



**FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO E NEGÓCIOS DE
SERGIPE - FANESSE
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO – NPGE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO “LATO SENSU”
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO
TRABALHO**

CRISTIANE RAMOS DOS SANTOS

**GERENCIAMENTO DE RISCOS POR ANÁLISE DE FALHAS
APLICADO A MANUTENÇÃO DE REPARO DO EIXO DE UM
ROLO COMPACTADOR DE MINÉRIO**

Aracaju – SE
2017.1

CRISTIANE RAMOS DOS SANTOS

**GERENCIAMENTO DE RISCOS POR ANÁLISE DE FALHAS
APLICADO A MANUTENÇÃO DE REPARO DO EIXO DE UM
ROLO COMPACTADOR DE MINÉRIO**

Artigo apresentado à Coordenação do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho da Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe - FANESE, como requisito parcial e elemento obrigatório para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, no período de 2017.1.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Griza

Coordenadora de Curso: Prof.(a) M.Sc.
Felora Daliri Sherafat

Aracaju - SE

2017.1

CRISTIANE RAMOS DOS SANTOS

**GERENCIAMENTO DE RISCOS POR ANÁLISE DE FALHAS
APLICADO A MANUTENÇÃO DE REPARO DO EIXO DE UM
ROLO COMPACTADOR DE MINÉRIO**

Artigo apresentado à Coordenação do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho da Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe – FANESE, como requisito para obtenção do grau de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, no período de 2017.1.

Aracaju (SE), 12 de junho de 2017.

Nota/Conteúdo: _____ (_____)
Nota/Metodologia: _____ (_____)
Média Ponderada: _____ (_____)

Orientador: Prof. Dr. Sandro Griza

Prof.^a M.Sc. Felora Daliri Sherafat
Coordenadora

Avaliador externo: Prof. Dr. André Felipe Barreto Lima

RESUMO

As técnicas de análise de falhas são importantes ferramentas para o gerenciamento de riscos, auxiliando na identificação de falhas e contribuindo para correção e melhoria contínua dos sistemas. Em qualquer setor econômico, os processos de manutenção apresentam problemas operacionais desafiadores, aos mais experientes profissionais. Neste estudo foram utilizadas duas técnicas para análise de falhas de um rolo compactador que fraturou o seu eixo repentinamente em serviço, após o segundo reparo para correção de falhas estruturais. Inicialmente, foi aplicada a Análise de Árvore de Falhas (AAF) com o objetivo de compreender a atuação dos mecanismos de causas de falha do sistema e facilitar a identificação da causa da fratura. As informações levantadas pela análise AAF, sugeriram que a provável causa da fratura teria sido alguma falha no processo de soldagem do eixo. A partir disso, foi aplicada a Análise de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais (AFTEM) para a avaliação e caracterização de propriedades da solda. Foram utilizadas as técnicas de Inspeção Visual da Superfície de Fratura, Caracterização Microestrutural por Metalografia e Perfil de Microdureza. A análise dos resultados das Técnicas de Engenharia de Materiais confirmou que o processo de soldagem apresentava vários defeitos que contribuiriam para fratura por fadiga do eixo do rolo compactador. Além disso, em uma análise preliminar, é possível sugerir que o processo de soldagem foi desnecessário.

Palavras-chave: AAF. AFTEM. Eixo. Fadiga. Gerenciamento de Riscos. Solda.

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Mecanismos causadores de falhas em plantas industriais	11
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica de um modelo de Árvore de Falhas	10
Figura 2 - Ponto de fratura do eixo do rolo compactador (indicado por setas)	16
Figura 3 - Desenhos da sequencia de procedimentos de reparo do eixo do rolo	17
Figura 4 - Árvore de Falhas Aplicada ao Reparo de um Eixo Rompido em Serviço Representação gráfica de um modelo de Árvore de Falhas	18
Figura 5 - Macrografia da superfície de fratura do eixo	20
Figura 6 - Macrografia da seção de corte do eixo. A direita, detalhe da solda, indicado no quadrado da imagem anterior	20
Figura 7 - Gráfico de microdureza Vickers que constitui o perfil da região do cordão de solda até o metal base do eixo	21

