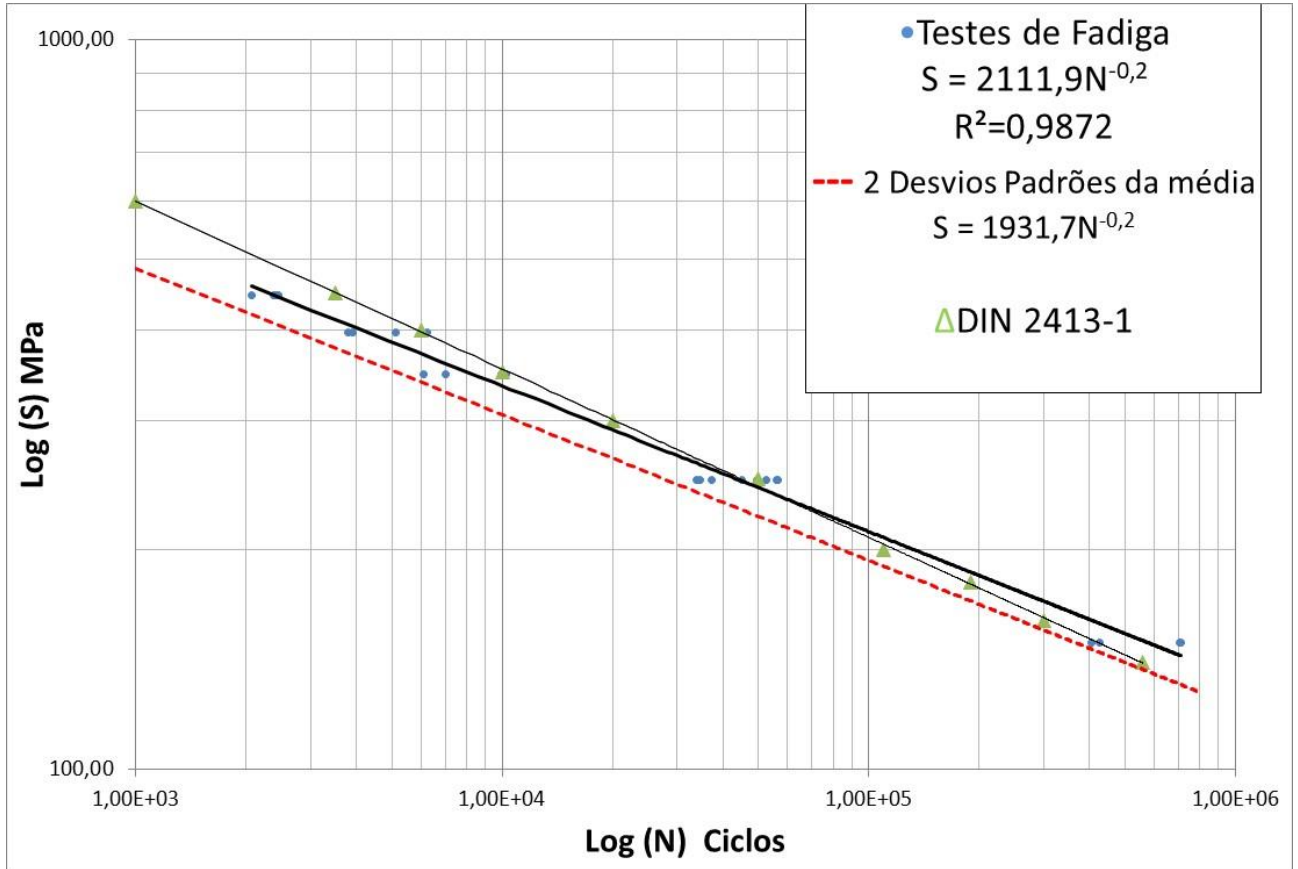


GRÁFICO 4. 10 – Comparação entre os ensaios de fadiga realizados e os resultados da norma DIN 2413-1 (1993)

4.13 Exemplos de análise de fadiga em mineroduto

4.13.1 Mineroduto operando em bateladas

Neste exemplo hipotético, um mineroduto operando em bateladas de polpa e água é avaliado em fadiga, considerando que não existam pulsações significativas. Não são considerados desgaste por abrasão ou corrosão.

4.13.1.1 Rainflow das pressões históricas

Na FIG. 4.3 é mostrado um exemplo do histórico de pressão de um mineroduto ao longo de 01 (um) ano e na TAB 4.7 são mostrados os resultados do cálculo do seu rainflow.

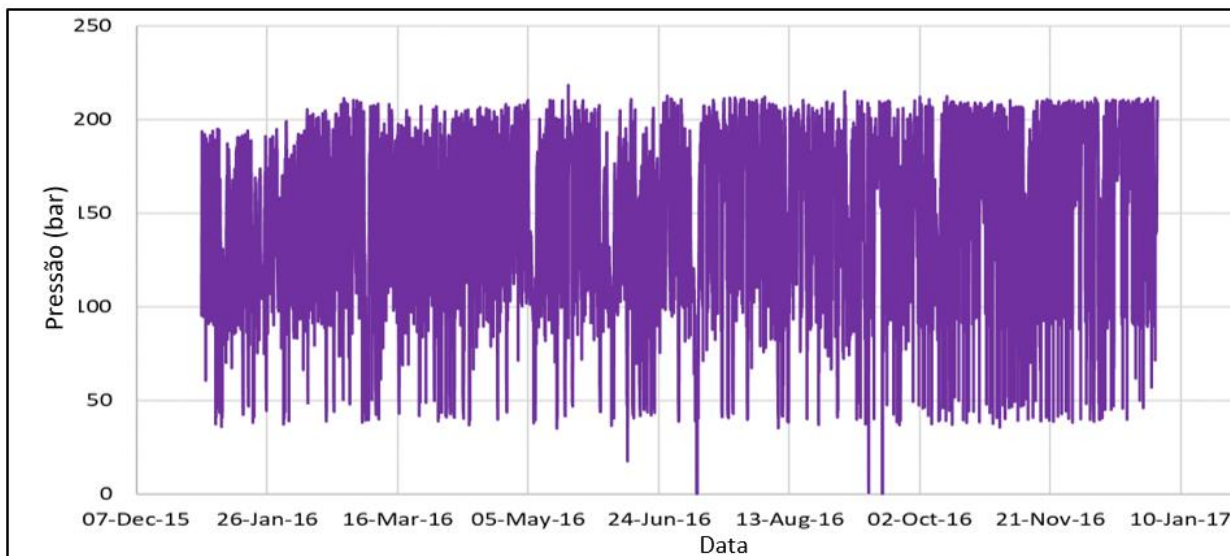


FIGURA 4. 3 - Histórico de pressões hipotético de um mineroduto ao longo do ano

TABELA 4. 7

Resultado do Rainflow do histórico de pressões de um mineroduto ao longo do ano

Mês	ΔP (MPa)	Ciclos
Janeiro	17,82	23,70
Fevereiro	17,35	13,50
Março	17,54	22,40
Abril	17,37	21,90
Maio	17,36	30,40
Junho	17,98	20,90
Julho	17,50	15,70
Agosto	17,38	17,20
Setembro	16,93	13,70
Outubro	16,92	10,30
Novembro	17,38	13,00
Dezembro	17,04	12,30

4.13.1.2 Análise de fadiga pelo dano acumulado

Utilizando a equação da curva do GRA. 4.2 é possível obter a quantidade de ciclos até a falha (N) para cada delta de pressão da TAB. 4.8 e assim aplicar a EQ. 2.1. para se obter o dano acumulado conforme mostrado na TAB. 4.8.

