

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Soldagem

Bruno Martins Amaral Tudeia

**ESTUDO DE FADIGA DA ESTRUTURA PRINCIPAL DE UM TRANSPORTADOR
DE SUCATAS**

Belo Horizonte

2023

Bruno Martins Amaral Tudeia

**ESTUDO DE FADIGA DA ESTRUTURA PRINCIPAL DE UM TRANSPORTADOR
DE SUCATAS**

Monografia de especialização apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Geras, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Ariel Rodríguez Dias

Belo Horizonte

2023

T899e Tudeia, Bruno Martins Amaral.
Estudo de fadiga da estrutura principal de um transportador de sucatas / Bruno Martins Amaral Tudeia. - 2023.
1 recurso online (78 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais"

Bibliografia: f. 77-78.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem. 3. Estruturas soldadas. 4. Fadiga. 5. Método dos elementos finitos. I. Arias, Ariel Rodríguez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 05ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 18 de abril de 2023, às 09:30h, a Comissão Examinadora se reuniu presencialmente para avaliar o trabalho:

Título: ESTUDO DE FADIGA DA ESTRUTURA PRINCIPAL DE UM TRANSPORTADOR DE SUCATAS

Aluno: BRUNO MARTINS AMARAL TUDEIA – Matrícula: 2021662203

Local: Sala de aulas Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem / EE / UFMG.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 26 minutos, é de parecer Favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 98 e sem (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
Departamento Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia
Inscrição UFMG: 327824

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Documento assinado digitalmente



KELVIN RIBEIRO DE FARIA SANTOS
Data: 18/07/2023 10:48:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Kelvin Ribeiro de Faria Santos
ISQ Brasil - Avaliador

HERMES
CARVALHO:06716
682694

Assinado de forma digital por HERMES
CARVALHO:06716682694
DN: c=BR, o=ICP-Brasil, ou=AC FCDL SC v5,
ou=8289597000167,
ou=Videoconferencia, ou=Certificado PF A1,
cn=HERMES CARVALHO 06716682694
Dados: 2023.07.17 14:54:58 -03'00

Prof. Dr. Hermes Carvalho
DEES/UFMG - Avaliador

Documento assinado digitalmente



BRUNO MARTINS AMARAL TUDEIA
Data: 17/07/2023 15:01:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aluno: Bruno Martins Amaral Tudeia

À minha família que sempre me apoiou no desenvolvimento pessoal e profissional. Aos professores da especialização que fornecerem conhecimento necessário para conclusão da especialização

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do curso de especialização em soldagem, pelo aprendizado e experiências compartilhadas, em especial ao Prof. Ariel Rodríguez Dias pela orientação neste trabalho. Agradeço aos alunos da especialização que estiveram comigo durante esta jornada.

RESUMO

Equipamentos e estruturas submetidos a carregamentos dinâmicos estão sujeitos a falhas por fadiga, desta forma torna-se importante a aplicação de estudos para identificar pontos críticos e identificação de vida útil. A aplicação de análises durante a operação do equipamento traz vantagens para estudos de modificação e melhorias, assim como auxiliam na análise de falha de eventuais trincas que sejam identificadas durante a vida útil do equipamento. Adicionalmente os resultados das análises podem auxiliar na elaboração de planos de inspeções, os quais serão otimizados e focados nas regiões que apresentem maior probabilidade de ocorrência de trincas. A aplicação do estudo na fase de projeto do equipamento pode trazer vantagens ainda maiores uma vez que podem ser aplicadas de forma prévia modificações na geometria, nos tipos de juntas selecionados, nos pontos de apoio e de fixação de componentes ou nos métodos de fabricação de modo a aumentar a vida útil do componente. Neste contexto, o presente trabalho apresentou a análise de resistência mecânica da estrutura principal de um transportador de sucatas, utilizado na alimentação de um forno elétrico a arco de uma siderúrgica de grande porte. Foram realizados estudos numérico-experimentais, com elaboração de modelo computacional em elementos finitos e análise experimental de tensões, para identificação dos ciclos de tensões atuantes na estrutura. Foi realizada a contagem de ciclos pelo método rainflow e foi aplicada a metodologia linear para o cálculo do dano acumulativo para identificação de vida útil para pontos mais críticos da estrutura. Conclui-se que a vida da estrutura é inferior ao objetivo de projeto, demandando-se estudos de melhoria de forma a aumentar a vida útil.

Palavras-chave: Fadiga; Transportador de Sucata; Estruturas Soldadas; Extensometria; Método de Elementos Finitos; Dano Acumulativo.

ABSTRACT

Equipment and structures subjected to dynamic loads are subject to fatigue failures, so it is important to apply studies to identify critical regions and identify fatigue life. The application of analyzes during the operation of the equipment brings advantages for studies of modification and improvements, as well as helping in the failure analysis of any cracks that are identified. Additionally, the results of the analyzes can help in the elaboration of inspection plans, which will be optimized and focused on the regions with the highest probability of occurrence of cracks. The application of the study in the design phase can bring even greater advantages, since modifications of the geometry can be applied in advance, in the selected joint detail, in the support and fixation points of components or in the manufacturing methods so to increase component life. In this context, this work presents the analysis of mechanical strength of the main structure of a scrap conveyor, used in the feeding of an electric arc furnace of a large steel mill. Numerical-experimental studies were carried out, with the elaboration of a computational model in finite elements and experimental stress analysis, to identify the stress cycles acting on the structure. Cycles counting was performed by the rainflow method and the linear methodology was applied to calculate the cumulative damage to identify the useful life for the most critical points of the structure. It is concluded that the life of the structure is less than the design objective, requiring improvement studies in order to increase the useful life.

Keywords: Scrap Conveyor; Welded Structures; Extensometry; Finite Element Method; Accumulating Damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Conjunto do transportador de sucatas.	15
Figura 1.2: Sistema de sustentação dos transportador por meio de tirantes.	16
Figura 1.3: Sistema de eixos excêntricos que promovem o acionamento do transportador.	16
Figura 2.1 – Curva da/dN por ΔK esquemática.	19
Figura 2.2 – Falha ocorrida devido a um crescimento de trinca a qual teve origem em uma porosidade interna da solda.	20
Figura 2.3 – Curvas S-N para juntas soldadas.	21
Figura 2.4 – Exemplos de juntas soldadas.	22
Figura 2.5 – Análise pelo método “effective notch”, consideração de raios de concordância igual a 1mm.	23
Figura 2.6 – Efeito na vida em fadiga da tensão mínima no ciclo de tensões.	24
Figura 2.7 – Efeito da resistência mecânica do material na vida em fadiga.	25
Figura 2.8 – Transformação de um modelo contínuo (a) em um modelo discreto (b).	27
Figura 2.9 – Diagrama com os passos para um estudo em elementos finitos.	28
Figura 2.10 – Ponte de Wheatstone	30
Figura 2.11 – Diferentes configurações de strain gages da fabricante HBM	31
Figura 2.12 – Medição do impacto durante aterrisagem da sonda lunar Surveyor I em 1966.	32
Figura 2.13 – Circuito $\frac{1}{2}$ ponte, configuração contendo extensômetro “dummy”.	33
Figura 2.14 – Montagem para completar uma medição $\frac{1}{2}$ ponte para um canal ponte completa.	34
Figura 2.15 – Deformação aparente X Temperatura para diferentes ligas utilizadas em filamentos de extensômetros	35
Figura 2.16 – Variação do <i>Gage Factor</i> em função da temperatura para diferentes ligas de filamento.	36
Figura 2.17 – Solda a ponto da fabricante Kyowa.	38
Figura 2.18 – Comparativo de variação de offset para 3 modelos diferentes de extensômetros para um monitoramento de longa duração a uma temperatura de 75° C.	39
Figura 2.19 – Variação offset de sinal de dois modelos de resistores (temperatura mantida em 24° C)	39
Figura 2.20 – Efeitos do ruído e da interferência.	41
Figura 2.21 – Exemplo de aplicação de filtro em um sinal. Frequência do dado bruto 50Hz.	42
Figura 2.22 – Aplicação de filtro média móvel.	42

Figura 2.23 – Aplicação de filtro média móvel.	43
Figura 2.24 – Resultado de instrumentação de uma barra de direção de um automóvel. Nota-se apresentação do gráfico de ruído (provocado por rugosidade da pista) além do gráfico do sinal filtrado.	43
Figura 2.25 – Avaliação de resultado de medição de um potenciômetro linear instalado na suspensão de um veículo, com objetivo de obter deslocamentos na mola.	44
Figura 3.1: Fluxograma do estudo numérico-experimental para determinação das cargas atuantes.	45
Figura 3.2: Sistema de coordenadas do modelo computacional.	46
Figura 3.3: Pontos de apoio da estrutura.	46
Figura 3.4: Discretização do modelo computacional.	47
Figura 3.5: Pontos de apoio da estrutura.	48
Figura 3.6: Regiões de aplicação de massa no modelo.	48
Figura 3.7: Espessuras aplicadas no modelo computacional.	49
Figura 3.8: Posição escolhida para a fixação dos <i>Strain Gages</i> durante o ensaio.	50
Figura 3.9: Detalhe para o ponto de instalação E5 com indicação do extensômetro Ativo e o Passivo (compensador de temperatura).	51
Figura 3.10: Montagem dos <i>Strain Gages</i> na ponte de Wheatstone, modelo do extensômetro e placa de aquisição utilizados no ensaio.	52
Figura 3.11: Ponte de Wheatstone.	53
Figura 3.12: Curvas SN do aço para amplitude constante de carregamento e elevado numero de ciclos.	57
Figura 4.1: Posição escolhida para a fixação dos Strain Gages durante o ensaio.	58
Figura 4.2: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E1.	59
Figura 4.3: Ciclos de tensão obtidos para os pontos E2 e E3.	59
Figura 4.4: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E4.	60
Figura 4.5: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E5.	60
Figura 4.6: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E6.	61
Figura 4.7: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E7.	61
Figura 4.8: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E8.	62
Figura 4.9: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E9.	62
Figura 4.10: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E10.	63
Figura 4.11: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E1.	64
Figura 4.12: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E2 e E3.	64

Figura 4.13: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E4.	65
Figura 4.14: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E5 e E6.	65
Figura 4.15: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E7.	66
Figura 4.16: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E8.	66
Figura 4.17: Descontinuidade D1 na solda das juntas tubulares lado direito.	67
Figura 4.18: Tensão na Descontinuidade D1 obtida pelo modelo ajustado	67
Figura 4.19: Descontinuidade D3 na solda próxima ao tirante 7.	68
Figura 4.20: Tensão na Descontinuidade D3 obtida pelo extensômetro S9.	69
Figura 4.21: Descontinuidades D4 (esquerda) e D5 (direita) na solda próximas ao tirante 9.	70
Figura 4.22: Descontinuidade D6 na solda ligando as chapas parafusadas.	71
Figura 4.23: Tensão na Descontinuidade D6 obtida pelo modelo ajustado	72
Figura 4.24: Descontinuidade D8, D9 e D10 na solda das mesas com os enrijecedores.	73
Figura 4.25: Tensão na Descontinuidade D8 obtida pelo modelo ajustado.	74
Figura 4.26: Descontinuidades D13 (esquerda) e D14 (direita) na solda próximas ao tirante 9.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Tensões admissíveis (Fonte: NBR 8400:1984).....	54
---	----

LISTA DE SIGLAS

S-N	Designação de curvas de fadiga
ΔK	Varição fator intensificador de tensões
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

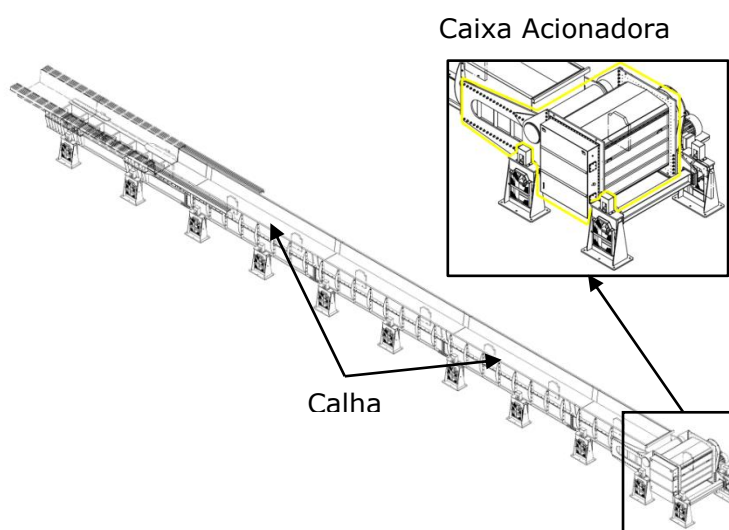
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Fadiga em estruturas	18
2.2	Elementos finitos	26
2.3	Extensometria	29
2.4	Análise de dados	40
3	METODOLOGIA	45
3.1	Modelo computacional	45
3.1.1	Discretização do modelo	46
3.1.2	Condições de contorno	47
3.1.3	Espessuras das chapas do equipamento	49
3.2	Experimentação	49
3.2.1	Extensometria	49
3.2.2	Análise de tensões	54
4	RESULTADOS	58
4.1	Extensometria	58
4.1.1	Extensometria – operação normal	58
4.1.2	Extensometria – queda de material	63
4.2	Análise de fadiga	67
5	CONCLUSÃO	76
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

Para a realização movimentação de sucata em processos siderúrgicos, pode-se utilizar um transportador de sucatas. Este modelo de transportador realiza o processo de movimentação de sucatas por meio de um movimento oscilatório, sendo o material depositado na calha por uma ponte rolante. A excitação para o movimento oscilatório é realizada por meio de um sistema composto por massas excêntricas localizadas na caixa acionadora, como ilustrado na Figura 1.1.

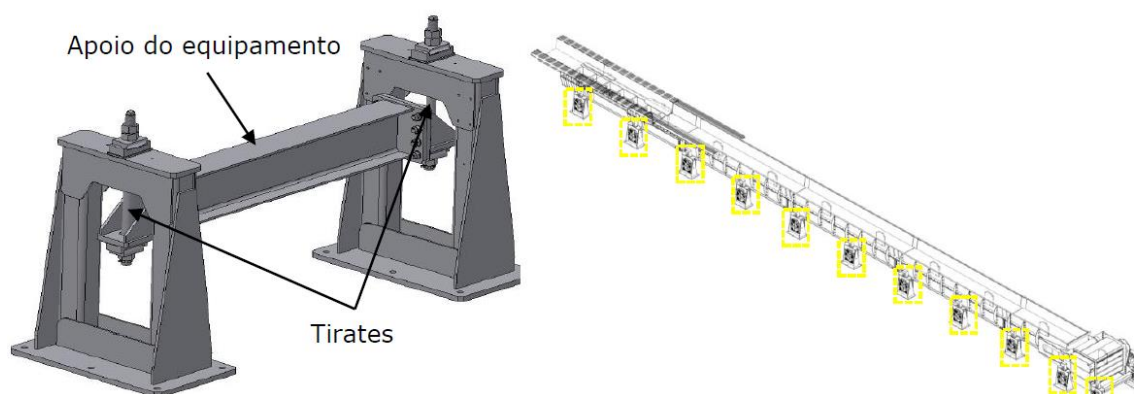
Figura 1.1: Conjunto do transportador de sucatas.



Fonte: Desenho montagem do transportador. Adaptado pelo autor.

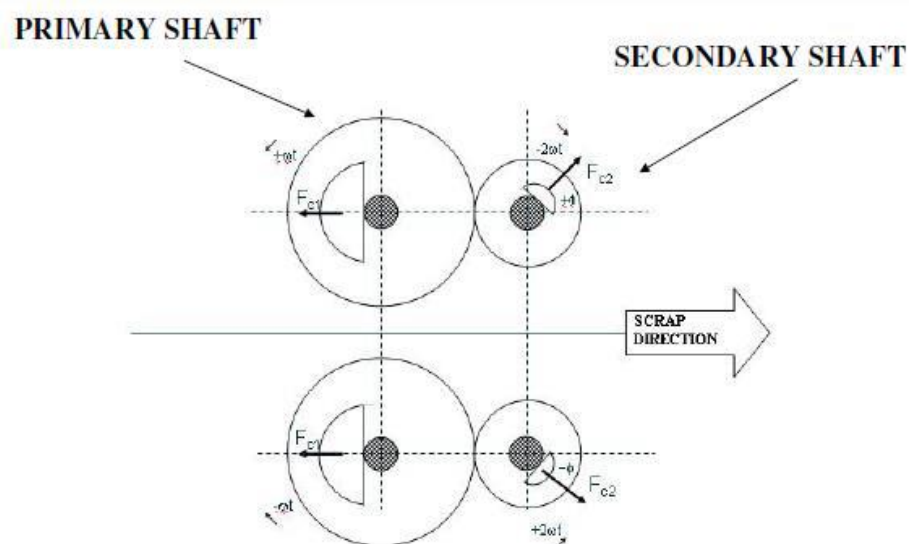
O equipamento apresenta uma massa total de 115181 kg, sendo acionamento de todo o conjunto realizado pela caixa acionadora. Os tirantes de sustentação do conjunto fazem com que o sistema apresente um comportamento semelhante ao pendular, como ilustrado na Figura 1.2. O acionamento é realizado por um conjunto de 4 massas desbalanceadas, conforme apresentado na Figura 1.3.

Figura 1.2: Sistema de sustentação dos transportador por meio de tirantes.



Fonte: Desenho montagem do transportador. Adaptado pelo autor.

Figura 1.3: Sistema de eixos excêntricos que promovem o acionamento do transportador.



Fonte: Manual do transportador. Adaptado pelo autor.

Devido ao recorrente surgimento de trincas na estrutura da caixa acionadora e do chassi da calha, tornou-se necessário a realização de uma análise de resistência mecânica, de forma a identificar possíveis causas das falhas estruturais.

1.1 Objetivo

Avaliação do comportamento mecânico do transportador através de um estudo numérico-experimental com objetivo de identificar esforços solicitantes e regiões mais propensas para o surgimento de trincas. Com os resultados, realizar análise para identificar vida útil quanto à fadiga da estrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fadiga em estruturas

Componentes de máquinas, veículos e estruturas estão frequentemente sujeitos a cargas oscilatórias e as tensões resultantes podem promover danos microscópicos nos materiais envolvidos. Mesmo tensões abaixo do limite de resistências dos materiais podem promover acúmulo de dano de forma contínua durante os ciclos de carregamento de forma a desenvolver trincas ou outros danos macroscópicos levando à falha do componente ou estrutura. Este processo de dano é denominado fadiga. (Dowling 2013).

O desempenho de uniões soldadas em estruturas e equipamentos é uma consideração importante durante a etapa projeto. Mesmo que a solda realizada apresente mesma resistência à fadiga que o metal base, defeitos inerentes ao processo como reforço, mordeduras, fusão incompleta, inclusões ou mesmo micro trincas servem como pontos de concentração de tensão. Esta característica promove redução da resistência à fadiga.

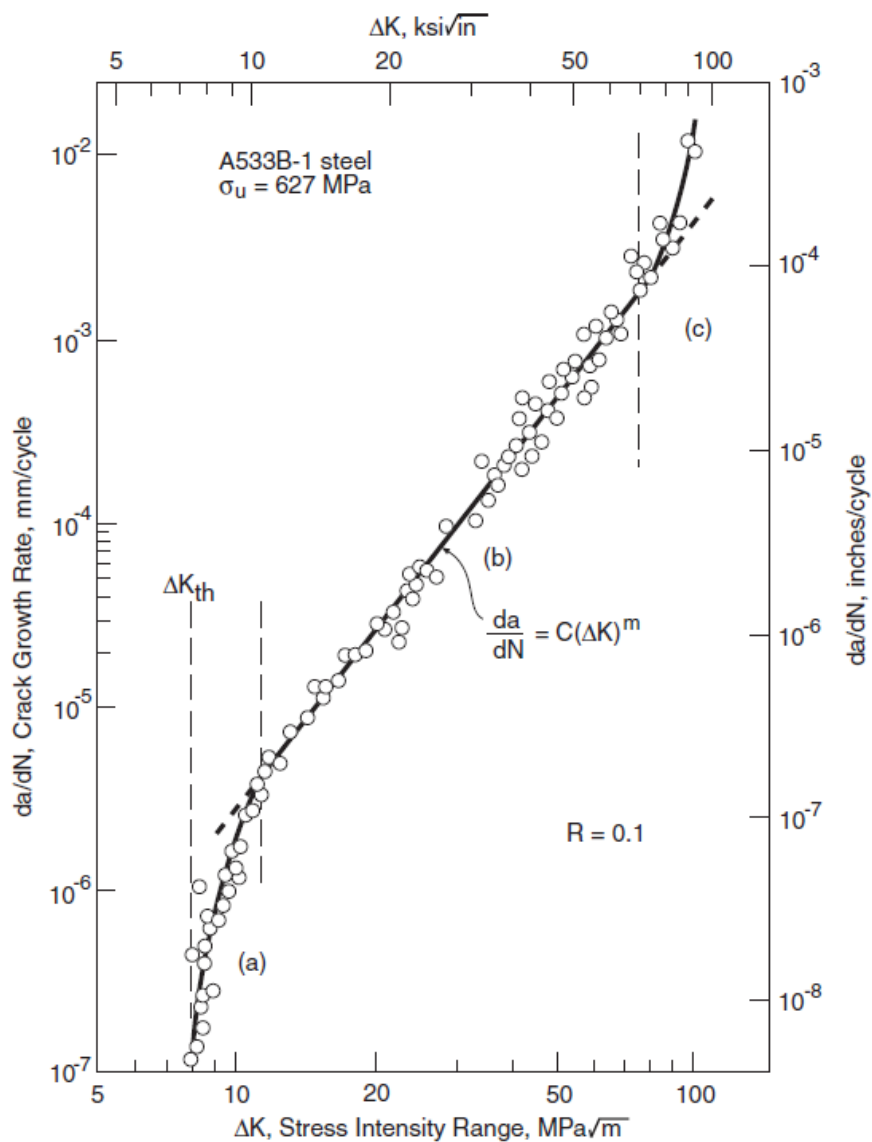
O processo de união por soldagem envolve a aplicação de intenso calor para promover a fusão do metal a ser unido assim como o metal de adição, para que após a solidificação ocorra a formação do cordão de solda. Estruturas soldadas apresentam tanto geometria quanto metalurgia complexos, e podem estar presentes defeitos e porosidades. Desta forma torna-se difícil a determinação de fatores concentradores de tensão para correlacionar o comportamento com peças de teste não soldadas. Como resultado, estão presentes em códigos relacionados a estruturas soldadas curvas S-N baseadas em testes de corpos de prova soldados. (Dowling 2013).

Segundo Dowling (2013), para a avaliação geral de fadiga de estruturas e equipamentos existem três principais metodologias. A tradicional análise de tensões, a qual é baseada na tensão nominal atuante no componente. Outra corresponde à análise de deformações, a qual envolve análise detalhada da plastificação que pode ocorrer durante carregamento cíclico. Por último a metodologia da mecânica da fratura, a qual avalia tempo necessário para uma determinada trinca atingir um tamanho crítico que ocasione falha do componente.

Para um dado material e condições de carregamento, o comportamento do crescimento da trinca pode ser descrito com relação da/dN e o fator intensificador de tensões. Na Figura 2.1 está apresentado um exemplo de resultados obtidos por meio de testes. Verifica-se que na região intermediária, ocorre uma correlação linear entre ΔK e da/dN , podendo-se aplicar correlações

que permitam o cálculo do tempo requerido para atingir um determinado crescimento de trinca (Dowling 2013).