SUMÁRIO

RESUMO	4
LISTA DE TABELAS	5
LISTA DE FIGURAS	5
1 INTRODUÇÃO	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Análise de Árvore de Falhas	9
2.2 Análise de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais	11
2.2.1 Causas e Modos de Falhas em Eixos	12
2.2.2 Processo de Soldagem e seus Efeitos	13
3 MATERIAL E METODOS	15
4 ESTUDO DE CASO	16
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1 Análise da Árvore de Falhas	18
5.2 Análise da Superfície de Fratura	19
5.3 Caracterização Microestrutural e Perfil de Microdureza	20
6 CONCLUSÃO	22
ABSTRACT	23
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de eventos danosos ocorrerem é uma constante no ambiente de trabalho da maioria das empresas. Estes podem incidir sobre o ser humano, o patrimônio material ou o meio ambiente. Em todo caso, os acidentes, incidentes e quase acidentes podem gerar perdas de grandes proporções ou, até mesmo, irreversíveis. O desenvolvimento de toda e qualquer atividade produtiva expõe o trabalhador a riscos diretos e indiretos, que podem comprometer sua integridade física e psicossocial.

As diferentes formas de falha em um sistema são as principais causas de acidentes de trabalho. Investigações quanto à natureza das falhas e das condições ou circunstâncias, que levariam a um evento indesejável, são procedimentos de gerenciamento de riscos que auxiliam na correção de erros do sistema e na proposição de medidas de controle preventivas e protetivas, a fim de evitar futuras falhas. O gerenciamento de riscos utiliza diferentes técnicas para a tomada de decisões através da análise, avaliação e controle dos riscos com o objetivo de proteger os recursos humanos e materiais de forma economicamente viável (MORAES, 2010; ROJAS, 2015).

As falhas de componentes em engenharia são indesejáveis e podem causar danos irreversíveis aos seres humanos, além de perdas econômicas elevadas por interferência na disponibilidade de produtos e/ou serviços. As principais causas de falhas em componentes, geralmente, fazem parte de um conjunto de falhas ou aspectos não considerados que inicia na fase de projeto, com a seleção e o processamento inadequados dos materiais; essas falhas normalmente eclodem na fase de operação e se agravam por falta de programas de manutenção; na fase final, os danos são inevitáveis e estes podem incidir sobre o patrimônio da empresa e/ou sobre os trabalhadores. A prevenção de falhas é difícil de ser garantida, pois antecipar e planejar possíveis falhas são as únicas ações a serem consideradas durante o projeto. Mas o conhecimento dos mecanismos de falhas possibilitou o desenvolvimento de técnicas para o controle e o monitoramento de falhas específicas e, com isso, tentar evitar possíveis acidentes (CALLISTER, 2002; FERRANTE, 2009; MATTOS, 2011; MORAES, 2010).

A Análise de Árvore de Falhas (AAF) é uma das muitas ferramentas do processo de gerenciamento de riscos, empregada para o estudo das falhas de um sistema específico, em que um diagrama de eventos (árvore) é construído em uma sequência lógica, a partir de uma falha principal (evento topo), a qual é associada, sequencialmente, a falhas secundárias (eventos secundários) com potencial para contribuir de forma individual ou combinada para a falha do sistema. Por meio dessa técnica de gerenciamento é possível identificar mecanismos de falhas (causas e modos), o que auxiliará na determinação de medidas para melhoria contínua do sistema (MATTOS, 2011; MORAES, 2010).

Neste trabalho foram estudadas as condições de falha de um eixo de rolo compactador, que após dois reparos para corrigir defeitos estruturais, rompeu repentinamente em serviço. O objetivo geral desse estudo é apresentar a provável causa da falha e se possível determinar os modos que elevaram a ruptura do eixo. Especificamente, neste estudo foi aplicada a técnica de gerenciamento de riscos por Análise de Árvore de Falhas (AAF) para identificar os diferentes eventos (causas) responsáveis pela falha principal; combinada a esta, também foram utilizadas análises de falhas por técnicas da Engenharia de Materiais para determinação dos mecanismos que contribuíram para o rompimento do eixo. Neste estudo a AAF atuará como uma ferramenta para pré-análise, direcionando as análises laboratoriais da Análise de Falhas por Engenharia de Materiais.