TABELA 4. 8

Cálculo do acumulado em fadiga de um mineroduto ao longo do ano

Mês	ΔP MPa	Ciclos (n)	Ciclos até a Falha (N)	Dano Acumulado (n/N)
Janeiro	17,82	23,70	25.758,44	0,00092
Fevereiro	17,35	13,50	29.441,55	0,000459
Março	17,54	22,40	27.881,11	0,000803
Abril	17,37	21,90	29.272,44	0,000748
Mai	17,36	30,40	29.356,85	0,001036
Junho	17,98	20,90	24.632,56	0,000848
Julho	17,50	15,70	28.201,21	0,000557
Agosto	17,38	17,20	29.188,33	0,000589
Setembro	16,93	13,70	33.279,23	0,000412
Outubro	16,92	10,30	33.377,69	0,000309
Novembro	17,38	13,00	29.188,33	0,000445
Dezembro	17,04	12,30	32.218,85	0,000382
Somatório do dano acumulado				0,007508

Neste exemplo, o dano acumulado para 01 (um) ano de operação foi de 0,007508. Sendo assim, considerando que nos próximos anos as pressões de operação seriam semelhantes, para se atingir o dano acumulado igual a 01 (um), que equivale a falha, seriam necessários 133,2 anos de bombeamento, não sendo um problema para um mineroduto que normalmente é projetado para no máximo 50 anos de operação.

4.13.2 Mineroduto operando em bateladas com pulsações

Neste exemplo hipotético, um mineroduto operando em bateladas de polpa e água é avaliado em fadiga, considerando pulsações de 100% pico a pico, devido ao mal funcionamento do sistema de amortecimento e falta de defasagem entre as bombas de deslocamento positivo operando em paralelo. Não são considerados desgaste por abrasão ou corrosão.

4.13.2.1 Rainflow das pressões históricas

O rainflow devido ao bombeamento em bateladas foi considerado o mesmo calculado no item 4.13.1.1. Para o cálculo do rainflow das pulsações foi considerado uma operação de 20 horas com o sistema de amortecimento inoperante, com uma amplitude de pressões de 10 MPa (100% pico a pico com pressão de operação de 10 MPa) em uma frequência de 8 Hz. Os resultados do rainflow são mostrados na tabela 4.9.

TABELA 4. 9

Resultado do Rainflow do histórico de pressões de um mineroduto ao longo do ano incluindo pulsações

Mês	ΔP MPa	Ciclos
Janeiro	17,82	23,70
Fevereiro	17,35	13,50
Março	17,54	22,40
Abril	17,37	21,90
Maiο	17,36	30,40
Junho	17,98	20,90
Julho	17,50	15,70
Agosto	17,38	17,20
Setembro	16,93	13,70
Outubro	16,92	10,30
Novembro	17,38	13,00
Dezembro	17,04	12,30
Pulsações	15,00	432.000

4.13.2.2 Análise de fadiga pelo dano acumulado

Utilizando a equação da curva do GRA. 4.2 é possível obter a quantidade de ciclos até a falha (N) para cada delta de pressão da TAB. 4.9 e assim aplicar a EQ. 2.1. para se obter o dano acumulado conforme mostrado na TAB. 4.10.

TABELA 4. 10

Cálculo do acumulado em fadiga de um mineroduto ao longo do ano incluindo pulsações

Mês	ΔP MPa	Ciclos (n)	Ciclos até a Falha (N)	Dano Acumulado (n/N)
Janeiro	17,82	23,70	25.758,44	0,00092
Fevereiro	17,35	13,50	29.441,55	0,000459
Março	17,54	22,40	27.881,11	0,000803
Abril	17,37	21,90	29.272,44	0,000748
Maiο	17,36	30,40	29.356,85	0,001036
Junho	17,98	20,90	24.632,56	0,000848
Julho	17,50	15,70	28.201,21	0,000557
Agosto	17,38	17,20	29.188,33	0,000589
Setembro	16,93	13,70	33.279,23	0,000412
Outubro	16,92	10,30	33.377,69	0,000309
Novembro	17,38	13,00	29.188,33	0,000445
Dezembro	17,04	12,30	32.218,85	0,000382
Pulsações	15,00	432.000	462.868,95	0,933309
Somatório do dano acumulado				0,940817

Neste exemplo, o dano acumulado para 01 (um) ano de operação foi de 0,940817. Considerando que nos demais anos de operação as pressões seriam semelhantes e que o sistema de amortecimento e defasagem entre as bombas foi corrigido, para se atingir o dano acumulado igual a 01 (um), que equivale a falha, seriam necessários mais 7,88 anos de operação. Sendo assim pulsações de pressões elevadas, devido ao bombeamento com o sistema de amortecimento com defeito e falta de dessincronização entre as bombas, tem um efeito extremamente severo na vida em fadiga do mineroduto.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se se concluir que:

1. Simulações em elementos finitos podem ser utilizadas para verificações das tensões atuantes no corpo de prova de tubos contendo a solda no teste de flexão em três pontos, sendo validadas pela extensometria.
2. Simulações em elementos finitos podem ser utilizadas para verificações das tensões atuantes no tubo sujeito a pressões internas, sendo validadas por cálculos analíticos.
3. Por comparação entre o estado de tensões na margem da solda foi possível correlacionar a pressão interna no tubo com a força aplicada no ensaio de flexão, podendo-se transformar a curva de fadiga de força em pressão por ciclos até a falha.
4. A curva S-N construída com a metodologia deste trabalho ficou muito próxima de uma curva S-N da norma DIN 2413-1 para tubos com solda SAW.
5. Ensaio por flexão em três pontos em corpos de prova curvos de tubos contendo a solda podem ser utilizados para obtenção da curva de fadiga.
6. A curva de pressão por ciclos até a falha pode ser utilizada para realizar a avaliação em fadiga de minerodutos em operação utilizando a contagem de ciclos dos dados históricos de pressão.
7. Pulsões de pressões elevadas devido ao mal funcionamento do sistema de amortecimento e falta de dessincronização de bombas de deslocamento positivo em paralelo são severos com relação à vida em fadiga, podendo ocasionar vazamentos em um curto período de operação.