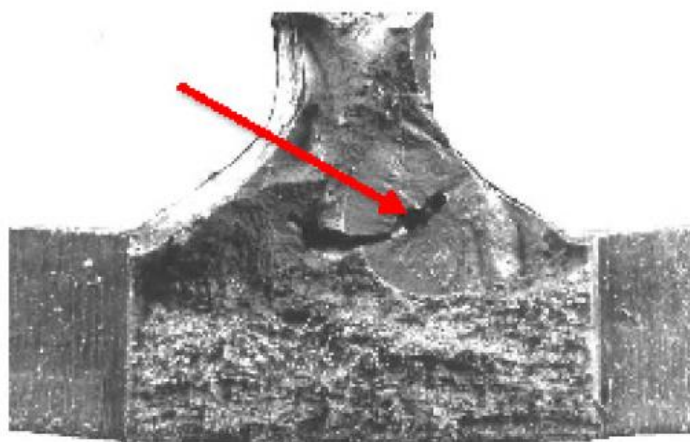
Figura 2.1 – Curva da/dN por ΔK esquemática.



Fonte: Dowling 2013.

Segundo Frank et al (2016) o crescimento de trincas requer duas condições: existência de descontinuidades e tensão de tração normal à descontinuidade. Na Figura 2.2 está apresentado um exemplo de falha por fadiga decorrente de um crescimento de trinca a qual teve início em uma porosidade interna. O crescimento da trinca pode ser dividido em três regimes: iniciação, crescimento constante e posterior fratura instável.

Figura 2.2 – Falha ocorrida devido a um crescimento de trinca a qual teve origem em uma porosidade interna da solda.



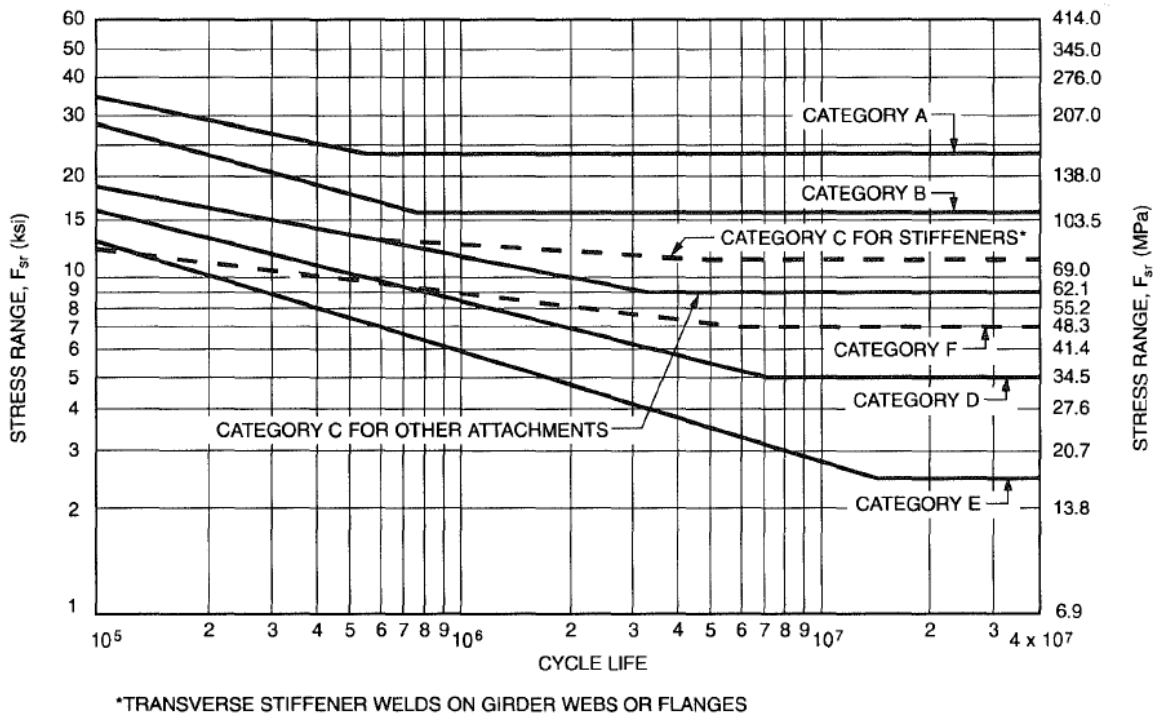
Fonte: Frank et al 2016.

O método da análise de tensões, via curvas, S-N, é comumente aplicado para estudos de fadiga em estruturas soldadas sendo uma metodologia empregada em diferentes normas, como por exemplo pode-se citar:

- AASTHO - American Association of State Highway and Transportation Officials;
- AWS D1.1: Structural Welding Code Steel;
- Eurocode 3 Parte 1-9 – Design of Steel Structures – Fadigue;
- DNV-RP-C203 - Fatigue Design of Offshore Steel Structures;
- IIW - Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components;
- ABNT NBR 8800 – Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto;
- AISE 6 - Specification for Electric Overhead Traveling Cranes for Steel Mill Service.

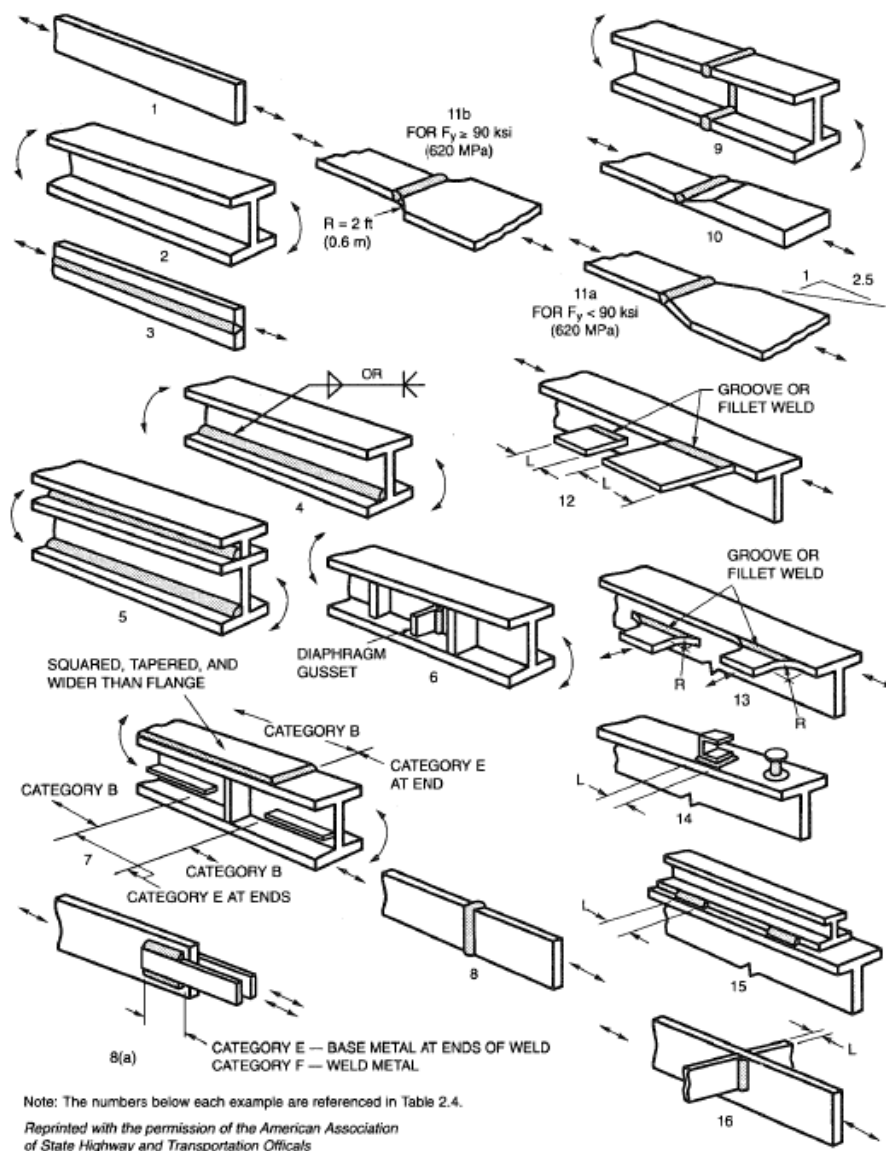
Na Figura 2.3 estão apresentadas curvas de fadiga para juntas soldadas, obtidas por meio de testes em componentes soldados, apresentadas na AWS D1.1:2000. Na Figura 2.4 estão apresentados exemplos de juntas soldadas. De acordo com o Welding Handbook (2001), as curvas de fadiga apresentadas pela AWS D1.1 são independentes da tensão de escoamento do material.

Figura 2.3 – Curvas S-N para juntas soldadas.



Fonte: AWS D1.1 2000.

Figura 2.4 – Exemplos de juntas soldadas.



Fonte: AWS D1.1 2000.

Segundo o código DNV-RP-C203 (2011), a análise de fadiga pode ser baseada em diferentes metodologias dependendo no nível de assertividade do estudo para determinado detalhe de junta. Este código apresenta três diferentes conceitos de curvas S-N que podem ser utilizadas para as análises:

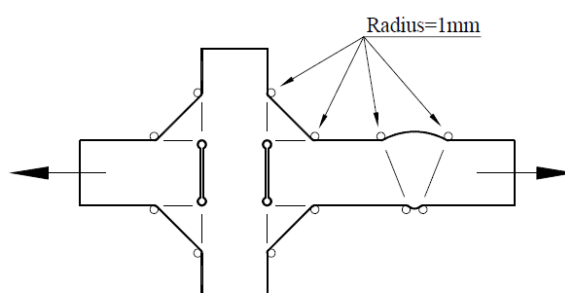
- Curvas S-N para tensão nominal;
- Curvas S-N para tensão “hot spot”;
- Curvas S-N para tensão “effective notch”

Tensão nominal corresponde a uma tensão atuante no componente que pode ser obtida pelas teorias clássicas de resistência dos materiais, como a teoria de vigas. O valor da tensão corresponde ao considerado durante a realização dos testes em componentes e não considera eventuais concentradores de tensões.

A tensão “hot spot” corresponde ao concentrador de tensão provocado pela geometria do tipo de união soldada. Não é incluído o efeito concentrador de tensões causado pela geometria do cordão de solda, sendo este efeito já considerado na correspondente curva S-N.

O método “effective notch” considera a tensão total atuante na junta soldada, obtido por meio de teoria linear elástica. Para o cálculo, considera-se um raio de curvatura de 1mm nos pontos de concentração de tensão, como apresentado na Figura 2.5. Este método cobre falhas que ocorrem na região do pé da solda, outros tipos de trincas como ocorrendo no interior ou na superfície do cordão não são considerados. Com estas considerações realiza-se cálculos das tensões, sendo aplicável o método dos elementos finitos, sendo posteriormente aplicada curva de fadiga correspondente.

Figura 2.5 – Análise pelo método “effective notch”, consideração de raios de concordância igual a 1mm.

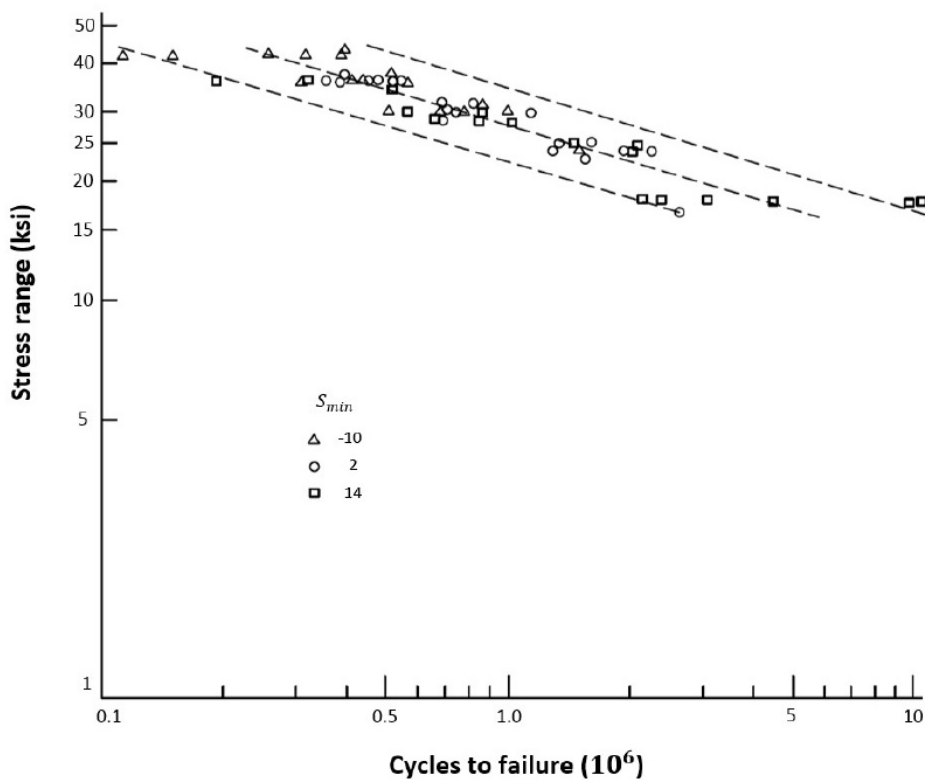


Fonte: DNV-RP-C203 2011.

Os códigos que tratam de fadiga em estruturas soldadas consideram o valor da faixa de tensões, correspondente à diferença entre a tensão máxima e mínima do ciclo de tensões, não sendo consideradas na análise as tensões médias. Segundo Gregory et al (1989) devido à presença de tensões residuais de tração de grande intensidade em soldas, mesmo com a atuação de tensões apenas compressivas causadas por forças externas, o ciclo de tensões ainda será

positivo na solda. Desta forma o ciclo de tensões para causar falha de juntas soldadas praticamente não é influenciado pelo valor das tensões médias atuantes (estas provocadas por cargas externas). Como resultado, durante o estudo de fadiga em estruturas, avalia-se as faixas de tensões (diferença entre tensão máxima e mínima) sem levar em consideração os valores de tensões médias. Frank et al (2016) informam um mesmo comportamento para componentes soldados, incluindo a indicação que o tipo de aço estrutural também apresenta pouca influência na resistência à fadiga, como pode ser visualizado na Figura 2.6 e Figura 2.7.

Figura 2.6 – Efeito na vida em fadiga da tensão mínima no ciclo de tensões.



Fonte: Frank et al 2016.

Figura 2.7 – Efeito da resistência mecânica do material na vida em fadiga.

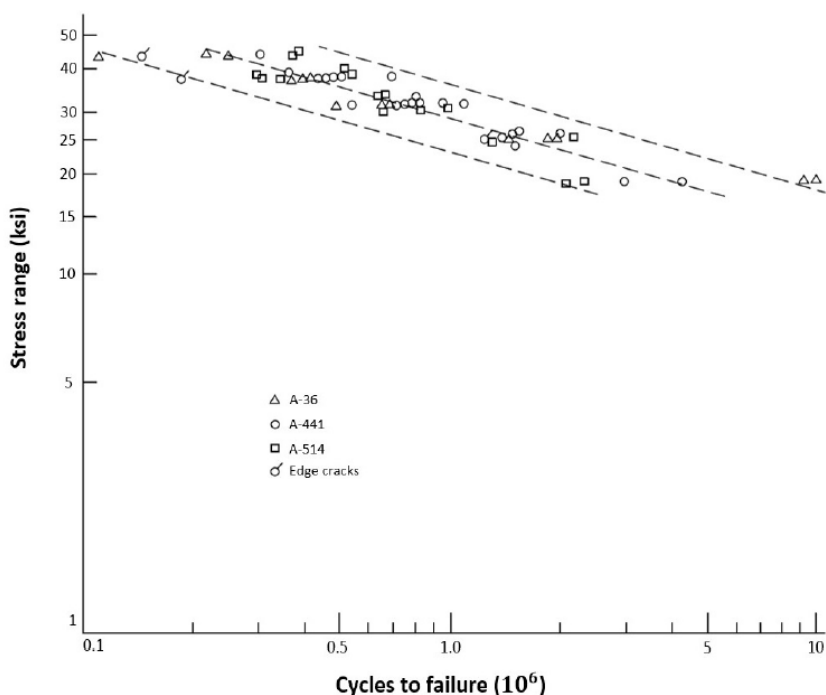


Figure 4.2.2-1 Effect of steel grade on fatigue life.

Fonte: Frank et al 2016.

Para a análise de fadiga, deve-se realizar uma correta estimativa dos carregamentos atuantes durante a vida útil da estrutura ou do componente. Nesta análise deve-se considerar todos os tipos de cargas variáveis. Carregamentos dinâmicos de diferentes fontes devem ser considerados, como durante a construção, transporte, instalação além das cargas de operação. Recomenda-se a aplicação de fatores no espectro de cargas de forma a ser considerado estatisticamente as condições mais críticas as quais o componente estará submetido. (Hobbacher 2016).

Adicionalmente à determinação das cargas, o método matemático para determinar as tensões atuantes nos componentes ou estruturas também deve ser avaliado quanto à precisão, principalmente para geometrias complexas. De forma a tornar o estudo mais assertivo, é comum a aplicação de estudos experimentais, os quais contemplam a utilização de sensores para medições de variáveis durante o funcionamento do equipamento e aplicação de métodos computacionais, como o método dos elementos finitos, que permitem uma análise de distribuição de tensões mesmo em geometrias de maior complexidade.

2.2 Elementos finitos

O método dos elementos finitos corresponde a um modelo computacional utilizado para avaliar o comportamento mecânico de estruturas e componentes. Pode-se determinar distribuição de tensões e deformações, auxiliando na etapa de dimensionamento de estruturas. Componentes ou estruturas podem apresentar geometrias de maior complexidade, tornando impreciso, em alguns casos, a aplicação da teoria clássica de resistência dos materiais.

Segundo Cook (1994), o método dos elementos finitos envolve a divisão do componente em estudo em uma série de elementos, onde o comportamento de cada elemento é descrito de uma maneira simplificada, sendo as conexões entre os elementos denominadas de nós. Este processo de discretização resulta em um arranjo de equações algébricas as quais descrevem o comportamento da estrutura em estudo.

Durante a aplicação deste procedimento computacional é importante a realização de uma análise de sensibilidade de malha juntamente com uma validação dos resultados obtidos. Estes dois passos devem ser necessariamente seguidos para garantia da confiabilidade dos resultados obtidos.

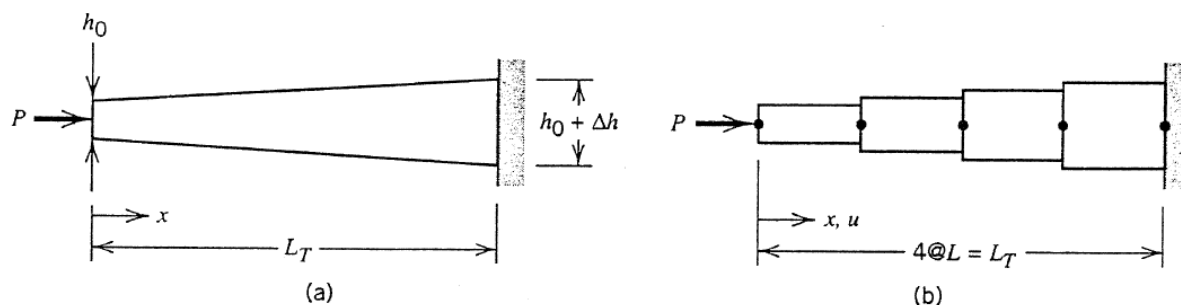
Existem vários programas que são utilizados no método dos elementos finitos. O Ansys® é um programa de elementos finitos capaz de realizar estudos estáticos, dinâmicos, de escoamento de fluidos e de eletromagnetismo. Segundo Moaveni (1999), este é um dos programas mais utilizados, sendo aplicado em problemas de engenharia nas indústrias aeroespacial, automotiva, eletrônica e nuclear.

Um modelo computacional apresenta erros, os quais podem afetar o resultado de maneira significativa. É de fundamental importância o conhecimento dos possíveis erros para que estes possam ser reduzidos e as suas consequências minimizadas. Os seguintes erros podem afetar os resultados: erros de truncamento, erros de arredondamento, erros ligados à discretização do modelo. O computador é capaz de efetuar apenas operações de aritméticas e de lógica, não sendo possível a solução direta de uma função matemática qualquer. Por exemplo, para resolver a função seno, o computador usa uma aproximação por uma série, como por exemplo uma série de Taylor, correspondendo este ao erro de truncamento.

Com a realização da discretização da geometria, tem-se uma aproximação da geometria real a ser estudada acarretando o chamado erro de discretização. Pode-se reduzir este erro com

o aumento do número de subdivisões do domínio. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de transformação de um modelo contínuo em um modelo discreto.

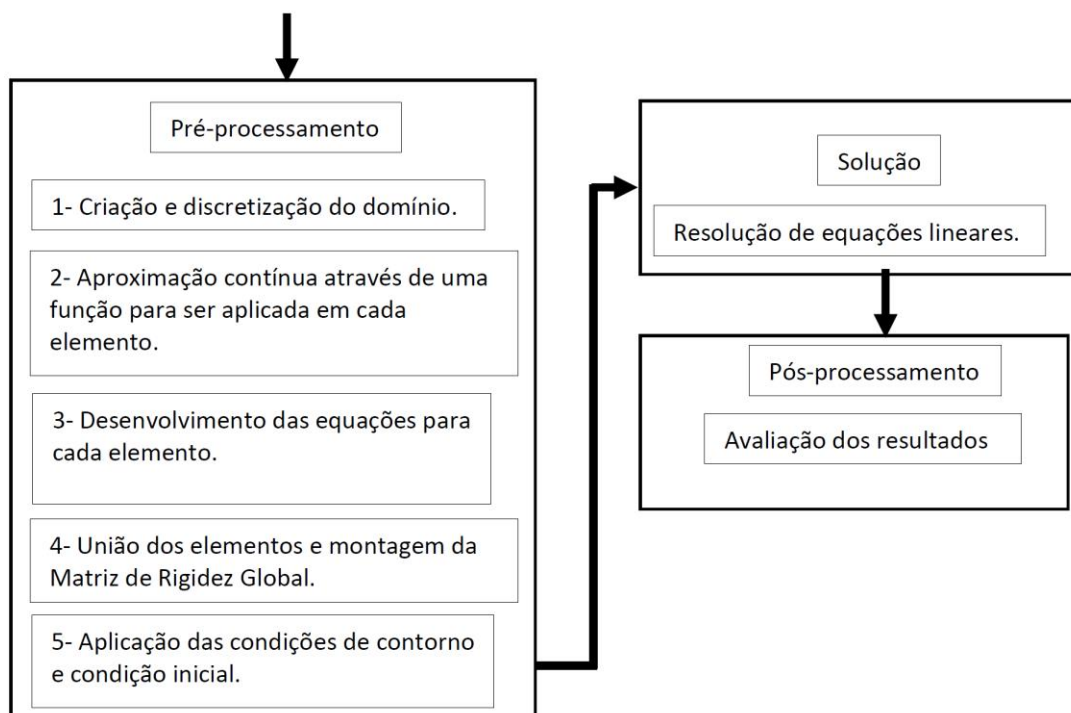
Figura 2.8 – Transformação de um modelo contínuo (a) em um modelo discreto (b).