A relevância do trabalho pode ser considerada pela importância estratégica do processo de manutenção industrial, responsável pela conservação e o bom funcionamento de todo o maquinário operacional em diversos setores econômicos. O sucesso desse processo, frequentemente, está associado à utilização de técnicas de gerenciamento de riscos que buscam corrigir e prevenir falhas, evitando prejuízos de ordem financeira e inúmeras outras consequências, tais como danos a equipamentos de toda a linha de produção; comprometimento da segurança do sistema, como um todo, e de sistemas interligados; parada da produção com perda do produto; deixar de atender clientes; comprometimento da imagem da empresa junto ao mercado e ao governo; acidentes com danos ao meio ambiente e a comunidade; acidentes com lesões física e psicológica, e mortes (MATTOS, 2011; MORAES, 2010).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Análise de Árvore de Falhas

O método da Análise de Árvore de Falhas (AAF) faz o estudo detalhado das causas que conduzem a um evento indesejável, possibilitando o relacionamento de causas através de portas lógicas, identificando diferentes eventos que levariam a ocorrência da falha principal (evento indesejável). Versões automatizadas dessa ferramenta são muito utilizadas para facilitar os cálculos de confiabilidade dos resultados. Também, é possível integrar essa análise a outras ferramentas de gerenciamento de riscos, de forma paralela ou complementar para obter o máximo de informações possíveis sobre o sistema (ROJAS, 2015).

A árvore é uma ferramenta de comunicação visual que ilustra graficamente a profundidade e os limites da análise. A construção da Árvore de Falhas se dá através de símbolos que representam os eventos e as portas lógicas para cada nível hierárquico. A princípio, é posto no topo da árvore o evento indesejável (falhas, perturbações, erros humanos ou qualquer anormalidade do sistema), na sequência, são determinadas as causas diretamente relacionadas ao evento, as quais compõem o primeiro nível hierárquico. Seguindo essa lógica dedutiva, vários eventos vão sendo encadeados e outros níveis hierárquicos podem ser formados, em função da complexidade do sistema, das informações disponíveis sobre a falha e do conhecimento técnico da equipe envolvida na análise (ROJAS, 2015; SAMPAIO, 2002; MORAES, 2010).

As portas lógicas tem a função de ligar os eventos de saída, na parte superior da árvore, as suas relações causais (eventos de entrada), sempre na parte inferior. As portas lógicas podem ser do tipo “E”, quando todos os eventos de entrada ocorrem de forma simultânea; e do tipo “OU”, quando os eventos de entrada ocorrem de forma isolada ou combinada. As portas lógicas podem ser descartadas para simplificação das análises de caráter apenas qualitativo. Os eventos podem ser representados por figuras geométricas, as mais comuns são: o retângulo para indicar um evento resultante de falhas básicas seguido de portas lógicas; os círculos representam os eventos básicos que indicam o limite para resolução da árvore de falhas; os losangos representam um evento não desenvolvido, indicando, por exemplo, a falta de informação sobre a falha básica; e os triângulos são usados para

evitar repetição, sendo que, triângulos com a mesma numeração indicam eventos iguais (ROJAS, 2015; SAMPAIO, 2002; MORAES, 2010; MATTOS, 2011).

Uma forma de representar a árvore de falhas foi apresentada na Figura 1. Nela podem ser observados os níveis hierárquicos e a simbologia, utilizada para representar as portas lógicas (“OU” e “E”) e os eventos (retângulos, losangos, círculos e triângulo) (ROJAS, 2015; SAMPAIO, 2002).

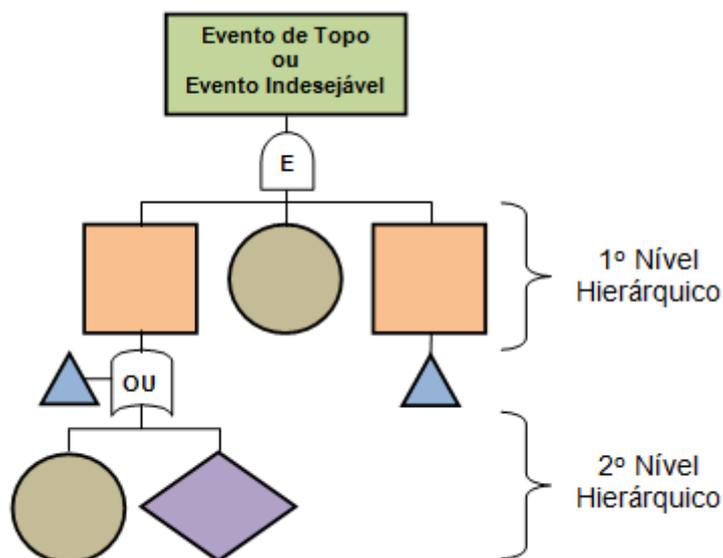


Figura 1 - Representação gráfica de um modelo de Árvore de Falhas.