ABSTRACT

Slurry pipelines, although generally not designed with fatigue considerations in mind, can be subject to this type of time-dependent failure mechanism driven by their operational cyclic pressure conditions. Undesirable batch pumping of slurry and water, unexpected stops/starts due to low pump stations reliability, problems in the hydraulic dampening system of reciprocating pumps and no phase shift control between the pumps operating in parallel can lead to significant fatigue cycles throughout the pipeline system. This is exacerbated at the long seam weld which is more sensitive to fatigue degradation. To avoid slurry leaks due fatigue induced cracks, it becomes necessary to evaluate the fatigue performance of the long seam weld under realistic operational cyclic loading. The purpose of this work was to demonstrate the applicability of a three-point bend fatigue test on curved specimens containing a weld for use in fatigue assessments of slurry pipelines.

The major challenge of this work was to correlate the stresses at the weld toe due to the application of static load in the three-point bending test in a curved test piece, and the stresses at the weld toe in a pipe submitted to internal pressure during operation. This correlation was made through finite element simulations validated with extensometry and analytical calculations. Thus, a three-point bending fatigue curve, where the result is force by number of cycles to failure, can be converted into an internal pressure curve by number of cycles until failure. With the historic of pipeline operating pressures, it is possible to perform the pressure cycle counting by the rainflow method, and through the new generated curve it is possible to perform the fatigue evaluation by the cumulative damage method. The results demonstrated that it is possible to use the proposed testing approach for the evaluation of the fatigue performance of the slurry pipeline long seam weld.

Key words: *Fatigue, Weld, Slurry Pipelines*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5L: Specification for line pipe**. 44 ed., Outubro 2007.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 579: Fitness-For-Service**. Junho 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 1104: Welding of pipelines and related facilities**. 20 ed., Novembro 2005.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.11 – **Slurry transportation piping systems**. Edition 2002.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. **Fundamentals of metal fatigue analysis**. Editora Prendice Hill, Estados Unidos, 1989.

BRITISH STANDARD. **BS 7910: Guide to methods to assessing the acceptability of flaws in metallic structures**. 2013.

BUENO, A. H. S. **Avaliação integrada de mecanismos de falha por corrosão em dutos**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Coppe UFRJ, 2007.

CHAPMAN, J. P.; LIMA, R; PINTO, D.; VIDAL, A. Slurry Pipeline Technology – An Overview. **Rio Pipeline Conference and Exposition**, Rio de Janeiro, 2009.

CORBO, M. A.; STEARNS, C. F. Practical design against pump pulsations. **Proceedings of the twenty-second international pump users symposium**, 2005.

CROCKER, L.; TURNBULL, A.; **Four-point bending testing – Finite element analysis of the stress and strain distribution**. NPL Report Mat 63, 2014.

DET NORSKE VERITAS. **DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures**. Outubro de 2011.

DIN 2413-1:1993-10 – **Steel pipes – Design of steel pressure pipes**. Alemanha, 1993.

DONG, X.; ZHAO, H.; ZHANG, L.; CHENG, H.; GAO, J. Geometry effects in four-point bending test for thin sheet studied by finite element simulation. **Materials Transactions**, Vol. 57, No. 3, p. 335-343, 2016.

FERNÁNDEZ-CUETO, J. M.; CAPULA-COLINDRES, S.; ANGELES-HERRERA, D.; VELÁZQUEZ, J. C.; MÉNDEZ, G. T. Analysis of 3D planar laminations in a welded section of API 5L X52 applying the finite element method. **Soldagem & Inspeção**, ed. 23, p. 17-31, 2018.

FILHO, A. A. **Elementos finitos, a base da tecnologia cae**. Editora Érica, São Paulo, 2000.

GURNEY, T. **Cumulative damage of welded joints**. Editora Woodhead, 2006.

HEIN, P. R. G.; BRANCHERIAU, L. Comparison between three-point and four-point flexural tests to determining wood strength of *Eucalyptus* specimens. **Maderas. Ciencia y tecnología**, ed. 20, p. 333-342, 2018.

HIBBLER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Ed. Person, 5ª ed., 2006.

HUANG, C. P.; MINEV, P.; LUOC, J.; NANDAKUMAR, K. A phenomenological model for erosion of material in a horizontal slurry pipeline flow. **Wear journal**, ed. 269, p. 190-196, 2010.

KARUPPANAN, S.; WAHAB, A. A.; PATIL, S.; ZAHARI, M. A. Estimation of burst pressure of corroded pipeline using finite element analysis (FEA). **Advanced Materials Research**, v. 879, p. 191-198, 2014.

KHADEMI-ZAHEDI, R.; SHISHESAZ, M. Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes. **Undeground Space**, ed. 4, p. 48-58, 2019.

KIEFNER, J. F.; ROSENFELD, M. J. **Basics of Metal Fatigue in Natural Gas Pipeline Systems - A Primer for Gas Pipeline Operators**. Pipeline Research Council International, 2006.

LAMÉ, M. G. **Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides**. Paris, 1866.

LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M. **Fatigue testing and analysis**. Editora Elsevier, Estados Unidos, 2005.

MA, B. T.; C. LAIRD. **Overview of fatigue behavior in copper single crystals-v. Surface morphology and stage I crack initiation sites for tests at constant strain amplitude**. Acta Metall, vol 37, No. 02, p. 325-336, ,1989.

MADDOX, S. J; Fatigue design rules for welded structures. **Journal of Progress in Structural Engineering and Materials**. V. 2, p. 102-109, 2000.

MADDOX, S. J. **Fatigue strength of welded structures**. Editora Abington, 2 ed, 2002.

MADDOX, S. J; ZHANG, Y. H. Comparison of fatigue of girth-welds in full-scale pipes and small-scale strip specimens. **27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, June 2008.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2011.

MATIOLLI, G. G. **Avaliação da corrosão interna em minerodutos brasileiros para transporte de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – UFMG, Belo horizonte, 2016.

MATSUISHI, M.; ENDO, T. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress. **Japan Society of Mechanical Engineers**, Jukvoka, Japan, 1968.

MILCHAELSEN, F. M. **Riscos geotécnicos em dutos: instrumentação para monitoramento de oleodutos e gasodutos em encostas instáveis**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre, 2011.

MILLER, J. Characteristics of the reciprocating pump. **Proceedings of the fifth international pump users symposium, 1976**.

MINER, M. A. **Cumulative damage in fatigue**. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 12, No.3, p.159-164, 1945.

MINELA, S. N. **Extensometria: estudo e aplicação**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Automotiva), UFSC, Joinville, 2017.

NIEMI, E.; FRICKE, W.; MADDOX, S. J. **Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components**. 2 ed., editora Springer, IIW, 2018.

PALMGREN, A. L. **Endurance of ball bearings**. VDI Zeitschrift, Vol. 68, p. 339, 1924.

REEMMEYER, O.; ERDELEN-PEPPLER, M.; LIESSEM, A.; SALZGITTER, G. K. Enhanced lifetime for internal pressure fatigue of dsaw pipes. **International Pipeline Conference**, 2004.