Fonte: Cook 1994.

Existem várias abordagens utilizadas em problemas envolvendo elementos finitos. Independentemente do modo de geração do modelo, os passos apresentados na Figura 2.9 são comumente seguidos. No pré-processamento é feita a criação da malha do modelo, correspondente à sua discretização. Para cada elemento são desenvolvidas equações que representam as relações entre as variáveis como força de tração ou compressão, momento de torção, momento de flexão e os deslocamentos dos nós. A relação entre estas variáveis é feita com o uso da matriz de rigidez, a qual é uma característica do elemento utilizado. Posteriormente é gerada uma matriz de rigidez global a qual representa todo o domínio em estudo. Os valores de entrada para o cálculo da solução são inseridos por meio de condições de contorno, como os modos de fixações do domínio com o ambiente externo e os carregamentos externos. A solução é calculada e os resultados podem ser analisados no pós-processamento. Os programas de elementos finitos atuais apresentam uma interface que facilita a realização deste processo, fazendo com que os usuários possam realizar estudos mesmo sem um conhecimento aprofundado sobre modelos computacionais.

Figura 2.9 – Diagrama com os passos para um estudo em elementos finitos.



É importante que na modelagem do problema seja analisado o elemento mais adequado. Existe uma grande variedade de elementos como o de treliça, de viga, de grelha assim como elementos mais avançados, como os elementos de placa, de casca e sólidos. A correta seleção do elemento pode aumentar a precisão do resultado e reduzir o esforço computacional. Em estruturas compostas por elementos de seção constante como tubos e vigas, é indicado o uso de elementos uniaxiais combinados de treliça, viga e de grelha.

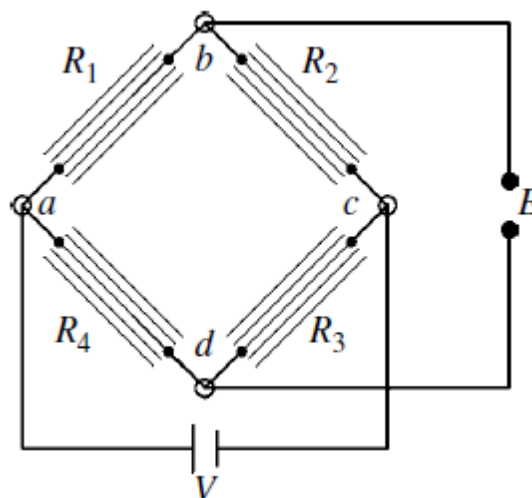
2.3 Extensometria

Verifica-se que é necessário um conhecimento da condição real de operação do equipamento de forma a se tornar mais assertivo o estudo de vida em fadiga. A aplicação de estudos teóricos do comportamento do equipamento pode fornecer ciclos de cargas atuantes, porém ainda apresentará eventuais discrepâncias com a condição real de operação. Pode-se realizar instrumentações no equipamento, com instalação de sensores para medição de deformações, acelerações ou deslocamentos. Identifica-se que a medição direta de deformações corresponde a uma forma de obtenção do ciclo de tensões atuantes. Com o ciclo de tensões atuantes pode-se identificar forma de operação, analisando-se por exemplo uniformidade das tensões e instantes de picos de tensões. Com estes resultados pode-se realizar validação de modelos computacionais, como por exemplo método dos elementos finitos, ou utilizar os ciclos de tensão para cálculo da vida em fadiga do componente.

Segundo Doyle (2004), o extensômetro é uma das ferramentas mais confiáveis para realização de uma análise de tensões experimental. O princípio de funcionamento do extensômetro está na característica de um condutor apresentar uma mudança no valor de sua resistência quando sujeito a uma deformação. Fixando-se um extensômetro em uma estrutura é possível determinar a deformação do material e com os resultados pode-se calcular o valor da tensão atuante.

A medição da variação da resistência do extensômetro é realizada com a montagem de uma ponte de Wheatstone, sendo este um circuito elétrico composto por dois divisores resistivos em paralelo, conforme indicado na Figura 2.5. Esta ponte é composta por uma tensão de entrada em dois vértices (a c) e por uma tensão medida nos outros dois vértices (b d).

Figura 2.10 – Ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de Doyle (2004).

A Eq 1 apresenta a relação entre a tensão de saída da ponte de Wheatstone e a variação das resistências dos extensômetros:

$$V_o = \frac{V_{exc}}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{Eq 1}$$

Considerando a constante de proporcionalidade k entre $\Delta R/R$ e ε , têm-se:

$$V_o = \frac{V_{exc} \cdot k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \text{Eq 2}$$

Verifica-se na Eq 2 que a deformação simultânea dos quatro extensômetros não provoca nenhuma variação V_o , como resultado a variação da temperatura não influencia no resultado, sendo esta uma das vantagens do uso de uma configuração ponte completa. Em adicional, existem as configurações $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ de ponte, onde são medidos respectivamente apenas 2 e 1 extensômetro, sendo utilizados resistores de precisão nos outros braços da ponte.

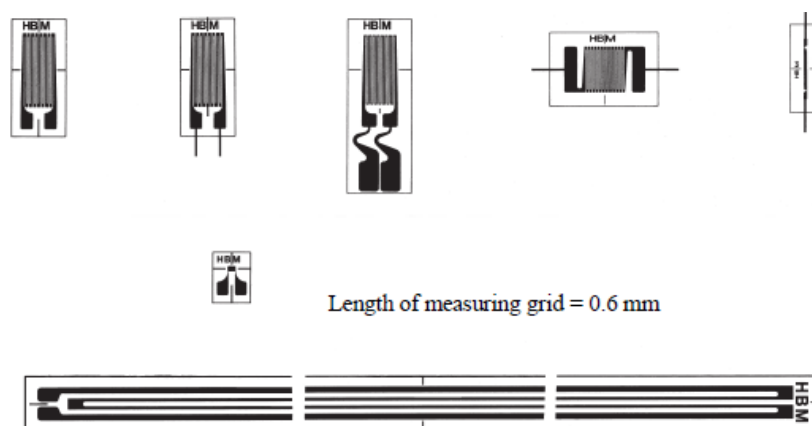
Segundo Doyle (2004), o adesivo utilizado na fixação do extensômetro deve possuir resistência ao cisalhamento suficiente para suportar uma tensão de 10 MPa. Grande parte dos adesivos utilizados para este ensaio é feita à base de acrílico ou epóxi. O uso de adesivo para a fixação é vantajoso pois não afeta o material que está sendo analisado, podendo ser usado em uma ampla variedade de materiais além de promover uma isolação térmica para o extensômetro.

Antes de realizar a colagem do extensômetro é necessária uma preparação da superfície da estrutura a ser analisada. Esta preparação compreende a retirada de impurezas e pintura com o posterior uso de solventes para a limpeza final. É comum o uso de solventes orgânicos, como a acetona e o etanol.

A ligação dos fios no extensômetro é feita por solda, presilhas, parafusos ou conectores. O uso da solda eletrônica é o mais utilizado, sendo a temperatura recomendada para solda entre 120 e 400°C. Em alguns casos o uso de um metal de solda apropriado é recomendado, como por exemplo a solda de estanho-chumbo que apresenta uma boa resistência à fadiga, podendo ser aplicada na medição de carregamentos dinâmicos.

Para uma medição com máxima precisão é necessário que seja realizado um estudo prévio do tipo de extensômetro a ser utilizado. Existem diferentes tipos de extensômetros, sendo cada configuração apropriada para determinadas condições e tipos de medição. Os extensômetros diferem no tamanho, número e arranjo dos “gages”, material de fabricação da base e do próprio filamento. A Figura 2.11 ilustra algumas configurações de extensômetros utilizadas.

Figura 2.11 – Diferentes configurações de strain gages da fabricante HBM

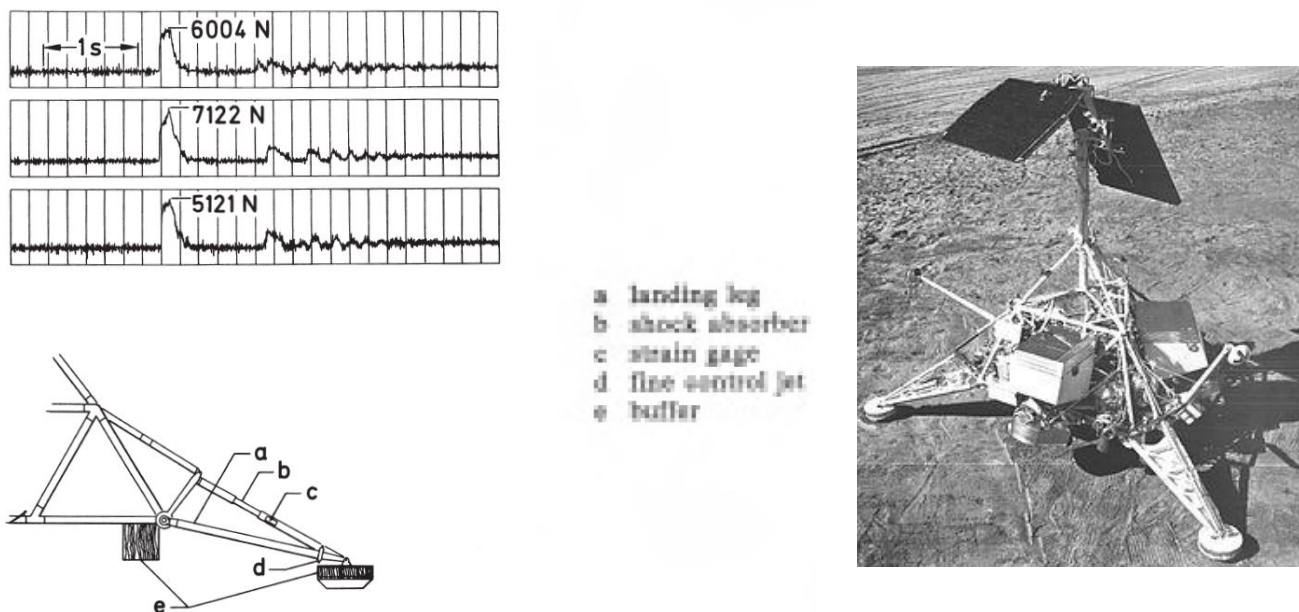


Fonte: Adaptado de Hoffman (1989).

Para completar a precisão da medição é necessário o uso de cabos de instrumentação adequados. Os cabos devem transmitir os dados da medição com mínimas interferências externas além de resistir às condições de operação e às condições do ambiente. Os cabos de instrumentação apresentam isolamentos eletromagnéticos, podendo em alguns casos apresentar também isolamento térmico. Em medições de carregamentos cíclicos é importante o uso de cabos com resistência à fadiga, sendo estes compostos por fios mais finos e com um isolamento flexível. As interferências eletromagnéticas que afetam os dados transmitidos são provenientes de outros fios condutores, geradores elétricos, máquinas de solda, transformadores ou motores.

Como um exemplo de aplicação, está apresentado na Figura 2.12 uma medição realizada na sonda lunar Surveyor I em 1966.

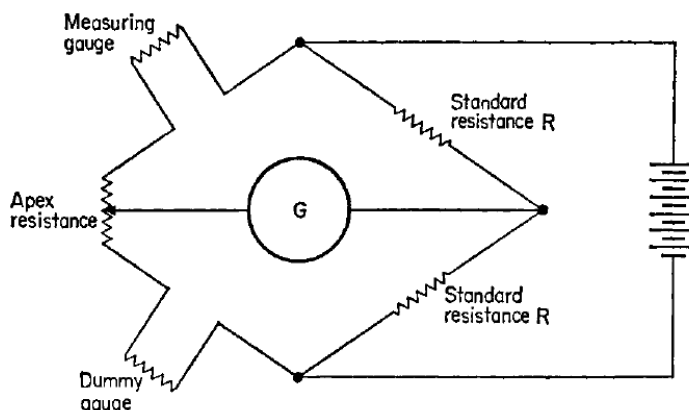
Figura 2.12 – Medição do impacto durante aterrissagem da sonda lunar Surveyor I em 1966.



Fonte: HOFFMAN 1989.

Segundo Hendry (1977) para a realização de medição de um extensômetro com correção de erros decorrentes de efeitos térmicos, pode-se utilizar o circuito apresentado na Figura 2.13. Nesta montagem utiliza-se em dois braços da Ponte de Wheatstone resistores fixos, e na outra metade um conjunto formado por dois extensômetros: um ativo e um passivo (“dummy”). Realizando-se a fixação do extensômetro passivo em uma chapa composta pelo mesmo material do componente em análise, e estando esta no mesmo ambiente e não estando submetida à deformação, os efeitos decorrentes de oscilações de temperatura serão cancelados.

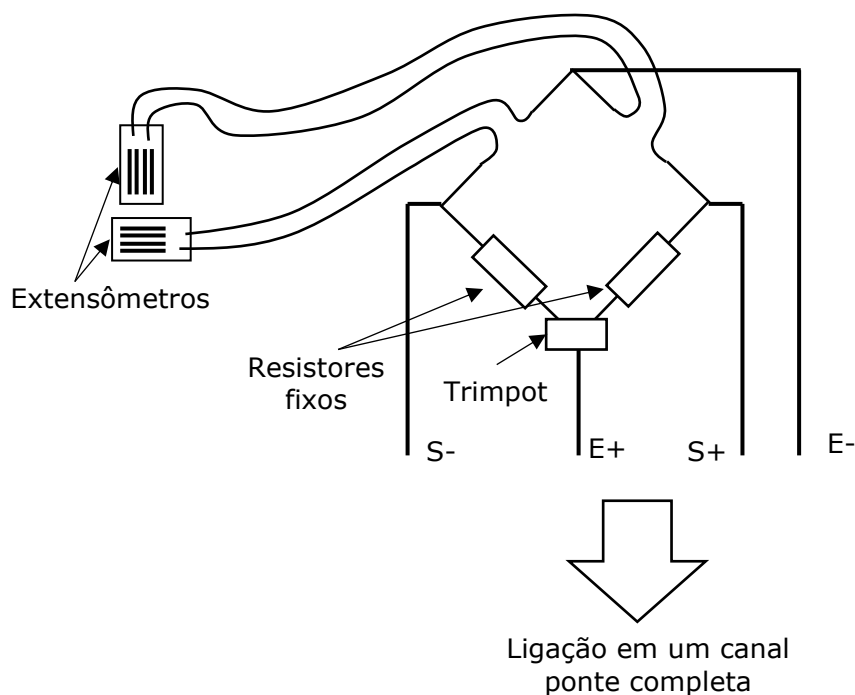
Figura 2.13 – Circuito $\frac{1}{2}$ ponte, configuração contendo extensômetro “dummy”.



Fonte: Hendry 1977.

Pode-se utilizar equipamentos contendo entrada do tipo ponte completa para medições de montagem $\frac{1}{2}$ Ponte. Torna-se necessário realizar uma montagem para completar a ponte antes da conexão com o equipamento, conforme apresentado na Figura 2.14. Nesta montagem, verifica-se que são utilizados resistores de valores fixos e um trimpot. Recomenda-se que sejam utilizados resistores com valores semelhantes ao dos extensômetros e trimpots de precisão (acima de 20 revoluções) e de baixo valor de resistência. O objetivo do trimpot é balancear a ponte, compensando principalmente desequilíbrios provocados por cabos e erros de valor dos resistores. Um menor valor de resistência do trimpot irá promover uma menor relação variação resistência/giro trimpot, facilitando desta forma o processo de balanceamento da ponte. Importante que o nó da ponte seja o recomendado na Figura 2.14, caso contrário tem-se a existência de resistência em série com o extensômetro, o que vai promover uma alteração do ganho de sinal. Este tipo de montagem permite que um equipamento com canais do tipo ponte completa torne-se versátil, podendo trabalhar com mais de um tipo de ponte (um equipamento dedicado a canal $\frac{1}{2}$ ponte não pode ser utilizado para medição ponte completa).

Figura 2.14 – Montagem para completar uma medição $\frac{1}{2}$ ponte para um canal ponte completa.



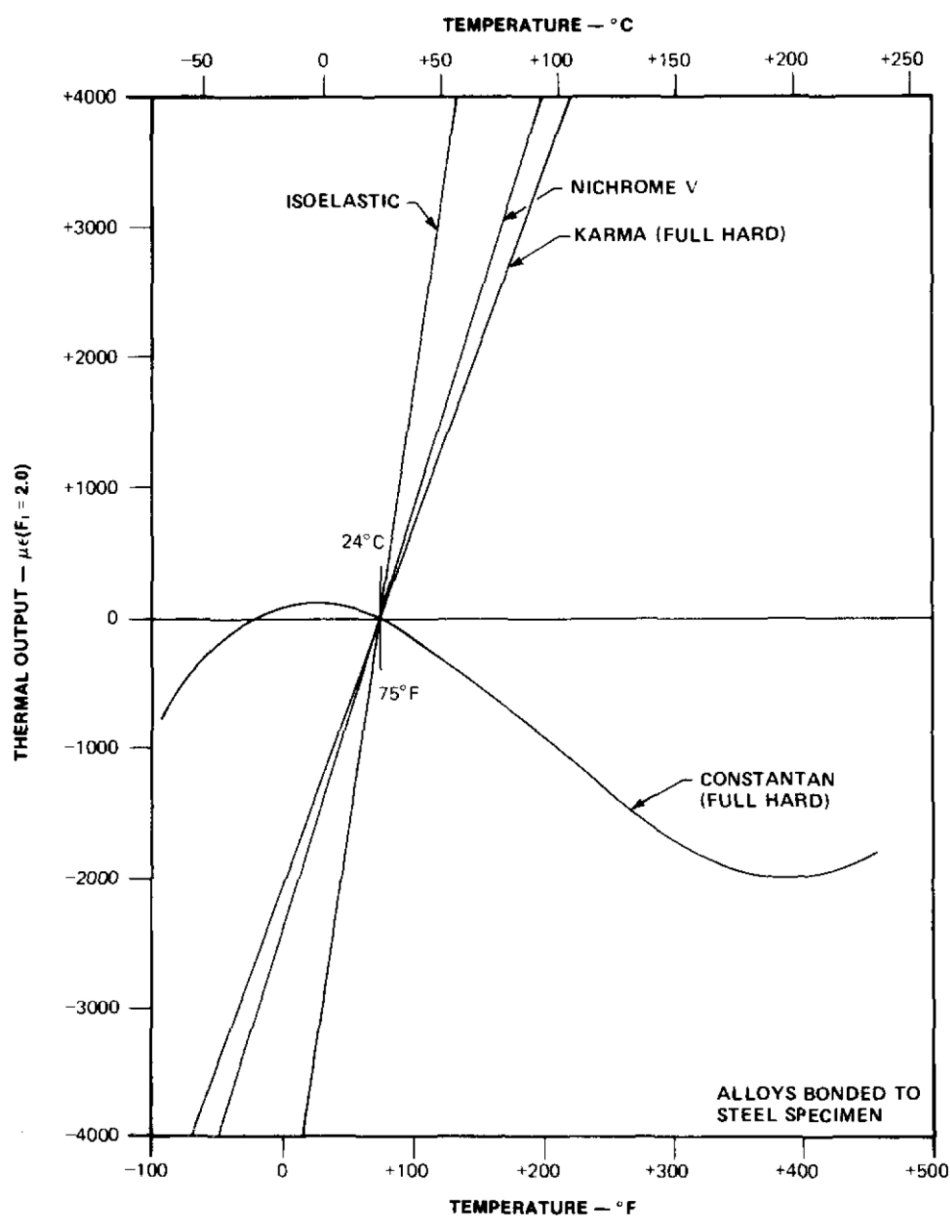
O sinal da medição está sujeito a desvios sendo principalmente causado por variação de temperatura. Como citado anteriormente, a utilização de um extensômetro passivo reduz este efeito, mas variação de temperatura no próprio cabo também pode apresentar influência. Para ensaios em temperatura ambiente, o ponto de medição irá apresentar variação de temperatura devido à potência dissipada pelo extensômetro, desta forma a utilização de baixas correntes é vantajosa. Verifica-se, portanto, a importância de realizar uma montagem do sistema com máxima qualidade e simetria de forma que os efeitos de temperatura provoquem baixo offset no sinal.

Segundo William [1992] a variação de temperatura irá provocar offset no sinal, vide Figura 2.15, devido:

- Metal base expande ou contrai (de forma diferente do metal do filamento);
- A resistência do filamento altera;
- O Gage Factor pode apresentar variação;
- Podem ocorrer mudanças no material da cola;
- Base do extensômetro pode apresentar variações (local onde está fixado o filamento);

- Devido à sensibilidade transversal, caso ocorra deformações na direção transversal, seja no metal base ou no extensômetro, ocorrerá alterações no sinal.

Figura 2.15 – Deformação aparente X Temperatura para diferentes ligas utilizadas em filamentos de extensômetros



Fonte: Willian 1992.

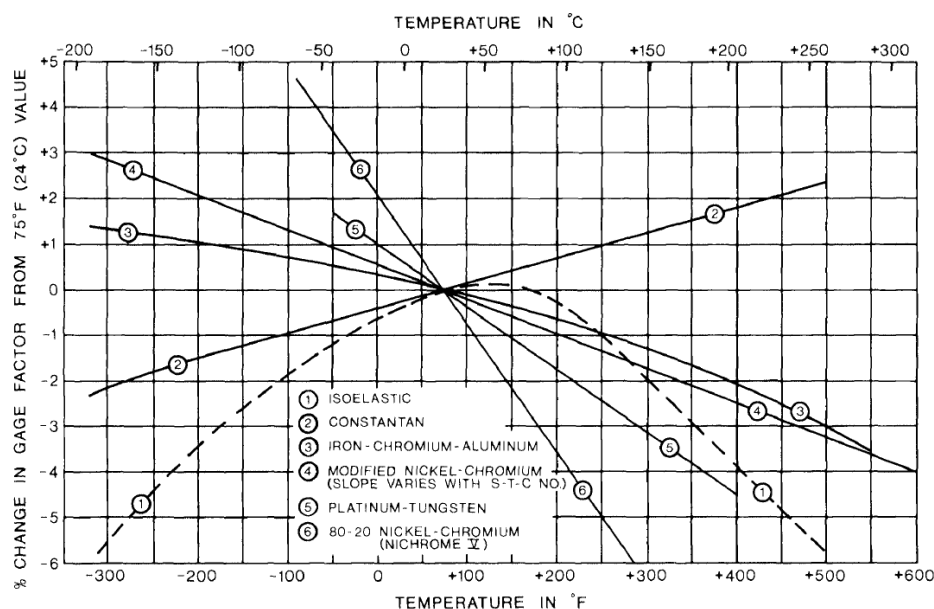
Tomando-se como um exemplo de extensômetro fixado em um material, considerando que este esteja submetido a um esforço de tração e a uma variação de temperatura durante o

ensaio. O material, deste exemplo, está fixado em apenas uma das extremidades, de forma que possa expandir termicamente sem restrições. Neste caso, caso não sejam aplicados procedimentos para compensar efeitos térmicos (ou caso estes sejam aplicados, porém sem o devido cuidado), o sinal obtido será composto por duas parcelas: uma parcela devido à deformação provocada pela força aplicada e uma segunda devido ao desvio de temperatura. Esta segunda parcela é resultado da seguinte soma:

$$\boxed{\text{Variação do Gage Factor}} + \boxed{\text{Variação da Resistência do Filamento}} + \boxed{\text{Diferença de coeficiente de expansão térmica filamento/metal base}}$$

Como verificado na Figura 2.16 a relação entre a deformação aparente e a temperatura pode não apresentar comportamento linear (obs.: liga Constantan, formada à base de 57% Cu e 43% Ni, é a mais utilizada comercialmente).