Fonte: Uma adaptação de: Pablo, R. Técnico em Segurança do Trabalho. Bookman (2015).

A Análise de Árvore de Falhas pode ser usada para análise de confiabilidade e de segurança em projetos, facilitando a compreensão dos mecanismos de falhas e do funcionamento do sistema como um todo. O método AAF, é utilizado, geralmente, como uma ferramenta de investigação das possíveis causas que levariam a ocorrência do evento indesejável, mas também pode ser usada como uma ferramenta para análise prévia ou posterior, a outras análises técnicas mais complexas, visando a otimização de recursos para determinação da causa efetiva da falha (MORAES, 2010; MATTOS, 2011).

2.2 Análise de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais

A análise de falhas é uma técnica que visa manter e assegurar a integridade e a segurança de produtos e de serviços. Atualmente, os resultados de causas/mecanismos de falha investigados por essa técnica contribuem para a prevenção de falhas em equipamentos, as modificações e melhoramento de projetos, e auxiliam na escolha dos materiais, das técnicas de fabricação e dos métodos de inspeção de componentes do projeto (FERRANTE, 2009).

Segundo Ferrante (2009, p.21), a falha pode ser definida como: “evento que resulta do fato de um produto ou componente não ser capaz de executar plenamente suas funções em serviço – seja devido à fratura, à deformação excessiva ou à deterioração”.

Na Tabela 1 são apresentados os principais mecanismos causadores das falhas em plantas industriais, os quais geralmente são controlados pela história do material e pelas condições de serviços (FERRANTE, 2009):

Tabela 1. Mecanismos causadores de falhas em plantas industriais.

Mecanismo	%
Corrosão	29
Fadiga	25
Fratura frágil	16
Sobrecarga	11
Corrosão em alta temperatura	7
Corrosão sob tensão/fadiga combinada com corrosão/fragilização por hidrogênio	6
Fluência	3
Desgaste, abrasão e erosão	3

Fonte: Maurizio, F. Seleção de materiais. EdUSCar (2009).

Segundo este estudo, os processos de corrosão e fadiga são os principais responsáveis por falhas. Mas conforme Nishida (1992), a fadiga é a principal responsável por falhas. Apesar da controvérsia, os estudos concordam que a fadiga é um mecanismo importante e por isso deve ser estudado para que seja possível prevenir falhas futuras.

A Fadiga é uma forma de falha progressiva e localizada, de estruturas submetidas a esforços cíclicos. Essa falha ocorre, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais. Para que ocorra a fadiga faz-se necessário a presença de uma componente de tensão positiva, deformação plástica e solicitações cíclicas (NORTON, 2004; CALLISTER, 2002).

A superfície de fratura originada por fadiga possui uma aparência frágil, que é perpendicular à direção da tensão principal de tração. Essa superfície apresenta duas regiões distintas: uma lisa, decorrente da fricção entre as superfícies ou porque a deformação plástica na ponta da trinca é muito pequena durante a propagação da trinca, e uma áspera, de aparência dúctil, formada durante a ruptura final quando a trinca atinge o seu tamanho limite (DIETER, 1988). A falha por fadiga possui três estágios: o início da trinca (nucleação), a propagação e a ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (NORTON, 2004; SHIGLEY, 2006).

