



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRÁULIO CAMPAGNARO SANTANA
LEONARDO FREIRE MUTZ

EIXOS DOS MECANISMOS DE TRANSLAÇÃO DE PONTE ROLANTE
DA ACIARIA: ANÁLISE DE FALHA

VITÓRIA
2010

**BRÁULIO CAMPAGNARO SANTANA
LEONARDO FREIRE MUTZ**

**EIXOS DOS MECANISMOS DE TRANSLAÇÃO DE PONTE ROLANTE DA
ACIARIA: ANÁLISE DE FALHA**

Projeto de graduação elaborado para a complementação do curso superior em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Oswaldo Paiva Almeida Filho

**VITÓRIA
2010**

**BRÁULIO CAMPAGNARO SANTANA
LEONARDO FREIRE MUTZ**

**EIXOS DOS MECANISMOS DE TRANSLAÇÃO DE PONTE ROLANTE DA
ACIARIA: ANÁLISE DE FALHA**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ____ de _____ de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof. Oswaldo Paiva Almeida Filho, M.Sc.
Orientador**

**Prof. Aloir Fassarela
Examinador**

**Prof. Fernando Menandro
Examinador**

A Deus, nossos pais, familiares, amigos e namorada, por tudo que fizeram para que esse trabalho fosse realizado.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Oswaldo Paiva Almeida Filho, pela orientação e apoio prestados neste Projeto de Graduação.

Aos colaboradores da ArcelorMittal Tubarão pela paciência, co-orientação e apoio, em especial ao especialista de Engenharia Mecânica da Aciaria, Antônio José Orlandi Almonfrei.

Aos nossos familiares, namorada e amigos pela contribuição durante todo o tempo de realização deste projeto.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo fazer um estudo de análise de falha da quebra dos eixos de rodas livres da translação da ponte e do carro (troller) da Ponte Rolante 41PR-08 da Aciaria, ArcelorMittal Tubarão. Primeiro, foi realizada uma breve descrição da empresa no cenário nacional e seus principais produtos. Na segunda parte do projeto, foi realizada uma revisão bibliográfica do estudo de falhas e a metodologia utilizada na Companhia para verificação das mesmas. Após, foram apresentadas as falhas separadamente e realizado um estudo específico de análise de falha da quebra dos eixos. A última parte do projeto é dedicada ao redimensionamento desses eixos, pois esta é a causa principal da falha ocorrida, e, por fim, são apresentadas as melhorias da análise de falha realizada e devidas conclusões.

Palavras-chave: falha, análise de falha, eixo, Ponte Rolante 41PR-08, Aciaria, ArcelorMittal Tubarão.

ABSTRACT

This project aims to make a study of failure analysis about the breaking of the free-wheel axle of the translation of the bridge and the car (troller) of Rolling Bridge 41PR-08 of Steelworks, ArcelorMittal Tubarão. First, was performed a brief description of the firm on the national scene and its main products. In the second part of the project, was carried out a review bibliographic study of failures and the methodology used in the Company to be verified. After that, the failures were presented separately and fulfilled a specific study of failure analysis of broken axle. The last part of the project is devoted to resizing these axes, because this is the main cause of the failure occurred, and, finally presents the improvements in failure analysis accomplished and relevant conclusions.

Keywords: failure, failure analysis, axle, Rolling Bridge 41PR-08, Steelworks, ArcelorMittal Tubarão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura organizacional da ArcelorMittal Tubarão	21
Figura 2 - Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão	23
Figura 3 - Diagramação de eventos e fatores causais	28
Figura 4 - Diagrama força versus deslocamento mostrando um comportamento do tipo frágil (curva a) e um comportamento dúctil (curva b)	29
Figura 5 - Representação esquemática da superfície de fratura em um aço	30
Figura 6 - Gráficos (a), (b) e (c) – tensão X nº. de ciclos	31
Figura 7 - Nucleação de trinca por fadiga nas bandas de escorregamento	33
Figura 8 - Extrusões e intrusões em uma chapa de cobre	33
Figura 9 - Estágios I, II e III da propagação de trinca em fadiga	35
Figura 10 - Evolução da eficiência do sistema de manutenção através da implementação da análise estruturada de falhas e causas fundamentais	38
Figura 11 - Seqüência da análise de falhas na ArcelorMittal Tubarão	41
Figura 12 - Correlação entre dureza e resistência mecânica	44
Figura 13 - Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas	45
Figura 14 - Viga da ponte 08 e carro (troller)	50
Figura 15 - Ponte 41PR08 – conjunto roda livre – localização da 1ª falha	53
Figura 16 - Conjunto eixo-roda livre da 1ª Falha – translação da ponte	54
Figura 17 - Região de tensão máxima para rasgos de chavetas retas, $\alpha \approx 10^\circ$	54
Figura 18 - Ponte 41PR08 – conjunto roda livre – localização da 2ª falha	55
Figura 19 - Representação da mudança de seção do eixo – 2ª falha	55
Figura 20 - Conjunto eixo-roda livre da 2ª falha, translação do carro da ponte	56
Figura 21 - Eixo da roda livre – primeira fratura – presença de trinca por fadiga iniciada no rasgo da chaveta – detalhes	58
Figura 22 - Eixo da roda livre – primeira fratura – iniciação no rasgo da chaveta	58
Figura 23 - Relação observada entre a resistência à tração e o limite de resistência à fadiga para os aços forjados e fundidos e ferro fundidos	65
Figura 24 - Eixo da roda livre – segunda fratura – presença de trinca por fadiga iniciada na mudança de seção	67

Figura 25 - Eixo da roda livre – segunda fratura – raio de concordância de 1 mm no projeto – regiões de nucleação de trincas por fadiga	67
Figura 26 - Micrografia – eixo da roda livre – segunda fratura – presença de martensita revenida	68
Figura 27 – Tolerâncias e interferências do eixo subdimensionado	75
Figura 28 – Tolerâncias e interferências do eixo redimensionado	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Falhas Ocorridas em 2008	52
Gráfico 2 - Efeito do acabamento superficial na fadiga do material	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual da ArcelorMittal Tubarão	20
Tabela 2 - Dados da ponte 41PR-08	50
Tabela 3 - Histórico de falhas relevantes	51
Tabela 4 - Efeito de tamanho, Kb	62
Tabela 5 - Efeito de carga	62
Tabela 6 - Efeito da concentração de tensão em determinados elementos	63
Tabela 7 - Fator de segurança	63
Tabela 8 – Limite de resistência, tensão de escoamento e dureza Brinell para alguns tipos de aços-liga	64
Tabela 9 - Composição química nominal (% em peso) do eixo da roda livre – 2ª Fratura	69
Tabela 10 - Composição química ABNT 4340 conforme Norma SAE - J404	69
Tabela 11 - Dureza superficial pontual do eixo da roda livre – 2ª Fratura	69
Tabela 12 - Coeficientes de atrito de alguns materiais	73
Tabela 13 - Módulo de elasticidade de alguns materiais	74
Tabela 14 – Comparação entre “projeto antigo” e “projeto novo”	76

LISTA DE SÍMBOLOS

α_f	Fator de transformação de uma solicitação alternante flexão em estático equivalente
α_t	Fator de transformação de uma solicitação alternante torção em estático equivalente
D	Diâmetro
$\varnothing$	Diâmetro
$\Delta D_{\min}$	Variação mínima do diâmetro
$\Delta D_{\max}$	Variação máxima do diâmetro
d _j	Diâmetro da seção resistente do eixo
E	Módulo de elasticidade
FS _{din}	Fator de segurança (dinâmico)
FS _{est}	Fator de segurança (estático)
k _a	Efeito do acabamento superficial
k _b	Efeito do tamanho
k _d	Efeito da carga
k _e	Efeito da efeito da temperatura
k _{ff}	Efeito da concentração de tensão de flexão
k _{ft}	Efeito da concentração de tensão de torção
k _g	Efeitos diversos
μ_{ep}	Coeficiente de atrito para escorregamento periférico
M _{eq (est)}	Momento equivalente atuante (estático)
M _{F_{alt}}	Momento fletor alternante atuante
M _{T_{máx}}	Momento torçor máximo
M _{T_{rep}}	Momento torçor repetido atuante
p _{min(T)}	Pressão mínima para torção
p _{max}	Pressão máxima
R	Raio
$\sigma_{adm.mat (est)}$	Tensão admissível do material (estático)
$\sigma_{esc (est)}$	Tensão limite de escoamento do material (estático)
σ_f	Tensão limite a fadiga do material

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 A ARCELORMITTAL TUBARÃO	17
2.1 HISTÓRICO	17
2.2 LOCALIZAÇÃO	18
2.3 APLICAÇÕES DO PRODUTO	18
2.4 TIPOS DE AÇO PRODUZIDOS	19
2.5 DESTAQUES DA EMPRESA	19
2.6 DADOS OPERACIONAIS	20
2.7 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	21
2.8 FLUXO DE PRODUÇÃO DA USINA	22
3 PROCESSO ACIARIA	23
3.1 PRODUÇÃO DE AÇO	23
3.2 PONTES ROLANTES ACIARIA	25
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
4.1 FALHA	26
4.1.1 Definição de falha	26
4.1.2 Definição de modo de falha	27
4.1.3 Definições	27
4.2 FRATURA	28
4.2.1 Definição de fratura	28
4.3 FADIGA	29
4.3.1 Tensões cíclicas	30
4.3.2 Etapas do processo de fadiga	31
4.3.2.1 Nucleação da trinca em fadiga	32
4.3.2.2 Propagação da trinca em fadiga	34
4.3.3 Fatores de influência na resistência à fratura	35
5 ANÁLISE DE FALHAS	36
5.1 CONCEITO	36
5.2 OBJETIVOS DA ABORDAGEM POR ANÁLISE DE FALHAS	37
5.3 PROFUNDIDADE DA ANÁLISE	38

5.4 DETALHES NOTÁVEIS	39
5.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FALHAS UTILIZADA NA ARCELORMITTAL TUBARÃO	41
5.5.1 Visita a área para coleta de informações	41
5.5.2 Levantamento de dados do equipamento	42
5.5.3 Análise visual do componente	42
5.5.4 Ensaios não-destrutivos	43
5.5.5 Análise química	43
5.5.6 Ensaio de dureza	43
5.5.7 Macrografia	44
5.5.8 Micrografia óptica	45
5.5.9 Fractografia	46
5.5.10 Determinação das causas raízes	46
5.5.11 Recomendação de melhorias	47
5.5.12 Elaboração de relatório técnico	47
6 ESTUDO DE CASO: ESCOPO	49
6.1 PONTE ROLANTE NO ESCOPO	49
6.2 DADOS DA PONTE ROLANTE	50
6.3 REGISTRO DE FALHAS DE EIXOS DE RODAS	51
7 ESTUDO DE CASO ESPECÍFICO	52
7.1 DESCRIÇÃO DAS ÚLTIMAS OCORRÊNCIAS	52
7.1.1 1ª Falha	53
7.1.2 2ª Falha	54
7.2 DESCRIÇÃO DAS ÚLTIMAS OCORRÊNCIAS X REGISTRO DE FALHAS DE EIXOS DE RODAS	56
7.3 ESTUDO DA 1ª FALHA	57
7.3.1 Coleta de dados e análise visual	57
7.3.2 Levantamento de dados e coleta de informações na área	59
7.3.3 Ensaio de dureza	59
7.3.4 Análises de projeto	60
7.3.4.1 Dimensionamento do eixo da translação da ponte	60
7.3.5 Determinação das causas raízes	65
7.4. ESTUDO DA 2ª FALHA	66
7.4.1 Coleta de dados e análise visual	66

7.4.2 Ensaio de micrografia	67
7.4.3 Análise química	68
7.4.4 Ensaio de dureza	69
7.4.5 Análises de projeto	69
7.4.6 Determinação das causas raízes	70
8 RECOMENDAÇÕES DE MELHORIAS	71
8.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS PARA OS DOIS EIXOS	71
8.2 REDIMENSIONAMENTO DOS EIXOS: PROPOSTA DE MELHORIA	72
9 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES	80
APÊNDICE A - Cálculo do Dimensionamento do Eixo que houve a Falha	81
APÊNDICE B - Cálculos do Redimensionamento Proposto para o Eixo	82
ANEXOS	83
ANEXO A - Representação esquemática das posições dos afastamentos fundamentais para Furos e Eixos	84
ANEXO B - Tabela de Graus de Tolerância-Padrão para Dimensões Nominais até 3150 mm	85
ANEXO C - Tabela dos Afastamentos Fundamentais para Eixos	86
ANEXO D - Tabela dos Afastamentos Fundamentais para Furos	87
ANEXO E - Posição das falhas - Ponte Rolante 41PR-08 – Rodas movidas	88
ANEXO F - Representação das Solicitações nos Eixos	89
ANEXO G - Conjunto Eixo-Roda Livre – Projeto Antigo	90
ANEXO H - Conjunto Eixo-Roda Livre – Projeto Novo	91
ANEXO I - Vista Superior dos Conjuntos da Translação da Ponte	92
ANEXO J - Representação dos Raios e Diâmetros na Roda	93

1 INTRODUÇÃO

A Análise de Falhas é uma atividade destinada a descobrir e eliminar a causa raiz da mesma. Ou seja, seu objetivo principal é evitar novas falhas. Uma investigação minuciosa deve determinar as causas básicas da falha e essa informação deve ser seguida de ações corretivas, a fim de impedir que o mesmo problema ocorra novamente. A importância de tal procedimento é sua capacidade de propor melhorias e evitar as consequências causadas pela falha de um componente ou equipamento. Consequências estas que podem significar uma simples parada de equipamento ou até provocar acidentes com mortes.

Portanto, a Análise de Falhas faz parte das prioridades de grandes empresas, tais como ArcelorMittal Tubarão, que confia esta responsabilidade aos seus engenheiros da Gerência de Engenharia Mecânica.

O Projeto de Graduação abordará a análise de uma falha ocorrida na Aciaria da ArcelorMittal Tubarão e será dividido nas seguintes partes:

- Apresentação da ArcelorMittal Tubarão.
- Descrição dos processos da Aciaria, área do equipamento que falhou.
- Revisão Bibliográfica, com apresentação de conceitos utilizados no trabalho.
- Estudo do caso e apresentação das pontes rolantes, equipamento de ocorrência da falha.
- Abordagem sobre análise de falhas.
- Metodologia de análise utilizada pela Gerência de Engenharia Mecânica da ArcelorMittal Tubarão.
- Detalhamento e estudo das falhas ocorridas.
- Conclusão e recomendações de melhorias, baseado na Análise de Falhas.

2 A ARCELORMITTAL TUBARÃO

Neste capítulo será apresentada a ArcelorMittal Tubarão, empresa onde se localiza o equipamento que será estudado, baseando-se em suas aplicações diretas e indiretas no processo de produção do aço.

2.1 HISTÓRICO

A ArcelorMittal Tubarão, maior produtora mundial de semi-acabados de aço, entrou em operação em 1983 com o nome de Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). Nessa época, era uma joint-venture de controle estatal, com participação minoritária dos grupos Kawasaki (Japão) e Ilva (Itália). Em 1992, a CST foi privatizada, passando a ser controlada por grupos nacionais e estrangeiros. Investimentos da ordem de US\$ 1,8 bilhões, principalmente em atualização tecnológica, permitiram o aumento do seu mix de produção, além de torná-lo mais nobre. A produção foi diversificada a partir de 2002, com a implantação do Laminador de Tiras à Quente (LTQ).

No ano de 2004, a CST consolidou a otimização da produção para 5 milhões de toneladas/ano, com o término da montagem da 4ª Central Termelétrica, que garantiu a auto-suficiência energética da empresa, mesmo com o LTQ em operação.

Em 2003 teve início o projeto de expansão da capacidade da CST para 7,5 milhões de toneladas de aço por ano. Nessa expansão, foram investidos cerca de US\$ 1 bilhão em construção de novas unidades produtivas e modernização de unidades já existentes. Essa expansão foi finalizada em 2007, e o início de sua operação teve como marco a entrada em funcionamento do Alto-Forno nº. 3.

Em outubro de 2005 é criada a Arcelor Brasil, com a união da CST, Belgo Mineira e Vega do Sul. O grupo Arcelor Brasil, com capacidade de 11 milhões de toneladas/ano, já nasceu como um dos maiores grupos industriais do Brasil e do mundo.

Em junho de 2006, com a fusão dos grupos Arcelor e Mittal Steel, surge o grupo ArcelorMittal, e a CST passa a se chamar ArcelorMittal Tubarão.

Em agosto de 2009, começou a operar o segundo forno de reaquecimento de placas do LTQ, elevando a capacidade de produção anual para 4 milhões de toneladas de bobinas a quente.

2.2 LOCALIZAÇÃO

A ArcelorMittal Tubarão encontra-se em uma posição estratégica, localizada no sudeste brasileiro, região da grande Vitória, Espírito Santo, ocupando uma área total de 13,5 milhões de m², sendo destes 7 milhões aproximadamente ocupados pela usina.

A empresa é cercada pelo Oceano Atlântico e está ligada a um complexo portuário com destaque para o Porto de Praia Mole, de onde saem a maioria das bobinas produzidas com destino à ArcelorMittal Vega, em São Francisco do Sul, Santa Catarina – SC, região Sul do país.

Além disso, também está ligada às rodos-ferrovia Estrada de Ferro Vitória- Minas e Ferrovia Centro – Atlântica (antiga Rede Ferroviária Federal) e rodovias como a BR – 101 e BR – 262.

Assim, a empresa desfruta de uma infra-estrutura que favorece o recebimento das principais matérias-primas e insumos (minério de ferro e carvão mineral), e ainda que facilita o escoamento dos produtos gerados numa proporção de aproximadamente 6 milhões de toneladas/ano.

2.3 APLICAÇÕES DO PRODUTO

As placas e bobinas da ArcelorMittal Tubarão são produtos semimanufaturados para posterior laminação em produtos planos com aplicações diversas tais como:

- Indústria Automobilística;
- Eletrodoméstico;
- Indústria Naval;
- Tubos, Gasodutos e Oleodutos;
- Construção Civil;
- Estruturas Metálicas.

2.4 TIPOS DE AÇO PRODUZIDOS

A ArcelorMittal Tubarão produz os seguintes tipos de aço:

- Ultra Baixo Carbono;
- Desgaseificado;
- Estrutural de Alta Resistência e Baixa e Média Liga;
- Baixo Carbono para estampagem profunda e extra-profunda;
- API para Tubos;
- Alto Carbono Estrutural.

2.5 DESTAQUES DA EMPRESA

Destaque mundial no mercado de semi-acabados:

- Responsável por 12% do volume global comercializado de placas de aço;
- Vendas totais de 2,5 milhões de toneladas de placas e 2,7 milhões de toneladas de bobinas em 2006. Desde o início de sua operação em 1983, a ArcelorMittal Tubarão já comercializou aproximadamente 74 milhões de toneladas de placas, sendo 92% destinadas ao exterior;
- Carteira de clientes com cerca de 60 companhias (18 países);
- Sistema de Garantia da Qualidade com Certificado ISO 9001-2000, desde 1996;
- Sistema de Gestão Ambiental com Certificado ISO 14.001, desde 2001.
- Sistema de Gestão da Saúde e Segurança com Certificado OHSAS 18001, desde 2005.

Uma das maiores empresas do Brasil - destaques em 2005:

- 3º produtor brasileiro em 2006 (17% da produção nacional de aço);
- 4.356 empregados.