RIJSWICK, R. V.; VLOT, E. **Pump phase shift control in world's largest iron ore concentrate pipeline**. Weir Minerals, 2017.

SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials**. Editora Kluwer, Netherlands, 2001.

SUN, J.; CHENG, F. Assessment by finite element modeling of the interaction of multiple corrosion defects and the effect on failure pressure of corroded pipelines. **Engineering Structures**, ed. 165, p. 278-286, 2018.

VETTER, G.; SEIDL, B. Pressure pulsation dampening methods for reciprocating pumps. **Proceedings of the tenth international pump users symposium, 1981**.

ANEXO A

A.1 Ensaios do material



SENAI FIEMG
Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaio NBR ISO/IEC 17025

ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA ÓPTICA - BASE FERRO
Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

CRL 0126

Relatório / Report nº 9304/2018

Solicitante / Requester: CEMEF ENGENHARIA LTDA
Endereço / Address: Av. Alfredo Ignácio Nogueira Perido, 305 Complemento 1204 - Jardim Aquarius - São Jo
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente / Customer: CN - MB
Identification by customer:

Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit	Elementos Elements	Concentração Concentration	Unidade Unit
Carbono (C)	0,0904	%	Chumbo (Pb)	0,0014	%
Silício (Si)	0,2501	%	Estanho (Sn)	0,0028	%
Manganês (Mn)	1,7636	%	Ársenio (As)	0,0051	%
Fósforo (P)	0,0239	%	Zircônio (Zr)	0,0015	%
Enxofre (S)	0,0032	%	Bismuto (Bi)	ND	%
Cromo (Cr)	0,0202	%	Cálcio (Ca)	0,0017	%
Molibdênio (Mo)	0,0053	%	Célio (Ce)	ND	%
Níquel (Ni)	0,0063	%	Antimônio (Sb)	ND	%
Alumínio (Al Total)	0,0291	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0034	%	Tântalo (Ta)	0,0090	%
Cobre (Cu)	0,0071	%	Boro (B)	0,0008	%
Nióbio (Nb)	0,0560	%	Zinco (Zn)	ND	%
Titânio (Ti)	0,0143	%	Lantânio (La)	ND	%
Vanádio (V)	0,0432	%	Nitrogênio (N)	0,0099	%
Tungstênio (W)	ND	%	Ferro (Fe) Balanço	97,6412	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação. This report contains results related exclusively specimen sent by requestor and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations
* Temperatura máxima do laboratório: 28°C / Maximum Temperature of laboratory: 28°C.
Procedimento / Método / Procedure / Method
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09 / Analysis performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.
* Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014 / Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.
Observações / Observations
O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.
* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento / Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.



Relatório / Report nº 9304/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:
* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.
Equipamentos / Instruments / Equipment / Instruments:
* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx Identificação 159239, calibrado pelo fabricante / Optical emission spectrometer Spectromaxx, Identification 159239, calibrated by manufacturer.

Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty			
Elemento Element	± U 95% / Uncertainty	Fator de Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom V eff
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	Infinito
Mn	0,0023	2	Infinito
P	0,0083	2	Infinito
S	0,0019	2,05	39,454
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,578
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	Infinito
Cu	0,0041	2,05	58,735
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,15	17,034
W	0,0124	2	Infinito
Pb	0,0007	2	Infinito
Sn	0,0014	2,05	50,571
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0005	2,13	42,45
Ca	0,0002	2	Infinito
Ce	0,0002	2	Infinito
Sb	0,0024	2	Infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,54
Zn	0,0002	2	Infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,52

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the biggest uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

Recepção / Reception	24/08/18	Analista Analyst	Responsável Responsible
Realização / Achievement	27/08/18	Patricia Rosendo	
Emissão / Emission	27/08/18	Laboratorista-CRQ 02102194-2*P	Patricia Rosendo Laboratorista-CRQ 02102194-2*P

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D
 Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itáuna CETEF Marcelino Corradi
 Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270
 Itáuna - MG - Fone: (37) 3249-2400



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaios Mecânicos
 Mechanical Tests Report

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaio nº:4650/2018

Test Report n°:4650/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente: Tração transversal a solda - E1TS1

Client Identification:

ENSAIO TEST	UNIDADE UNITY	RESULTADOS RESULTS
Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength	kgf/mm ²	67,3
	MPa	660
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture	%	ND
Largura Width	mm	12,57
Espessura Thickness	mm	14,28
Força Máxima (F_m) Maximum Force	Kgf	12080

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

ND %

Proof Strength, Plastic Extension

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

ND mm

O corpo de prova rompeu na solda.

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35660-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2



Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio Mecânicos
Mechanical Tests Report

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaio nº:4651/2018

Test Report nº:4651/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Tração transversal a solda - E1T52

Client Identification:

ENSAIO <i>TEST</i>	UNIDADE <i>UNITY</i>	RESULTADOS <i>RESULTS</i>
Resistência à Tração (R_m) / <i>Tensile Strength</i>	kgf/mm ²	66,8
	MPa	655
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / <i>Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit</i>	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) <i>Superior Yield Strength</i>	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / <i>Percentage of Elongation after rupture</i>	%	ND
Largura <i>Width</i>	mm	12,57
Espessura <i>Thickness</i>	mm	14,32
Força Máxima (F_m) <i>Maximum Force</i>	Kgf	12020

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

Proof Strength, Plastic Extension

ND %

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / *Superior Yield Strength:*

Nitido

Comprimento de Medida Original / *Original Length Measure:*

ND mm

O corpo de prova rompeu na solda.

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaios Mecânicos
 Mechanical Tests Report

Ensaio NBR ISO 9503
 17025

CRL 0126

Relatório de Ensaio nº:4652/2018

Test Report nº:4652/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Tração transversal a solda - E1T83
 Client Identification:

ENSAIO TEST	UNIDADE UNITY	RESULTADOS RESULTS
Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength	kg/mm ²	67,1
	MPa	658
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit	kg/mm ²	ND
	MPa	ND
Resistência ao Escoamento Superior (R_{mH}) Superior Yield Strength	kg/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture	%	ND
Largura Width	mm	12,58
Espessura Thickness	mm	14,31
Força Máxima (F_m) Maximum Force	Kgf	12080

Observações do ensaio / Test Observation:	
ND - Não determinado / ND - Not determined	
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) Proof Strength, Plastic Extension	ND %
Resistência ao Escoamento Superior (R_{mH}) / Superior Yield Strength:	Não
Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:	ND mm
O corpo de prova rompeu na solda.	