2.2.1 Causas e Modos de Falhas em Eixos

O eixo de transmissão é um elemento de máquinas rotativas capaz de transmitir movimento rotativo e torque de um dispositivo de comando a outro induzido. Dependendo da configuração da máquina, o eixo estará montado em mancais e apresentará acoplamentos por atrito e mudanças no contorno, degraus ou ressaltos, que contribuirão para concentração de tensões (NORTON, 2004; ASI, 2006). As cargas em um eixo de transmissão podem ser torcionais, flexionais ou uma combinação dos dois tipos. Um eixo rotativo sujeito a cargas de flexão transversal fixas experimentará um estado de tensões alternadas. A cada volta, o elemento de tensão na superfície do eixo vai da tração à compressão. Dessa forma, um eixo de transmissão em flexão alternada estará sujeito a falhas por fadiga (NORTON, 2004).

A falha de um eixo por fadiga depende do tipo de carregamento sofrido em serviço e das variáveis que contribuem para concentração de tensão como o peso do eixo, o peso dos componentes fixados ao eixo e o grau do alinhamento entre mancais. Assim, esses componentes rotativos são suscetíveis à fadiga pela natureza de sua operação e as falhas são geralmente a fadiga por torção, flexão rotativa e flexão alternada (ASI, 2006; GERDUN, 2007).

Invariavelmente os elementos de máquina contêm concentradores de tensões que diminuem a resistência à fadiga. As concentrações de tensões podem advir de descontinuidades geométricas originadas durante a fabricação ou usinagem inadequada. A rugosidade superficial elevada, entalhes, porosidades, inclusões e um superaquecimento localizado que aumenta a tensão localmente, formando um gradiente de tensão que leva o componente e/ou estrutura a experimentar um estado triaxial de tensões, fundamental para o desenvolvimento dos mecanismos de falha (DIETER, 1988; OGNJANOVIC, 2010).

Os concentradores de tensão de natureza metalúrgica podem levar um eixo a falhar devido ao desenvolvimento de trincas em pontos onde há divergência de propriedades no material, tais como inclusões grandes, partículas de segunda fase frágeis, soldas e pites de corrosão (ASI, 2006).

A falha de eixos também pode estar relacionada aos processos de fabricação, quando estes criam deformações locais acima do limite de escoamento do material, produzindo um campo de tensões residuais. Essa deformação plástica causa encruamento e, conseqüentemente, aumenta a dureza do material localmente. A área deformada plasticamente pode ser considerada um ponto para concentração de tensões onde a nucleação de trincas ocorre, geralmente, na interface entre o metal base e a camada mais dura (NORTON, 2004; SALEHI, 2011).

2.2.2 Processo de Soldagem e seus Efeitos

A soldagem é uma técnica de união de metais, com muitas variáveis a serem consideradas: a composição química do metal base e do metal de adição, a escolha do processo, o custo, as propriedades da junta, etc. Os procedimentos adotados antes, durante e após a soldagem irão garantir a qualidade da junta soldada. A operação de pré-aquecimento do componente reduz a taxa de resfriamento, evita o desenvolvimento de trincas na junta, retarda a dissipação de calor, e, conseqüentemente, diminui as deformações geradas pelo processo de soldagem. O aquecimento após a soldagem melhora as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta, auxilia na difusão do hidrogênio e alivia as tensões internas no material (WAINER, 2010; KOU, 2002).

A solidificação da poça de solda, no caso dos aços, é influenciada pelo gradiente térmico, velocidade de solidificação e concentração de soluto; estas são

as variáveis do processo de soldagem que determinam a macroestrutura da solda e, conseqüentemente, a resistência ao início e propagação de trincas. A transformação de solidificação produz mudanças na estrutura cristalina, acompanhadas por uma contração de volume, que determinam as propriedades mecânicas e o aparecimento de trincas na solda (WAINER, 2010; KOU, 2002).

A microestrutura de uma junta soldada deve apresentar propriedades similares a do metal base. Isso significa que a zona fundida e a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) devem desenvolver as propriedades mecânicas estabelecidas em projeto. Uma junta soldada possui diversas curvas de resfriamento contínuo que representam diferentes velocidades de resfriamento na zona afetada pelo calor (WAINER, 2010). Tal fenômeno, em um aço-carbono, pode levar a ZAC a apresentar regiões distintas: crescimento de grãos, refino de grão, transformação parcial, e esferoidização de carbeto. Isso causa uma variação de dureza ao longo da zona afetada pelo calor que altera a resistência à fadiga do material. A região de crescimento de grão é a mais importante da ZAC. Ela atinge temperaturas entre 1100 e 1500°C e, rapidamente, é resfriada pela dissipação de calor para o metal base, o que favorece a formação de uma estrutura martensítica que apresenta maior dureza que o metal base (SALEHI, 2011; RESENDE, 2006).