Uma das empresas mais produtivas e preparadas para o futuro:

- Ostenta um dos mais baixos custos de produção de aço do mundo, com excelência operacional e localização estratégica;
- Produz placas 100% via Lingotamento Contínuo desde 1998;
- Produção diversificada desde 2002, com entrada em operação do Laminador de Tiras a Quente, com capacidade de produção de 2,0 milhões de toneladas/ano, com foco no mercado interno;
- Consolida-se como fornecedora preferencial de semi-acabados de aço de qualidade (placas e bobinas à quente) para a exigente indústria automotiva;
- Apresenta indicadores entre os melhores do mundo nas áreas de meio ambiente (ênfase no desenvolvimento sustentável) e segurança no trabalho;
- Auto-suficiente em energia elétrica (gera, a partir do aproveitamento de gases do processo produtivo, 100% da energia necessária à sua produção).

2.6 DADOS OPERACIONAIS

A Tabela 1 mostra a produção da ArcelorMittal Tubarão nos últimos anos.

Tabela 1 – Produção anual da ArcelorMittal Tubarão.

	2004	2005	2006	2007	2008
PRODUÇÃO (mil t)					
- Gusa Líquido	4.971	4.843	5.094	5.992	6.638
- Aço Líquido	5.093	4.978	5.274	5.831	6.309
- Aço Bruto	4.958	4.850	5.136	5.692	6.174
- Placas	4.935	4.816	5.110	5.637	6.121
- Placas para venda	2.966	2.422	2.355	2.742	3.366
- Bobina a Quente	1.943	2.341	2.709	2.825	2.509
- Bobina a Frio			407	431	426
- Bobina Galvanizada			473	507	477

Fonte: site da ArcelorMittal Tubarão, 2010.

2.7 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

A figura 1 ilustra a estrutura organizacional da ArcelorMittal Tubarão, desde Diretores até cargos Gerenciais, com foco na área operacional de Gusa e Energia, Produção de Placas Bobinas e Chapas de Aço e Manutenção Central.

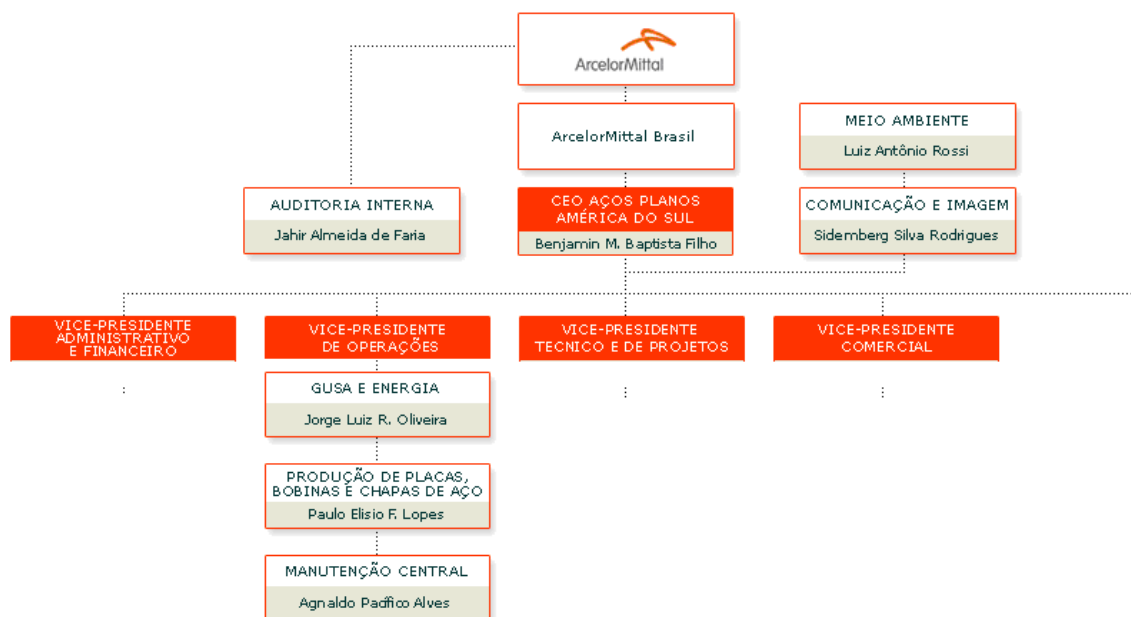


Figura 1 - Estrutura Organizacional da ArcelorMittal Tubarão.

Fonte: site da ArcelorMittal Tubarão, 2010.

A área industrial propriamente dita do processo de produção do aço faz parte da Vice-presidência de Operações, onde se encontra a Gerência Geral de Manutenção Central, departamento responsável pelo apoio às diversas Divisões do setor de produção.

A essas Divisões, estão ligadas as Engenharias de Manutenção Elétrica, Mecânica e Automação. Também fazem parte as Divisões de Suprimentos, Serviços de Apoio, Oficinas em Geral (fabricação e manutenção) e ainda Manutenção de Conjuntos.

A Gerência de Engenharia Mecânica possui várias equipes, dentre elas, Projeto, Preditiva, Materiais, Programação e Planejamento Coordenados, Gerenciamento do Sistema Informatizado de Manutenção e ainda Engenharia Civil.

A análise de falha estudada neste trabalho envolve tanto a Engenharia de Manutenção da Aciaria (especialistas área mecânica) quanto a Engenharia de Projetos, pois esta também auxiliou na verificação, análise e solução da falha que será abordada mais adiante.

2.8 FLUXO DE PRODUÇÃO DA USINA

A ArcelorMittal Tubarão é uma Usina Siderúrgica Integrada, ou seja, todos os sub-processos necessários para a fabricação do aço são realizados internamente, desde a preparação de matérias-primas até o produto final. As principais áreas da usina são:

- **Pátios de Carvão e Minério:** armazenamento de matéria-prima.
- **Coqueria:** transformação do Carvão Mineral em Coque.
- **Sinterização:** transformação do minério de ferro em sinter.
- **Altos-Fornos:** onde uma mistura de sinter, coque e fundentes são transformados em ferro-gusa, matéria-prima principal para fabricação do aço na Aciaria. Essa transformação se dá pelo processo de redução.
- **Aciaria:** unidade onde o gusa líquido é transformado em aço pelos convertedores. Após essa transformação, o aço sofre um processo de refino secundário, para ajuste de composição química.
- **Lingotamento Contínuo:** onde o aço líquido é resfriado de maneira controlada, formando placas de dimensões previamente definidas.
- **Laminador de Tiras à Quente:** onde as placas de aço são reaquecidas e laminadas, formando bobinas de espessuras pré-determinadas.
- **Utilidades:** área que fornece as condições necessárias para as outras áreas funcionarem, como energia elétrica, oxigênio, ar comprimido, entre outras.

- **Oficinas:** unidade responsável por fabricação de peças e manutenção de equipamentos.
- **Porto:** utilizado para envio dos produtos para os clientes e recebimento de matérias-primas.

A figura 2 ilustra o fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão.

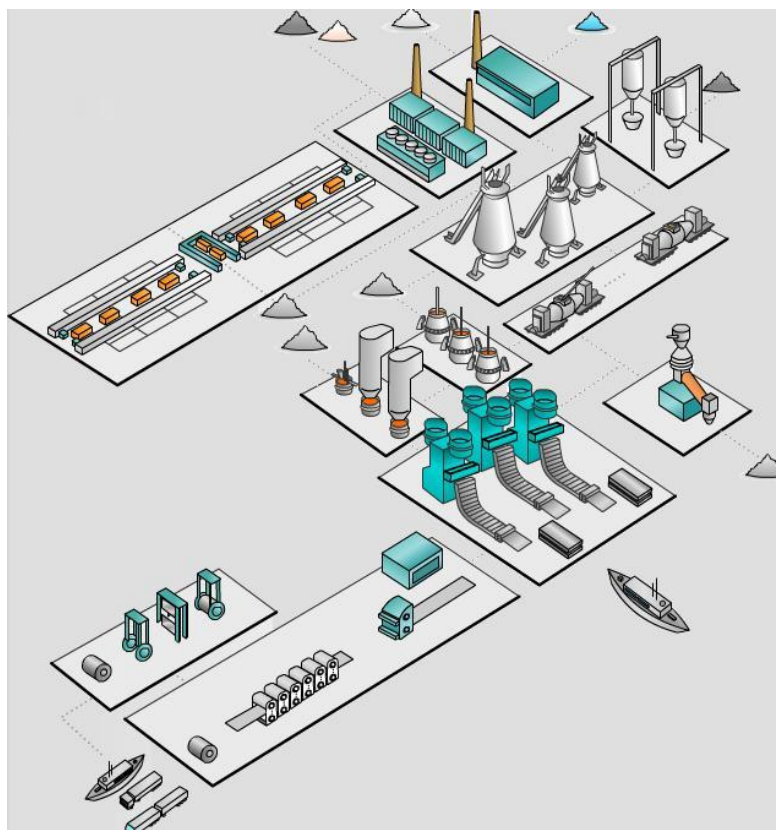


Figura 2 - Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão.
Fonte: site da ArcelorMittal Tubarão, 2010.

3 PROCESSO ACIARIA

3.1 PRODUÇÃO DE AÇO

Aciaria é a unidade de uma usina siderúrgica onde existem máquinas e equipamentos voltados para o processo de transformar o ferro gusa em diferentes tipos de aço.

O principal destes equipamentos é o convertedor, que é um tipo de forno, revestido com tijolos refratários e que transforma o ferro gusa e a sucata em aço. Uma lança sopra oxigênio em alta pressão para o interior do forno, produzindo reações químicas que separam as impurezas, como os gases e a escória.

A principal reação química no convertedor ocorre entre o oxigênio injetado e o carbono presente no ferro gusa, gerando gases que são eliminados do interior do convertedor. Estes gases se combinam e retiram o carbono do gusa, dando origem ao aço.

O processamento na aciaria divide-se em refino primário e refino secundário. O refino primário acontece no convertedor, onde o ferro-gusa geralmente adicionado à sucata de aço é transformado em aço. Nesta fase são removidos o silício, o manganês, e principalmente o carbono. No refino secundário são feitas as correções mais específicas e controladas com o objetivo de aumentar a desoxidação, ajustar melhor a temperatura e a composição química adicionando elementos especiais para alcançar teores de enxofre abaixo de 0,005% e carbono abaixo de 0,002%. Estas correções são realizadas em estações de tratamentos denominadas RH's (Rushtall Heraeus) 1 e 2, os quais possuem uma lança que sopra oxigênio e IRUT (Injection Refining-up Temperature), o qual também possui uma lança de oxigênio e ainda uma lança de argônio para homogeneização do aço. A composição de outros elementos químicos é corrigida com adição de ferros-liga.

Após tratamentos, as placas de aço são levadas através das Pontes Rolantes para o Lingotamento Contínuo, processo contínuo onde o aço líquido é transformado em placas de aço. Estas placas classificadas como Aços Planos podem ser transferidas para o porto onde são fornecidas aos clientes ou ainda, podem ser usadas como matéria-prima de outros processos como, por exemplo, a Laminação, no caso da ArcelorMittal Tubarão, são levadas para o LTQ (Laminador de Tiras a Quente) para produção de bobinas.

3.2 PONTES ROLANTES ACIARIA

Na Aciaria existem cinco pontes rolantes responsáveis pelo fluxo do processo de produção do aço. No refino primário (área do convertedor), três pontes são utilizadas com os seguintes objetivos:

- **Ponte 41PR-04:** responsável pelo carregamento de sucata no convertedor;
- **Ponte 41PR-03:** responsável pelo transporte de panela de gusa que foi carregada na pesagem de gusa até as estações dessulfurantes KR's 1e 2;
- **Ponte 41PR-02:** responsável pelo carregamento do gusa no convertedor;

No refino secundário, há duas pontes responsáveis pelo fluxo das panelas de aços provindas dos convertedores. Elas são utilizadas com os seguintes objetivos:

- **Ponte 41PR-08:** responsável pelo transporte de panela vazia, ou seja, as panelas que já foram para o Lingotamento Contínuo e retornaram à Aciaria para serem tratadas (limpeza e substituição de válvulas gavetas e refratamento);
- **Ponte 41PR-09:** responsável pelo transporte de panelas cheias de aço provindas dos convertedores até as estações de tratamento de aço no refino secundário (RH's e IRUT);

As características dessas pontes rolantes são muito parecidas, pois todas devem suportar o sincronismo da Aciaria, ou seja, um ritmo de produção 24h/dia, além de estarem em um ambiente agressivo sujeito a pó, fumaça e principalmente calor.

As únicas diferenças dessas cinco pontes citadas são as capacidades que cada uma suporta de acordo com suas aplicações no processo e os tipos de materiais transportados. Pelas responsabilidades de cada uma citadas acima, é correto afirmar que as pontes 41PR-02 e 41PR-09 possuem as mesmas capacidades e por

isso tem projetos semelhantes. As outras citadas possuem capacidades diferentes, um exemplo é a 41PR-04 que somente carrega sucata.

Levando em consideração aos projetos de cada uma, pode-se registrar:

- A engenharia básica de todas estas pontes foi desenvolvida pela Italmplantin (Itália);
- A ponte de carregamento de sucata foi projetada, fabricada e montada por empresa brasileira;
- As demais pontes foram projetadas, fabricadas e montadas sob a responsabilidade da Italmplantin (Itália), sendo que parte das estruturas foram fabricadas no Brasil;
- As pontes de fornecimento da Italmplanti (Itália) seguem o mesmo padrão de cálculos, mas há uma diferença para a Ponte Rolante 41PR-08 que possui em seu projeto transferência de movimento entre eixo e roda com o uso de chavetas e não através de ajuste prensado (interferência) como nas outras pontes.

O estudo de caso deste trabalho refere-se à Ponte Rolante 41PR-08, considerando a análise das falhas ocorridas nos eixos movidos das rodas nos mecanismos de translação do carro (denominado troller) e o da translação da ponte (ANEXO E).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FALHA

4.1.1 Definição de falha

Falha de acordo com a norma NBR 5462 de 1994 é a cessação da função requerida

de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho definido. (CALLISTER, 2008)

O sucesso de uma organização eficiente de manutenção reside na garantia do desempenho requerida pelo sistema ao menor custo possível. Isto significa que os métodos de manutenção devem estar baseados, sobretudo no claro entendimento das falhas que incidem sobre os diversos níveis do sistema.

4.1.2 Definição de modo de falha

Um modo de falha é definido como sendo toda e qualquer falha que seja inerente a um equipamento ou componente, e que resulte em uma perda funcional sobre um sistema ou um subsistema. (PINTO, 2004).

4.1.3 Definições

Segundo PINTO, 2004, algumas definições são úteis na investigação e análise de falhas (ver Figura 3):

Evento - qualquer ocorrência em tempo real que tenha impacto sobre o desempenho do sistema avaliado.

Condição - qualquer estado que possa gerar impacto sobre o desempenho do sistema.

Causa - uma condição particular que resulta na ocorrência do evento.

Causa direta - a causa que diretamente faz com que ocorra o evento.

Causa contributiva - uma causa que isoladamente não resulta na ocorrência do evento, porém somada a outras causas contributivas ou diretas pode ampliar a potencialidade de ocorrência do mesmo.

Causa fundamental - a causa que, acaso corrigida/eliminada, preveniria a recorrência do evento.

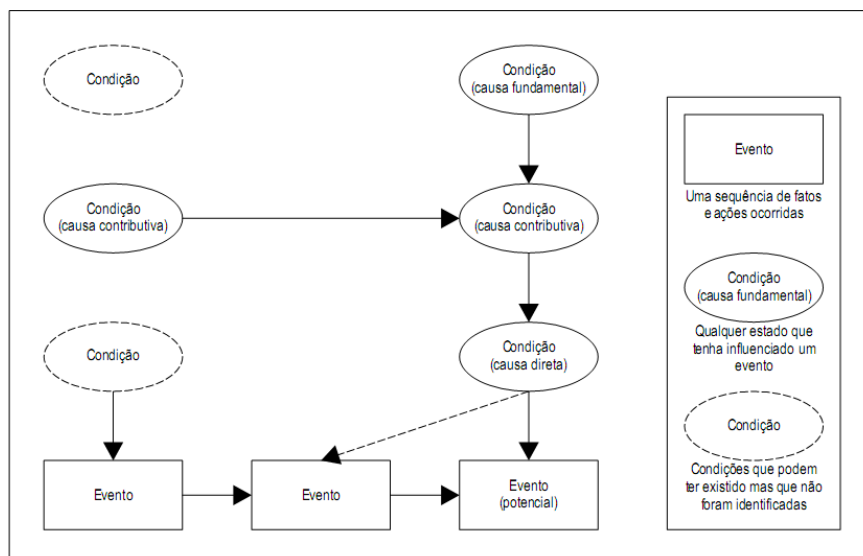


Figura 3 - Diagramação de eventos e fatores causais.

Fonte: Tópicos de engenharia de confiabilidade, Luis Henrique Terbeck Pinto, 2004

4.2 FRATURA

4.2.1 Definição de fratura

Fratura consiste na separação do material em dois ou mais partes devido à aplicação de uma carga estática a temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material. Qualquer processo de fratura envolve duas etapas, a formação e propagação de trincas, em resposta à imposição de uma tensão. A modalidade de fratura é altamente dependente do mecanismo de propagação da trinca. (VAN VLACK, 1984)

Para materiais na engenharia, são possíveis dois modos de fratura: dúctil e frágil. A classificação está baseada na habilidade de um material em experimentar uma deformação plástica. (CALLISTER, 2008)

A fratura dúctil é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está avançando. Ademais, o processo prossegue de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento da trinca se estende. Esse tipo de trinca é frequentemente chamado de estável. Isto é, ela resiste à qualquer extensão adicional a menos que exista um aumento da tensão aplicada. Adicionalmente,

existirá normalmente a evidência de uma deformação generalizada apreciável na superfície da fratura. Por outro lado, no caso de uma fratura frágil, as trincas podem se espalhar de maneira extremamente rápida, com o acompanhamento de muito pouca deformação plástica. Tais trincas podem ser chamadas de instáveis, e a propagação da trinca, uma vez iniciada, irá continuar espontaneamente sem um aumento na magnitude da tensão aplicada. (CALLISTER, 2008)

Uma boa maneira para se observar a diferença no comportamento entre os materiais é submetendo-os a um ensaio de tração. Fazendo-se um gráfico da força em função do deslocamento, é possível caracterizar um material entre os dois grupos. Materiais frágeis rompem-se com pequeno deslocamento e mostram maior resistência mecânica conforme Figura 4, mostrada abaixo. (HECK, 2009).

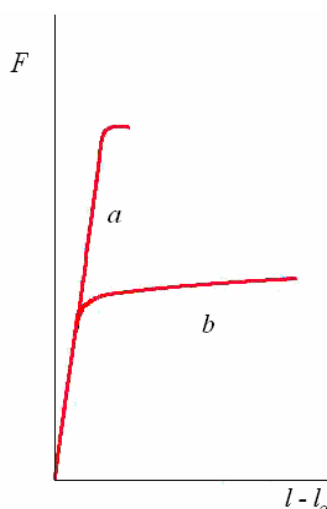


Figura 4 - Diagrama força versus deslocamento mostrando um comportamento do tipo frágil (curva a) e um comportamento dúctil (curva b).

Fonte: Introdução à engenharia metalúrgica, Nestor Cezar Heck.