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaios Mecânicos
 Mechanical Tests Report

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaio nº:4656/2018

Test Report nº:4656/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Tração transversal na posição 180° em relação a solda - E1T180 1

Client Identification:

ENSAIO TEST	UNIDADE UNITY	RESULTADOS RESULTS
Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength	kgf/mm ²	66,7
	MPa	654
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit	kgf/mm ²	60,6
	MPa	594
Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture	%	26,5
Largura Width	mm	12,51
Espessura Thickness	mm	14,22
Força Máxima (F_m) Maximum Force	Kgf	11850

Observações do ensaio / Test Observations:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

0,2 %

Proof Strength, Plastic Extension

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

50,00 mm

Ensaio realizado conforme orientação do cliente.



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaios Mecânicos
 Mechanical Tests Report

Relatório de Ensaio nº:4657/2018

Test Report nº:4657/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Tração transversal na posição 180° em relação a solda - E1T180 2
 Client Identification:

ENSAIO TEST	UNIDADE UNITY	RESULTADOS RESULTS
Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength	kgf/mm ²	67,3
	MPa	660
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite do escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit	kgf/mm ²	56,8
	MPa	577
Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture	%	27,5
Largura Width	mm	12,51
Espessura Thickness	mm	14,25
Força Máxima (F_m) Maximum Force	Kgf	11990

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

0,2 %

Proof Strength, Plastic Extension

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

50,00 mm

Ensaio realizado conforme orientação do cliente.



Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio Mecânicos
 Mechanical Tests Report

Ensaio
 NBR ISO/IEC
 17025

CRL 0126

Relatório de Ensaio nº:4658/2018

Test Report nº:4658/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Tração transversal na posição 180° em relação a solda - E1T180 3

Client Identification:

ENSAIO TEST	UNIDADE UNITY	RESULTADOS RESULTS
Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength	kgf/mm ²	66,9
	MPa	656
Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit	kgf/mm ²	58,5
	MPa	574
Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength	kgf/mm ²	ND
	MPa	ND
Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture	%	29,0
Largura Width	mm	12,53
Espessura Thickness	mm	14,25
Força Máxima (F_m) Maximum Force	Kgf	11940

Observações do ensaio / Test Observations:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

0,2 %

Proof Strength, Plastic Extension

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

50,00 mm

Ensaio realizado conforme orientação do cliente.

SENAI Itaúna CETEF Marcellino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35660-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy
 Test Report of Charpy Impact Strength

Ensaio NBR ISO/IEC 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:4644/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificações do Cliente / Client Identification: Amostra com entalhe no sentido longitudinal - E1L90 1

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contains results referred exclusively specimens sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Resultados Obtidos / Results:

C.P.	Comprimento Length (mm)	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Altura sob o entalhe (mm) Depth Under the Notch	Ângulo de Entalhe Notch Angle	Raio de Entalhe Notch Radius (mm)	Energia Absorvida Absorbed Energy (KV, 300)	Energia Absorvida Absorbed Energy (J/mm ²)
1	54,68	10,00	10,02	8,01	44°36'	0,250	298 J	3,71
2	54,36	9,99	10,03	8,00	45°10'	0,250	297 J	3,70
3	54,27	10,00	10,01	8,01	45°04'	0,250	294 J	3,67
Média / Average:							296 J	3,69

* NS - Não Solicitado
 * NS - Unstressed

* ND - Não Determinado
 * ND - Not Determined



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy
 Test Report of Charpy Impact Strength

Ensaios NBR ISO 14850 17025
 CRL 0126

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:4640/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificações do Cliente / Client Identification: Amostra com entalhe no sentido longitudinal na ZTA - E1LD4

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimens sent to requestor and only be reproduced in full and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Resultados Obtidos / Results:

C.P.	Comprimento Length (mm)	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Altura sob o entalhe (mm) Depth Under the Notch	Ângulo do Entalhe Notch Angle	Raio do Entalhe Notch Radius (mm)	Energia Absorvida Absorbed Energy (KV ₂ 300)	Energia Absorvida Absorbed Energy (J/mm ²)
1	54,52	10,00	10,02	8,02	45°30'	0,250	290 J	3,61
2	54,71	10,00	10,03	8,02	45°17'	0,250	297 J	3,69
3	54,21	10,00	10,02	8,02	44°52'	0,250	296 J	3,68
Média / Average:							294 J	3,66

* NS - Não Solicitado

* NS - Unstressed

* ND - Não Determinado

* ND - Not Determined



Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy
 Test Report of Charpy Impact Strength



ENEM NR 13015C 17622
 CRL 0126

Relatório de Ensaio / Test Report N°:4646/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificações do Cliente / Client Identification: Amostra com entalhe no sentido longitudinal. (Da face interna do tubo para fora) - E1R90 4

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimens sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Resultados Obtidos / Results:

C.P.	Comprimento Length (mm)	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Altura sob o entalhe (mm) Depth Under the Notch	Ângulo do Entalhe Notch Angle	Raio do Entalhe Notch Radius (mm)	Energia Absorvida Absorbed Energy (KV, 300)	Energia Absorvida Absorbed Energy (J/cm²)
1	54,70	10,00	10,02	8,02	44°32'	0,250	296 J	3,68
2	54,38	10,00	10,03	8,02	45°14'	0,250	296 J	3,68
3	54,58	10,00	10,02	8,02	45°07'	0,250	297 J	3,70
Média / Average:							296 J	3,69

* NS - Não Solicitado

* NS - Unstressed

* ND - Não Determinado

* ND - Not Determined



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy
 Test Report of Charpy Impact Strength

ENSAIOS
 NOR ISO/IEC
 17025

CRL 0125

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:4642/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificações do Cliente / Client Identification: Amostra com entalhe no sentido Radial na ZTA da face interna do tubo para lora - E1R07

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimens sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Resultados Obtidos / Results:

C.P.	Comprimento Length (mm)	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Altura sob o entalhe (mm) Depth Under the Notch	Ângulo do Entalhe Notch Angle	Raio de Entalhe Notch Radius (mm)	Energia Absorvida Absorbed Energy (KV ₂ 300)	Energia Absorvida Absorbed Energy (J/mm ²)
1	54,64	10,00	10,02	8,01	45°13'	0,250	297 J	3,70
2	54,60	9,98	10,03	7,99	44°48'	0,250	290 J	3,62
3	54,65	9,99	10,01	8,00	44°52'	0,250	296 J	3,70
Média / Average:							294 J	3,67

* NS - Não Solicitado
 * NS - Unstressed

* ND - Não Determinado
 * ND - Not Determined



Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT
 Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
 Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Relatório de Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy
 Test Report of Charpy Impact Strength

Ensaio
 NBR ISO/IEC
 17025

CRL 0126

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:6056/2018

Solicitante / Client: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTTONI
Endereço / Address: Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco - BELO HORIZONTE - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificações do Cliente / Client Identification: Amostra com entalhe no sentido longitudinal a solda - E1W01, E1W02, E1W03

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimens sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Resultados Obtidos / Results:

C.P.	Comprimento Length (mm)	Largura Width (mm)	Espessura Thickness (mm)	Altura sob o entalhe (mm) Depth Under the Notch	Ângulo do entalhe Notch Angle	Raio do entalhe Notch Radius (mm)	Energia Absorvida Absorbed Energy (KV ₂₀₀)	Energia Absorvida Absorbed Energy (J/mm ²)
1	54,94	10,01	10,01	8,02	45°24'	0,250	86 J	1,07
2	54,39	10,01	10,00	8,02	45°13'	0,250	154 J	1,92
3	54,29	10,00	10,01	8,01	45°07'	0,250	130 J	1,62
Média / Average:							123 J	1,54

* NS - Não Solicitado

* NS - Unrequested

* ND - Não Determinado

* ND - Not Determined

APÊNDICE A

A.1 Resultados da extensometria dos testes de flexão em três pontos

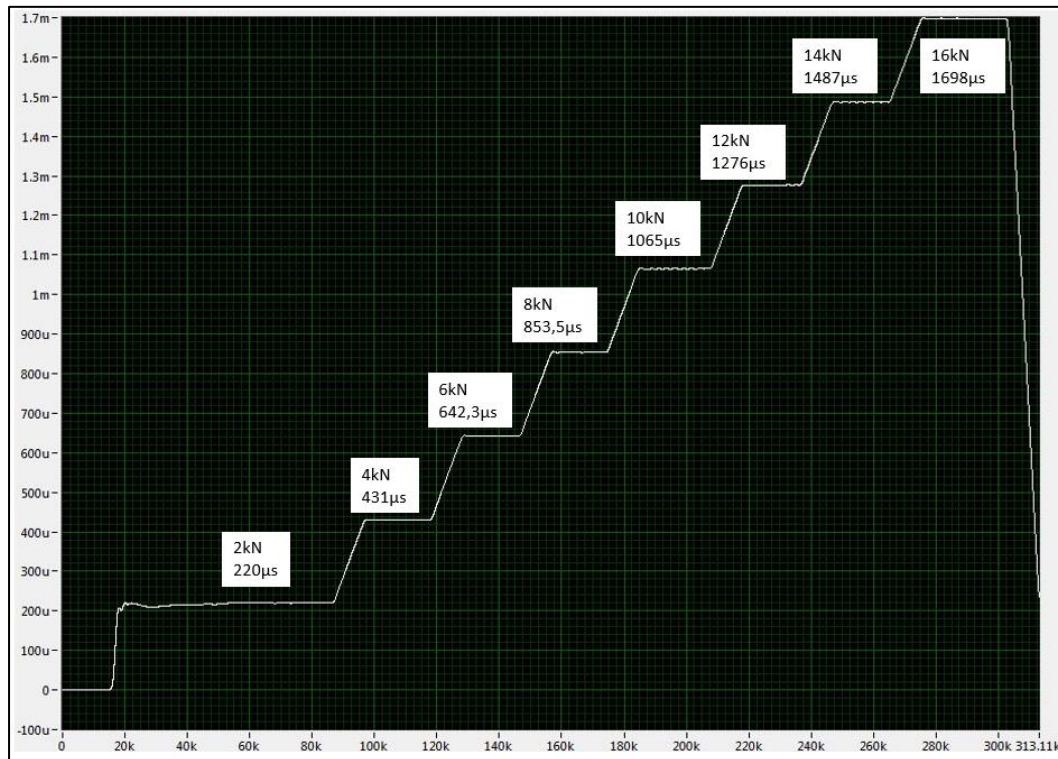


GRÁFICO A. 1 - Resultado de deformação do extensômetro do teste de flexão em três pontos na superfície inferior, lado direito na posição 0,4t.

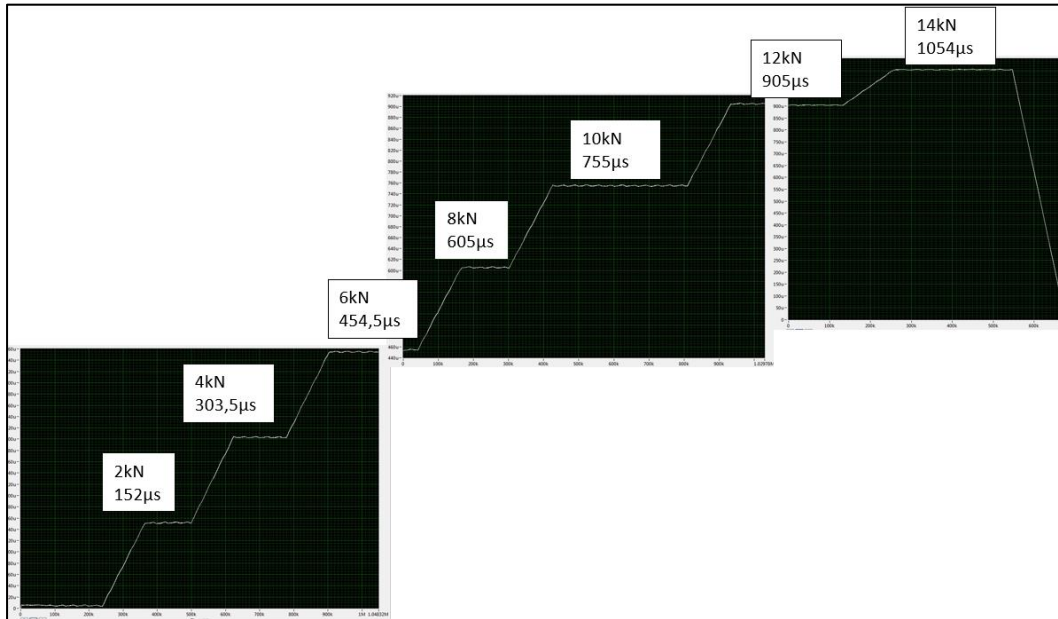


GRÁFICO A. 2 - Resultado de deformação do extensômetro do teste de flexão em três pontos na superfície inferior, lado direito na posição 1,0t.