Durante a soldagem, os ciclos térmicos podem causar deformações residuais, levando ao aparecimento de tensões residuais na junta soldada e suas adjacências. A distribuição não uniforme das temperaturas acarreta em expansões e contrações do material na zona de solda, podendo gerar deformação plástica (SILVA, 2000). Assim, as tensões residuais são uma tentativa de equilibrar as forças nessa região, dando origem a efeitos indesejáveis como a propagação de trincas, corrosão sob tensão, fadiga, etc. A tensão residual na ZAC depende do grau de restrição da junta soldada. A restrição e a concentração de tensões crescem com o aumento da espessura da secção soldada da peça (SALEHI, 2011; WAINER, 2010).

3 MATERIAL E METODOS

Este trabalho trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada com abordagem qualitativa e quantitativa. Quanto aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória com procedimento de estudo de caso. Os dados do problema e o material de análise (peça fraturada) usados neste estudo foram obtidos por fonte primária através do responsável técnico da empresa contratada para realizar o reparo do eixo do rolo compactador de uma Mineradora do Estado. A abordagem qualitativa da pesquisa é representada pela construção do diagrama da Análise de Árvore de Falhas (AAF) com os dados da situação problema, fornecidos pelo responsável técnico da empresa, e informações técnicas da literatura especializada em análise de falhas. Para a abordagem quantitativa foram utilizadas amostras retiradas do eixo fraturado, posteriormente, essas amostras passaram por tratamentos específicos, em função do tipo de análise laboratorial, a que seriam submetidas para caracterização microestrutural de mecanismos possivelmente associados à falha. Também foram registradas imagens da superfície de fratura do eixo para inspeção visual de aspectos de fratura que auxiliam na identificação das causas e modos de falhas.

4 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso traz uma análise das causas que levaram ao rompimento repentinamente em serviço do eixo de um rolo compactador de minério (Figura 2). De acordo com a empresa, este eixo passou por um reparo devido a desgaste na região do mancal da extremidade LOA (Figura 3). Depois do reparo, foi constatada a presença de trincas através de análises por ultrassom e técnica de líquidos penetrantes. Por este motivo, foi realizado um outro reparo, com os seguintes procedimentos: remoção de toda a extremidade do lado LOA; usinagem interna do restante do rolo para fazer um furo, com diâmetro de 400 mm e profundidade de 306 mm; usinagem de um chanfro (junta) tipo V para solda; introdução de um tarugo de aço AISI 4340 para substituição do eixo da extremidade LOA, com interferência de 0,4 mm; adição de solda com 20 mm de penetração ao redor de todo o perímetro e; usinagem de acabamento.

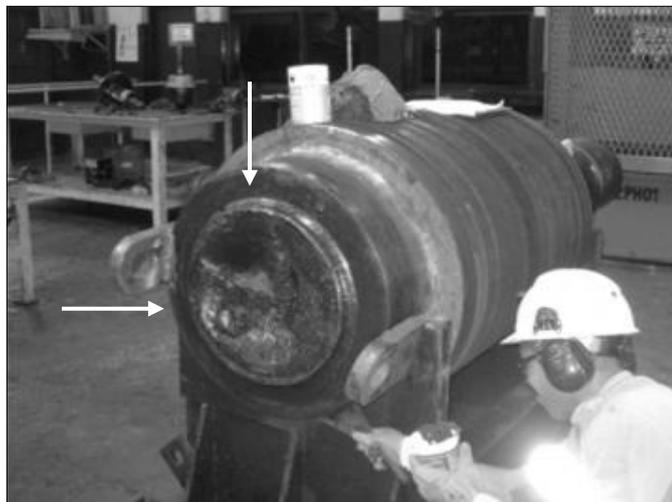


Figura 2. Ponto de fratura do eixo do rolo compactador (indicado por setas).