4.3 FADIGA

Fadiga é a ruptura de componentes, sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações cíclicas repetidas. Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico. (GARCIA, 2000)

Entre os principais fatores para que ocorra a falha por fadiga nos materiais podem ser citados: a existência de tensões cíclicas ou flutuantes e o número de ciclos de aplicação da tensão suficientemente alto para que ocorram a nucleação e propagação de uma trinca. (GARCIA, 2000)

Pode-se afirmar que 90% das falhas em serviço de componentes metálicos que experimentam movimento de um jeito ou de outro é devido à fadiga. Frequentemente, a superfície de fratura por fadiga irá mostrar algumas características macroscópicas de fácil identificação e associação ao fenômeno da fadiga, tais como as marcas de praia (ver Figura 5). (GARCIA, 2000)

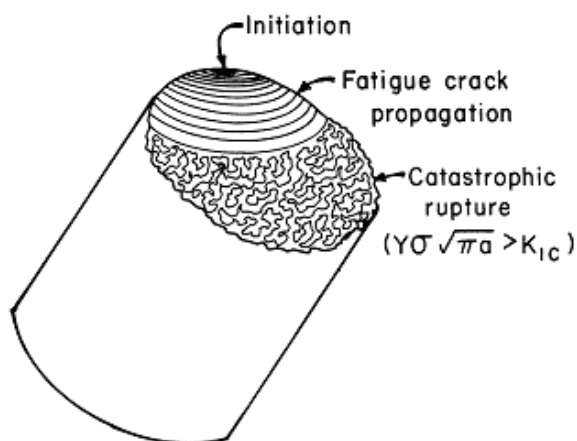


Figura 5 - Representação esquemática da superfície de fratura em um aço.
 Fonte: [http:// www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metais.doc](http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metais.doc)

A Figura 5 mostra um esquema da superfície de fratura de um aço que falhou por fadiga. As principais características a serem observadas neste tipo de falha são pontos ou sítio de iniciação da trinca (geralmente na superfície); uma região de propagação de trinca mostrando as marcas de praia e uma região de fratura rápida, onde o comprimento de trinca excede um valor crítico.

4.3.1 Tensões cíclicas

É importante caracterizar os possíveis tipos de tensões cíclicas que provocam o fenômeno de fadiga, sendo que a tensão aplicada pode ser axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa). De modo geral,

três diferentes formas de tensão cíclica ou variável no tempo são possíveis. (GARCIA, 2000)

A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma função senoidal, onde os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas. A Figura 6 apresenta três tipos de ciclos de tensão. (GARCIA, 2000)

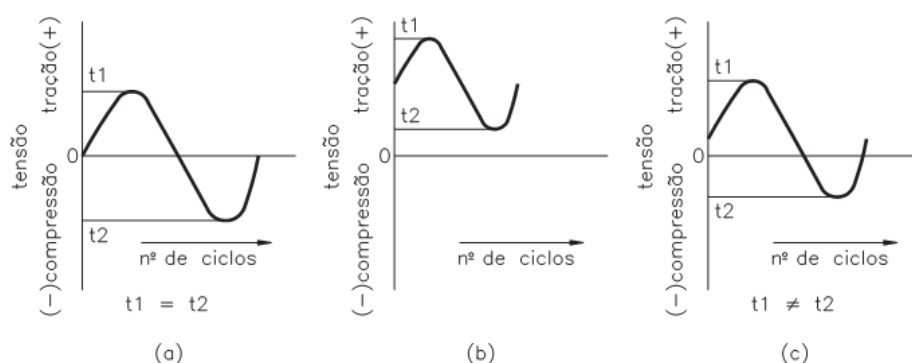


Figura 6 - Gráficos (a), (b) e (c) – tensão x nº. de ciclos.
Fonte: <http://www.epcapelas.com/dados/>

A figura a mostra um gráfico de tensão reversa, assim chamada por que as tensões de tração têm valor igual às tensões de compressão.

No gráfico b todas as tensões são positivas, ou seja, o corpo de prova está sempre submetido a uma tensão de tração, que oscila entre um valor máximo e um mínimo.

O gráfico c representa tensões positivas e negativas, como no primeiro caso, só que as tensões de compressão têm valores diferentes das tensões de tração.

4.3.2 Etapas do processo de fadiga

As rupturas promovidas por processos de fadiga distinguem-se por apresentarem três estágios conhecidos.

1. O primeiro estágio abrange o período de nucleação da falha.
2. O segundo estágio compreende a propagação de uma trinca, na direção ortogonal à tensão de tração.
3. O terceiro estágio apresenta a ruptura catastrófica, no momento em que a seção resistente diminui o suficiente para que não mais suporte um ciclo de carga e rompa por sobrecarga.

(GARCIA, 2000)

4.3.2.1 Nucleação da trinca em fadiga

Trincas de fadiga nucleiam em singularidades ou descontinuidades na maioria dos materiais. Descontinuidades podem estar na superfície ou no interior do material. As singularidades podem ser estruturais (tais como inclusões ou partículas de segunda fase) ou geométricas (tais como riscos). Singularidades superficiais podem estar presentes desde o começo ou podem se desenvolver durante a deformação cíclica, com, por exemplo, a formação de intrusões e extrusões, as quais são chamadas de bandas de escorregamento persistentes em metais. (FROEHLICH, 2009).

Estas intrusões e extrusões são sítios ou locais preferenciais de nucleação de trincas por fadiga. Um modelo de formação destas imperfeições é apresentado na Figura 7. A Figura 8 apresenta uma foto real destas imperfeições. (FROEHLICH, 2009).

Degaus de escorregamento sozinhos podem ser responsáveis pela nucleação de trincas ou estes podem interagir com defeitos estruturais ou geométricos para formar as trincas.

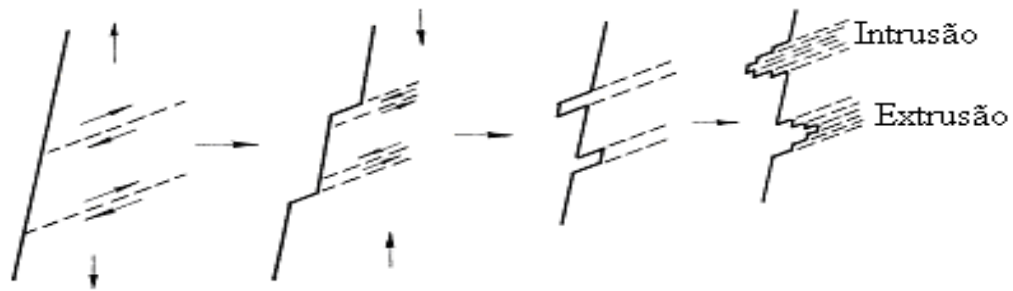


Figura 7 - Nucleação de trinca por fadiga nas bandas de escorregamento.

Fonte: http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metalis.doc



Figura 8 - Extrusões e intrusões em uma chapa de cobre.

Fonte: www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metalis.doc

Estes defeitos ocorrem durante carregamento cíclico e podem crescer e formar uma trinca através de contínua deformação plástica.

Desde que a maioria das falhas por fadiga ocorre na superfície de um material, a condição da superfície é muito importante. Justamente, o polimento da superfície pode aumentar significativamente a vida em fadiga de um material.

Uma explicação para a nucleação preferencial de trincas de fadiga na superfície pode ser devido ao fato que a deformação plástica é mais fácil na superfície e que os degraus de escorregamento ocorrem também na superfície, além do fato que a máxima tensão estará sempre posicionada em algum ponto da superfície.

Entretanto, trincas de fadiga também podem iniciar no interior do corpo de prova (em descontinuidades ou defeitos internos). (FROEHLICH, 2009).

4.3.2.2 Propagação da trinca em fadiga

A propagação corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão normal principal (plano de carregamento). Este segundo estágio é o mais característico da fadiga. É sempre visível a olho nu e pode corresponder a uma grande parte da seção resistente. A superfície de fratura tem uma textura lisa e avança de forma semicircular (formação das estrias de fadiga). (FROEHLICH, 2009).

Para grandes amplitudes de tensão, uma fração muito grande da vida em fadiga (por volta de 90%) ocorre no estágio de crescimento ou propagação da trinca. Para um componente que possui um entalhe, esta parcela torna-se ainda maior. Visto que, intrinsecamente os processos de fabricação formarão trincas ou defeitos nos materiais, a parte de propagação pode ser uma das etapas mais importantes no processo de fadiga.

Algumas trincas nuclearão na superfície e propagarão de acordo com direções preferenciais nos planos orientados (estágio I), aproximadamente, a 45° do plano de carregamento, Figura 9.

Durante este estágio, a propagação de trinca é da ordem de poucos micrometros ou menos por ciclo. Após este estágio, uma trinca dominante de poucas dezenas de milímetros começa a propagar numa direção perpendicular ao plano de carregamento. Este é chamado de estágio II e a superfície de fratura apresenta marcas de estrias ou estriações. Além disso, outra importante característica no estágio II são as chamadas “marcas de praia”. Assim como as estrias, as marcas de praia também são semicirculares, mas são, entretanto, visíveis a olho nu.

As marcas de praia podem ser originadas através dos diferentes graus de oxidação produzidos nas sucessivas paradas para repouso do equipamento ou pela variação nas condições de carregamento. Estas marcas representam milhares ou mesmo milhões de ciclos e elas apontam para o local de início de propagação de trinca.

A proporção entre a etapa de propagação e a ruptura final indica o grau de sobrecarga da peça ou o coeficiente de segurança aplicado.

A partir de certo tamanho de trinca, todo o sistema torna-se instável e a seção remanescente do componente não consegue suportar mais a carga aplicada e o material entra em fratura catastrófica (estágio III).

(FROEHLICH, 2009).

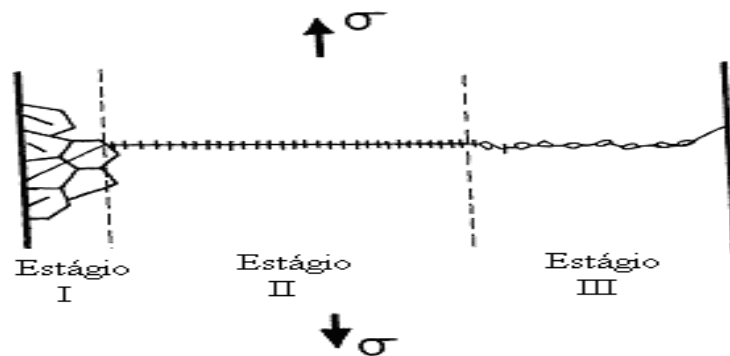


Figura 9 - Estágios I, II e III da propagação de trinca em fadiga.

Fonte: http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metais.doc.

4.3.3 Fatores de Influência na Resistência à Fratura

1. **Acabamento superficial:** Quanto melhor for o acabamento superficial, ou melhor, quanto mais liso estiver o componente, maior é a resistência à fadiga.
2. **Tamanho da peça:** Quanto maior é o componente, menor é a sua resistência à fadiga. De uma maneira mais simples, pode-se associar a influência do tamanho da peça na vida em fadiga, simplesmente, considerando o efeito do acabamento superficial. Assim, é possível imaginar a diminuição da resistência à fadiga com o aumento da dimensão do componente.
3. **Temperatura:** Considerando temperaturas abaixo da ambiente, tem sido observado que os metais apresentam um aumento na sua resistência à fadiga com o decréscimo da temperatura. Para mais altas temperaturas, a deformação plástica que é um fator extremamente importante em fadiga, torna-se mais intensa, diminuindo a vida em fadiga.

4. **Concentração de tensões:** Todas as descontinuidades tais como entalhes, furos e ranhuras modificam a distribuição de tensões, acarretando em um aumento de tensões localizadas. Com este aumento de tensão localizado, o carregamento torna-se mais severo, diminuindo a vida em fadiga do material.
5. **Efeitos microestruturais:** O comportamento em fadiga dos aços é uma função da microestrutura apresentada, bem como do nível de inclusões não metálicas presentes. Um material temperado e revenido têm melhores características quanto à fadiga, que no seu estado normalizado ou recozido. Estes efeitos observados são diretamente relacionados ao aumento no limite de escoamento do material, uma vez que a iniciação de trincas por fadiga envolve deformação plástica localizada. Variações metalúrgicas que dificultem a deformação plástica levam a um aumento na resistência à fadiga. Maiores quantidades de inclusões diminuem a resistência à fadiga dos materiais.

(FROEHLICH, 2009).

5 ANÁLISE DE FALHAS

5.1 CONCEITO

Considera-se falha a ocasião em que o componente ou equipamento não é mais capaz de executar a sua função com segurança. Portanto, analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar o motivo da sua perda de capacidade. (AFONSO, 2002).

A análise de falha deve determinar as suas causas básicas e essa informação deve ser utilizada para permitir a introdução de ações corretivas que impeçam a repetição do problema. Para isto, a função do componente ou do equipamento deve ser considerada na investigação. Desta forma, tem-se que o objetivo principal da análise de falhas é evitar novas falhas. (AFONSO, 2002).

Deve-se observar que um defeito ocorrido no equipamento antes do fim da vida útil para o modo de falha considerado será considerado uma falha prematura, no caso de componentes com vida útil definida. Além disso, defeitos ocorridos a qualquer tempo serão considerados falhas prematuras se ocorrerem por modos de falhas não considerados no projeto ou em componentes com vida útil indefinida. (AFONSO, 2002).

5.2 OBJETIVOS DA ABORDAGEM POR ANÁLISE DE FALHAS

Os objetivos principais da metodologia de análise de falhas são (PINTO, 2004):

- Estruturar a planificação das manutenções preventivas, preditivas e pró-ativas de acordo com os modos de falha predominantes em cada equipamento e a análise dos riscos representativos ao sistema.
- Assegurar o controle das causas fundamentais identificadas para cada modo de falha, e minimizar seu impacto sobre o funcionamento do sistema (aumento do tempo médio entre falhas de um equipamento).
- Amparar as análises de confiabilidade e as tomadas de decisões em trabalhos de planejamento da manutenção e eliminação de perdas produtivas.
- Auxiliar as estratégias de formação dos efetivos de manutenção através da observação das necessidades observadas durante as análises das falhas já vivenciadas ou potenciais.

Os efeitos dos trabalhos de análise de falhas sobre o sistema de manutenção estão ilustrados na Figura 10.

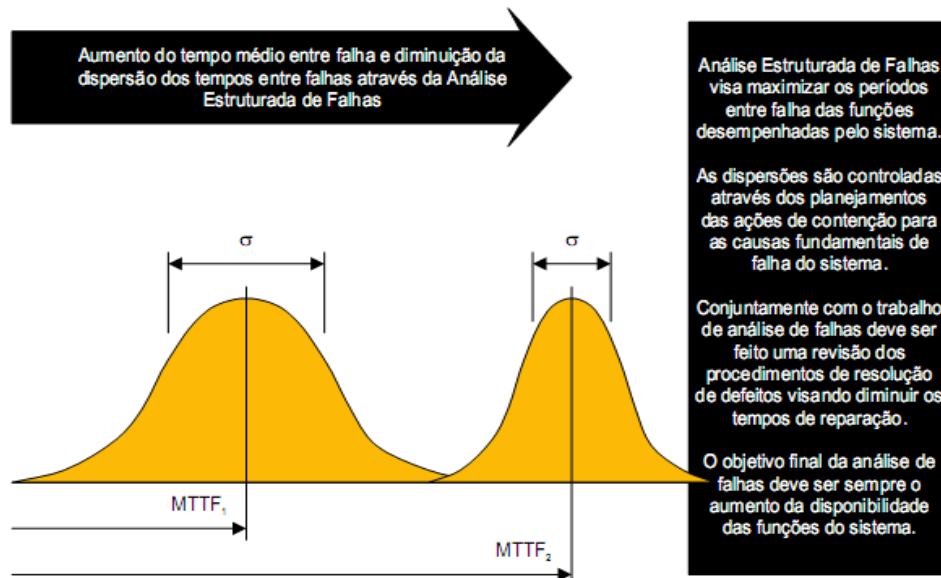


Figura 10 - Evolução da eficiência do sistema de manutenção através da implementação da análise estruturada de falhas e causas fundamentais.

Fonte: Pinto, 2004 - Tópicos de engenharia de confiabilidade

5.3 PROFUNDIDADE DA ANÁLISE

Normalmente as indústrias não contam com grandes contingentes de pessoal dedicado exclusivamente à análise de falhas, surgindo daí a necessidade de estabelecer um critério de priorização, ou seja, um critério que ajude a focar os principais problemas, para obter o maior retorno possível a partir dos recursos disponíveis.

A profundidade da análise deve ser adequada ao tipo de falha. O tamanho do prejuízo (perdas financeiras, lesões corporais e agressões ambientais) vai determinar a profundidade da análise. Nem sempre será justificável fazer uma análise completa do evento (Root Cause Failure Analysis) devido ao tempo e dinheiro gasto com isso.

Adotando o critério de falha repetitiva se o tempo médio entre falhas do equipamento é menor que a média da planta, uma sistemática adotada com eficácia é:

a) No caso de falhas não repetitivas que não tenham resultado em perdas de produção ou em riscos de acidentes ou agressões ambientais a análise deve ser

executada pela pessoa encarregada de consertar o equipamento e o seu supervisor. O processo é conhecido por 5 Why (5 Porque);

b) No caso de falhas repetitivas do equipamento, falhas que resultaram em perdas de produção ou falhas que causaram risco de acidentes ou agressão ambiental, o processo de análise deve ser mais detalhado. Nesse caso a análise da falha deve ser feita por um grupo onde haja, no mínimo, um especialista em manutenção do equipamento que falhou, um da operação e um representante do grupo técnico ou de engenharia da fábrica. Todos os envolvidos na análise devem ter conhecimento dos fatos, idealmente obtidos por observação pessoal das evidências disponíveis e do relato de testemunhas. Esse processo é chamado por muitos nomes, dependendo da indústria: Eliminação de Defeitos, Análise de Ocorrências Anormais, Relatório de Não Conformidade, ou, simplesmente, de Análise Completa.

(AFONSO, 2002)

5.4 DETALHES NOTÁVEIS

Alguns pontos importantes não devem ser esquecidos, seguindo o esquema tradicional, coletar informação, organizá-la, analisar os dados, determinar o modo de falha e as causas básicas. Esses pontos são:

a) Manter o foco no primeiro componente a falhar;

Ao examinar uma máquina danificada, pode ser difícil descobrir a origem do problema. Não deve ser esquecido que, na maior parte dos casos, somente os eventos que iniciaram a falha interessam, todos os demais danos observados serão conseqüências da falha do primeiro componente.

Esse item é extremamente importante para manter o foco do trabalho nos componentes que iniciaram a falha, evitando gastar esforço e tempo com análise de falhas de importância secundária.

Obviamente, deve ser dada alguma atenção ao exame de todos os destroços da máquina, já que isso pode ajudar a descobrir onde o problema começou, a obter informações sobre as causas da falha e a determinar a

extensão dos serviços de manutenção que serão necessários para retornar o equipamento à operação normal.

b) Procurar por pontos fracos ou por modos de falha ocultos;

O ponto fraco é o componente que amplifica os efeitos de uma falha em outro componente.

Os modos de falha ocultos são aqueles que acontecem com componentes que não funcionam o tempo todo, só sendo percebidos quando o componente é solicitado a trabalhar.

c) Procurar por mais de uma causa básica;

A causa básica é exatamente aquilo que se procura, porém não se deve dar o trabalho de análise de falhas por terminado quando uma causa básica válida é encontrada.