Figura 2.16 – Variação do *Gage Factor* em função da temperatura para diferentes ligas de filamento.



Fonte: Willian 1992.

Segundo Hoffman (1989) não existe um modelo de extensômetro que irá preencher todos os requisitos para uma aplicação específica. Cada modelo de extensômetro apresenta uma característica específica e apresentam um objetivo específico. Um modelo de extensômetro para

elevadas temperaturas é robusto e confiável, porém para a realização de uma medição a temperatura ambiente um modelo comum de baixo custo pode fornecer resultados mais confiáveis. Isso ocorre pois o modelo de extensômetro para elevadas temperaturas pode apresentar um filamento com uma liga metálica que não possui comportamento linear entre deformação e variação de resistências para baixas faixas de temperatura.

Os principais fabricantes de extensômetros são:

- HBM;
- Vishay;
- Kyowa.

Os fabricantes citados acima possuem catálogos com diversas configurações de extensômetros. Para aplicações rotineiras de curta duração a marca Kyowa apresenta modelos com melhores custo benefício. Para aplicações mais específicas, a marca Vishay apresenta uma maior variedade de modelos (grande combinação de diferentes ligas e bases).

Segundo Gees (1984) para medições de curta duração e uso geral, os modelos da Kyowa se mostram satisfatórios, para ensaios de longa duração são recomendados modelos da Vishay. A série WA da Vishay é um bom exemplo para aplicações em longa duração onde é necessária estabilidade e resistência à fadiga, possui uma base em resina reforçada com fibra de vidro, apresenta uma camada isolante no filamento.

Para temperaturas até aproximadamente 100°C utiliza-se extensômetros de uso geral (por serem mais comerciais e apresentam um custo menor). Para temperaturas maiores (ex.: até 350°C) existe uma segunda classe de extensômetros para atender, porém, nesta faixa de temperatura deve-se utilizar colas específicas, as quais em grande parte necessitam de um procedimento de cura sob temperaturas controladas. Adicionalmente existe uma dificuldade de importação de colas especiais. Desta forma, para temperaturas acima de 100°C, torna-se mais prático a aplicação de extensômetros soldados, os quais apresentam diferentes classes, alguns modelos suportam temperaturas de até 1400°C. Na Figura 2.17 está apresentada uma máquina de solda para fixação de extensômetros metálicos utilizadas em altas temperaturas.

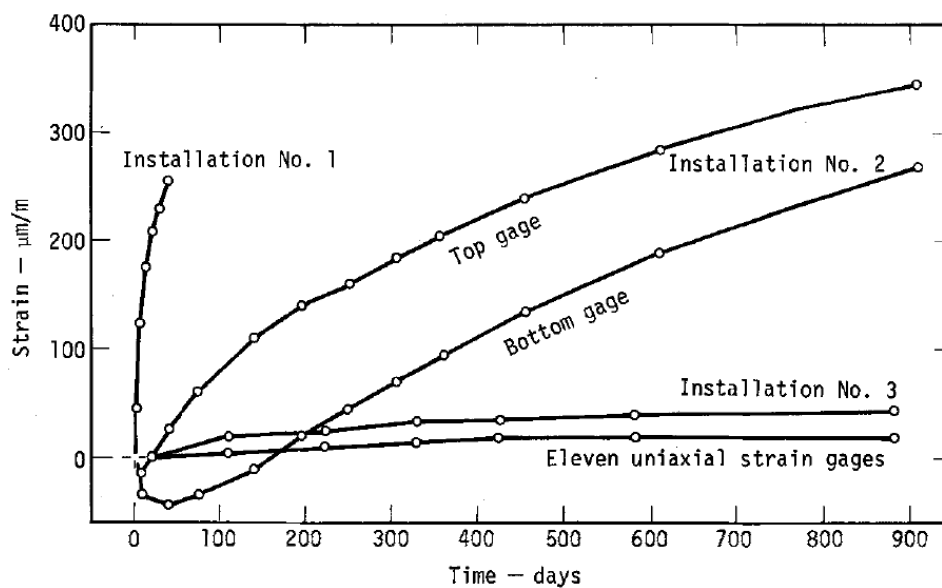
Figura 2.17 – Solda a ponto da fabricante Kyowa.



Freynd (1976) realizou um estudo experimental de longa duração (900 dias) para três modelos diferentes para avaliar offset de sinal em extensômetros. Identificou que o modelo com base em resina reforçada com fibra de vidro e com o filamento de Karma Modificado (liga níquel-crômio-alumínio-ferro), apresentou uma menor variação de offset. Para um mesmo filamento de Constantan, foram ensaiados dois extensômetros com diferentes materiais para a base: resina reforçada em fibra de carbono e poliamida. Identificou-se que o modelo com a poliamida apresentou um maior desvio de sinal. O estudo indicou que para diferentes desvios de sinais estão relacionados com variações metalúrgicas na liga do filamento, fluência do filamento, absorção de umidade pela base do extensômetro e pela cola. Dentre os fatores, identificou-se que o tipo de base do extensômetro foi o principal fator para erro de offset. Abaixo estão apresentadas as instalações realizadas, resultados apresentados na Figura 2.18.

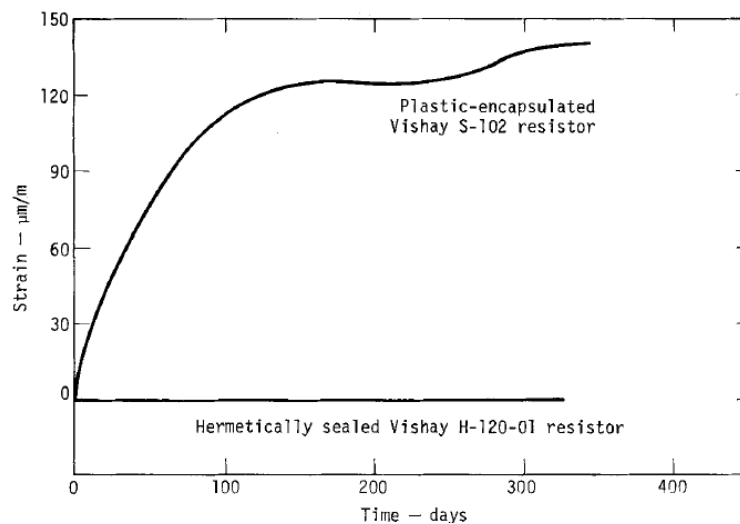
- Instalação 1:
 - Base Poliamida, filamento Constantan e sem encapsulamento. EA-06-125TQ-350
- Instalação 2:
 - Base fenólica reforçada com fibra de vidro, filamento Constantan com encapsulamento. FABX-25-35S6
- Instalação 3:
 - Base em resina epóxi-fenólica reforçada com fibra de vidro, filamento Karma Modificado com encapsulamento. WK-06-250BG-350

Figura 2.18 – Comparativo de variação de offset para 3 modelos diferentes de extensômetros para um monitoramento de longa duração a uma temperatura de 75° C.



Fonte: FreynJk 1976.

Figura 2.19 – Variação offset de sinal de dois modelos de resistores (temperatura mantida em 24° C)



Fonte: FreynJk 1976.

Segundo Grünbaum (2000) transdutores, fabricados com extensômetros, utilizados em aplicações de longa duração (intervalo para realização de calibração de offset é superior a 1 ano) é um desafio. Experimentos realizados pela HBM indicaram um espectro grande de

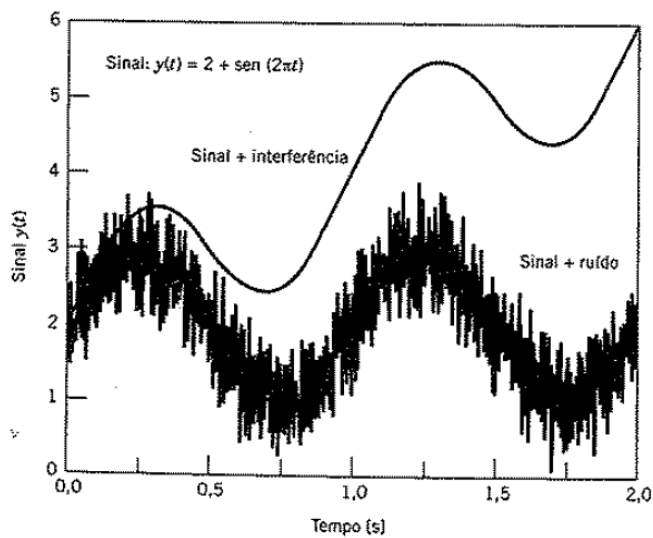
resultados de variação de offset de 0,2% a 1%. Devido ao número de parâmetros que influenciam neste resultado, é um desafio identificar com exatidão quais configurações provocam determinados resultados, ao se realizar ensaios para uma mesma configuração diferentes resultados já foram observados. Com avaliação dos resultados, identificou-se que a utilização de extensômetros de 6mm apresentam um menor erro devido à fluência quando comparado com extensômetros de 3mm, e a qualidade de aplicação do adesivo é um fator importante no resultado. No artigo, são apresentados resultados de ensaios de longa duração para dois comprimentos diferentes de extensômetros, 3mm e 6mm, e submetido a diferentes valores de deformação.

2.4 Análise de dados

A aplicação de filtros em dados de medição remove ruídos do sinal, normalmente de alta frequência, permitindo a visualização de oscilações correspondentes aos parâmetros que se tem interesse. A aplicação de filtros é necessária e muito aplicável durante a avaliação dos dados, porém deve-se ter atenção para que dados reais que apresentem alta frequência não sejam considerados ruídos (Segers 2010).

Segundo Figliola & Beasley (2007) o sinal medido é afetado por variáveis extrínsecas que podem ser classificadas em ruído e interferência. O ruído corresponde a uma variação aleatória do valor medido, como consequência da variação das variáveis extrínsecas, é responsável pelo aumento da dispersão dos dados. A interferência impõe uma tendência determinística indesejável no valor medido. Na Figura 2.20 tem-se um exemplo de efeitos provocados pelo ruído e pela interferência.

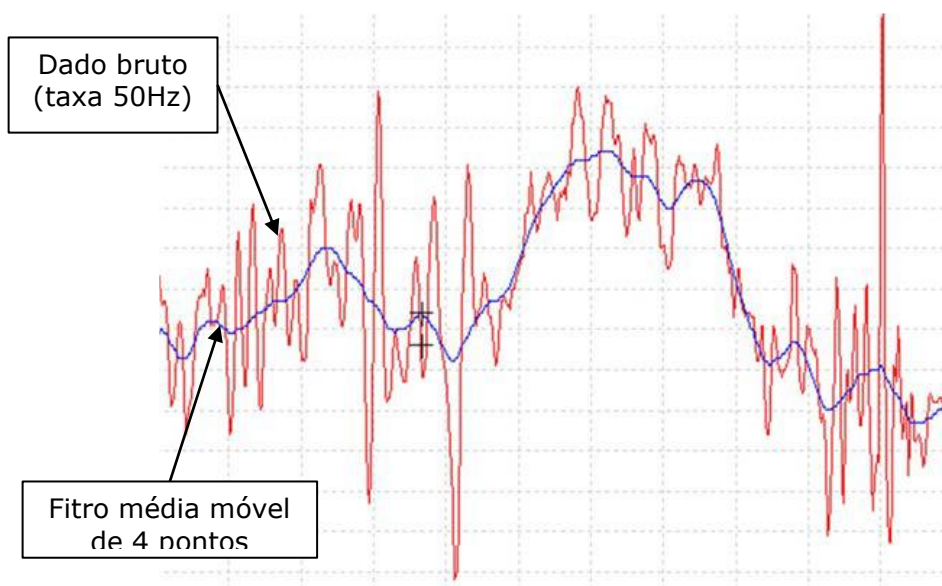
Figura 2.20 – Efeitos do ruído e da interferência.



Fonte: Figliola & Beasley 2007.

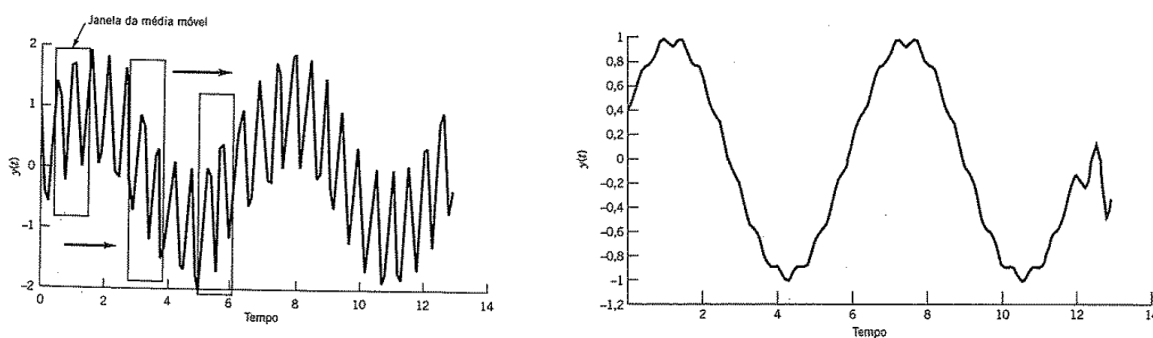
Na Figura 2.21 é apresentado um gráfico de sinal, o qual foi obtido a uma frequência de 50Hz. Este dado foi filtrado aplicando-se filtro média móvel com 4 pontos, nesta metodologia um ponto é substituído pela média entre os quatro pontos anteriores e os quatro pontos anteriores.

Figura 2.21 – Exemplo de aplicação de filtro em um sinal. Frequência do dado bruto 50Hz.



Fonte: Segers 2014.

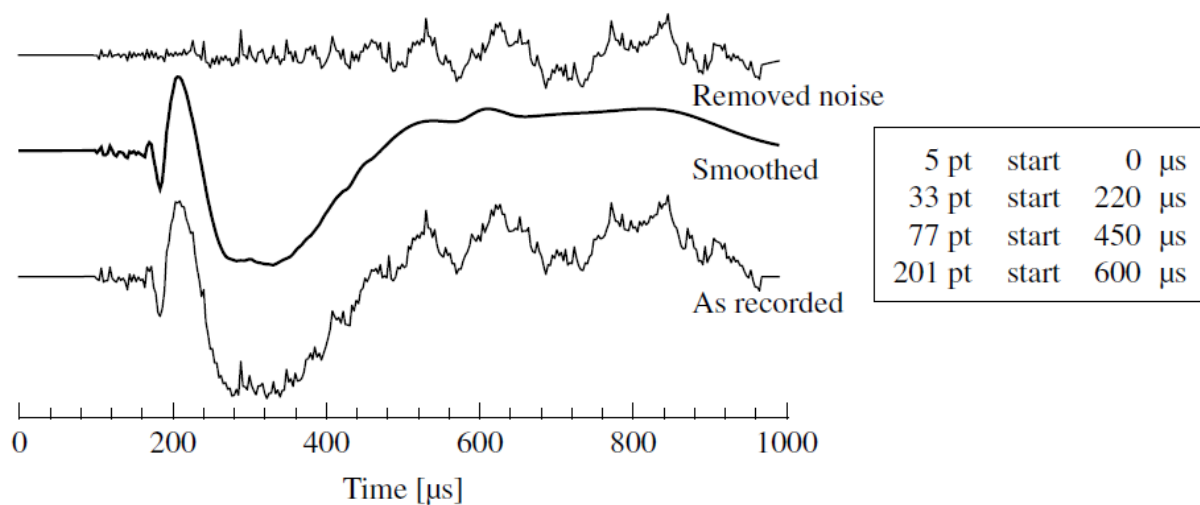
Figura 2.22 – Aplicação de filtro média móvel.



Fonte: Adaptado de Figliola & Beasley 2007.

De acordo com Doyle (2004) a aplicação de média móvel é uma das formas mais simples de filtros de sinais. Na Figura 2.23 está apresentado um exemplo de filtragem de sinais, nota-se a apresentação de gráfico contemplando o ruído removido, informação importante para se avaliar nível de suavização do sinal.

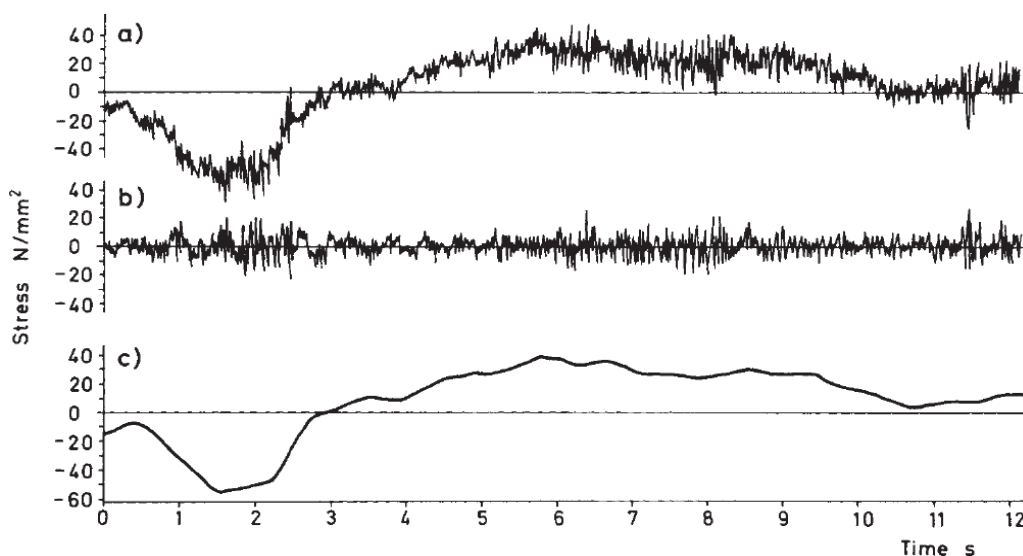
Figura 2.23 – Aplicação de filtro média móvel.



Fonte: Doyle 2004.

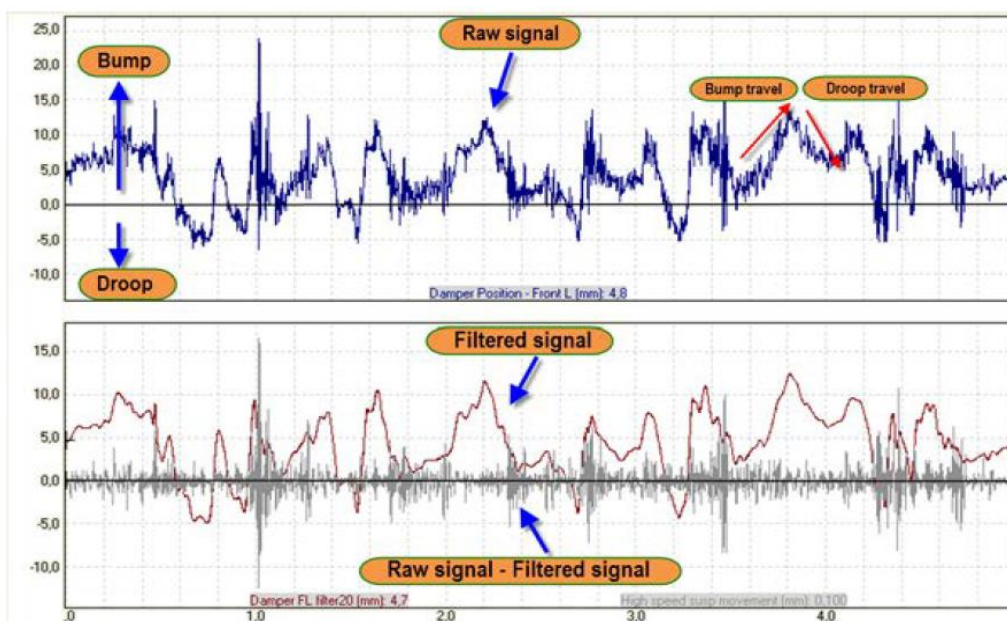
Na Figura 2.24 está apresentado um exemplo de resultado de extensometria na barra de direção de um automóvel, com aplicação de tratamento de dados para retirada de ruídos. Na Figura 2.25 estão apresentados resultados de medição de um potenciômetro linear utilizado para medição de deslocamento de mola de um veículo, destacando-se os sinais antes e após a aplicação de filtros.

Figura 2.24 – Resultado de instrumentação de uma barra de direção de um automóvel. Nota-se apresentação do gráfico de ruído (provocado por rugosidade da pista) além do gráfico do sinal filtrado.



Fonte: Dowling 2013.

Figura 2.25 – Avaliação de resultado de medição de um potenciômetro linear instalado na suspensão de um veículo, com objetivo de obter deslocamentos na mola.



Fonte: Segers 2014.

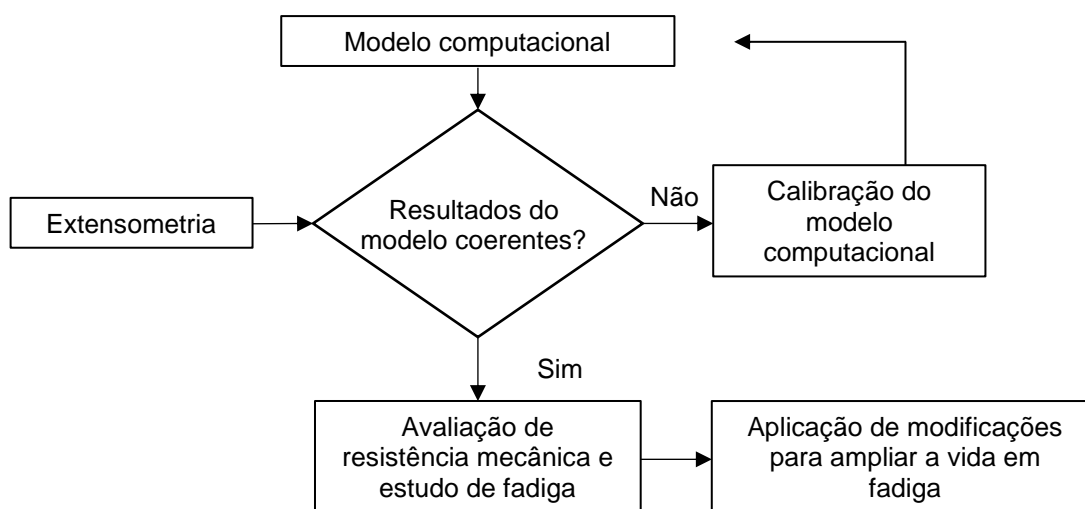
A avaliação dos dados após a aplicação de filtros facilita o estudo das tensões decorrentes de ações que apresentam baixa frequência. Por exemplo, durante a avaliação de uma ponte rolante a avaliação do delta de tensão decorrente de condição com e sem carga apresenta baixa frequência, e os ruídos causados no sinal ocasionados por equipamentos próximos (motores, transformadores, atrito roda/trilho, etc) apresentam alta frequência.

3 METODOLOGIA

O modelo CAD 3D da estrutura principal do transportador de sucatas foi elaborado a partir dos desenhos técnicos, sendo posteriormente utilizado na construção do modelo estrutural em elementos finitos no Ansys 19.2.