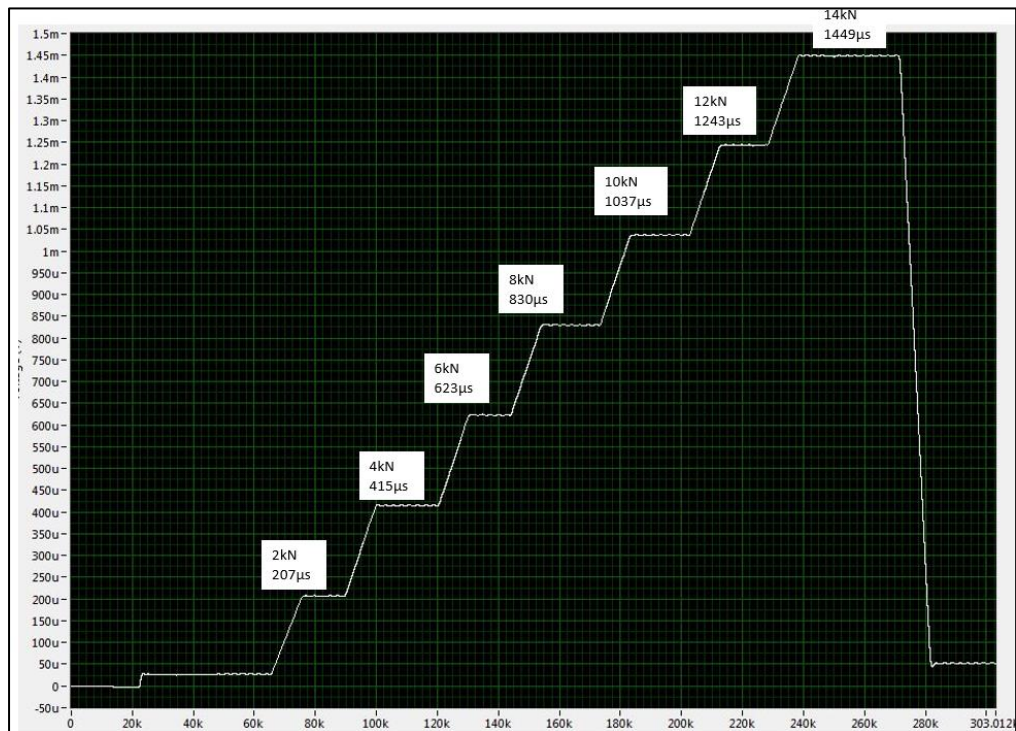


GRÁFICO A. 3 - Resultado de deformação do extensômetro do teste de flexão em três pontos na superfície inferior, lado esquerdo na posição 0,4t.

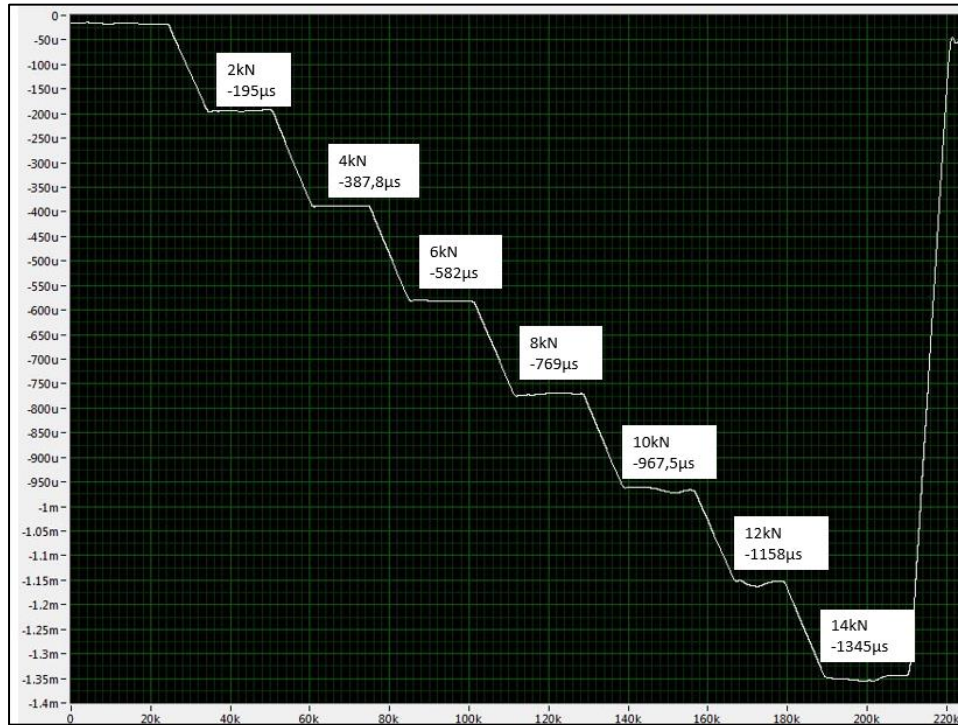


GRÁFICO A. 4 - Resultado de deformação do extensômetro do teste de flexão em três pontos na superfície superior, lado direito na posição 0,4t.

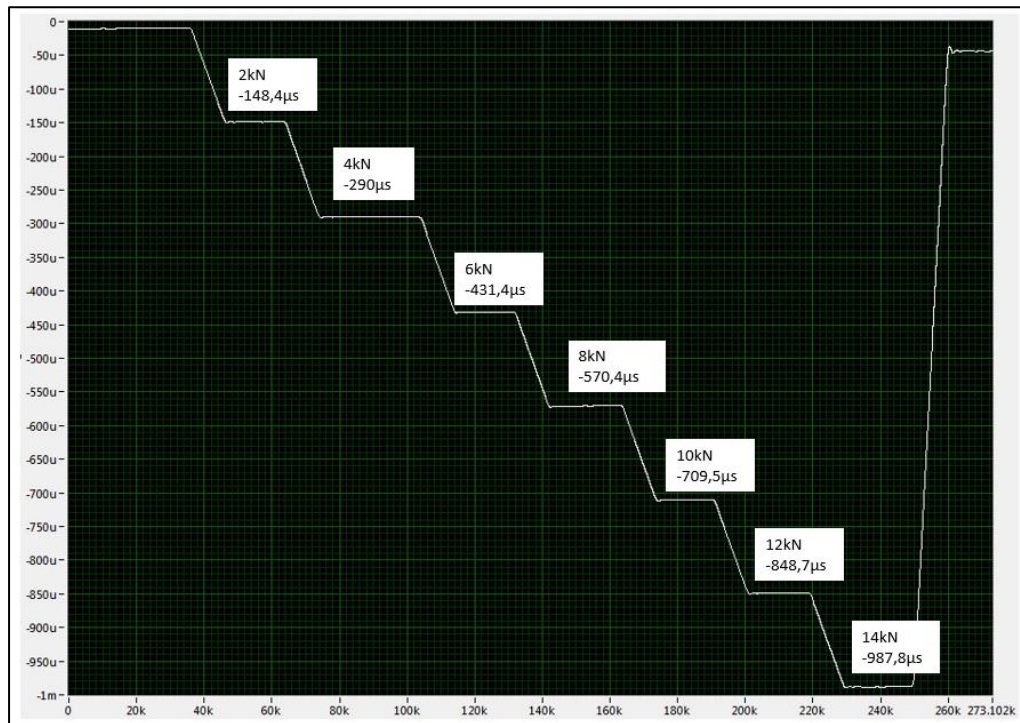


GRÁFICO A. 5 - Resultado de deformação do extensômetro do teste de flexão em três pontos na superfície superior, lado direito na posição 1,0t.