O risco que existe quando alguma das causas básicas da falha não é localizada é que só serão implementadas medidas preventivas para os problemas conhecidos, ficando o sistema sujeito a falhas pelas causas não tratadas.

d) Desenvolver um banco de dados de análise de falhas e de histórico de manutenção;

Não é suficiente escrever relatório de manutenção e de análise de falhas. Faz-se necessária uma “expansão de memória” dentro do computador.

e) Descobrir por que algumas máquinas não falham;

Embora pareça óbvio, sempre é interessante lembrar que, se máquinas similares operam em serviços similares, mas só uma delas apresenta alta confiabilidade, basta descobrir qual é a diferença entre elas para descobrir como resolver o problema da máquina de baixa confiabilidade.

(AFONSO, 2002)

5.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FALHAS UTILIZADA NA ARCELORMITTAL TUBARÃO

A Gerência de Engenharia Mecânica da ArcelorMittal Tubarão utiliza procedimentos de análises baseados na metodologia apresentada na Figura 11, entretanto, a análise não necessita seguir exatamente essa ordem, visto que algumas atividades dependem de disponibilidade de laboratórios e algumas podem concomitantes. Também é importante lembrar que algumas dessas atividades não são necessárias para a conclusão da análise. Esta sequência inicia-se após a identificação da falha, pela equipe de manutenção/operação.

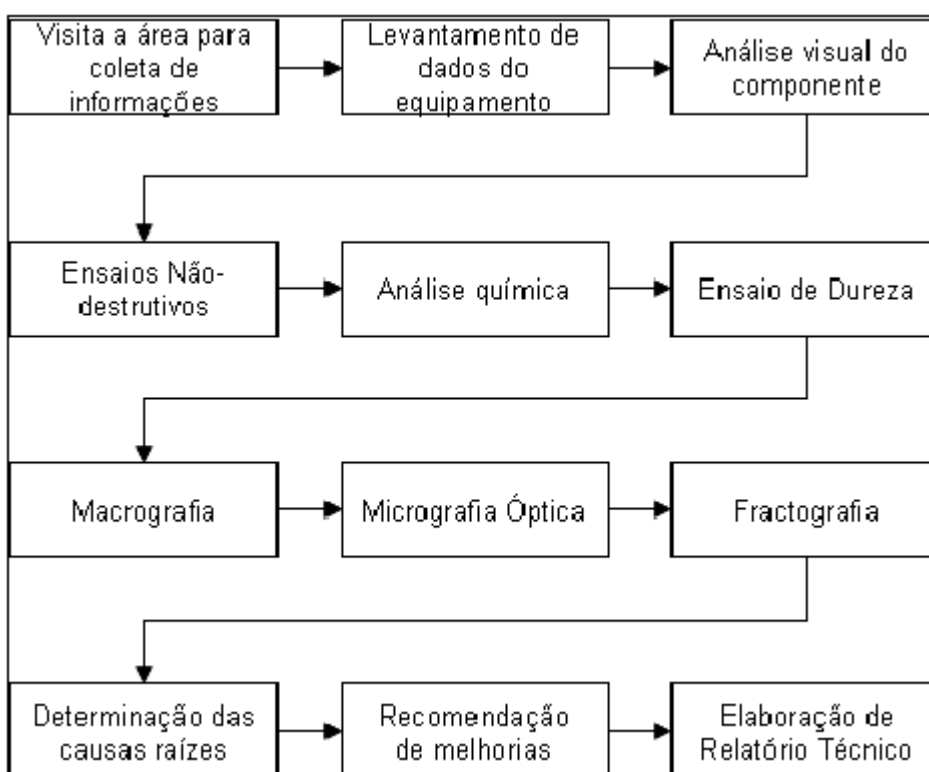


Figura 11 - Sequência da Análise de Falhas na ArcelorMittal Tubarão.

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

5.5.1 Visita a área para coleta de informações

Nesta etapa do processo, o engenheiro responsável pela análise vai até a área para coletar informações, tais como ambiente de trabalho, ritmo de operação do equipamento, observar equipamento semelhante em funcionamento, informações

sobre peculiaridades do equipamento, dados de inspeções, frequência de trocas, entre outras.

Além disso, fotografias são tiradas da área e do equipamento, para auxiliar na análise e ilustrar o Relatório Técnico.

A partir das informações coletadas nesta etapa, já é possível levantar algumas hipóteses sobre as possíveis causas da falha.

5.5.2 Levantamento de dados do equipamento

Após a coleta de informações, o próximo passo é o levantamento de dados do equipamento e do componente. Nessa fase, é levantado o histórico do equipamento, desenhos do equipamento e do componente, gráficos de monitoramento, análises anteriores, especificação de compra do componente, planos de manutenção e inspeção, entre outros.

Nesta etapa, toda a documentação e as referências necessárias para uma análise mais precisa são obtidos. Também é possível avaliar se o projeto é satisfatório, além de identificar possíveis causas para a falha. Além disso, podemos avaliar se os planos de manutenção e inspeção estão de acordo com a criticidade do equipamento, se a especificação de compra contempla os quesitos exigidos em projeto, dentre outras coisas.

5.5.3 Análise visual do componente

Primeiramente, é feita a observação do componente retirado do equipamento, sem qualquer tipo de limpeza. Dessa forma, podem-se observar as condições de funcionamento, a presença de material aderido, lubrificantes, produtos de corrosão, entre outras substâncias.

Posteriormente, o componente é limpo com a ajuda de solventes não corrosivos, e são feitas novas observações. Por meio destas, é possível visualizar várias características que podem identificar a causa da falha, como por exemplo, marcas

de usinagem, pites de corrosão, amassamento, desgaste, entre outros. Também é possível observar o provável tipo de fratura que o componente sofreu. A presença de marcas de praia na fratura é um forte indício de fadiga. Uma fractografia pode ser realizada para comprovar este fato.

A análise visual do componente é uma das etapas mais importantes, pois, assim como na etapa de levantamento de dados, as observações feitas já podem identificar a possível causa da falha. Entretanto é necessária a realização de outras etapas para confirmar a hipótese.

5.5.4 Ensaios não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos são utilizados para identificar possíveis defeitos internos e superficiais que podem estar relacionados à fratura do componente. Esta etapa torna-se desnecessária quando através da análise visual já foi possível identificar a provável causa. Os ensaios não-destrutivos mais usados na análise de falhas são: ultra-som, líquido penetrante, partículas magnéticas e termografia.

5.5.5 Análise química

Levando em consideração a quantidade de amostras; grau de exatidão requerido; tempo e custo da análise; composição química da amostra, entre outros fatores, deve-se escolher um dos métodos existentes para determinar a composição química do material. Os métodos mais utilizados em análise de falhas são: espectrografia de massa e microanálise química.

5.5.6 Ensaio de dureza

Algumas vezes, amostras do material que falhou não são disponíveis para realização de ensaio de tração, para determinação da resistência mecânica do material. Nesses casos, é preciso estimar esse valor por meio do ensaio de dureza. Utilizando de relações, tabelas e gráficos, é possível estimar a resistência mecânica do material através do valor da dureza da peça. Um exemplo de gráfico pode ser visto na Figura 12. Tal ensaio é realizado com a utilização de penetradores.

Conforme a magnitude do carregamento imposto no penetrador, o ensaio é classificado de duas formas: macropenetração (carga maior que 200 gf) e micropenetração (carga menor que 200 gf).

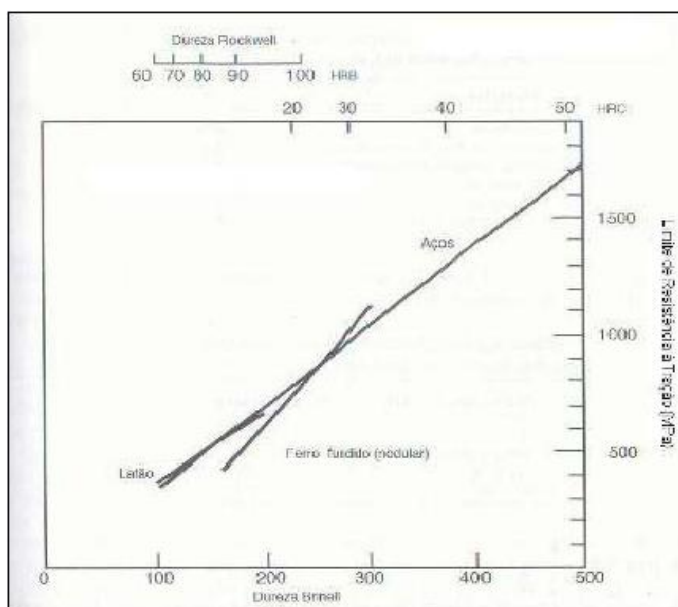


Figura 12 - Correlação entre Dureza e Resistência Mecânica.

Fonte: GARCIA, 2000.

5.5.7 Macrografia

A macrografia consiste em retirar uma amostra do material, realizar uma limpeza e atacá-la com algum reagente químico. A seguir, são tiradas fotografias, para registro da superfície revelada pelo ataque do reagente. Assim, é possível observar, por exemplo, se a peça sofreu algum tipo de tratamento térmico ou superficial, como, por exemplo, cementação.

A macrografia age em conjunto com o ensaio de dureza. Caso este ensaio indique uma diferença razoável de dureza entre superfície e núcleo de uma peça, é um indício de que a peça recebeu algum tratamento. Assim, a macrografia confirma essa hipótese, e revela sua extensão. Caso a peça apresente dureza homogênea, a macrografia é desnecessária.

5.5.8 Micrografia óptica

As propriedades químicas, físicas e mecânicas de um material são influenciadas pela estrutura cristalina e dos grãos. Estrutura de grãos diferentes, para um mesmo material, pode significar propriedades mecânicas diferentes. Tal situação pode ser observada na Figura 13, para três microestruturas diferentes de um metal CFC (Z).

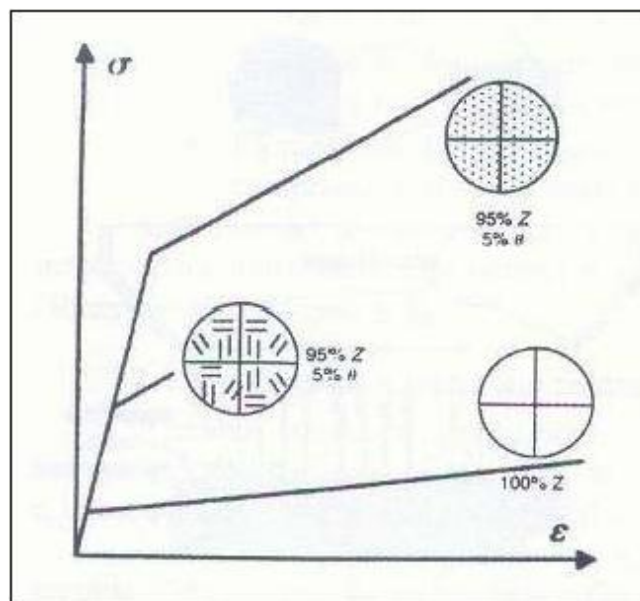


Figura 13 - Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas.

Fonte: GODEFROID, 2005

A micrografia óptica mostra tanto alterações das propriedades mecânicas do aço, eventualmente causadas após o processo de têmpera, pois o mesmo torna-se mais resistente e frágil, quanto variações microestruturais, por meio da estrutura de grãos.

Para se obter a micrografia óptica, devem ser seguidas as seguintes etapas:

- Corte da amostra;
- Embutimento em resina (geralmente baquelite), com a face a ser observada deixada à mostra;
- Identificação da amostra embutida;

- Desbaste mecânico (lixamento);
- Polimento (mecânico ou eletroquímico);
- Ataque químico (geralmente usando Nital) para revelação da microestrutura;
- Limpeza;
- Observação ao microscópio óptico.

De posse das fotografias da microestrutura, é possível identificar vários aspectos do material, como inclusões, microtrincas, descarbonetação, tamanho de grãos, configuração dos grãos, alinhamento dos grãos que evidencia o tipo de fabricação, microestrutura característica de tratamento térmico, imperfeições em solda, entre outros. Esses aspectos são muito úteis para a análise de falha, pois já podem identificar a provável causa da falha do componente.

5.5.9 Fractografia

A análise da superfície da fratura, através de um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) mostra o caminho para identificar o tipo de falha e revela a história de eventos que precederam a falha. Por estes motivos, essa etapa é uma das mais importantes na análise de falhas. Através da fractografia pode-se observar a origem, direção de propagação, estágios e extensão da trinca, os dados de modo e tipo de fratura e a zona fraturada e as respectivas dimensões.

5.5.10 Determinação das causas raízes

Após levantar informações nas etapas anteriores, o próximo passo é analisá-las para identificar as causas raízes da falha. As informações são comparadas com as hipóteses levantadas, a fim de validar ou não essas hipóteses.

Além dos dados coletados, é recomendada a consulta a referências bibliográficas, livros técnicos, Handbooks, tabelas, normas ou outras fontes, para se ter um embasamento teórico necessário para se determinar a provável causa da falha. É importante também dialogar com outros engenheiros, tanto da área do equipamento quanto da equipe de análise, para troca de opiniões sobre a falha, contribuindo, desta forma, para uma análise mais completa e eficiente.

Geralmente, algumas das principais causas de falhas são: erros de projeto, erros de fabricação, erros de instalação, material fora do especificado, sobrecarga operacional, manutenção deficiente, entre outras.

5.5.11 Recomendação de melhorias

Juntamente com a etapa anterior, essa etapa é o objetivo da análise de falhas, pois, após a determinação das causas, devem ser feitas propostas de melhorias, com o objetivo de evitarem falhas semelhantes, ou aumentar o tempo entre falhas.

Dependendo das causas determinadas, as recomendações mais usuais podem ser: alterações no projeto, maior controle na fabricação / instalação, alterações nos planos de manutenção e inspeção, alterações de material, entre outras.

Vale lembrar que a decisão e a responsabilidade de seguir ou não as recomendações é da área responsável pelo equipamento.

5.5.12 Elaboração de relatório técnico

Findadas as etapas de identificação das causas da falha e recomendações propostas, é elaborado um Relatório Técnico de Análise de Falhas, que é enviado para a área responsável pelo equipamento. Neste relatório são apresentados os resultados da análise.

Após a elaboração do relatório, o mesmo é revisado por um ou mais engenheiros, com o objetivo de verificar e reparar erros, dificuldade de compreensão, entre outros. Terminada a revisão, o relatório é enviado ao Coordenador para aprovação.

Conseguida a aprovação, o relatório é inserido no sistema eletrônico de documentos da empresa, para consulta pelos funcionários com acesso ao sistema. Além disso, o relatório é enviado aos responsáveis pelo equipamento, que tomarão as decisões cabíveis. Assim, é finalizado o papel da Gerência de Engenharia Mecânica na Análise de Falhas.

O Relatório Técnico de Análise de Falhas elaborado na Gerência ArcelorMittal Tubarão consiste de:

- Sumário, que é exigido apenas quando o relatório ultrapassar 20 páginas, sendo opcional nos demais casos;
- Introdução, onde é apresentado o tema e o objetivo do relatório;
- Especificação Técnica, onde devem constar números e títulos de desenhos, especificação do material, e qualquer outra informação relevante do componente que falhou;
- Desenvolvimento, que é a parte mais importante do texto. Nessa parte deve ser descrito todo o detalhamento da análise, na seqüência em que foi executada. Além disso, nessa parte são incluídas figuras, fotografias, tabelas, entre outros.
- Conclusão, onde são apresentados os resultados da análise de forma resumida, indicando as causas da falha;
- Recomendações, onde são explicitadas as melhorias recomendadas após a análise, que têm como objetivo evitar falhas futuras;
- Anexos, que é opcional, onde são incluídos materiais suplementares ao relatório, como por exemplo, catálogo de fabricantes, sites, entre outros.

6 ESTUDO DE CASO: ESCOPO

6.1 PONTE ROLANTE NO ESCOPO

As Pontes Rolantes são equipamentos usados para transportar cargas dentro de um espaço físico pré-determinado. Tem o nome de "Ponte Rolante" por ser constituída basicamente de uma viga principal apoiada em cada extremidade por apoios rolantes que se deslocam sobre dois trilhos elevados e paralelos afastados um do outro, com comprimento aproximado da viga.

O deslocamento da viga principal é no seu sentido transversal, tanto para a direita como para a esquerda, pela extensão dos trilhos e geralmente em planos horizontais ou, em casos especiais os trilhos podem seguir trajetória curva e os planos serem levemente inclinados.

Acrescentado à viga principal geralmente existe um guincho capaz de suspender as cargas verticalmente do chão até aproximadamente à altura da viga principal. Este guincho frequentemente está instalado sobre um carro que se desloca longitudinalmente através da viga principal.

A Ponte Rolante 41PR-08 estudada neste projeto possui somente um carro, mas com dois tipos de guinchos, um principal para carregar a panela e outro auxiliar com objetivo de virar a panela de ponta à cabeça, processo que se dá no momento de limpeza da panela.

Como já citado anteriormente, a ponte opera 24h/dia e tem como objetivo assegurar o fluxo de panelas que saem do Lingotamento Contínuo e retornam à Aciaria para serem tratadas (limpeza e substituição de válvulas gavetas). Ela está localizada entre o refino primário e secundário da Aciaria e opera ao lado da ponte rolante 41PR-09, responsável pela transferência das panelas cheias que saem dos convertedores e seguem para as estações de tratamentos secundárias.



Figura 14 - Viga da ponte 08 e carro (trolley).
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010

6.2 DADOS DA PONTE ROLANTE 41PR-08

A ponte 41PR-08 da Aciaria possui um peso total aproximado de 243 toneladas e uma capacidade de elevar e transladar cargas de até 160 toneladas, neste caso, o peso aproximado da panela vazia que a mesma está transportando através do guincho principal. Já o guincho auxiliar suporta cargas de até 50 toneladas.

Tabela 2 - Dados da ponte 41PR-08.

Ponte Rolante 41PR-08	
Peso Total	243065 Kg
Cap. Elevação Principal	160 Ton
Cap. Elevação Auxiliar	50 Ton
Norma Epto.	ABNT 8400 - classe Sm16

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

6.3 REGISTRO DE FALHAS DE EIXOS DE RODAS

Com o objetivo de termos uma análise mais detalhada, foi realizada através do Sistema de Manutenção da ArcelorMittal Tubarão uma busca do histórico de falhas ocorridas nos últimos 7 anos na Ponte Rolante 41PR-08. Segue abaixo uma tabela mostrando o número das principais falhas.

Tabela 3 - Histórico de falhas relevantes.

Histórico de Falhas Relevantes								
Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010/Jun
Elevação Principal	30	22	40	16	13	13	5	5
Elevação Auxiliar	12	13	21	21	13	3	5	4
Translação Ponte	36	3	1	4	0	5	6	4
Translação Carro	18	0	1	2	0	8	4	4
Total	96	38	63	43	26	29	20	17

Fonte: SISMANA, sistema de manutenção ArcelorMittal Tubarão, 2010

Através da tabela, percebe-se que o maior índice de falhas está na Elevação Principal da Ponte, comprovando realmente ser um item mais crítico dos demais existentes. A maioria das falhas ocorridas são em função dos freios, o que pode ser chamado de componente crítico.

Já os movimentos de translação tanto da Ponte quanto do Carro, podem-se perceber um índice muito baixo de falhas, e a maior parte das vezes essas ocorrências são caracterizadas pela quebra de parafusos de mancais ou redutores de eixos de rodas da Ponte.