O modelo computacional em elementos finitos foi elaborado com objetivo de identificar pontos mais críticos do equipamento, os quais foram posteriormente monitorados por meio da técnica da extensometria. O modelo foi calibrado com os resultados experimentais e utilizado para um estudo de distribuição de tensões. Na Figura 3.1 está apresentado um fluxograma resumindo a metodologia aplicada.

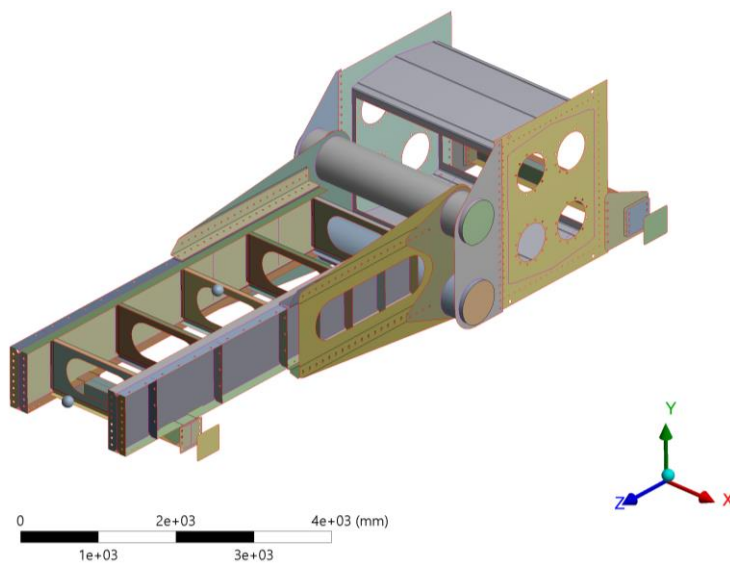
Figura 3.1: Fluxograma do estudo numérico-experimental para determinação das cargas atuantes.



3.1 Modelo computacional

Na Figura 3.2 está apresentado o modelo computacional em elementos finitos, com a indicação do sistema de coordenadas de referência.

Figura 3.2: Sistema de coordenadas do modelo computacional.



3.1.1 Discretização do modelo

Durante o estudo foi realizada uma análise linear elástica utilizando-se o elemento estrutural Shell 181. A Figura 3.4 apresenta a malha utilizada.

Figura 3.3: Pontos de apoio da estrutura.

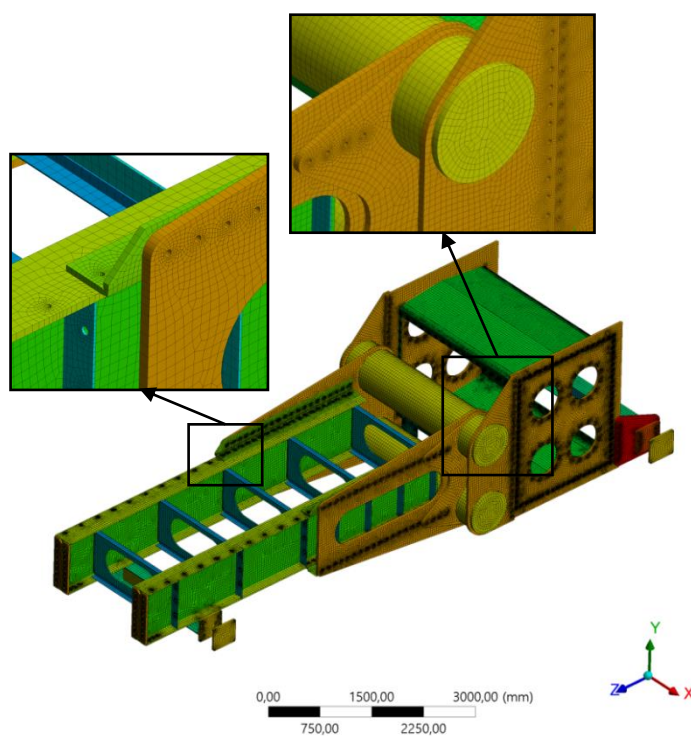
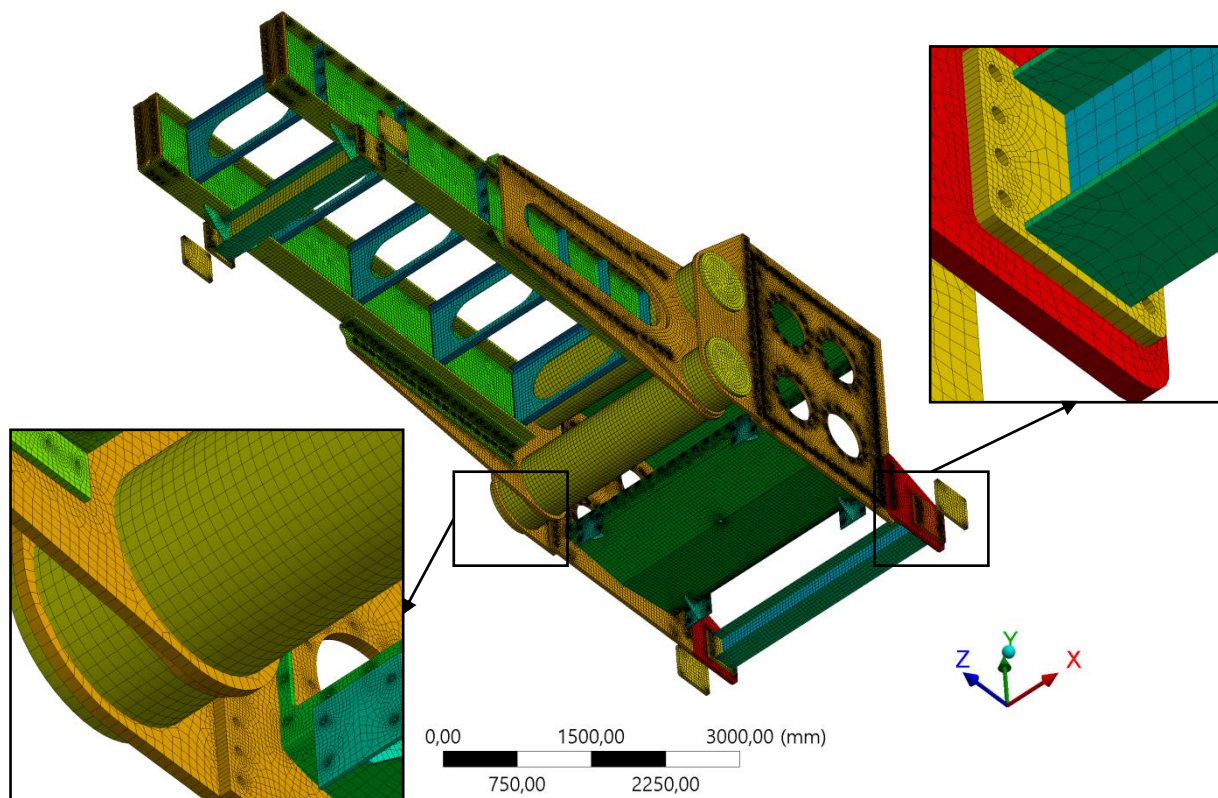


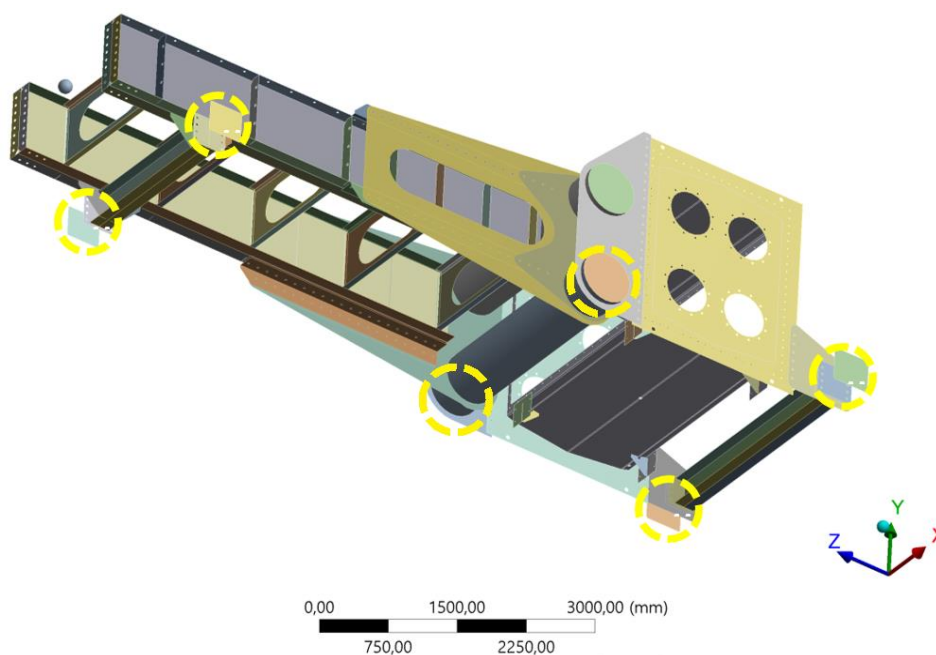
Figura 3.4: Discretização do modelo computacional.



3.1.2 Condições de contorno

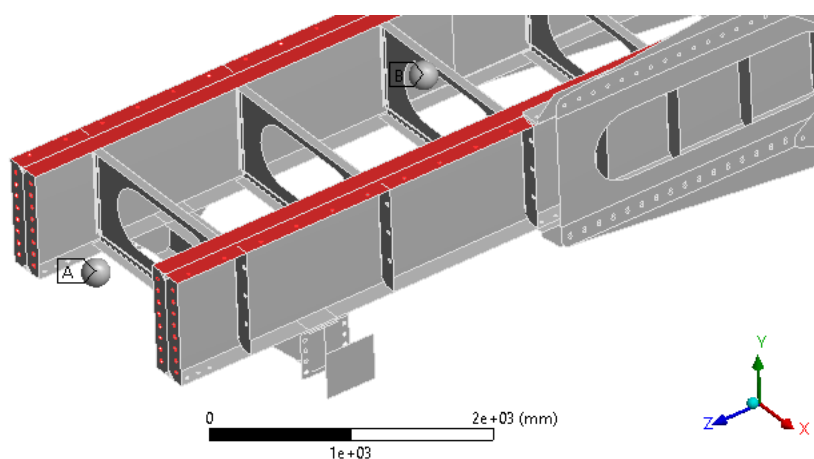
Para representar a condição de fixação do Equipamento, foi considerado como deslocamento na direção Y nulo nas regiões indicadas na Figura 3.3.

Figura 3.5: Pontos de apoio da estrutura.



No modelo foram aplicadas as massas representando os outros componentes do sistema assim como o restante da calha.

Figura 3.6: Regiões de aplicação de massa no modelo.

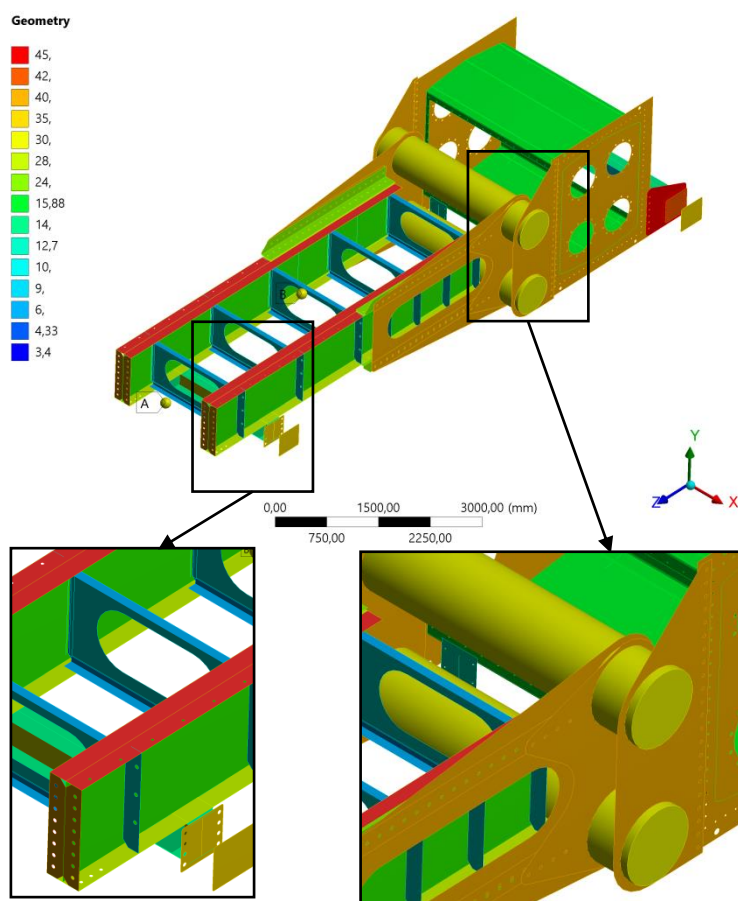


As ações de operação estimadas por meio de modelos analíticos e numéricos foram aplicadas na direção do eixo da calha provocando esforços longitudinais.

3.1.3 Espessuras das chapas do equipamento

As espessuras consideradas na análise correspondem às espessuras de projeto do equipamento, sendo estas apresentadas na Figura 3.7.

Figura 3.7: Espessuras aplicadas no modelo computacional.



3.2 Experimentação

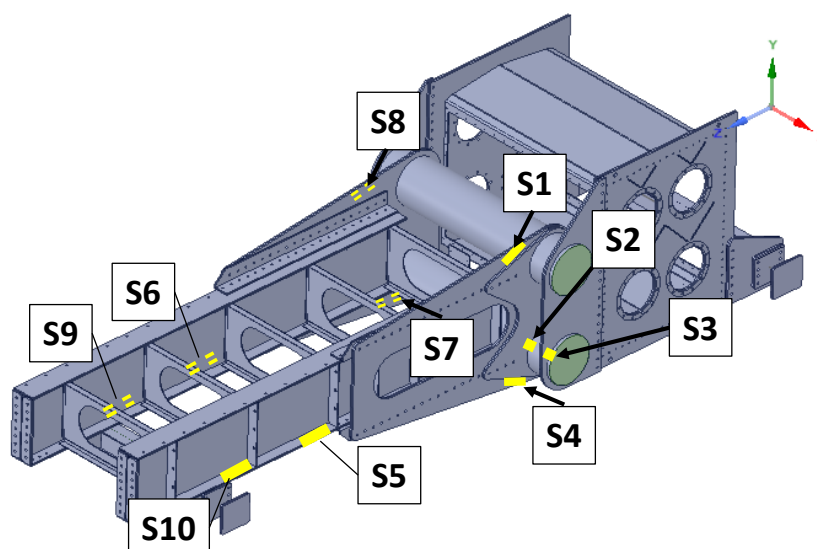
Foram instalados no total 10 pontos de coleta com extensômetros para obtenção do ciclo de tensões atuantes na estrutura do equipamento.

3.2.1 Extensometria

Os níveis de tensões mecânicas durante a operação do equipamento foram obtidos por meio de extensômetros resistivos. O objetivo da extensometria foi identificar ciclos de tensões

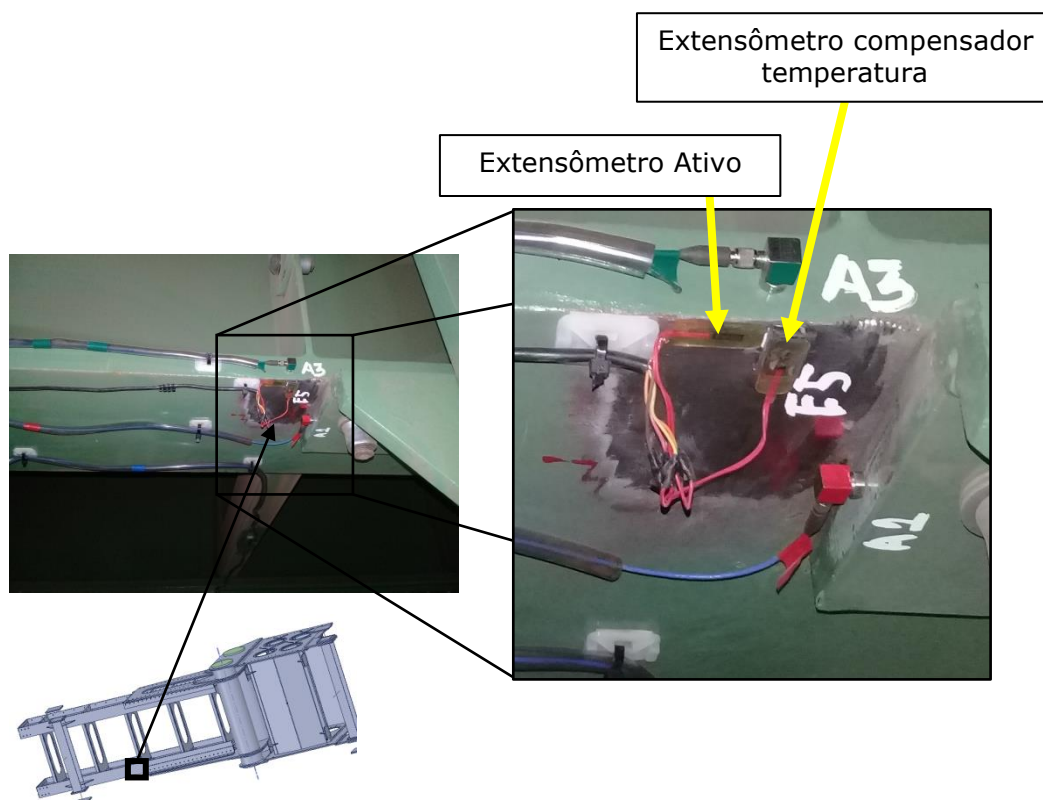
na estrutura do equipamento, os quais foram utilizados durante o estudo de vida em fadiga. Os pontos foram definidos com base nos resultados do modelo computacional preliminar assim como no histórico de trincas. Os pontos que já apresentaram trincas e pontos de maiores tensões mecânicas foram adotados para instrumentação buscando uma distribuição simétrica dos sensores, para possibilitar a obtenção de esforços provocados por cargas transversais ou verticais. A partir da variação dos esforços observada durante a ocorrência dos eventos operacionais é possível compreender melhor o funcionamento do equipamento, obter os carregamentos atuantes na estrutura e ajustar o modelo numérico. A Figura 3.8 apresenta os pontos escolhidos para posicionamento dos extensômetros.

Figura 3.8: Posição escolhida para a fixação dos *Strain Gages* durante o ensaio.



Para realização da extensometria do equipamento, foi instalado um extensômetro em cada ponto medido na estrutura e um segundo extensômetro em uma chapa de aço externa, correspondendo a uma montagem do tipo $\frac{1}{2}$ ponte. O primeiro mede as deformações na estrutura e o segundo permanece livre das deformações. Como ambos estão submetidos à mesma temperatura, pode-se reduzir possíveis erros devidos às variações de temperatura. A Figura 3.9 ilustra a montagem utilizada.

Figura 3.9: Detalhe para o ponto de instalação E5 com indicação do extensômetro Ativo e o Passivo (compensador de temperatura).



A seguir são apresentados os dados do sistema utilizado para a análise experimental de tensões.

Informações do equipamento de aquisição de dados:

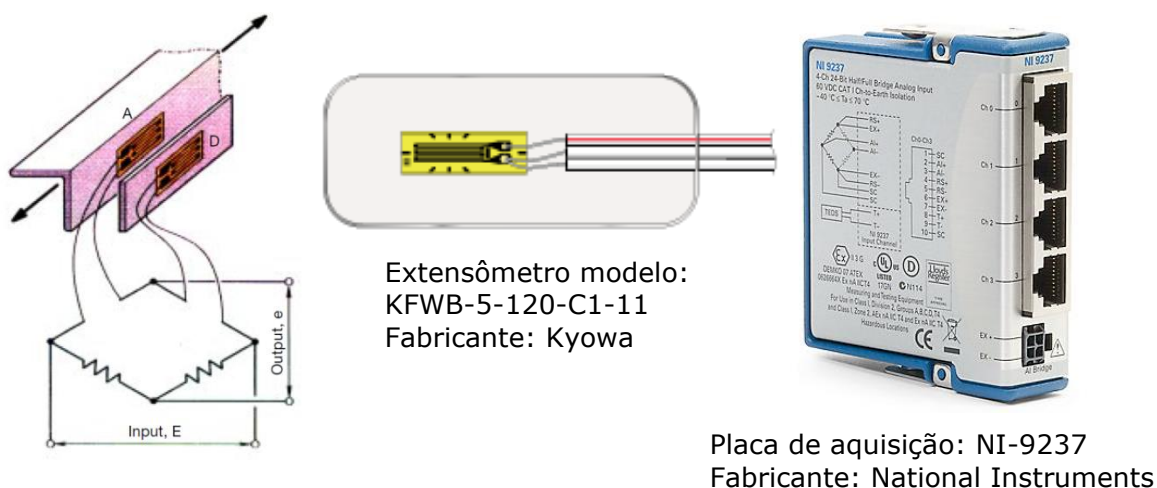
- Modelo: National Instruments cDAQ 9237 (
- Figura 3.10);
- Número de canais utilizados: 8;
- Resolução placa A/D: 24 bits;
- Taxa de Aquisição: 2kHz;
- Gravação e tratamento dos dados: Software Labview e notebook;

Informações dos extensômetros e cabos:

- Cabos: Manga 26AWG BT;
- Extensômetros:

- Modelo: KFWB-5-120-C1-11;
- Fabricante: Kyowa.

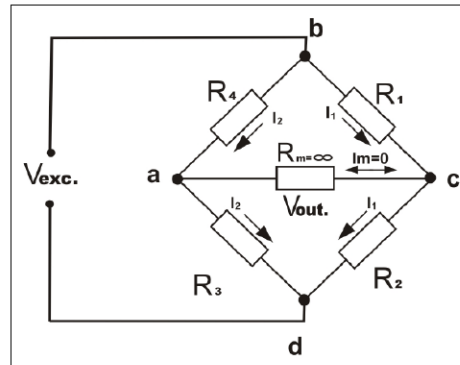
Figura 3.10: Montagem dos *Strain Gages* na ponte de Wheatstone, modelo do extensômetro e placa de aquisição utilizados no ensaio.



A medição da variação da resistência do extensômetro foi realizada com a montagem de uma ponte de Wheatstone, sendo este um circuito elétrico composto por dois divisores resistivos em paralelo, conforme indicado na Figura 3.11.

Esta ponte é composta por uma tensão de entrada em dois vértices (b d) e por uma tensão medida nos outros dois vértices (a c). A ponte de Wheatstone pode ser montada com um número menor do que 4 strain gages, sendo os outros braços balanceados com resistores elétricos de alta precisão. Uma montagem comum é a do tipo meia ponte, composta por dois strain gages, um destes colados na estrutura a ser analisada e um segundo utilizado para compensar as variações de temperatura.

Figura 3.11: Ponte de Wheatstone.



A relação entre a tensão de saída e da tensão de alimentação na ponte de Wheatstone é representada pela equação 1:

$$V_o = \frac{V_{exc}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1)$$

Sendo:

$\frac{\Delta R}{R}$: razão entre a resistência do extensômetro devido à deformação e a sua resistência inicial;

V_{exc} : tensão de excitação da ponte de Wheatstone;

V_o : tensão de saída da ponte de Wheatstone.