TABELA A. 1

Resultados obtidos na extensometria da superfície inferior

Força (kN) Aplicada	Tensão (MPa) Lado Direito 0,4t	Tensão (MPa) Lado direito 1,0 t	Tensão (MPa) Lado esquerdo 0,4t	Tensão (MPa) Lado esquerdo 1,0 t
2,0	44,0	30,4	41,4	Defeito
4,0	86,2	60,7	83,0	Defeito
6,0	128,0	90,9	125,0	Defeito
8,0	171,0	121,0	166,0	Defeito
10,0	213,0	151,0	207,0	Defeito
12,0	255,0	181,0	249,0	Defeito
14,0	297,0	211,0	290,0	Defeito

TABELA A. 2

Resultados obtidos na extensometria da superfície superior

Força (kN) Aplicada	Tensão (MPa) Lado Direito 0,4t	Tensão (MPa) Lado direito 1,0 t
2,0	-39,0	-29,7
4,0	-77,6	-58,0
6,0	-116,0	-86,3
8,0	-154,0	-114,0
10,0	-194,0	-142,0
12,0	-232,0	-170,0
14,0	-269,0	-198,0

A.2 Resultados das simulações em Elementos Finitos de flexão em três pontos

TABELA A. 3

Resultados das simulações de elementos finitos superfície inferior

Força (kN) Aplicada	Tensão (MPa) Posição 0,4t	Tensão (MPa) Posição 1,0 t
2,0	43,0	30,8
4,0	85,9	61,7
6,0	129,0	92,0
8,0	171,0	123,0
10,0	214,0	153,0
12,0	257,0	183,0
14,0	299,0	214,0

TABELA A. 4

Resultados das simulações de elementos finitos superfície superior

Força (kN) Aplicada	Tensão (MPa) Posição 0,4t	Tensão (MPa) Posição 1,0 t
2,0	-39,4	-28,9
4,0	-78,8	-57,8
6,0	-118,0	-86,5
8,0	-157,0	-115,0
10,0	-196,0	-144,0
12,0	-236,0	-173,0
14,0	-275,0	-201,0

A.3 Validação das simulações de flexão em três pontos

TABELA A. 5

Comparação das tensões na posição 0,4t da superfície Interna

Força (kN) Aplicada	Extensometria Tensão (MPa) Posição 0,4t	Simulação MEF Tensão (MPa) Posição 0,4t	Diferença (%)
2,0	44,0	43,0	2,3
4,0	86,2	85,9	0,3
6,0	128,0	129,0	0,8
8,0	171,0	171,0	0,0
10,0	213,0	214,0	0,5
12,0	255,0	257,0	0,8
14,0	297,0	299,0	0,7

TABELA A. 6

Comparação das tensões na posição 1,0t da superfície Interna

Força (kN) Aplicada	Extensometria Tensão (MPa) Posição 1,0t	Simulação MEF Tensão (MPa) Posição 1,0t	Diferença (%)
2,0	30,4	30,8	1,3
4,0	60,7	61,7	1,6
6,0	90,9	92,0	1,2
8,0	121,0	123,0	1,7
10,0	151,0	153,0	1,3
12,0	181,0	183,0	1,1
14,0	211,0	214,0	1,4

TABELA A. 7

Comparação das tensões na posição 0,4t da superfície Externa

Força (kN) Aplicada	Extensometria Tensão (MPa) Posição 0,4t	Simulação MEF Tensão (MPa) Posição 0,4t	Diferença (%)
2,0	-39,0	-39,4	1,0
4,0	-77,6	-78,8	1,5
6,0	-116,0	-118,0	1,7
8,0	-154,0	-157,0	1,9
10,0	-194,0	-196,0	1,0
12,0	-232,0	-236,0	1,7
14,0	-269,0	-275,0	2,2

TABELA A. 8

Comparação das tensões na posição 1,0t da superfície Externa

Força (kN) Aplicada	Extensometria Tensão (MPa) Posição 1,0t	Simulação MEF Tensão (MPa) Posição 1,0t	Diferença (%)
2,0	-29,7	-28,9	2,7
4,0	-58,0	-57,8	0,3
6,0	-86,3	-86,5	0,2
8,0	-114,0	-115,0	0,9
10,0	-142,0	-144,0	1,4
12,0	-170,0	-173,0	1,8
14,0	-198,0	-201,0	1,5

A.4 Validação das simulações em elementos finitos do tubo com pressão interna

TABELA A. 9

Comparação entre as tensões calculadas e simuladas na superfície inferior do tubo

Pressão (Mpa)	Tensão Cálculo Analítico (MPa)	Tensão Simulação (MPa)	Diferença (%)
1,00	15,55	15,55	0,00
5,00	77,72	77,75	0,04
10,00	155,45	155,50	0,03
15,00	233,17	233,25	0,03
20,00	310,90	310,95	0,02

TABELA A. 10

Comparação entre as tensões calculadas e simuladas na superfície superior do tubo

Pressão (Mpa)	Tensão Cálculo Analítico (MPa)	Tensão Simulação (MPa)	Diferença (%)
1,00	14,55	14,53	0,14
5,00	72,72	72,65	0,10
10,00	145,45	145,35	0,07
15,00	218,17	218,05	0,06
20,00	290,90	290,80	0,03

A.5 Correlação entre a força aplicada nos ensaios de flexão e as pressões de operação

TABELA A. 11

Tensão “hot spot” devido a força aplicada no ensaio de flexão em três pontos

Força (kN)	Tensão posição 0,4t (Pa)	Tensão posição 1,0t (Pa)	Tensão “Hot Spot” (Pa)
2	4,30E+07	3,08E+07	5,1159E+07
4	8,59E+07	6,17E+07	1,0206E+08
6	1,29E+08	9,20E+07	1,5323E+08
8	1,71E+08	1,23E+08	2,0419E+08
10	2,14E+08	1,53E+08	2,5508E+08
12	2,57E+08	1,83E+08	3,0595E+08
14	2,99E+08	2,14E+08	3,5682E+08
16	3,42E+08	2,44E+08	4,0767E+08

A.6 Resultados testes de fadiga

TABELA A. 12

Resultados dos ensaios de fadiga de flexão em três pontos

Força Aplicada no Ensaio (kN)	Ciclos até a falha
18,00	2453
18,00	2080
18,00	2383
18,00	2420
16,00	5114
16,00	3807
16,00	6253
16,00	3900
14,00	10.266
14,00	6994
14,00	9922
14,00	6092
10,20	45.148
10,20	37.189
10,20	33.890
10,20	34.658
10,20	52.488
10,20	56.299
10,20	56.588
10,20	49.564
6,00	406.429
6,00	427.162
6,00	708.791
6,00	704.060

A.7 Conversão da Curva F-N para P-N

TABELA A. 13

Resultados dos ensaios de fadiga de flexão em três pontos convertidos para pressão interna

Pressão Interna (MPa)	Ciclos até a falha
28,75	2453
28,75	2080
28,75	2383
28,75	2420
25,55	5114
25,55	3807
25,55	6253
25,55	3900
22,36	10.266
22,36	6994
22,36	9922
22,36	6092
16,00	45.148
16,00	37.189
16,00	33.890
16,00	34.658
16,00	52.488
16,00	56.299
16,00	56.588
16,00	49.564
9,59	406.429
9,59	427.162
9,59	708.791
9,59	704.060