7 ESTUDO DE CASO ESPECÍFICO

7.1 DESCRIÇÃO DAS ÚLTIMAS OCORRÊNCIAS

Neste capítulo serão apresentadas as falhas em um caso real ocorridas na ponte 41PR-08 da Aciaria, ArcelorMittal Tubarão. Ocorreram duas falhas similares em equipamentos distintos da ponte, uma no conjunto do eixo da roda livre de translação da ponte e a outra no conjunto do eixo da roda livre de translação do carro da ponte.

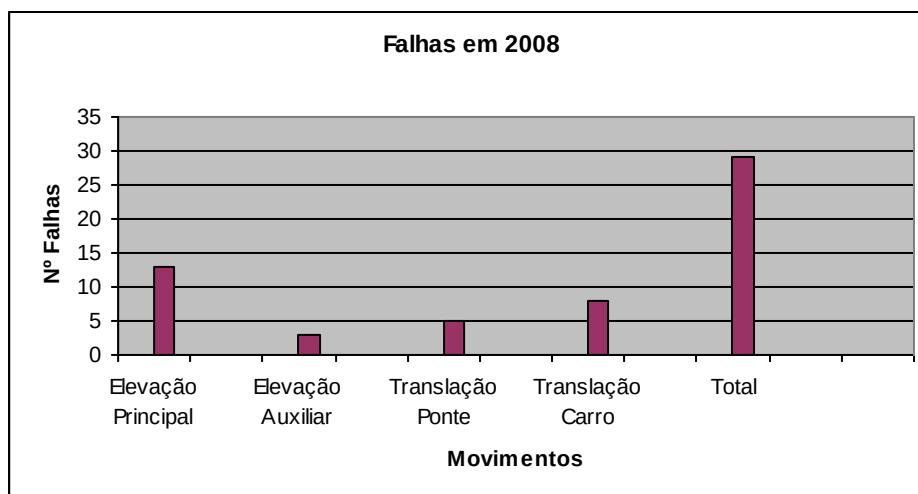


Gráfico 1 - Falhas Ocorridas em 2008.

Fonte: SISMANA, Sistema de Manutenção ArcelorMittal Tubarão, 2010

As duas falhas ocorreram em curto intervalo de tempo, cinco dias de uma para outra, e apresentaram características semelhantes de acordo com as fotos e análises realizadas pela Engenharia de Manutenção. Este estudo será muito importante, pois os eixos apresentam o mesmo projeto de dimensionamento, mesmo suportando cargas distintas, assim se tem menor custo principalmente com sobressalentes e manutenções.

Vale destacar que este caso foi eventual, pois nunca havia tido falhas deste tipo, ou seja, quebra de eixos de rodas livres tanto da translação do carro como da translação da ponte.

As falhas serão apresentadas separadamente para se ter uma análise mais completa e a metodologia utilizada para análise de falha será seguida conforme foi descrita no capítulo 6.

7.1.1 1ª Falha

A primeira falha apresentada será do eixo da roda livre de translação da ponte rolante 41PR-08 da Aciaria, a qual falhou em operação em 27/08/2008. A posição da roda que sofreu a trinca pode ser visualizada no (ANEXO E). Abaixo segue o conjunto Eixo-Roda mostrando a respectiva falha.

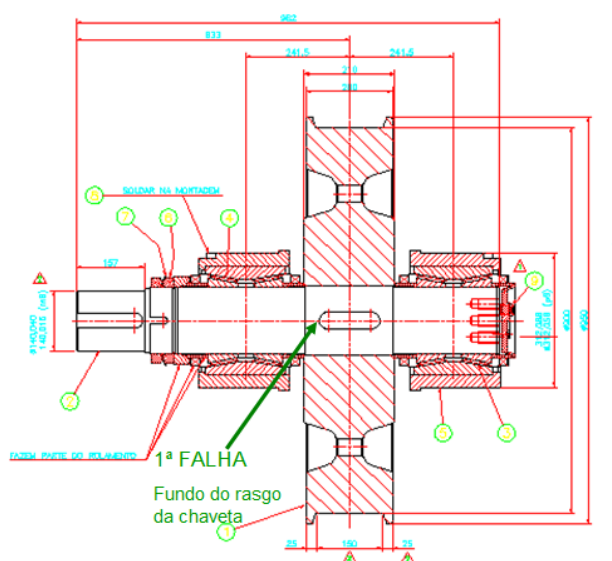


Figura 15 - Ponte 41PR08 – Conjunto roda livre – Localização da 1ª falha.
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2008.

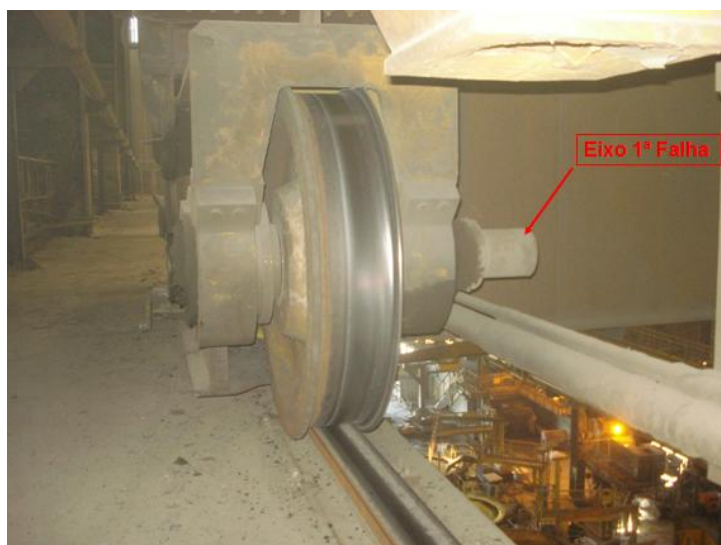


Figura 16 - Conjunto Eixo-Roda Livre da 1ª Falha – Translação da Ponte.
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Na primeira falha, a trinca por fadiga nucleou no fundo do rasgo de chaveta, região de concentração de tensão. Neste caso, a chaveta utilizada é do tipo reta e a região de tensão máxima é mostrada abaixo.

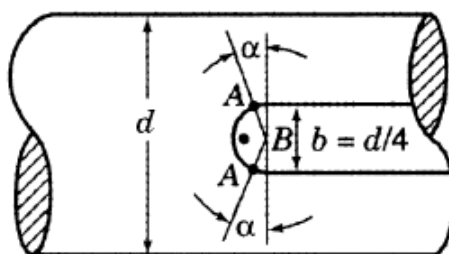


Figura 17 - Região de tensão máxima para rasgos de chavetas retas, $\alpha \approx 10^\circ$.
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2008.

7.1.2 2ª Falha

A segunda falha ocorreu no dia 02/09/08, cinco dias após a primeira falha, e se caracterizou no eixo da roda livre de translação do Carro da Ponte. A posição da roda localizada no Carro pode ser vista no Anexo A. Assimilando à 1ª falha, abaixo se tem o esquemático conjunto Eixo-Roda da translação do carro.



Figura 20 - Conjunto Eixo-Roda Livre da 2ª Falha – Translação do Carro da Ponte
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

7.2 DESCRIÇÃO DAS ÚLTIMAS OCORRÊNCIAS X REGISTRO DE FALHAS DE EIXOS DE RODAS

Visualizando o Gráfico 1, percebe-se que houve quatro falhas no movimento de translação da Ponte 41PR-08 antes da quebra do eixo e sete falhas antes da quebra ocorrer no carro.

De acordo com inspetores e especialistas da área de Ponte Rolante da Aciaria, é muito difícil este tipo de falha ocorrer devido aos planos de inspeção realizados. A maioria das ocorrências registradas está ligada a equipamentos como freio, cabo de aço (substituídos sempre preventivamente), trilhos desalinhados e até mesmo quebra de redutores das rodas motrizes de translação tanto do carro quanto da Ponte.

Dessa forma, torna-se importante avaliar e programar um estudo de caso específico para cada falha ocorrida, pois se tratam de falhas casuais, difícil de ocorrerem, mas que põe em risco a produtividade do equipamento em si e também da produção da Usina.

Após apresentar as duas falhas, nota-se a semelhança da origem de formação das trincas, pois nos dois momentos elas surgiram em pontos de alta concentração de tensão (fundo do rasgo de chaveta e mudança de seção), estudo já abordado no Capítulo 4.

Nos próximos capítulos serão estudadas as duas falhas individualmente e detalhadamente, aplicando os conceitos e metodologias de análise de falhas já apresentados.

7.3 ESTUDO DA 1ª FALHA

Agora, será apresentada uma análise detalhada da 1ª falha real na Ponte Rolante 41PR-08, onde houve quebra do eixo da roda livre de translação. As análises e resultados serão baseados na metodologia aplicada na Companhia e em referências bibliográficas que abordam o contexto.

7.3.1 Coleta de dados e análise visual

Nas figuras coletadas após a quebra, pode ser observado que a primeira falha iniciou-se no fundo do rasgo da chaveta. Como já mencionado, esta é uma região de alta concentração de tensão.

Pode ser observado também que há um arrancamento final na seção do eixo na parte oposta à chaveta.



Figura 21 - Eixo da roda livre – Primeira fratura – Presença de trinca por fadiga Iniciada no rasgo da chaveta – Detalhes.

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Nesta figura, observa-se um arrancamento final da falha que apresenta características de trinca iniciada por fadiga.



Figura 22 - Eixo da roda livre – Primeira fratura – Iniciação no rasgo da chaveta.

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Analizando ainda as Figuras 21 e 22, podemos observar pelo menos 16 pontos de nucleação de trincas por fadiga ao longo da seção do eixo, que são caracterizados pelas marcas de catraca na superfície de fratura (*ratchet marks*).

Várias nucleações de trincas de fadiga são devido à elevada concentração de tensão nesta região. Ainda nesta Figura é evidenciado que as trincas por fadiga se propagaram por aproximadamente 95% da seção do eixo. Apesar do projeto do eixo contemplar o material ABNT 4340 com dureza entre 300 e 350HB, este apresentou alta tenacidade à fratura, que evidencia material e tratamento térmico adequado à aplicação.

7.3.2 Levantamento de dados e coleta de informações na área

Pelo histórico levantado das falhas ocorridas nos últimos anos vistos na Tabela 3, a Ponte Rolante apresentava uma operação normal, pois havia registros de falhas, mas não tão graves.

Em relação ao plano de inspeção, o inspetor da Ponte Rolante 08 garantiu que o plano estava cumprido até o momento da falha.

Ao coletar informações com o operador da ponte (o qual estava no horário), a Ponte vinha operando normalmente, algumas falhas comuns apareciam como falhas de sensores de freio da translação, falha em inversores, mas nenhuma que pudesse influenciar a falha mecânica ocorrida no eixo da translação.

7.3.3 Ensaio de dureza

Devido a não disponibilidade para análise do eixo da 1ª falha, não foi possível a realização de ensaios de dureza do eixo. Mas pelo projeto, o material encontra-se dentro da faixa para a aplicação, entre 300 e 350HB, e ainda tratamento térmico adequado.

7.3.4 Análises de projeto

Ao realizar uma análise do projeto da translação da Ponte, foi detectado que o fator dimensionamento do eixo foi uma das principais causas. No (APÊNDICE A), podem ser visualizados os cálculos para um diâmetro calculado, que se encontra numa faixa mais adequada para a aplicação e, conseqüentemente, mais segura.

Outro fator nesta primeira falha, é que em aplicações onde se tem transmissão de movimentos em rodas livres (por exemplo, as outras quatro Pontes Rolantes da Aciaria), é muito mais seguro e prático a realização do projeto através de interferência e não transmissão por chaveta, pois assim, diminui-se um fator concentração de tensão, apontado também como uma das principais causas da falha.

7.3.4.1 Dimensionamento do eixo da translação da ponte

Neste tópico será apresentado o dimensionamento do eixo da translação da Ponte de acordo com os dados e desenhos adquiridos nos arquivos da ArcelorMittal Tubarão.

Assim, após o dimensionamento poderemos definir as conclusões de análises de projeto, tanto na escolha do material correto, como também a qualidade e dimensão do eixo fraturado.

Para o dimensionamento foram usadas equações do Método Estático Equivalente. Abaixo, encontram-se as equações e todas as constantes podem ser visualizadas na Lista de Símbolos deste projeto.

$$dj \geq 2,17 \times 3 \sqrt{\frac{M_{eq(est)}}{\sigma_{adm.mat(est)}}} \quad (1)$$

$$\sigma_{adm.mat(est)} = \frac{\sigma_{esc}}{F_{S(est)}} \quad (2)$$

$$M_{eq(est)} = \sqrt{(MF_{alt} \times \alpha_f)^2 + \left(\frac{1,00}{4}\right) \times MT_{rep(nom)}^2 \times (1 + \alpha_t)^2} \quad (3)$$

$$\alpha_f = \frac{\sigma_{esc(est)}}{\sigma_f \times k_a \times k_b \times k_d \times k_e \times k_{ff} \times k_g} \quad (4)$$

$$\alpha_t = \frac{\sigma_{esc(est)}}{\sigma_f \times k_a \times k_b \times k_d \times k_e \times k_{ft} \times k_g} \quad (5)$$

Através das equações apresentadas acima, devemos atender a importância dos fatores de transformação de uma solicitação alternante flexão e torção em estático equivalente α_f e α_t , respectivamente. Estes fatores dependem de vários efeitos, e foram definidos de acordo com as especificações apresentadas a seguir.

A constante K_a (efeito de acabamento superficial) foi definida de acordo com o Gráfico 2 abaixo. Usualmente, para o tipo de acabamento do material utilizado neste projeto, adota-se um $K_a = 0,68$. Portanto, este foi o valor escolhido para cálculos.

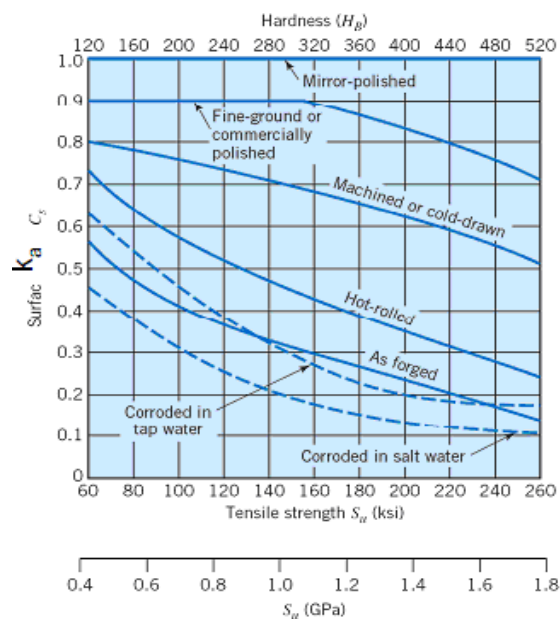


Gráfico 2 - Efeito do acabamento superficial na fadiga do material.
Fonte: BRANCO, C.A.G.M. Mecânica dos Materiais, 2ª ed.

O efeito de tamanho (K_b) foi definido pela tabela 4:

Tabela 4 - Efeito de tamanho, K_b .

Diâmetro da peça	k_b
$d < 7,5 \text{ mm}$	1,00
$7,5 < d < 50 \text{ mm}$	0,85
$d > 50,0 \text{ mm}$	0,75

Fonte: BRANCO, C.A.G.M. Mecânica dos Materiais, 2ª ed.

Como o projeto estudado apresenta $d > 50 \text{ mm}$, o efeito de tamanho foi definido como $K_b = 0,75$.

O efeito de carga foi retirado da tabela 5:

Tabela 5 - Efeito de carga, K_d .

Carga	k_d
Flexão	1,00
Axial	0,70
Torção	1,00

Fonte: PAIVA, Oswaldo, Apostila Elementos de Máquinas I, 2010.

O efeito de carga foi considerado para torção/flexão devido ser eixo de roda livre de Ponte Rolante, daí $K_d = 1,00$.

Para o efeito de temperatura (t em $^{\circ}\text{C}$), deve ser considerado:

Se $t < 71^{\circ}\text{C}$, $K_e = 1,00$;

Se $t > 71^{\circ}\text{C}$, $K_e = \frac{344,4}{273,3 + t}$ (PAIVA, ELEMENTOS DE MÁQUINAS I, 2010).

Sendo assim, tem-se que o eixo da Ponte Rolante trabalha com aproximadamente temperaturas na faixa inferior a 71°C , assim K_e foi definido como 1,00.

Ainda temos que levar em consideração o efeito da concentração de tensão. A Tabela 6 mostra valores desse efeito para determinados elementos de acordo com suas características.

Tabela 6 - Efeito da concentração de tensão em determinados elementos.

Elemento	Característica	Fator de concentração de tensão	
		$1/k_r$	$1/k_{tr}$
Eixo ranhurado	Perfil reto	3,0 a 5,0	*
	Perfil evolvente	1,5 a 2,0	*
	Perfil estriado	2,0 a 2,5	*
Chaveta	Paralela	**	3,0
	Cônica encaixada (desmontável)	**	3,0
	Cônica circular	2,0 a 3,0	*
	Redonda ou Woodruff	2,0 a 3,0	*
	Cunha plana	1,5	1,2
	Cunha côncava	1,0	1,0
	Cunha tangencial	3,0 a 5,0	*
	Kennedy	3,0 a 5,0	*
Eixo de perfil poligonal		1,6	1,2
Ajuste prensado cilíndrico	Sem chaveta	2,0	*
	Com chaveta	2,5	*
Anéis elásticos cônicos		1,7	1,2

(*) : $1/k_{tr} = (0,6 \text{ a } 0,7) * 1/k_r$

Fonte: PAIVA, Oswaldo, Apostila Elementos de Máquinas I, 2010.

O elemento analisado para nosso caso se enquadra em ajuste prensado cilíndrico como indicado na tabela. É importante observar que serão realizados cálculos para Ajuste com e sem chaveta a efeito de comparação.

Ao dimensionarmos um eixo, devemos também levar em consideração o fator de segurança que acaba se tornando um dos principais fatores, pois ele influenciará no cálculo da tensão admissível do material já visto na fórmula (2) acima. A Tabela 7 ilustra os valores para este fator:

Tabela 7 - Fator de segurança.

Fator de segurança	Valores
$F_{s \text{ est}}$	1,5 a 2,0
$F_{s \text{ din}}$	2,0 a 2,5

Fonte: PAIVA, Oswaldo, Apostila Elementos de Máquinas I, 2010.

Como estamos interessados na situação mais crítica, adotaremos sempre os valores que proporcionarão a maior solicitação.

De acordo com a Tabela 8, temos:

$\sigma_{esc} = 1000 \text{ MPa}$ (Aço ABNT 4340).

TABELA 8 - Limite de resistência, tensão de escoamento e Dureza Brinell para alguns tipos de aço-liga.

Material	Limite de Resistência (Mpa)	Tensão de Escoamento (Mpa)	H Brinell (Kgf/mm ²)
ABNT 5120	900	---	200
ABNT 5130 / VR-30	1000	---	205
ABNT 5140 / VR-40	1100	950	215
ABNT 5150 / VR-50	1200	1060	350
ABNT 5160 / VR-60	1200	1010	350
ABNT 4130 / VL-30	1100	1000	215
ABNT 4140 / VL-40	1100	970	220
ABNT 4320 / VM-20	1000	900	---
ABNT 8735	1050	1000	215
ABNT 4340 / VM-40	1300		250

Fonte: http://www.demec.ufmg.br/Grupos/labprojmec/Acos_Liga.htm

Conforme a Figura 23, tem-se um intervalo para σ_f de 40 a 60% da σ_{esc} , para solicitações de até 1400 MPa. Usualmente, aplica-se o valor de $0,577 \times \sigma_{esc}$, que ainda permanece no intervalo recomendado, portanto será adotado.