A relação entre a variação da resistência do extensômetro e a deformação do material é feita de acordo com a equação 2:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon * k \quad (2)$$

Sendo:

k : constante específica do strain gage.

Substituindo-se a equação 2 na equação 1 obtém-se a relação entre as tensões na ponte e as deformações no material:

$$V_o = \frac{V_{exc} * k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3)$$

Considerando-se a montagem tipo meia ponte, a seguinte equação é aplicada:

$$V_o = \frac{V * k}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (4)$$

3.2.2 Análise de tensões

Durante a verificação de resistência mecânica, determinam-se as tensões nos diferentes elementos da estrutura do equipamento e verifica-se a existência de um coeficiente de segurança suficiente em relação às tensões críticas, considerando as duas seguintes causas de falha possíveis:

- Plastificação;
- Fadiga.

A obtenção das tensões atuantes nos elementos de estrutura é efetuada a partir do modelo computacional em elementos finitos considerando diferentes combinações de ações.

3.2.2.1 Avaliação de resistência mecânica

A norma ABNT NBR 8400:1984 especifica a tensão admissível do material a partir da tensão de escoamento e do caso de solitação analisado. O equipamento é classificado como Caso I – Equipamento em Serviço Normal sem Vento. Portanto, de acordo com a Tabela 12 da mesma norma, as tensões admissíveis à tração ou compressão simples (σ_a) e ao cisalhamento puro (τ_a) serão as indicadas na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1: Tensões admissíveis (Fonte: NBR 8400:1984).

Classe de tensão	Símbolo	Equação
Normal	σ_a	$\frac{\sigma_e}{1,5}$
Cisalhamento	τ_a	$\frac{\sigma_a}{\sqrt{3}}$

No caso específico de junções soldadas, a norma especifica a tensão admissível de cisalhamento como $\frac{\sigma_a}{\sqrt{2}}$.

3.2.2.2 Fadiga

Considerou-se a verificação da fadiga de acordo com o Método do Dano Controlado, que assegura o comportamento satisfatório da estrutura durante o tempo de vida na condição de ser implementado, durante esse período, um programa de inspeção e manutenção destinado a detectar e corrigir o dano por fadiga.

A recomendação IIW (2016) especifica a vida em fadiga em função da resistência à fadiga para $2 \cdot 10^6$ ciclos ($\Delta\sigma_C$) (Quadros 8.1 a 8.10 da norma) e da amplitude de tensão normal ($\Delta\sigma_R$) de acordo com a Eq. 1.

$$N_R = \begin{cases} 2 * 10^6 * \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_R}\right)^3, & \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D \\ 5 * 10^6 * \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_R}\right)^5, & \Delta\sigma_D > \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_L \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde, N_R = Número de ciclos até a falha;

$\Delta\sigma_C$ = Resistência à fadiga para $2 \cdot 10^6$ ciclos [MPa];

$\Delta\sigma_R$ = Intervalo de tensão normal [MPa];

$\Delta\sigma_D = 0,737 * \Delta\sigma_C$

$\Delta\sigma_L = 0,549 * \Delta\sigma_D$

Para $\Delta\sigma_R < \Delta\sigma_L$ a norma considera vida infinita. Porém, convencionou-se como 10^8 ciclos.

O intervalo de tensão normal ($\Delta\sigma_R$) e o número de ciclos associados a ele (nE) foi determinado de acordo com o ciclo de tensão fornecido pela extensometria. Desta forma, calculou-se o dano para um 1 ciclo de acordo com a Eq. 2.

$$D = \sum_i^n \frac{nE_i}{N_{Ri}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, D = Dano equivalente a 1 ciclo;

nE_i = Número de ciclos associado ao intervalo de tensão $\Delta\sigma_{Ri}$ para o patamar i do espectro ponderado;

N_{Ri} = Número de ciclos até a falha calculado para o intervalo de tensões $\Delta\sigma_{Ri}$.

Considerando o dano acumulado até a falha igual a 1, a vida em fadiga do Equipamento pode ser calculada através da Eq. 3.

$$V = \frac{1}{D} \cdot \frac{t_{med}}{t_{op}} \cdot \frac{1}{30} \quad \text{Eq. 3}$$

onde, V = Vida em fadiga [meses];

t_{med} = Tempo de medição;

t_{op} = Tempo de operação por dia [h/dia];

Para realização dos cálculos, adotou-se $t_{op} = 24$ h/dia.

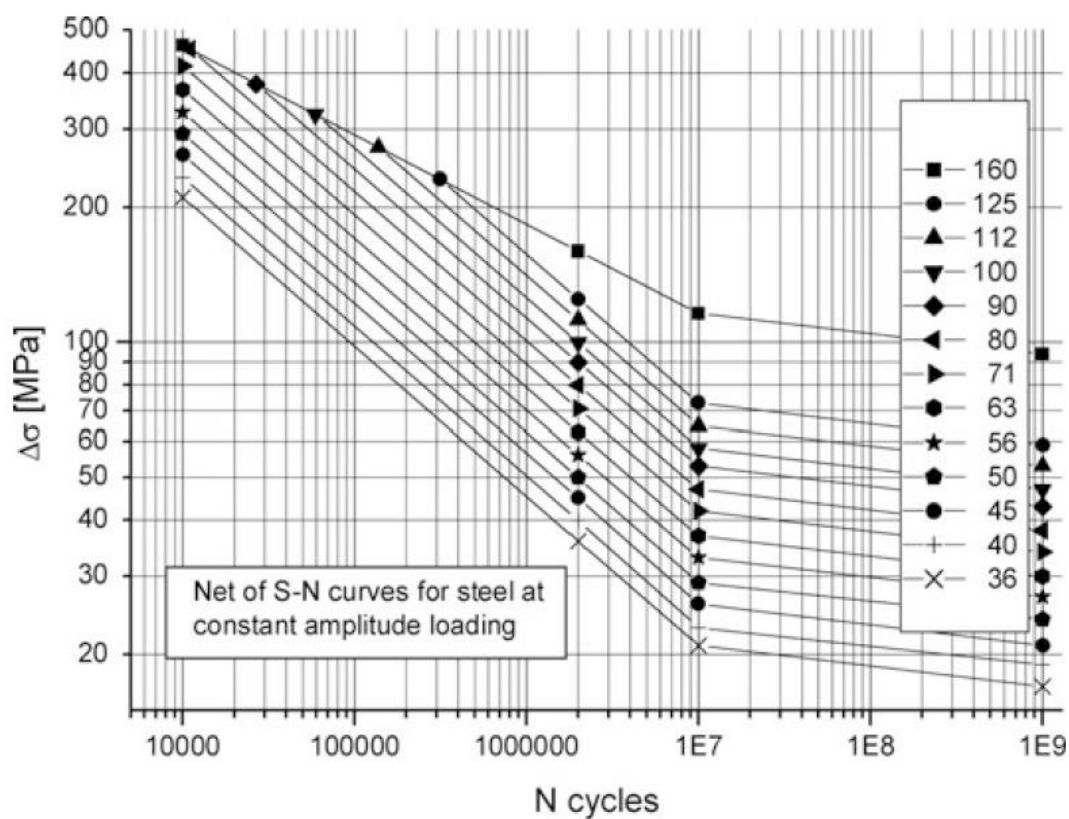
Todas essas descontinuidades do tipo trinca já identificadas no equipamento se iniciaram em regiões cujas ligações foram projetadas como soldadas ou que foram reparadas por meio de solda. Desta forma, será realizada a estimativa de vida dos detalhes que apresentaram descontinuidades registradas na inspeção.

Foi considerado como um ciclo de operação do equipamento um ciclo oscilatório completo. Adotando a maior velocidade da esteira registrada durante as medições foi 210 rpm (velocidade em 100%), o número total de ciclos em um ano foi estimado assumindo que o equipamento com operação 24 horas por dia e 365 dias ao ano sem interrupções.

Por meio dessa estimativa, pode-se classificar o problema como uma fadiga com alto número de ciclos, uma vez que o número de ciclos ocorridos em 1 ano é maior que 10^7 ciclos. Isso significa que os detalhes do equipamento tendem a se situar na região de menor inclinação da curva S-N apresentada na Figura 3.12.

Para determinar a vida útil do componente utilizou-se a interpolação por meio da curva S-N apresentada na Figura 3.12.

Figura 3.12: Curvas SN do aço para amplitude constante de carregamento e elevado numero de ciclos.



Fonte: IIW 2016.

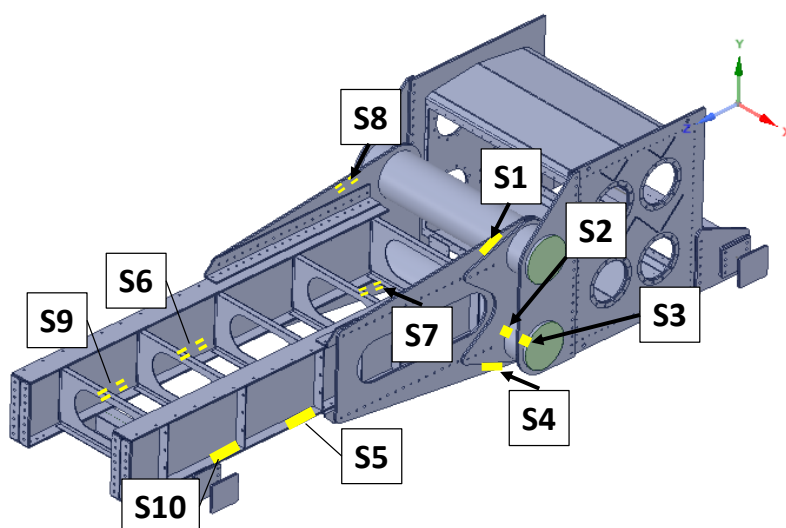
O valor de $\Delta\sigma_D$ para 10^7 ciclos foi determinado a partir do valor de $\Delta\sigma_c$ por meio de curva S-N para $m=3$ (inclinação da curva entre 10^4 e 10^7 ciclos). Tendo em vista que o problema se trata de um elevado número de ciclos, os cálculos da estimativa de vida do componente são feitos com a segunda parte da curva S-N cujo valor da inclinação é $m=22$ (inclinação da curva entre 10^7 e 10^9 ciclos) e a tensão de referência da interpolação é $\Delta\sigma_D$ anteriormente calculado.

4 RESULTADOS

4.1 Extensometria

A partir da variação dos esforços observada por meio da extensometria durante a ocorrência dos eventos operacionais foi possível compreender melhor o funcionamento do equipamento, obter os carregamentos atuantes na estrutura e ajustar o modelo numérico. A Figura 3.8 apresenta os pontos de posicionamento dos extensômetros.

Figura 4.1: Posição escolhida para a fixação dos Strain Gages durante o ensaio.



Os resultados apresentados estão divididos em instantes de operação normal, instante com a máxima velocidade e instante de queda de material.

4.1.1 Extensometria – operação normal

A operação normal corresponde a condição de trabalho com material na calha e na velocidade máxima da caixa acionadora. Na Figura 4.2 à Figura 4.10 estão apresentados os resultados obtidos para os pontos E1 à E10.

Figura 4.2: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E1.

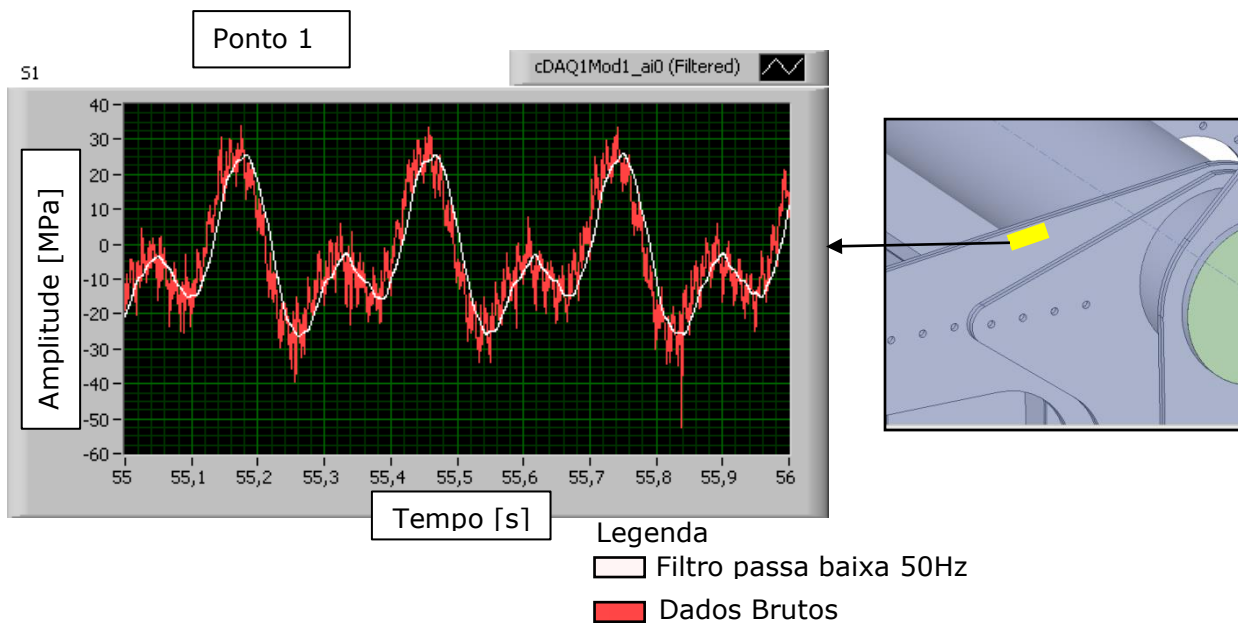


Figura 4.3: Ciclos de tensão obtidos para os pontos E2 e E3.

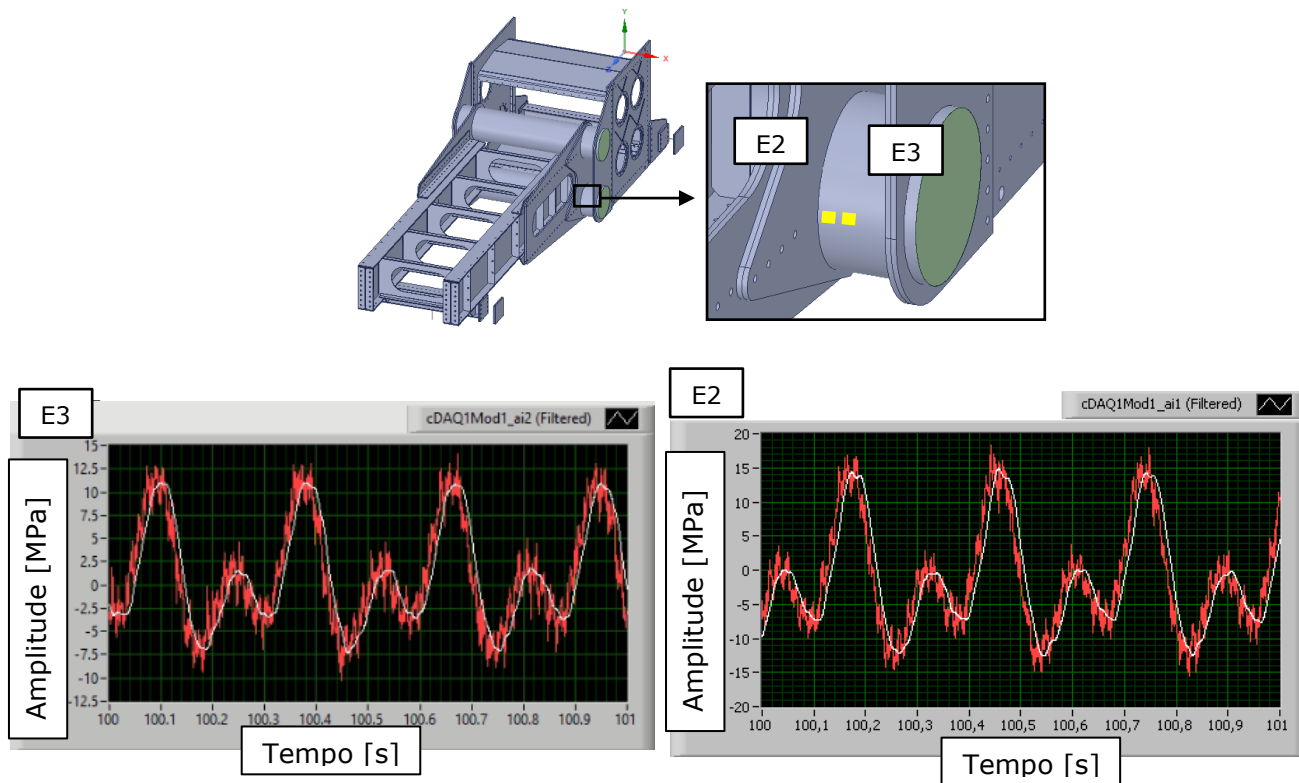


Figura 4.4: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E4.

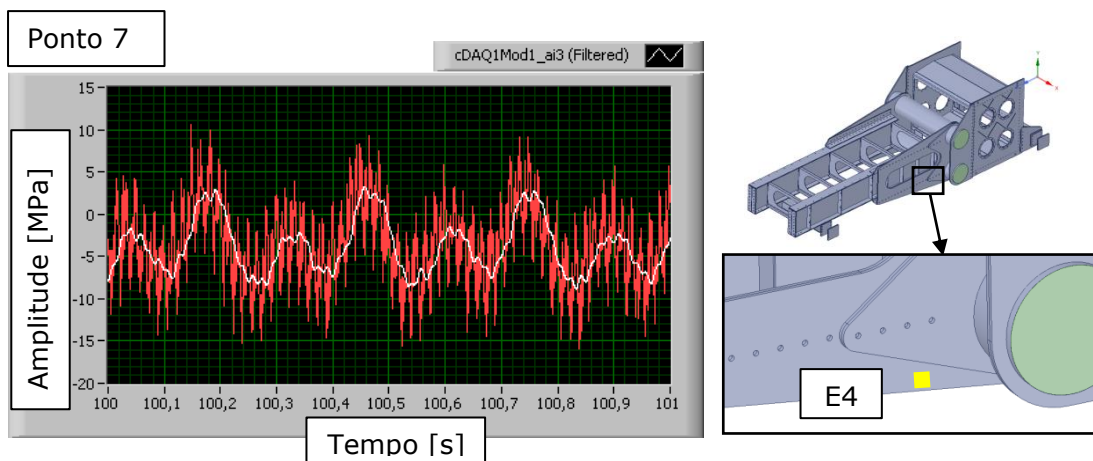


Figura 4.5: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E5.

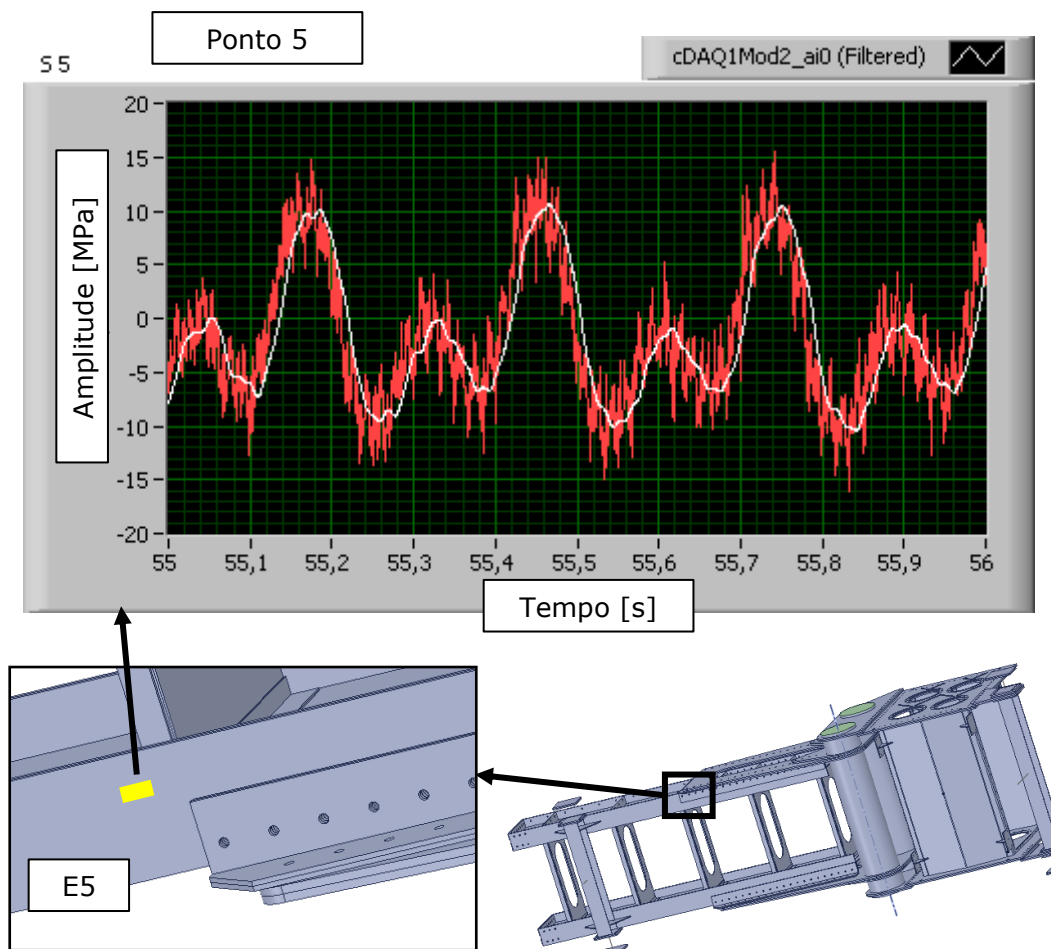


Figura 4.6: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E6.