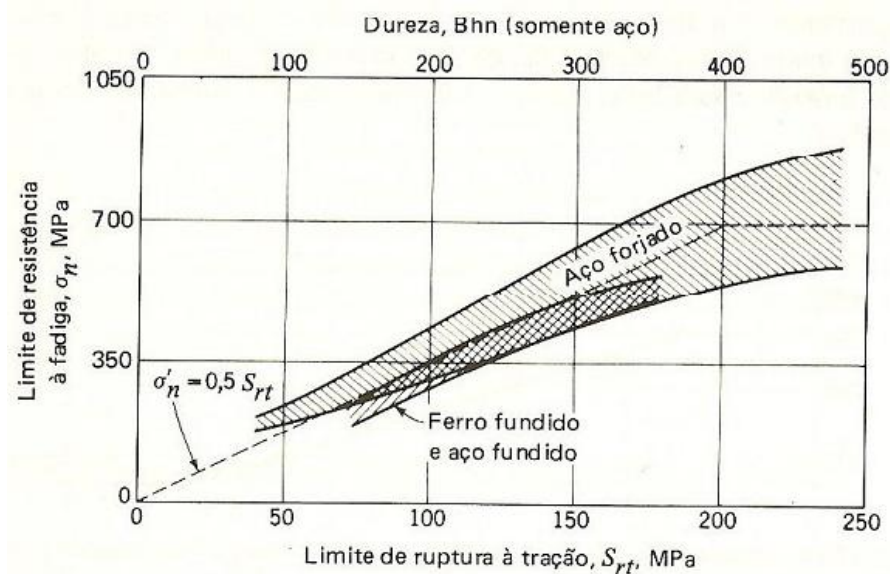


Figura 23 - Relação observada entre a resistência à tração e o limite de resistência à fadiga para os aços forjados e fundidos e ferro fundidos

Fonte: SHIGLEY, J. E.. Elementos de Máquinas, 1984.

E ainda, para efeito de calculo, tem-se:

$$MT = (7162 \text{ N}) / n$$

Após o conhecimento de todas as variáveis, foram obtidos os valores do diâmetro do eixo com e sem chaveta. Os cálculos e valores obtidos podem ser visualizados no (APÊNDICE A).

7.3.5 Determinação das causas raízes

É importante ressaltar alguns pontos do projeto/manutenção do conjunto girante das rodas movidas, que influenciam diretamente no aumento da máxima tensão do eixo:

- Para a ponte em questão a distância entre centros dos mancais do conjunto da roda é de 483 mm que é superior ao utilizado em outras pontes similares. Menores valores entre mancais resultam em menores esforços de flexão no eixo; (ARQUIVO ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2008)

- Foi observado marcas de contato entre trilho e aba da roda, muito provavelmente devido ao desalinhamento dos trilhos, visto que este fato é mais pronunciado nas

rodas de translação da ponte. Estes contatos provocam esforços na axial; (ARQUIVO ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2008)

- Os diâmetros entre as rodas opostas deverão obedecer ao padrão de manutenção PO-MANACIA-IM-0010, ou seja, a diferença do diâmetro entre rodas opostas não deverá exceder 0,2%. Este cuidado reduz esforços torcionais no eixo; (ARQUIVO, ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2008).

Assim, de acordo com essas considerações, mais as análises de projeto descritas no tópico 7.3.4, fica claro que a causa raiz da 1ª falha ocorrida foi erro de projeto, tanto no dimensionamento do eixo como em algumas considerações que não foram levantadas.

7.4 ESTUDO DA 2ª FALHA

De maneira similar à primeira falha, analisaremos agora a segunda falha real, ocorrida esta no eixo da roda livre de translação do carro da Ponte. Este estudo também é baseado na metodologia de análises de falhas da Companhia.

7.4.1 Coleta de dados e análise visual

Após cinco dias à primeira falha, houve também a quebra do eixo da roda livre de translação do carro da Ponte. Abaixo, nas Figuras 24 e 25, têm-se as fotografias retiradas do eixo.



Figura 24 - Eixo da roda livre – Segunda fratura – Presença de trinca por fadiga iniciada na mudança de seção.

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.



Figura 25 - Eixo da roda livre – Segunda fratura – Raio de concordância de 1 mm no projeto – Regiões de nucleação de trincas por fadiga.

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Pode ser observado nas Figuras 24 e 25 que o eixo sofre uma mudança de seção, o que prova ser uma região de concentração de tensão. Desse modo, as trincas se propagam por toda seção do eixo, caracterizando uma falha por fadiga. (capítulo 4).

7.4.2 Ensaio de micrografia

Devido à disponibilidade do eixo na 2ª falha ocorrida, os corpos-de-prova foram cortados em uma máquina politriz, com refrigeração adequada, em quadrados de 10 mm de aresta, e convenientemente embutidos a frio, com posterior lixamento numa seqüência normal de lixas de SiC, e polimento com alumina fina e pasta de diamante.

O reativo químico utilizado para revelar a microestrutura dos aços foi o Nital 2% (2 ml de ácido nítrico- HNO_3 em 98 ml de etanol- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Foram analisadas as seções longitudinais dos corpos-de-prova de cada aço.

A observação da microestrutura dos aços foi realizada em um microscópio ótico marca LEICA, modelo DMLM, com analisador de imagens Hitachi KP-M1Ap, disponível na companhia ArcelorMittal Tubarão.

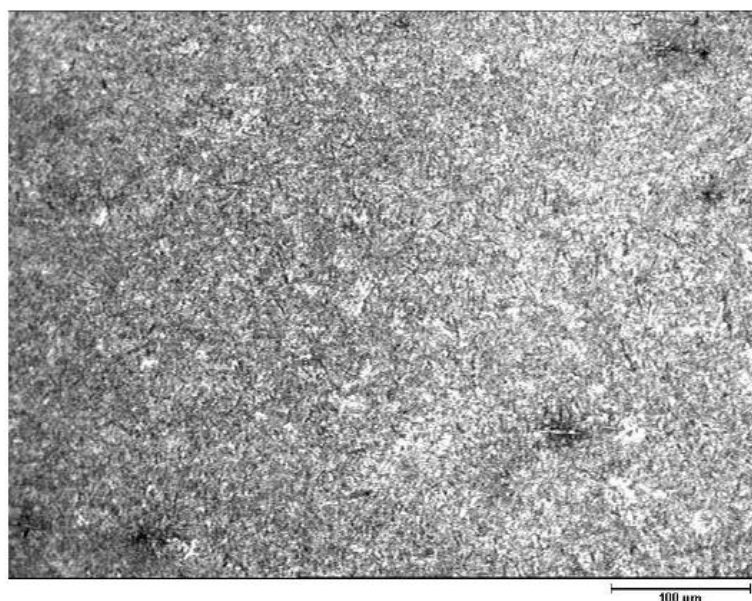


Figura 26 - Micrografia – Eixo da roda livre – Segunda fratura – Presença de martensita revenida.
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2008.

A micrografia do eixo da segunda fratura, Figura 26, revela a presença de martensita revenida, evidenciando que o eixo foi temperado e revenido, conforme previsto para esta aplicação. (RELATÓRIO TÉCNICO, ARCELORMITTAL TUBARÃO).

7.4.3 Análise química

Foi realizada a análise química utilizando-se um espectrômetro de emissão óptica, da marca ThermoARL, modelo ARL-4460 disponível na companhia ArcelorMittal Tubarão. O laboratório segue a Norma ASTM E350 (2005), realizando a média simples entre três análises. De acordo com as especificações de projeto, a composição química do material se encontra dentro dos padrões do aço do tipo ABNT 4340.

Tabela 9 - Composição química nominal (% em peso) do eixo da roda livre – 2ª Fratura.

Comp.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti
%	0,40	0,254	0,75	0,023	0,013	0,034	0,034	1,76	0,77	0,22	0,003	0,001	0,004

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Tabela 10 - Composição química ABNT 4340 conforme Norma SAE – J404.

ABNT/SAE	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,030	0,040	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

Fonte: www.leonox.com.br/J404.

A análise química do eixo nos revela um aço do tipo ABNT 4340 conforme especificado no projeto. (RELATÓRIO TÉCNICO, ARCELOMITTAL TUBARÃO)

7.4.4 Ensaio de dureza

Foram retiradas amostras do eixo e ensaiados em durômetro de mesa Leitz MM6, disponível na ArcelorMittal Tubarão de acordo com norma ASTM E18 em Rockwell C.

Tabela 11 - Dureza superficial pontual do eixo da roda livre – 2ª Fratura.

Dureza	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	Média
HRC	36,4	39,8	40,5	41,9	36,9	39,1±2,4

Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2008.

A dureza superficial está em torno de (39,1±2,4) HRC que está dentro da faixa especificada para esta aplicação. (RELATÓRIO TÉCNICO, ARCELOMITTAL TUBARÃO).

7.4.5 Análises de projeto

Assim como na primeira falha real, o eixo da roda livre de translação do carro sofreu fadiga. Devemos recordar que os dois eixos possuem mesmo projeto, objetivando

reduzir custos com manutenções e sobressalentes, de acordo com os especialistas da Engenharia Mecânica da Aciaria. Desse modo, como o eixo da translação da ponte sofre a solicitação mais crítica no processo, o dimensionamento para o eixo do carro será o mesmo utilizado no tópico 7.3.4, garantindo que o mesmo não irá falhar por solicitação.

Dessa forma, deve-se repensar a utilização de chaveta no eixo para transmissão de movimentos de rodas livres, pois é um concentrador de tensão a mais na aplicação.

7.4.6 Determinação das causas raízes

Na segunda falha, a trinca por fadiga foi nucleada na mudança de seção do eixo, figura 25, região que também possui alta concentração de tensão, devido à própria mudança de diâmetro com pequeno raio de adoçamento, e também à pressão da roda com o eixo, visto que raio de concordância $r = 1 \text{ mm}$ e t de apenas $1,5 \text{ mm}$, visto na Figura 19. (RELATÓRIO TÉCNICO, ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2008)

Também foram observados na superfície de fratura vários pontos de nucleação de trincas por fadiga, evidenciando o alto concentrador de tensão na região, figura 25.

Da mesma forma ocorrida na primeira fratura, a segunda apresentou alta tenacidade à fratura visto que a trinca por fadiga se propagou por aproximadamente 90% da seção do eixo. Na análise do eixo também não fica evidenciado o raio de concordância de 1 mm previsto em projeto, ou seja, provavelmente foi fabricado somente com o raio da ferramenta de usinagem ($\sim 0,4 \text{ mm}$), aumentando assim o concentrador de tensão na região. (RELATÓRIO TÉCNICO, ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2008).

Assim, as análises caracterizam uma falha por fadiga como visto também no 1º estudo, mas a causa raiz evidencia um erro no projeto, pois algumas recomendações não foram adotadas.

8 RECOMENDAÇÕES DE MELHORIAS

Agora, serão recomendadas algumas melhorias para compor no novo projeto e em planos de inspeção realizados pela especialidade Mecânica da Aciaria. O nosso foco nas recomendações abaixo será dado ao redimensionamento dos eixos. Os cálculos para os dois eixos que falharam serão os mesmos por motivos já citados.

8.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS PARA OS DOIS EIXOS

Com as causas identificadas, algumas recomendações são propostas para evitar a recorrência deste tipo de falha:

- Revisar dimensionamento do eixo; (APENDICES A e B) e (ANEXOS A, B, C e D).
- Repensar a utilização de chaveta para transmissão de movimentos livres, pois utilizando interferência sem chaveta, elimina-se um concentrador de tensão;
- Verificar o alinhamento dos trilhos de translação da ponte de acordo com o PO-MAN-ACIA-IM-0041 (padrão de manutenção, ArcelorMittal Tubarão, 2010).
- Verificar diâmetro entre rodas de acordo com o PO-MAN-ACIA-IM-0010;
- Revisar os projetos dos eixos quanto às recomendações citadas nas análises descritas acima;
- Substituir todos os eixos das rodas de translação da Ponte e do Carro 41PR08 pelos eixos modificados;
- Até a completa substituição dos eixos, adotar sistemática de inspeção periódica dos eixos por ultra-som durante paradas programadas (trimestral).

8.2 REDIMENSIONAMENTO DOS EIXOS: PROPOSTA DE MELHORIA

De acordo com os cálculos de dimensionamento realizados, chegou-se a conclusão que o eixo estava subdimensionado. Desta forma, será feita neste capítulo uma proposta de melhoria, adequando uma nova especificação ao eixo, de modo que o mesmo seja capaz de suportar as solicitações a qual está submetido.

Para este fim, adotar-se-á um Momento Torsor de 12950 N.m, visto que este não se alterará com um redimensionamento e um novo eixo, sem chaveta, com diâmetro de 210 mm, pois um diâmetro de 207 mm já seria suficiente, como foi demonstrado anteriormente.

Ainda vale ressaltar que será usado o tipo de ajuste com interferência prensado. Algumas observações abaixo são colocadas afins de cálculo:

- A pressão a ser adotada no projeto é o menor dos valores encontrados;
- A pressão mínima para manter a ligação deve ser menor ou igual à pressão máxima admissível pelos materiais;

Para fins de segurança, adotaremos um acréscimo de 20 μm na dilatação. Portanto, chega-se, aproximadamente, a uma dilatação máxima de 965 μm e uma dilatação mínima de 43 μm . Estes valores representarão, respectivamente, as interferências máxima e mínima. Arbitrariamente, baseado em dados usuais, escolheremos o grau de tolerância-padrão IT8 e IT9 e adotaremos o afastamento fundamental H.

Como ultimo passo, recorrem-se novamente aos graus de tolerância-padrão e afastamentos fundamentais (ANEXOS B, C e D) da norma NBR 6158, para conclusão do redimensionamento. As fórmulas utilizadas para fins de redimensionamento estão enumeradas de 6 a 10 logo abaixo:

$$p_{\min(T)} = \frac{2.MT_{\max}.FS}{\pi.D^2.l.\mu_{ep}} \quad (6) \quad p_{\max} < 0,45. \sigma_e. \left(\frac{R^2 - R_1^2}{R^2} \right) \quad (7)$$

$$p_{\max} < 0,45. \sigma_e \quad (8) \quad \Delta D_{\min} = \frac{D.p_{\min}}{E} \left(\frac{2.R_2^2}{R_2^2 - R^2} \right) \quad (9)$$

$$\Delta D_{\max} = \frac{D.p_{\max}}{E} \left(\frac{2.R_2^2}{R_2^2 - R^2} \right) \quad (10)$$

Fonte: PAIVA, Oswaldo, Apostila Elementos de Máquinas I, 2010.

Os coeficientes de atrito podem ser retirados da Tabela 12:

Tabela 12 - Coeficientes de atrito de alguns materiais.

Ajuste	LONGETUDINAL						RADIAL							
Peça Interna	Aço St 50.11						Aço St 50.11							
Peça Externa	Aço St 50.11	FoFo 18.91	Ge	Liga Al	Mg	Latão Ms 58	Resina Prensada	Aço St 50.11	Aço St 50.11	FoFo 18.91	Ge	Liga Al	Mg	Latão Ms 58
Estado de Lubrificação	Óleo de máquina	Seco		Seco		Seco		Óleo de máquina	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	
μ_{ip}	0,086 a 0,250	0,090 a 0,170	0,030 a 0,090	0,040 a 0,100	0,330	0,130 a 0,240		0,350 a 0,400	0,130 a 0,180	0,100 a 0,150	0,170 a 0,250			
μ_{il}						0,140 a 0,360								
μ_{ep}	0,050 a 1,170	0,070 a 0,120	0,020 a 0,060	0,030 a 0,070	0,220	0,080 a 0,190		0,150 a 0,160	0,070 a 0,090	0,050 a 0,060	0,050 a 0,140			
μ_{el}						0,050 a 0,120								
μ_m	0,054 a 0,220	0,070 a 0,130	0,020 a 0,080	0,050 a 0,100	0,540									

Fonte: PAIVA, Oswaldo. Apostila Elementos de Máquinas I, 2010.

A Tabela 13 abaixo nos mostra os módulos de elasticidade de para alguns materiais:

Tabela 13 - Módulo de elasticidade de alguns materiais.

Material	Modulo de Young [GPa]
Diamante	1 000
Carbeto de silício (SiC)	450
Tungstênio	406
Ferro	196
Aços de baixa liga	200 - 207
Ferros-fundidos	170 - 190
Cobre	124
Titânio	116
Vidro (SiO ₂)	94
Alumínio	69
Vidro ((Na ₂ O - SiO ₂))	69
Nylon	2 - 4

Fonte: <http://www.mse.cornell.edu/courses/engri111/modulus.htm>.

Com os dados adotados e valores obtidos, tem-se Ø210 H9, com liberdade para escolha do afastamento fundamental para o eixo. Encontram-se abaixo, nas Figuras 27 e 28, as representações das tolerâncias e interferências do eixo, no projeto antigo e na proposta de melhoria, respectivamente.