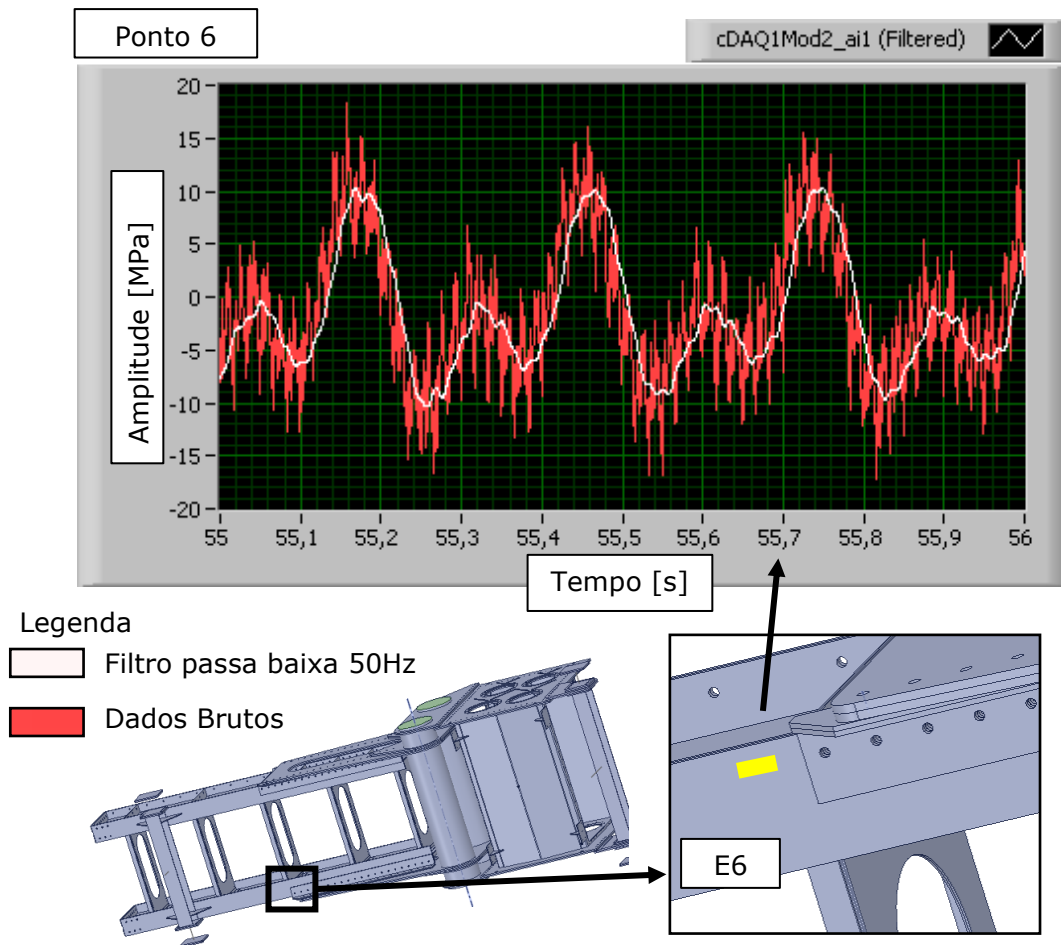


Figura 4.7: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E7.

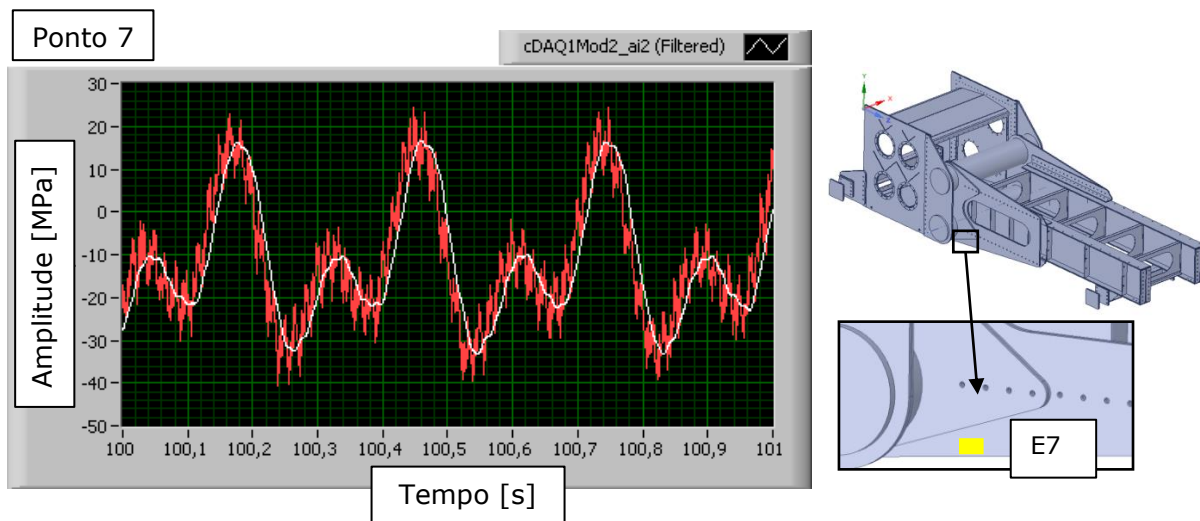


Figura 4.8: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E8.

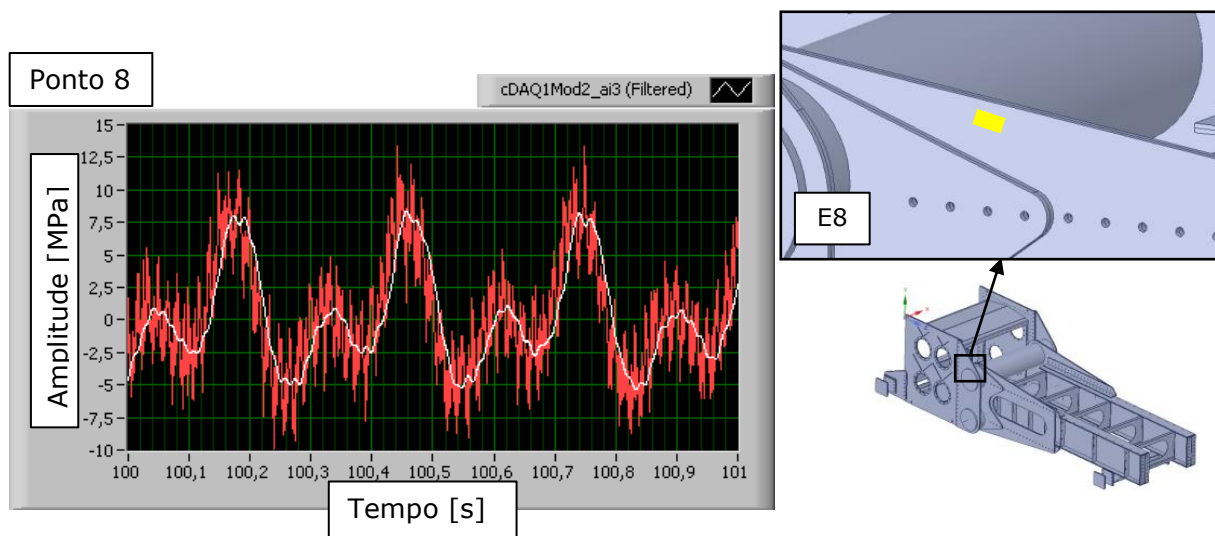


Figura 4.9: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E9.

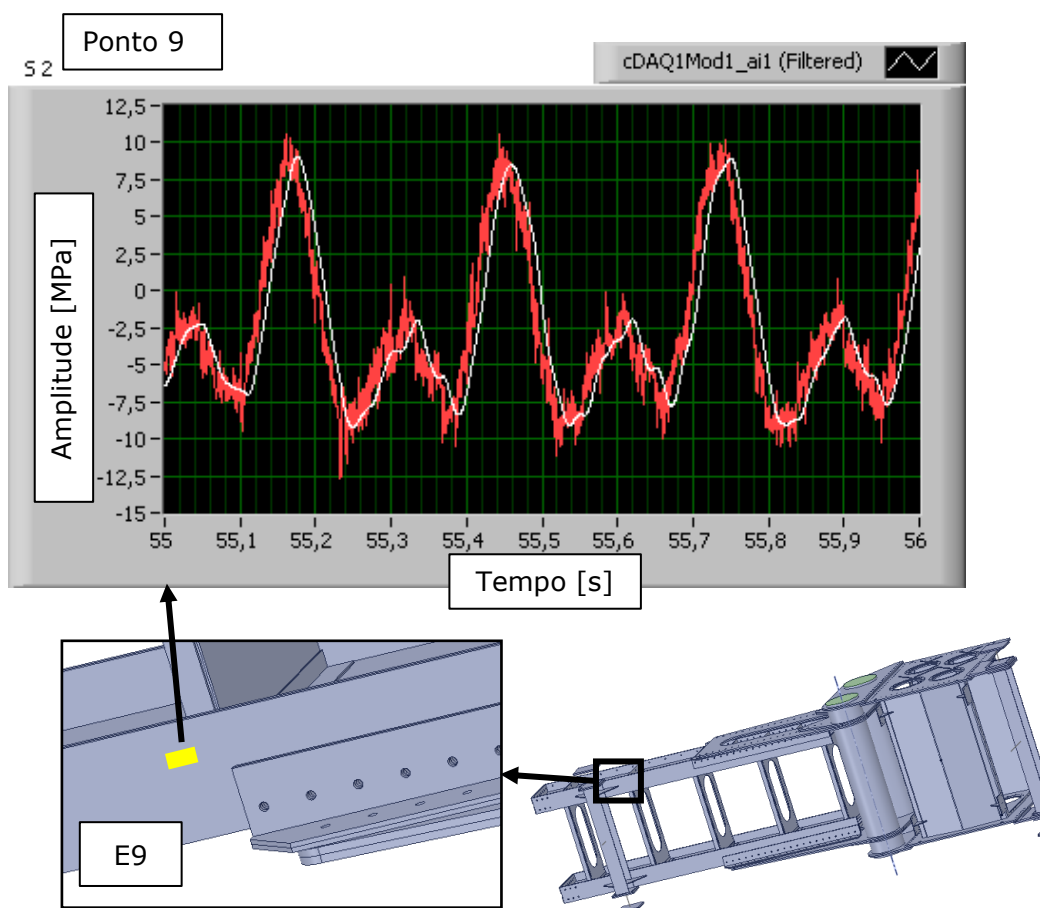
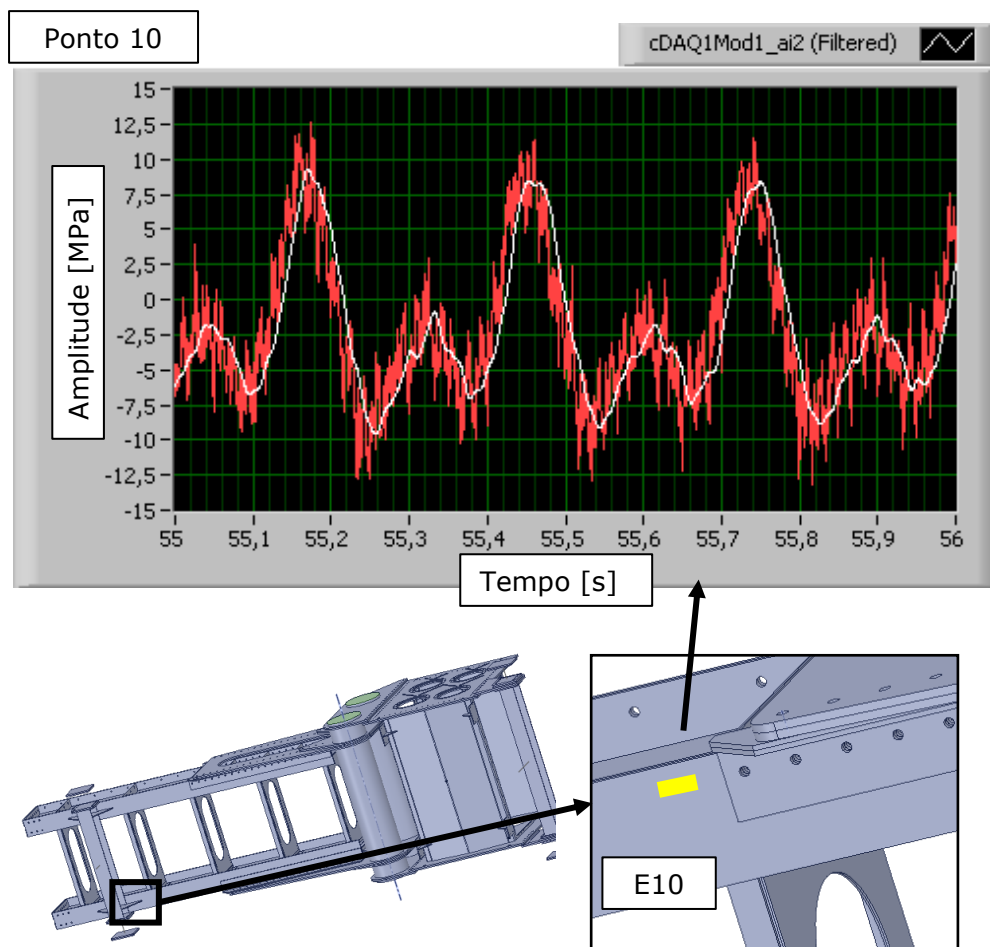


Figura 4.10: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E10.



Verifica-se nos resultados obtidos uma uniformidade para os ciclos de tensões durante a operação e valores baixos de amplitudes. Não foram identificados instantes de picos de tensão ou incompatibilidades para pontos instalados de forma simétrica na estrutura.

4.1.2 Extensometria – queda de material

Além da operação normal, foram medidos os instantes de queda de material na calha, correspondente à etapa de alimentação do transportador. Na Figura 4.11 à Figura 4.16 estão apresentados os resultados obtidos.

Figura 4.11: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E1.

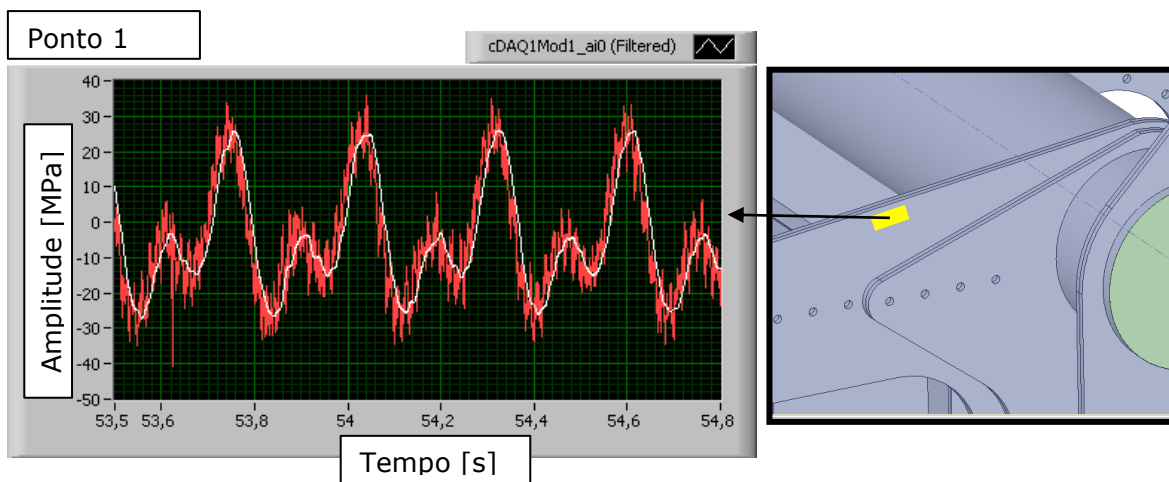


Figura 4.12: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E2 e E3.

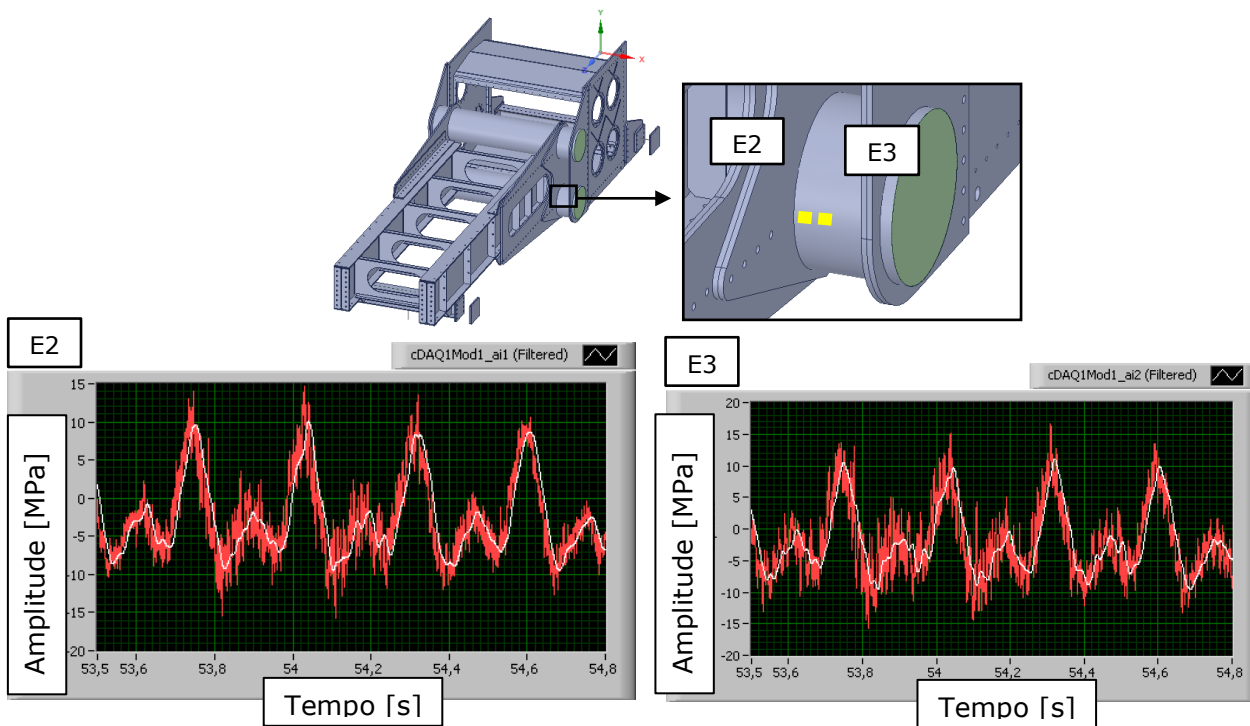


Figura 4.13: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E4.

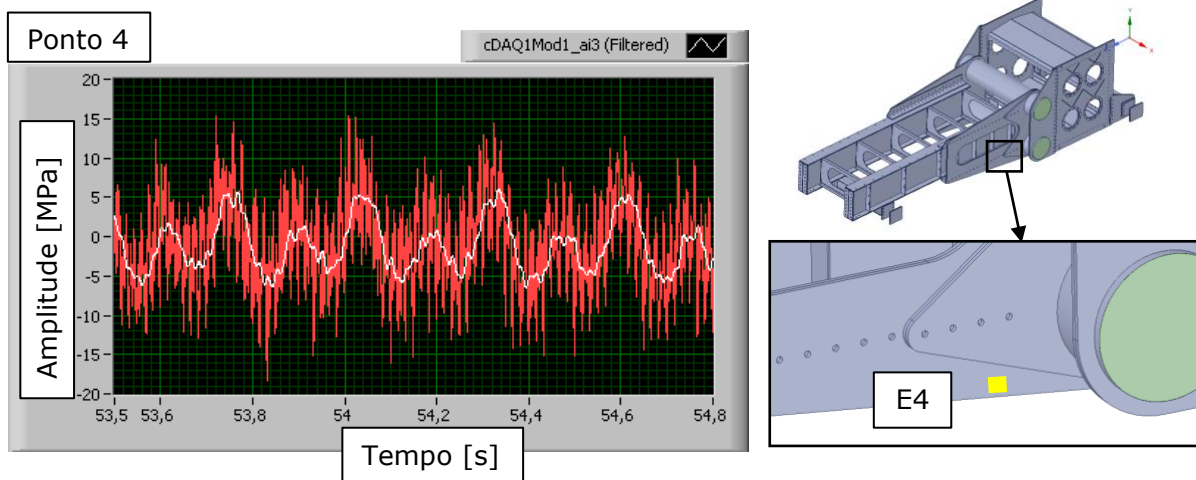


Figura 4.14: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E5 e E6.

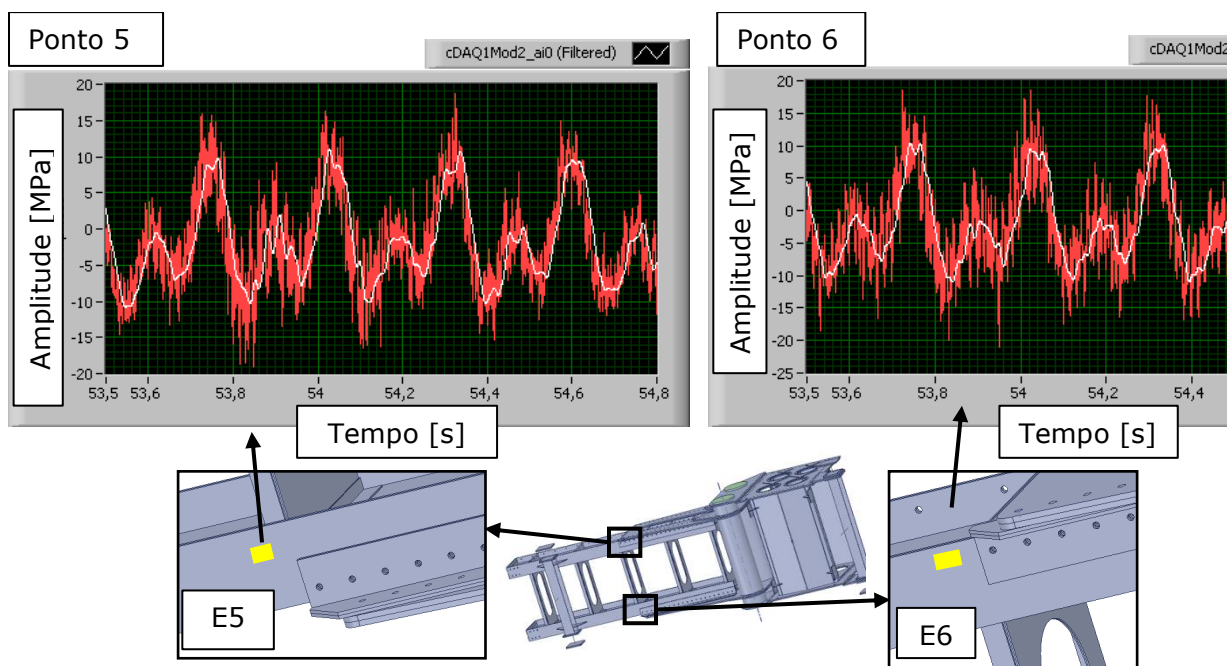


Figura 4.15: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E7.