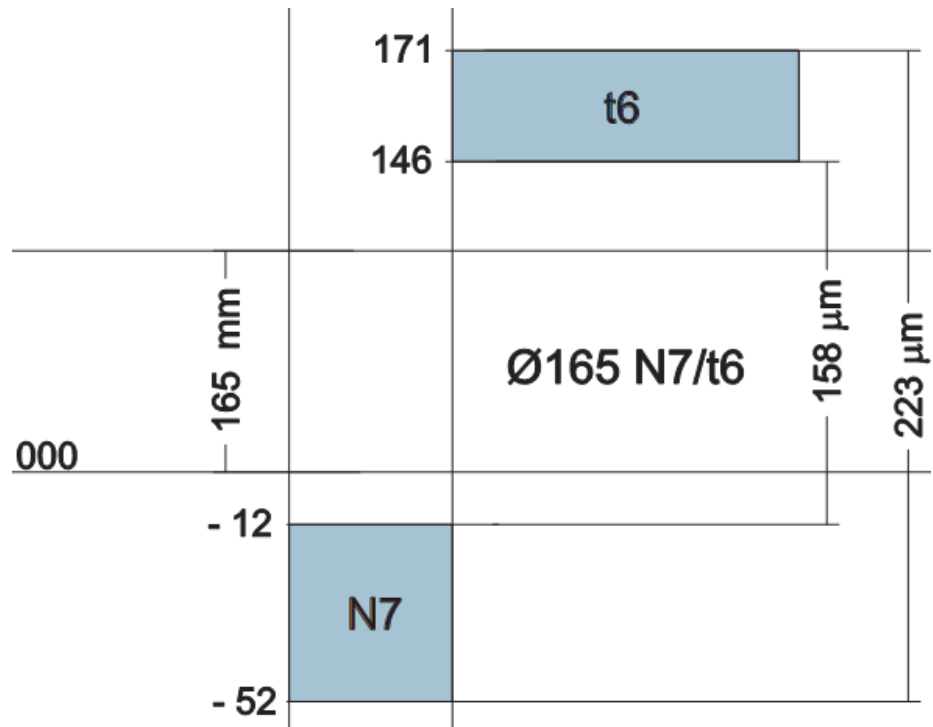


Figura 27 – Tolerâncias e interferências do eixo subdimensionado

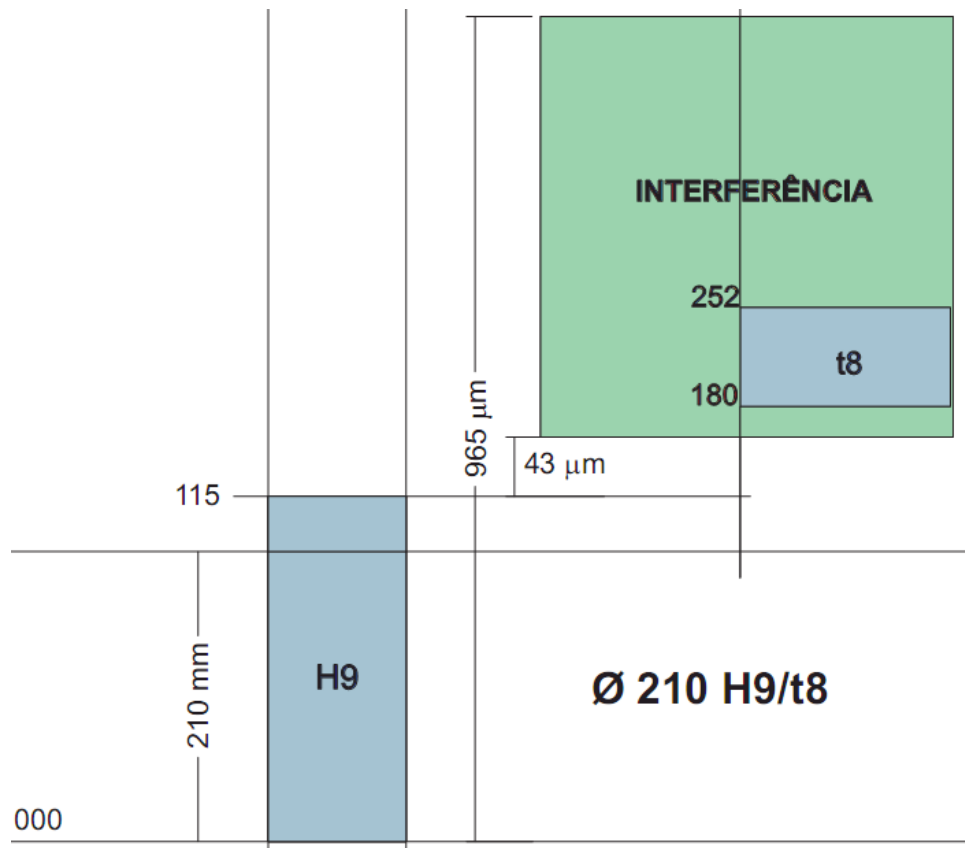


Figura 28 – Tolerâncias e interferências do eixo redimensionado

Deve-se observar que a escolha adequada dos afastamentos deve estar no intervalo de 43 μm e 965 μm . A escolha, neste caso especificamente, foi do afastamento “t”. Porém, qualquer outra escolha, baseada nas tabelas dos ANEXOS C e D, e que respeite o intervalo de interferências (afastamentos de “t” a “za”), também será válida.

Na Tabela 14 é feita uma comparação entre alguns parâmetros do eixo estudado (projeto antigo) e o eixo proposto neste após o estudo (projeto novo).

Tabela 14 – Comparação entre “projeto antigo” e “projeto novo”

		PROJETO ANTIGO	PROJETO NOVO
$\varnothing$	Medida (mm)	165	210
	Tolerância	N7/t6	H9/t8
INTERFERENCIAS	Mínima (μm)	158	43
	Máxima (μm)	223	252

Ainda a respeito da Tabela 14, vale ressaltar que o projeto novo é de um eixo sem chaveta, com as dimensões necessárias para suportar as cargas exercidas sobre o eixo, conforme calculadas na seção de dimensionamento deste projeto de graduação e demonstradas no APENDICE A. Para um eixo com chaveta, o diâmetro adotado deveria ser maior que 224 mm, fato este que não foi observado pelo responsável do projeto original.

Entretanto, como pode ser lido na Tabela 14, o intervalo de interferência do projeto antigo encontra-se inserido no intervalo proposto no novo projeto, portanto, pra este parâmetro, não havia erro.

É importante lembrar também que os cálculos não levaram em consideração o efeito da temperatura no componente solicitado, uma vez que a temperatura no ambiente de trabalho não foi julgada como sendo um fator relevante, pois a mesma é relativamente baixa para causar algum distúrbio.

9 CONCLUSÃO

Com as análises e estudos realizados neste trabalho, fica evidente que a ferramenta Análise de Falhas é de extrema importância para a indústria de modo geral, pois, além de promover melhorias dos equipamentos com relação à manutenção, há benefícios também para a segurança e sustentabilidade de modo geral.

Outro fator importante é o aprendizado com relação ao estudo da falha. Neste caso, a falha poderia ser causada por um dos três fatores: ressonância, fadiga prematura ou ainda ruptura brusca. Como não há indícios de ressonância e nem foi uma fratura brusca, percebe-se que o eixo sofreu uma fadiga que poderia ser evitada, pois houve na verdade um subdimensionamento.

Devemos nos atentar que o trabalho contribuiu em muito com as análises práticas realizadas, pois fomos além do conhecimento teórico adquirido em sala. Mas, um fator importante neste projeto de graduação que devemos analisar é a questão da metodologia. A análise feita pelos engenheiros foi de extrema importância para os resultados obtidos, mas há um desvio na análise, pois o fator dimensionamento deveria ser tratado como o principal para mais tarde serem feitas outras análises.

Assim, propomos uma melhoria redimensionando o eixo fraturado dentro das normas sabendo que a falha poderia ser evitada. Este estudo comprova a importância do assunto Análise de Falha, o qual sempre deverá ser tratado com muito detalhe durante todo curso de Engenharia aperfeiçoando ainda mais o perfil do engenheiro recém formado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCELORMITTAL TUBARÃO. Web site e arquivos.

<www.arcelormittal.com/br/tubarao>. Acesso em: 23 maio 2010.

AFONSO, Luiz Otavio Amaral, **Análise de falhas de máquinas rotativas - Alguns pontos importantes**, 2002

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

ESDEP, EUROPEAN Steel design education Programme. 1990. - Moura Branco e outros. **'Fadiga em Estruturas Soldadas'**, Fundação Calouste Gulbenkian, Ag 1986, Lisboa.

GARCIA, Amauri; SANTOS, Carlos Alexandre dos; SPIM, Jaime Álvares. **Ensaaios dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

GODEFROID, Leonardo B. **Análise de Falhas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2005.

HECK, Nestor Cezar, **Introdução à engenharia metalúrgica**, 2009.

NBR 6158 - 1995 - **Sistema de Tolerâncias e Ajustes**.

NBR 8400 – **Cálculo para Elevação e Movimentação de Cargas**, 1983.

PAIVA, Oswaldo. **Apostila Elementos de Máquinas I**, 2010.

PINTO, Luis Henrique Terbeck, **Tópicos de engenharia de confiabilidade**, 2004.

Suresh S., **"Fatigue of Materials"**, Cambridge University Press. (1998).

V. Chiaverini, **Tecnologia Mecânica**, Vol. 1.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Ed Campus, 1984.

www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula_11_-_Fadiga_dos_metais.doc. Acesso em 15 jun. 2010.

www.epcapelas.com/dados/index.php?dir=Material_Pedagogico%2FEnsaio+Materiais%2F. Acesso em 10 jun. 2010.

APÊNDICES

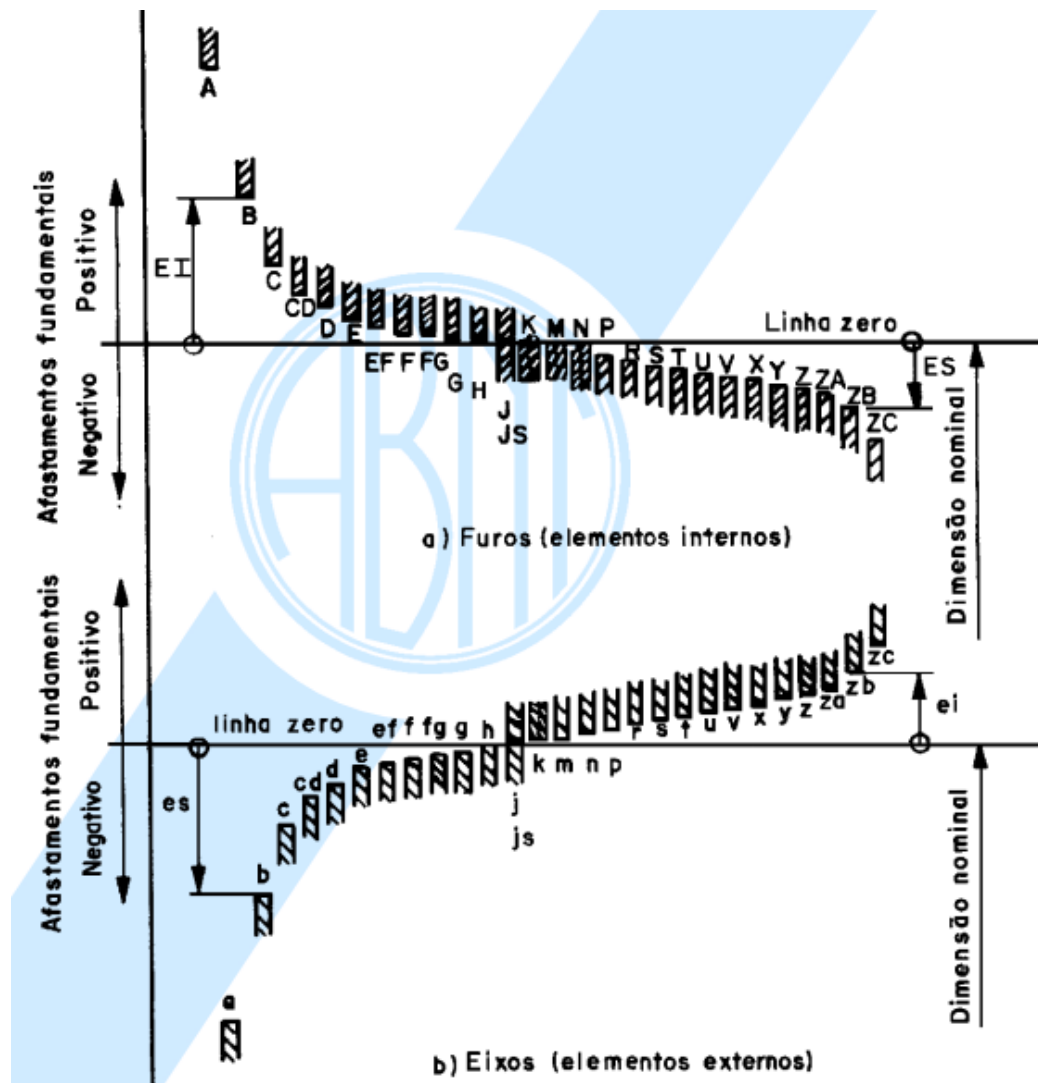
APÊNDICE A – Cálculo do Dimensionamento do Eixo que houve a Falha.

	Ajuste prensado com chaveta		Ajuste prensado sem chaveta	
MT (rep)	12945,71289	N.m	12945,71289	N.m
MF(alt)	85732,5	N.m	85732,5	N.m
α_f	8,49559928		6,796479424	
α_t	5,522139532		4,417711625	
Meq	729266,0101	N.m	583470,0891	N.m
σ_{adm}	666,6666667	$10^6 \cdot \text{N/m}^2$	666,6666667	$10^6 \cdot \text{N/m}^2$
dj	0,223589881	m	0,207569252	m

PRESSÃO		
P min	8,614906187	MPa
P max eixo	450	Mpa
p max cubo	360,9226874	Mpa
ΔD		
ΔD min	0,022556316	mm
ΔD max	0,945	mm

ANEXOS

ANEXO A - Representação esquemática das posições dos afastamentos fundamentais para Furos e Eixos.



Fonte: NBR 6158, 1995

ANEXO B – Tabela de Graus de Tolerância-Padrão para Dimensões Nominais até 3150 mm.

Dimensão nominal (mm)		Graus de tolerância-padrão																	
		IT1 ^(a)	IT2 ^(a)	IT3 ^(a)	IT4 ^(a)	IT5 ^(a)	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14 ^(c)	IT15 ^(c)	IT16 ^(c)	IT17 ^(c)	IT18 ^(c)
Acima	Até e Inclusive	Tolerância																	
		(μm)												(mm)					
-	3 ^(c)	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630 ^(a)	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800 ^(a)	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000 ^(a)	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250 ^(a)	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600 ^(a)	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000 ^(a)	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500 ^(a)	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150 ^(a)	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

Fonte: NBR 6158, 1995

ANEXO C – Tabela dos Afastamentos Fundamentais para Eixos.

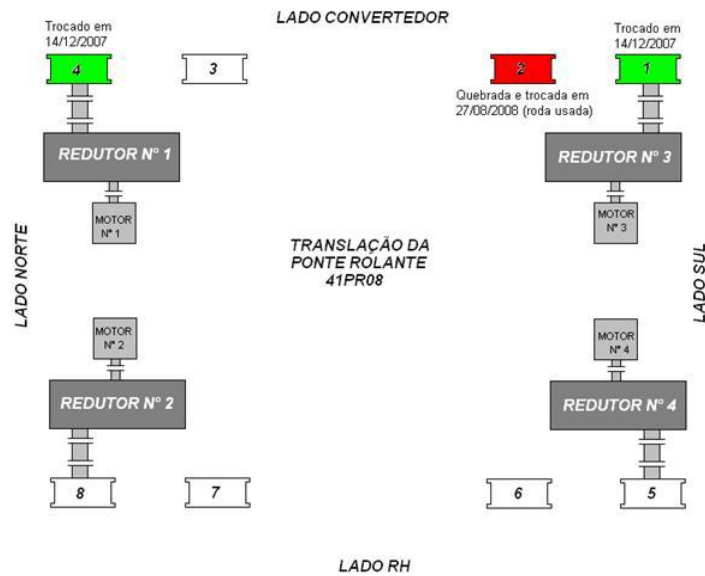
Dimensão nominal (mm)		Afastamento superior es											Afastamentos fundamentais (µm)					Afastamento inferior ei													
		Todos os graus de tolerância-padrão											IT5 e IT6	IT7	IT8	IT9 até IT7	Até IT3 (inclusive e acima de IT7)	Todos os graus de tolerância-padrão													
Acima	Até e inclusive	a ^(h)	b ^(h)	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js ^(h)	j	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb			
3	3 ^(h)	+270	+140	+80	+34	+20	+14	+10	+8	+4	+2	0	ITn Afastamento = ± $\frac{ITn}{2}$ onde n é o valor IT	+2	+4	+8	0	0	+2	+4	+8	+10	+14		+18		+20		+28	+32	+40
6	6	+270	+140	+70	+48	+30	+20	+14	+10	+8	+4	0		+2	+4	+1	0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	
10	10	+280	+150	+80	+58	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+2	+5	+1	0	+8	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	
14	14	+290	+150	+95		+50	+32	+18		+6	0			+3	+8	+1	0	+7	+12	+18	+23	+28	+33			+40		+50	+64	+90	
18	18																								+39	+45		+80	+77	+108	
24	24	+300	+180	+110		+85	+40	+20		+7	0			+4	+8	+2	0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+138	
30	30																														
40	40	+310	+170	+120		+80	+50	+25		+9	0			+5	+10	+2	0	+9	+17	+28	+34	+43	+48		+80	+88	+80	+94	+112	+148	+200
50	50	+320	+180	+130																									+54	+70	+81
63	63	+340	+190	+140		+100	+60	+30		+10	0																				
80	80	+380	+200	+150																											
100	100	+380	+220	+170		+120	+72	+38		+12	0																				
125	125	+410	+240	+180																											
160	160	+480	+280	+200																											
200	200	+520	+280	+210																											
250	250	+580	+310	+230																											
315	315	+680	+340	+240																											
400	400	+740	+380	+280		+170	+100	+50		+15	0																				
500	500	+820	+420	+280																											
630	630	+920	+480	+300																											
800	800	+1050	+540	+330																											
1000	1000	+1200	+600	+380		+210	+125	+62		+18	0																				
1250	1250	+1350	+680	+400																											
1600	1600	+1500	+780	+440																											
2000	2000	+1650	+840	+480																											

Fonte: NBR 6158, 1995

Dimensione		Allineamento inferiore EI												Allineamento fondamentale (µm)												Allineamento superiore ES												Microspina (µm)							
nominale (mm)		Tolleranze di allineamento in parallelo																								Grandezze di allineamento in parallelo di IT7												Grandezze di allineamento in parallelo							
Alma	Alma Riscala	AP1	B1	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JSP1	J	K1	K1R1	N1R1	Palea ZDF	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	Za	Zb	ZC	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8										
3	3 H 9	+270	+340	+80	+34	+20	+14	+10	+8	+6	+4	+2	0	+2	+4	+8	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-24	-32	-40	-60	0	0	0	0	0									
5	5	+270	+340	+70	+48	+30	+20	+14	+10	+8	+6	+4	0	+5	+8	+10	-11 µ	-11 µ	-14	-14	-16	-18	-20	-24	-28	-36	-42	-60	-80	1	15	1	3	4											
6	10	+280	+350	+80	+38	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	-11 µ	-11 µ	-14	-14	-16	-18	-20	-24	-28	-34	-42	-62	-87	-97	1	15	2	3	6	1									
10	14													+6	+10	+15	-11 µ	-11 µ	-14	-14	-16	-18	-20	-24	-28	-34	-42	-64	-90	-150															
14	18	+290	+350	+98		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	-11 µ	-11 µ	-14	-14	-16	-18	-20	-24	-28	-34	-42	-66	-97	-108	-150	1	2	3	7	1									
18	24													+8	+12	+20	-21 µ	-21 µ	-24	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-42	-66	-98	-138	-188														
24	30	+300	+380	+110		+68	+40		+20		+7	0		+8	+12	+20	-21 µ	-21 µ	-24	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-42	-66	-98	-138	-188	15	2	3	4	8	12								
30	40	+310	+370	+120										+10	+14	+24	-21 µ	-21 µ	-24	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-42	-66	-98	-138	-188	15	3	4	5	9	14								
40	50	+320	+380	+130		+80	+50		+25					+10	+14	+24	-21 µ	-21 µ	-24	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-42	-66	-98	-138	-188	15	3	4	5	9	14								
50	68	+340	+390	+140		+100	+60		+30		+10	0		+13	+18	+25	-21 µ	-21 µ	-24	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-42	-66	-98	-138	-188	2	3	5	6	11									
68	80	+350	+400	+150		+120	+72		+36		+12	0		+16	+22	+34	-31 µ	-31 µ	-34	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-54	-84	-116	-150	-214														
80	100	+360	+420	+170		+140	+84		+42		+14	0		+18	+26	+42	-31 µ	-31 µ	-34	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-54	-84	-116	-150	-214	2	4	5	7	13	15								
100	120	+410	+440	+180										+18	+26	+42	-31 µ	-31 µ	-34	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-54	-84	-116	-150	-214	3	4	6	7	15	20								
120	140	+460	+490	+200										+22	+30	+47	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
140	160	+520	+550	+220		+148	+88		+48		+14	0		+22	+30	+47	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
160	180	+580	+610	+230										+26	+34	+51	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
180	200	+640	+670	+240										+30	+38	+55	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
200	225	+740	+780	+260		+170	+102		+50		+16	0		+30	+38	+55	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
225	250	+820	+860	+280										+34	+42	+61	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
250	280	+920	+960	+300		+190	+110		+58		+17	0		+38	+46	+65	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
280	318	+1080	+1140	+330										+42	+50	+71	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
318	358	+1200	+1260	+360		+210	+125		+62		+18	0		+46	+54	+75	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
358	400	+1380	+1440	+400		+240	+135		+68		+20	0		+50	+58	+81	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
400	450	+1500	+1560	+440		+250	+135		+68		+20	0		+50	+58	+81	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								
450	500	+1680	+1740	+480										+50	+58	+81	-41 µ	-41 µ	-44	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-64	-96	-128	-160	-220	4	5	8	9	17	25								

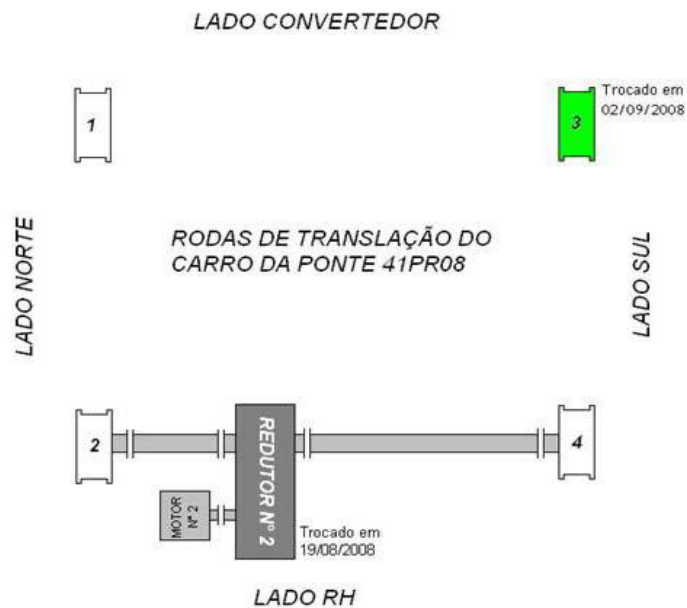
Fonte: NBR 6158, 1995

Em cor vermelha – Falha do eixo da Translação da Ponte.



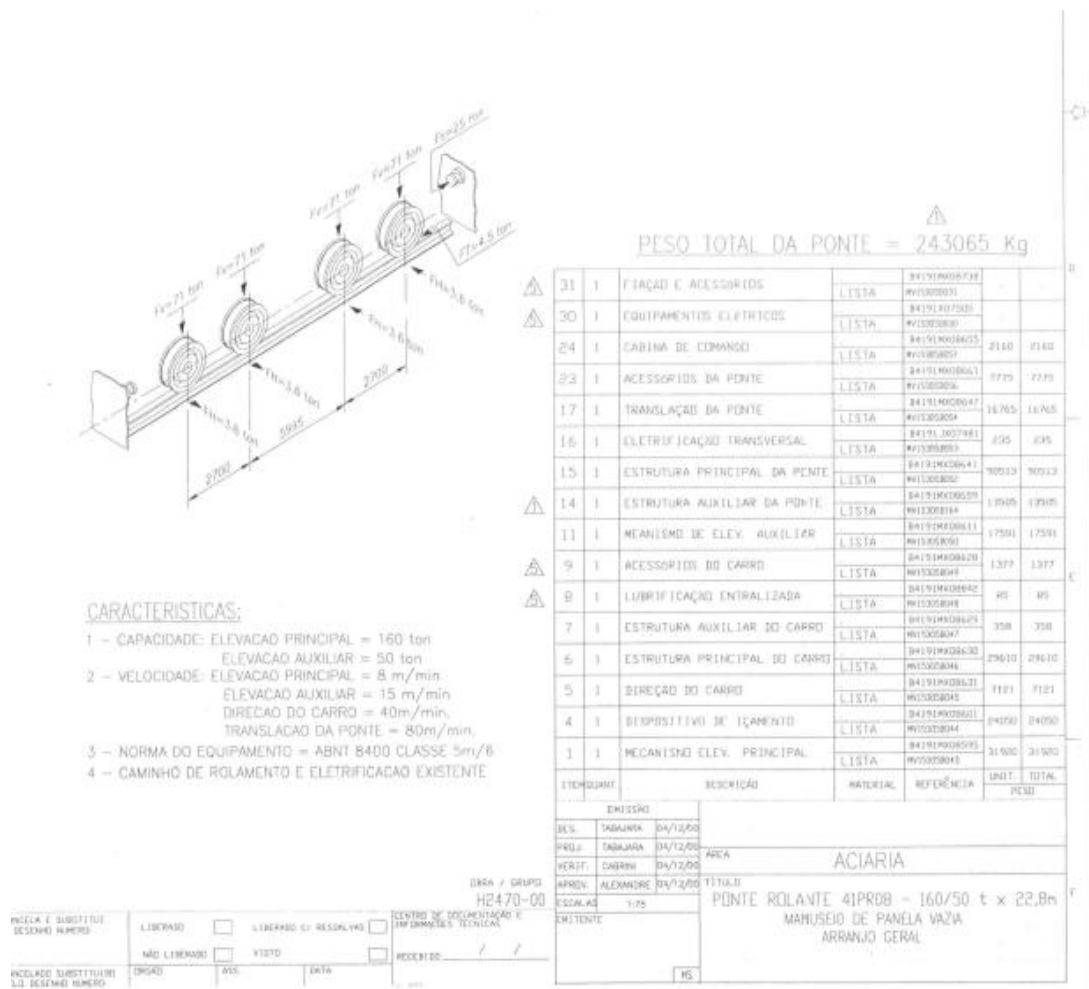
Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

Indicada em cor verde – Falha do eixo da Translação do Carro da Ponte.

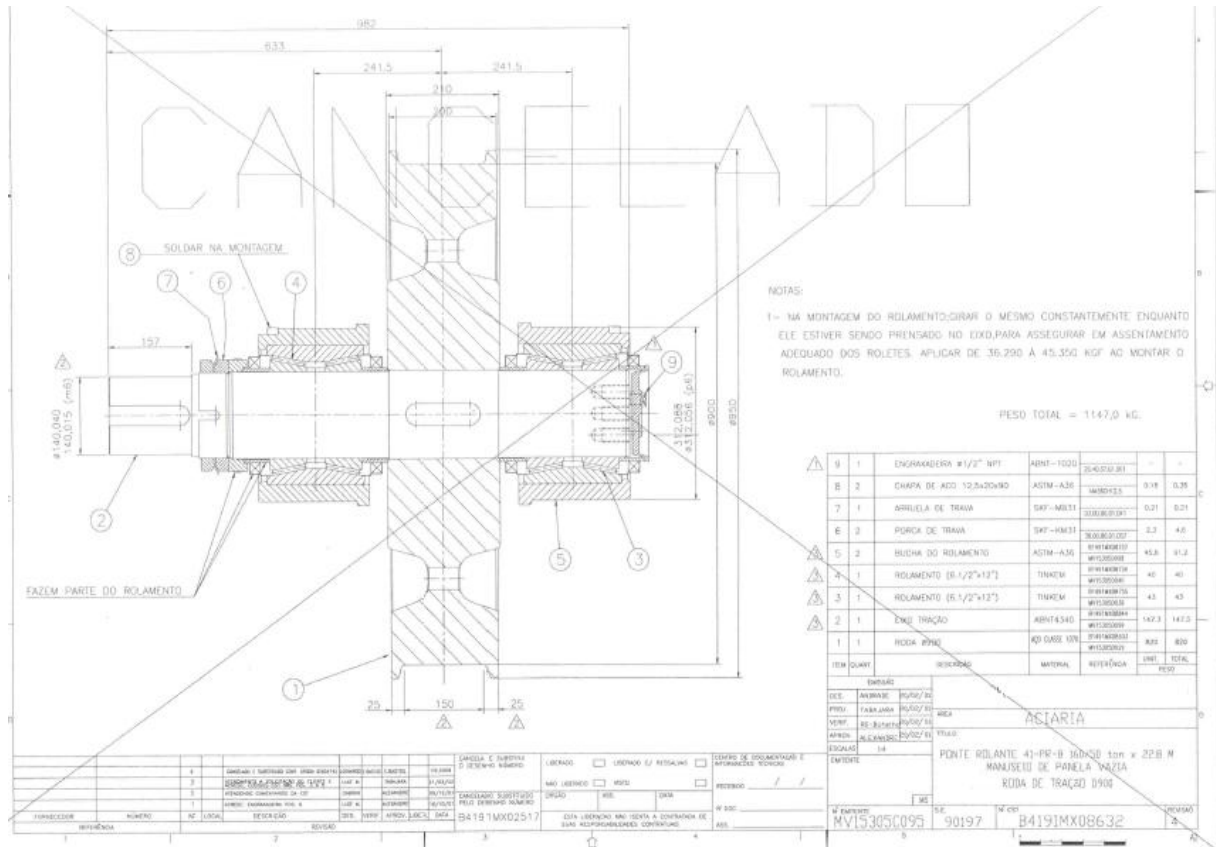


Fonte: Arquivo ArcelorMittal Tubarão, 2010.

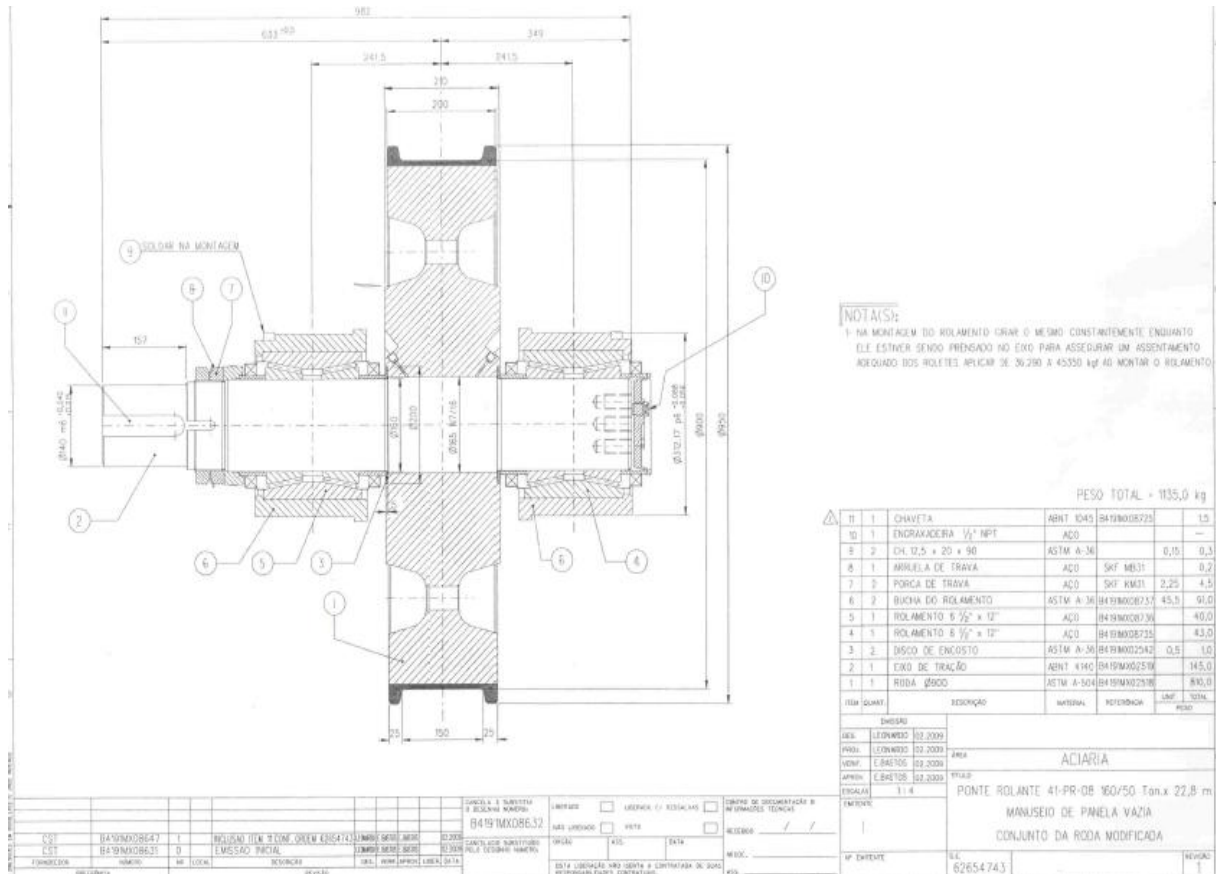
ANEXO F – Representação das Solicitações nos Eixos



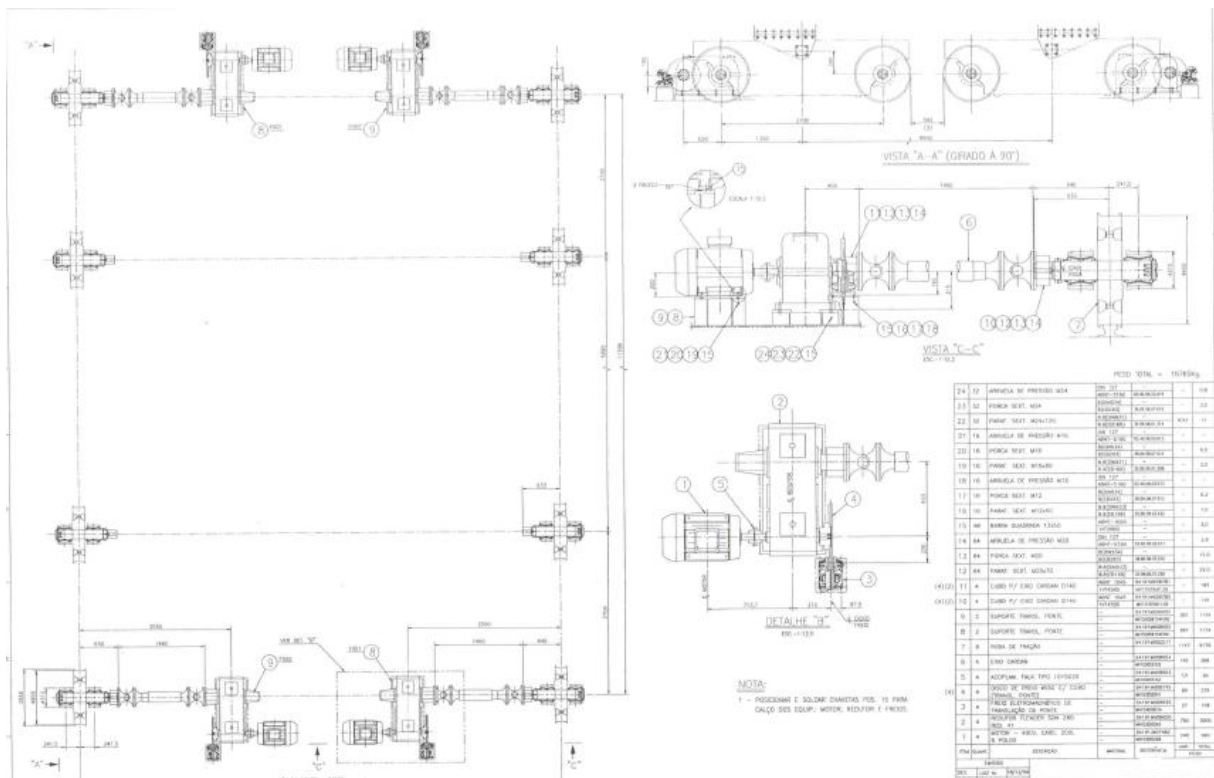
Fonte: Arquivo, ArcelorMittal Tubarão, 2010



Fonte: Arquivo, ArcelorMittal Tubarão, 2010

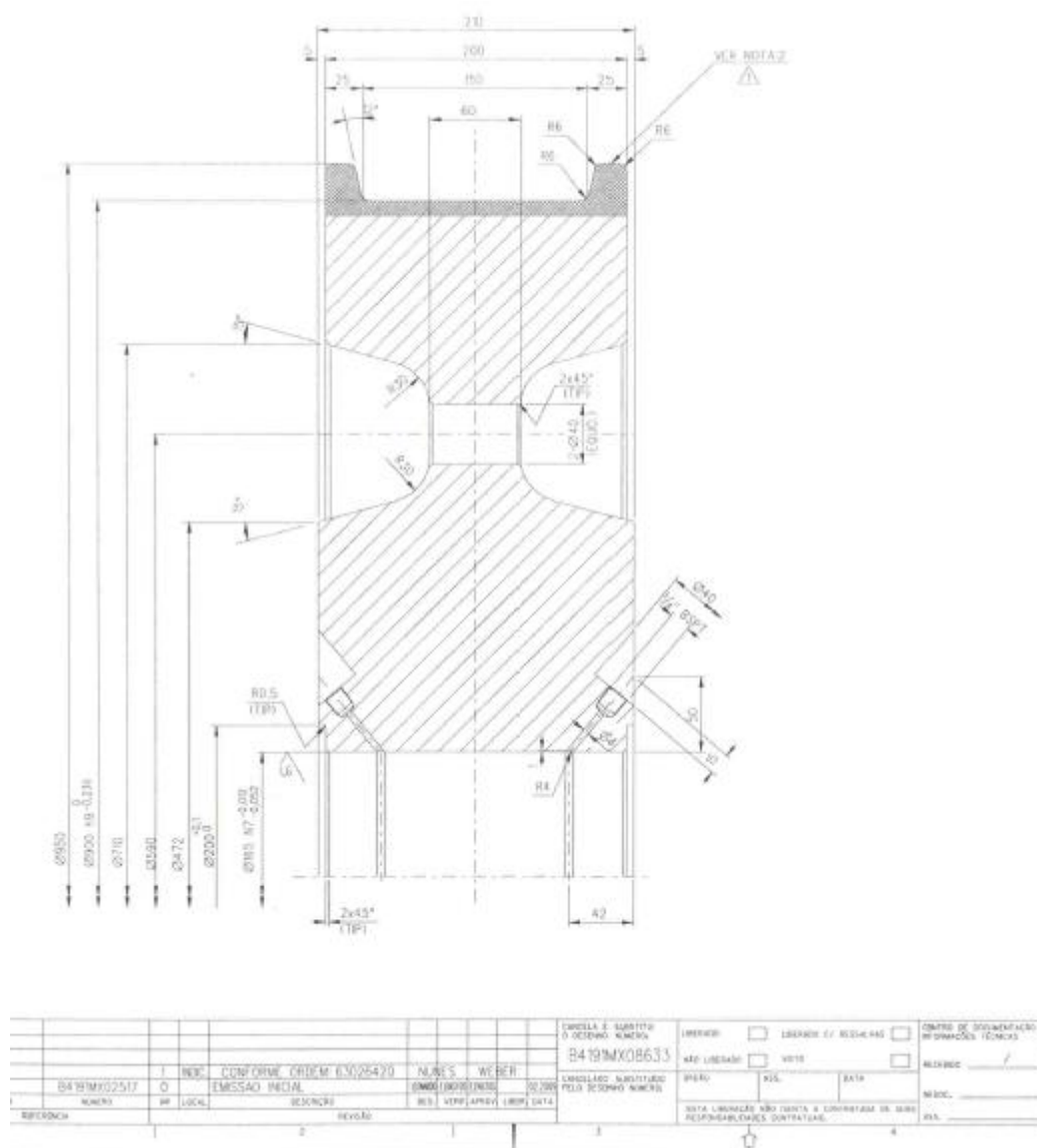


Fonte: Arquivo, ArcelorMittal Tubarão, 2010



Fonte: Arquivo, ArcelorMittal Tubarão, 2010

ANEXO J – Representação dos Raios e Diâmetros na Roda



Fonte: Arquivo, ArcelorMittal Tubarão, 2010