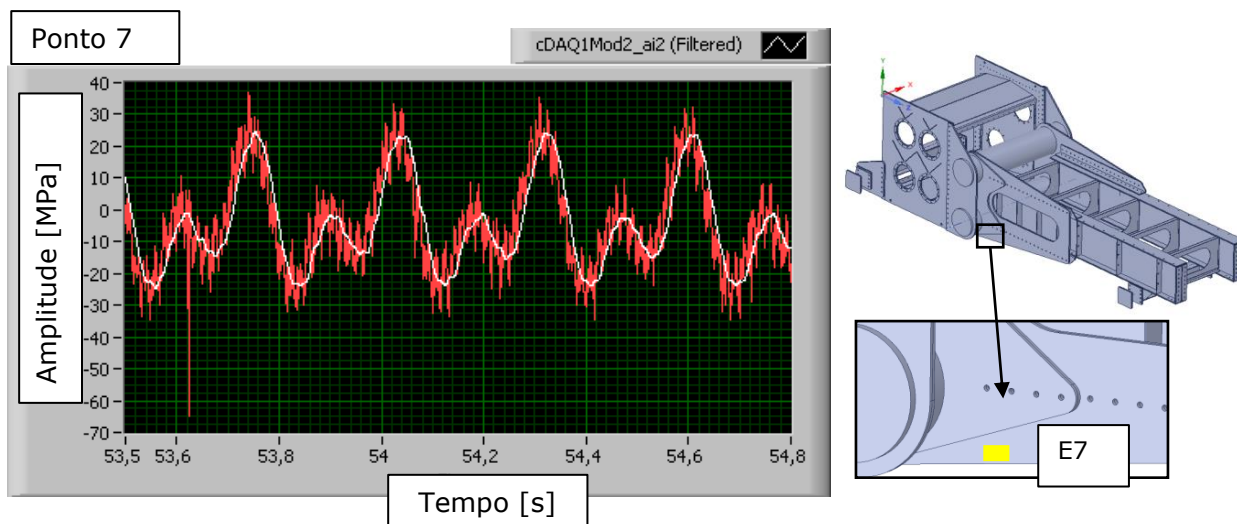
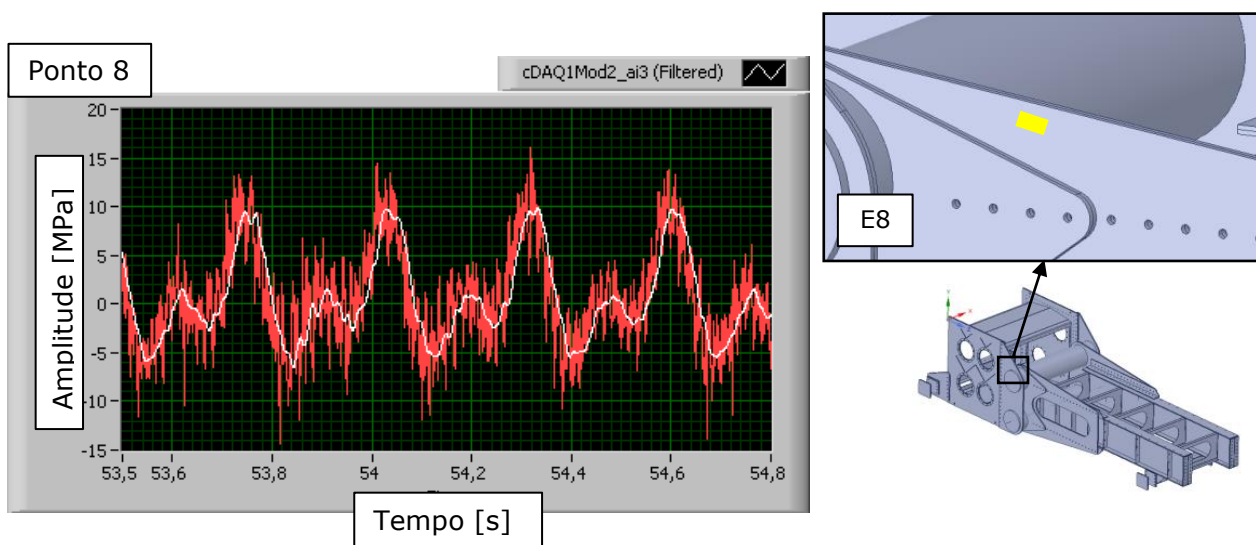


Figura 4.16: Ciclos de tensão obtidos para o ponto E8.



Verifica-se nos resultados que as tensões não apresentam variações em relação à condição de operação normal (sem queda de material). Avaliando-se as tensões, é possível observar que a queda de material gera oscilações locais de alta frequência e baixa amplitude que são desprezíveis perante o movimento oscilatório global do equipamento. Verificam-se que as amplitudes de tensões apresentam magnitudes semelhantes aos resultados apresentados no item 4.1.1, o qual corresponde à condição de operação sem queda de material. Portanto, a queda de material na calha não corresponde a uma condição crítica de operação.

4.2 Análise de fadiga

Com base no modelo computacional em elementos finitos, o qual foi calibrado tomando-se como referência os dados da extensometria, os pontos que apresentaram trincas na estrutura foram avaliados quanto à vida em fadiga.

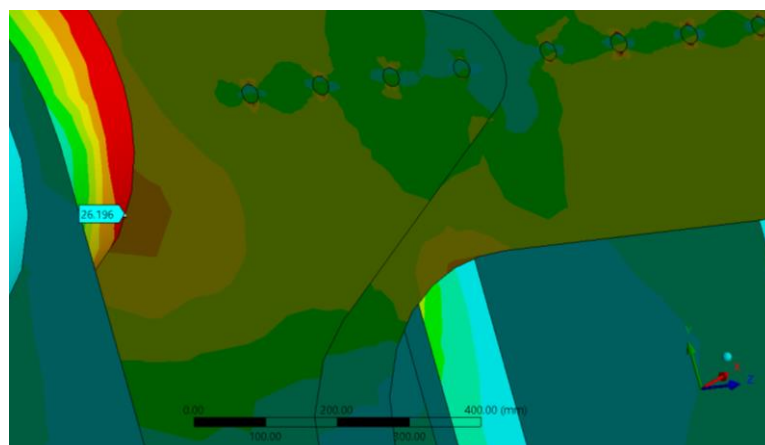
A Figura 4.17 apresenta a descontinuidade D1 encontrada durante inspeções do equipamento, uma trinca no pé do filete de solda.

Figura 4.17: Descontinuidade D1 na solda das juntas tubulares lado direito.

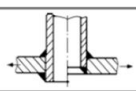


A amplitude da máxima tensão principal atuante $\Delta\sigma$, obtido com o modelo computacional em elementos finitos no ponto indicado na Figura 4.18 foi 26,19 MPa.

Figura 4.18: Tensão na Descontinuidade D1 obtida pelo modelo ajustado



O detalhe 832 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima de onde foi encontrada a descontinuidade D1 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

832		Tubular branch or pipe penetrating a plate, fillet welds. Toe cracks	71	25	However, structural hot spot stress recommended
		Root cracks (analysis based on stress in weld throat)	36	12	If diameter > 50 mm, stress concentration of cutout has to be considered Analysis based on modified nominal stress. However, structural hot spot stress recommended

57

(continued)

Adotando $\gamma = 1,15$, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D1:
(IIW 2016 Table 3.1
- Detalhe 832)
para $t > 25\text{mm}$: $k_s := \left(\frac{25}{40}\right)^{0,3}$

$$\Delta\sigma_{c1} := \frac{k_s \cdot 71 \text{ MPa}}{\gamma}$$

$$\Delta\sigma_{c1} = 53,6197 \text{ MPa}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ determinado foi 31,35 MPa. Por fim, a vida útil estimada foi de $5,2 \times 10^8$ ciclos, ou seja, 57 meses. Essa vida útil indica o tempo mínimo estimado para a vida deste detalhe. Contudo, os demais detalhes apresentados a seguir são mais críticos e, por isso são determinantes na vida útil do equipamento.

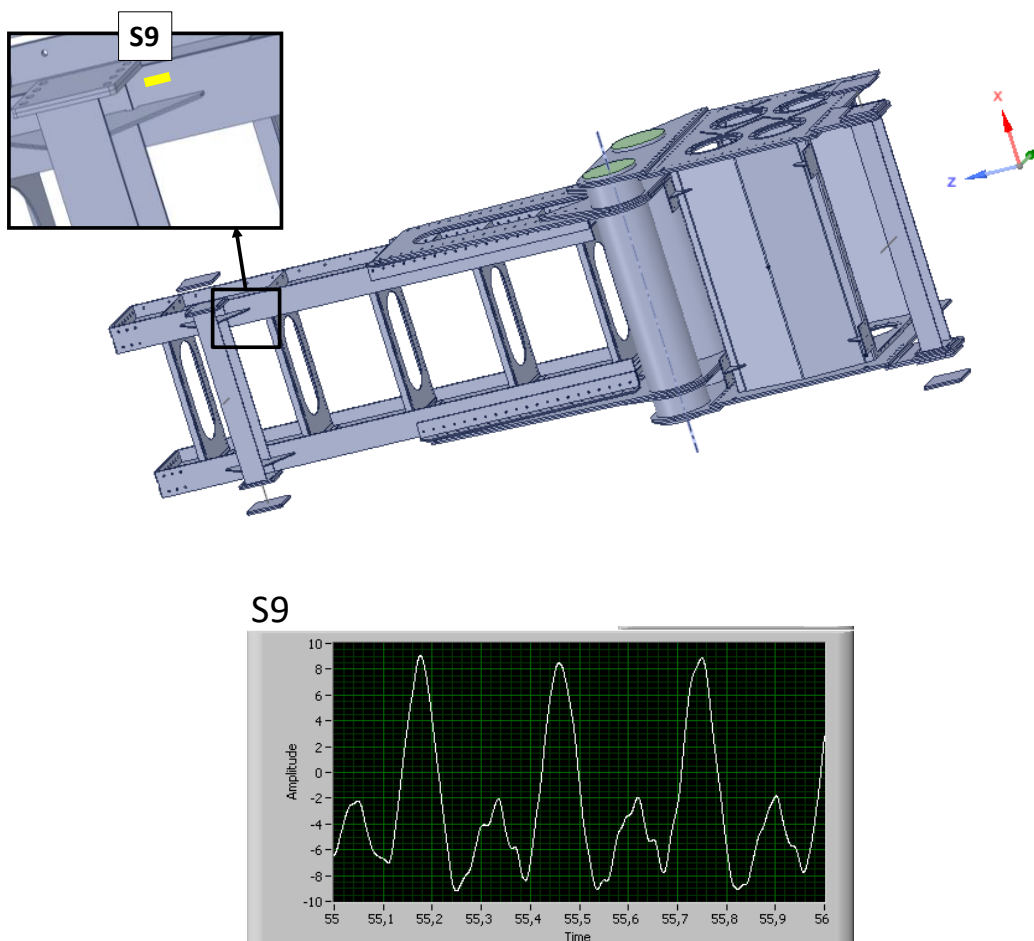
A Figura 4.19 apresenta a descontinuidade D3 encontrada durante inspeções do equipamento.

Figura 4.19: Descontinuidade D3 na solda próxima ao tirante 7.



O variação da máxima tensão atuante $\Delta\sigma_r$ medido pelo extensômetro S9 no ponto indicado na Figura 4.20 foi 19,0 MPa.

Figura 4.20: Tensão na Descontinuidade D3 obtida pelo extensômetro S9.



O detalhe 614 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima de onde foi encontrada a descontinuidade D3 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

614		Transverse loaded overlap joint with fillet welds Stress in plate at weld toe (toe crack) Stress in weld throat (root crack)	63 36	22 12	Stresses to be calculated using a plate width equalling the weld length For stress in plate, eccentricity to be considered, as given in chapters 3.8.2 and 6.3 Both failure modes have to be assessed separately
-----	--	--	----------	----------	--

Adotando $\gamma = 1,15$ e assumindo que a trinca tenha se iniciado na raiz da solda, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D3:
(IIW 2016 Table 3.1
- Detalhe 216)

$$\text{para } t > 25\text{mm: } k_s := \left(\frac{25}{28}\right)^{0,2}$$

$$\Delta\sigma_{c_2} := \frac{k_s \cdot 36 \text{ MPa}}{\gamma} \quad \Delta\sigma_{c_2} = 30,6028 \text{ MPa}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ calculado foi 17,9 MPa. Por fim a vida útil estimada foi de $8,36 \times 10^6$ ciclos, ou seja, 1 mês.

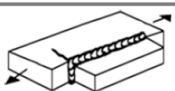
As Figura 4.21 apresenta as descontinuidades D4 e D5 encontradas durante inspeções do equipamento.

Figura 4.21: Descontinuidades D4 (esquerda) e D5 (direita) na solda próxima ao tirante 9.



A variação da da máxima tensão atuante $\Delta\sigma_r$ medido pelo extensômetro S9 no ponto indicado na Figura 4.20 também pode ser adotado para as descontinuidades D4 e D5 pelo fato de ambas as trincas estarem na mesma região.

O detalhe 525 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima dos detalhes das descontinuidades D4 e D5 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

No.	Structural Detail	Description (St. = steel; Al. = aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and remarks
525		In-plane or out-of-plane longitudinal gusset welded to plate or beam flange edge, gusset length l: l < 150 mm l < 300 mm l > 300 mm	50 45 40	18 16 14	For $t_2 < 0.7 t_1$, FAT rises 12 % t_1 is main plate thckness t_2 is gusset thickness

Adotando $\gamma = 1,15$ e sabendo que $l > 300$ mm, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D4 e D5:
 (IIW 2016 Table 3.1
 - Detalhe 525 l=420mm)

para $t > 25$ mm: $k_s := \left(\frac{25}{28}\right)^{0,3}$

$$\Delta\sigma_{c_3} := \frac{k_s \cdot 40 \text{ MPa}}{\gamma} \quad \Delta\sigma_{c_3} = 33,6199 \text{ MPa}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ calculado foi 19,7 MPa. Por fim a vida útil estimada foi de $2,12 \times 10^7$ ciclos, ou seja, 2 meses.

A Figura 4.22 apresenta a descontinuidade D6 encontrada durante inspeções do equipamento.

Figura 4.22: Descontinuidade D6 na solda ligando as chapas parafusadas.



A variação da máxima tensão principal atuante $\Delta\sigma_r$ no ponto indicado na Figura 4.23 foi 20,3 MPa.

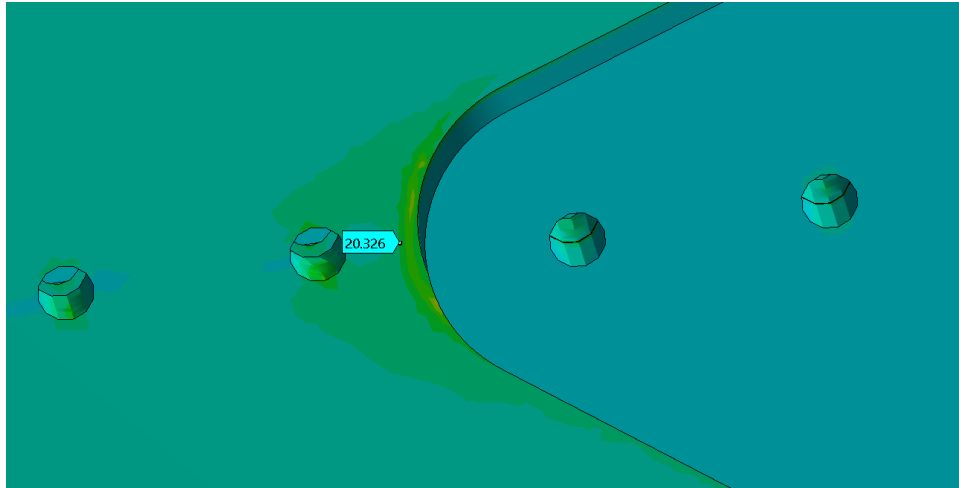
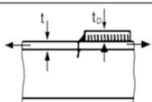


Figura 4.23: Tensão na Descontinuidade D6 obtida pelo modelo ajustado

O detalhe 711 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima de onde foi encontrada a descontinuidade D6 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

700	Reinforcements			
711		End of long doubling plate on I-beam, welded ends (based on stress range in flange at weld toe) $t_D \leq 0.8 t$ $0.8 t < t_D \leq 1.5 t$ $t_D > 1.5 t$	56 50 45	20 18 16
				End zones of single or multiple welded cover plates, with or without transverse welds If the cover plate is wider than the flange, a transverse weld is needed. No undercut at transverse welds

Adotando $\gamma = 1,15$ e sabendo que as espessuras das duas chapas são iguais, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D6:
 (IIW 2016 Table 3.1
 - Detalhe 711 $t_c=t=40\text{mm}$)

para $t > 25\text{mm}$: $k_s := \left(\frac{25}{40}\right)^{0,3}$

$$\Delta\sigma_{c_4} := \frac{k_s \cdot 50 \text{ MPa}}{\gamma} \quad \Delta\sigma_{c_4} = 37,7604 \text{ MPa}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ determinado foi 22,08 MPa. Por fim, a vida útil estimada foi de $6,37 \times 10^7$ ciclos, ou seja, 7 meses.

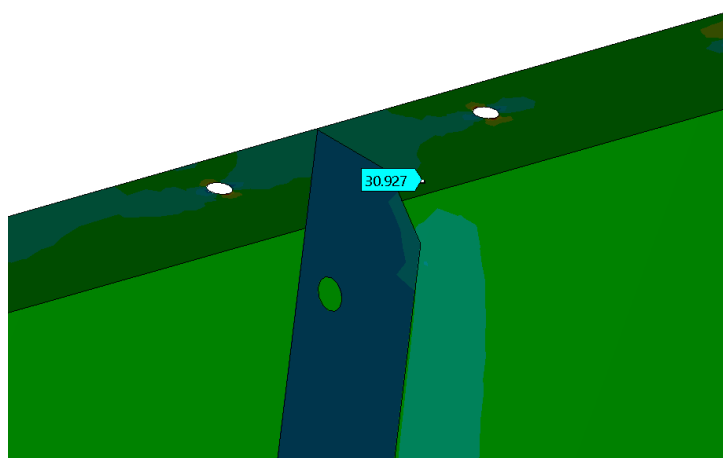
A Figura 4.24 apresenta as descontinuidades D8, D9 e D10 encontradas durante inspeções do equipamento.



Figura 4.24: Descontinuidade D8, D9 e D10 na solda das mesas com os enrijecedores.

A variação da máxima tensão principal atuante $\Delta\sigma_r$ no ponto indicado na Figura 4.25 foi 30,9 MPa. Essa solicitação é aplicável para as descontinuidades D8, D9 e D10, pois os detalhes são os mesmos e os valores de tensão muito semelhantes.

Figura 4.25: Tensão na Descontinuidade D8 obtida pelo modelo ajustado.



O detalhe 515 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima de onde foram encontradas as descontinuidades D8, D9 e D10 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

No.	Structural Detail	Description (St. = steel; Al. = aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and remarks
515		Trapezoidal stiffener to deck plate, fillet or partial penetration weld, out of plane bending	71	25	Calculation based on maximum out-of-plane bending stress range in weld throat or stiffener

Adotando $\gamma = 1,15$ e sabendo que as espessuras das duas chapas são iguais, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D8, D9 e D10:
(IIW 2016 Table 3.1
- Detalhe 515)

$$\text{para } t \leq 25\text{mm: } k_s := \left(\frac{25}{25}\right)^{0,3}$$

$$\Delta\sigma_{c5} := \frac{k_s \cdot 71 \text{ MPa}}{\gamma} \quad \Delta\sigma_{c5} = 61,7391 \text{ MPa}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ determinado foi 36,1 MPa. Por fim, a vida útil estimada foi de $3,07 \times 10^8$ ciclos, ou seja, 33 meses.

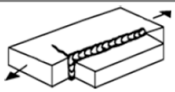
A Figura 4.26 apresenta trincas encontradas durante inspeções do equipamento.

Figura 4.26: Descontinuidades D13 (esquerda) e D14 (direita) na solda próximas ao tirante 9.



A variação da máxima tensão atuante $\Delta\sigma_r$ medido pelo extensômetro S9 no ponto indicado na Figura 4.20 também pode ser adotado para as descontinuidades D13 e D14 pelo fato de ambas as trincas estarem na mesma região e com a mesma orientação.

O detalhe 525 da tabela 3.1 da IIW (2016) foi adotado para determinar o valor de $\Delta\sigma_c$ na curva S-N. Esse detalhe foi escolhido por ser o detalhe que mais se aproxima dos detalhes das descontinuidades D13 e D14 avaliando as características geométricas, a direção da tensão principal e o local de iniciação da trinca.

No.	Structural Detail	Description (St. = steel; Al. = aluminium)	FAT		Requirements and remarks
			St.	Al.	
525		In-plane or out-of-plane longitudinal gusset welded to plate or beam flange edge, gusset length l: l < 150 mm l < 300 mm l > 300 mm	50 45 40	18 16 14	For $t_2 < 0.7 t_1$, FAT rises 12 % t_1 is main plate thickness t_2 is gusset thickness

A variação da máxima tensão atuante $\Delta\sigma_r$ foi medido pelo extensômetro S9 no ponto indicado na Figura 4.20

Adotando $\gamma = 1,15$ e sabendo que $l > 300$ mm, os cálculos a seguir foram usados para determinar o $\Delta\sigma_c$ para este detalhe:

Curva Fadiga D13 e D14:
(IIW 2016 Table 3.1
- Detalhe 525 $l=420$ mm)

$$\text{para } t \leq 25\text{mm: } k_s := \left(\frac{25}{28}\right)^{0,3}$$

$$\Delta\sigma_c = \frac{k_s \cdot 40 \text{ MPa}}{\gamma} = \frac{33,6199 \text{ MPa}}{1,15}$$

A partir do valor de $\Delta\sigma_c$, o $\Delta\sigma_d$ calculado foi 19,7 MPa. Por fim a vida útil estimada foi de $9,5 \times 10^6$ ciclos, ou seja, 1 mês.

5 CONCLUSÃO

Visando investigar a causa do elevado número de trincas na estrutura do equipamento, realizou-se uma inspeção em campo na qual foram encontradas 14 descontinuidades. Posteriormente, foram realizados ensaios com extensômetros que permitiram compatibilizar o modelo numérico desenvolvido.

Observando-se os níveis de tensões obtidos no equipamento, pode-se concluir que a causa do problema é o elevado número de ciclos aliado à baixa resistência à fadiga de alguns detalhes estruturais. Essa baixa resistência à fadiga está relacionada principalmente à qualidade de execução da solda e à escolha do tipo de ligação.

Portanto, em um primeiro momento enquanto a estrutura do equipamento não for substituída,

Recomenda-se que as descontinuidades sejam recuperadas aplicando os procedimentos adequados de soldagem para a recuperação das trincas, verificando sempre a ocorrência da penetração total da solda e garantindo que após esse processo não exista descontinuidades remanescentes no interior da chapa. O tratamento de tensões residuais e o desbaste do pé da solda também são processos recomendados que favorecem o aumento da resistência e consequentemente da vida útil do detalhe.

Como uma solução visando a preservação da estrutura em longo prazo, é recomendada a substituição da estrutura do equipamento com adaptações no projeto, visando reduzir o número de ligações soldadas. Nos detalhes que permanecerem soldados devem-se aplicar procedimentos e métodos durante a soldagem que promovam maior resistência à fadiga.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS D1.1, **Structural Welding Code Steel**, 17ª Edição American Welding Society 2000.

Cook, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis**. Publicado por John Wiley & Sons, 1994;

Dowling, E. N., **Mechanical Behavior of Materials**, 4th ed. Pearson Education Limited 2013.

Doyle, J. F., **Modern Experimental Stress Analysis**. Publicado pela Editora John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

Figliola R. S., Beasley D. E., **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**, 4a Edição, Editora LTC, 2007.

Frank K. H., Mertz D. R., Wilson K. E., Russo F. M., **Design and Evaluation of Steel Bridges for Fatigue and Fracture FHWA-NHI-16-016**, Federal Highway Administration (FHWA) 2016.

Freyhult H. S. Jr., Dittbenner G. R., **Strain-gage-stability Measurements for Years at 75°C in Air**, 1976.

Gregory E. N., Slater G., Woodley C. C., **Welded Repair of Cracks in Steel Bridge Members - National Cooperative Highway Research Program Report 321**, National Research Council Washington, D.C, 1989.

Grünbaum P., **Long-term measurements of strains with strain-gauges and stability of strain-gauge transducers**. Artigo séria RAM publicado pela HBM, 2000.

Hendry A. W., Neal B. G., **Elements of Experimental Analysis**, 1977.

HOBACHER, A. F., **Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**, 2ND ed. Springer International Publishing Switzerland 2016.

Hoffman, K., **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Publicado por Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

Moaveni S., **Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS**. Publicado por Prentice-Hall 1999.

Segers, J., **Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition. Segunda Edição**, 2014.

Welding Science and Technology, **Welding Handbook Volume 1**, 9ª Edição American Welding Society 2001.