Na Figura 3 está esquematizada a sequência de procedimentos adotados pela empresa para o reparo do eixo. O primeiro esquema ilustra a retirada do eixo original, no qual foram identificadas trincas que comprometeriam seu desempenho em serviço. O segundo esquema ilustra os procedimentos de reparo descrito no parágrafo anterior. No terceiro esquema, observa-se o eixo após o reparo e antes da falha. Nesse esquema, a presença de uma faixa mais escura ao longo do diâmetro do eixo representa o local de deposição da solda, empregada com o objetivo de aumentar a fixação do eixo ao rolo.

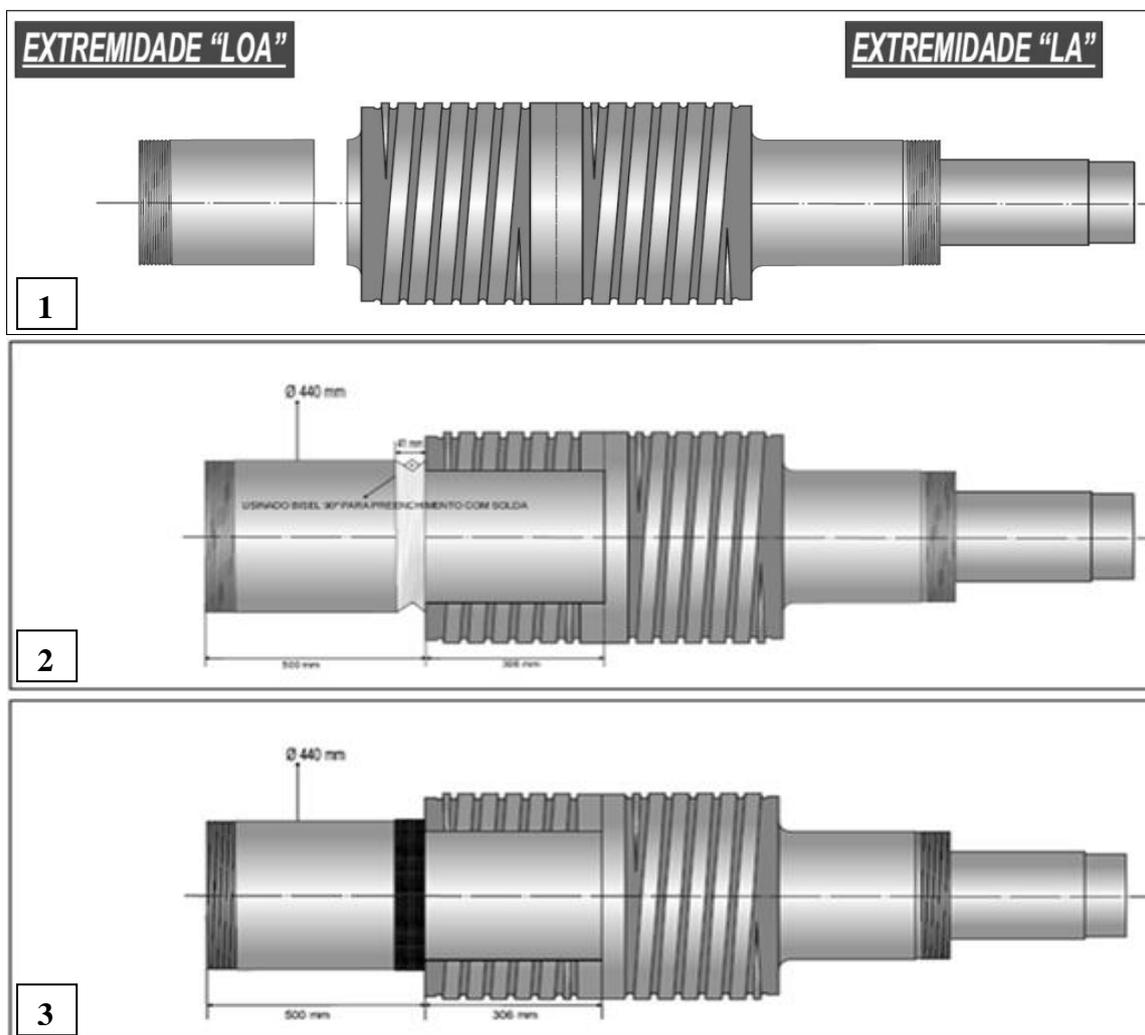


Figura 3. Desenhos da sequência de procedimentos de reparo do eixo do rolo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da Árvore de Falhas

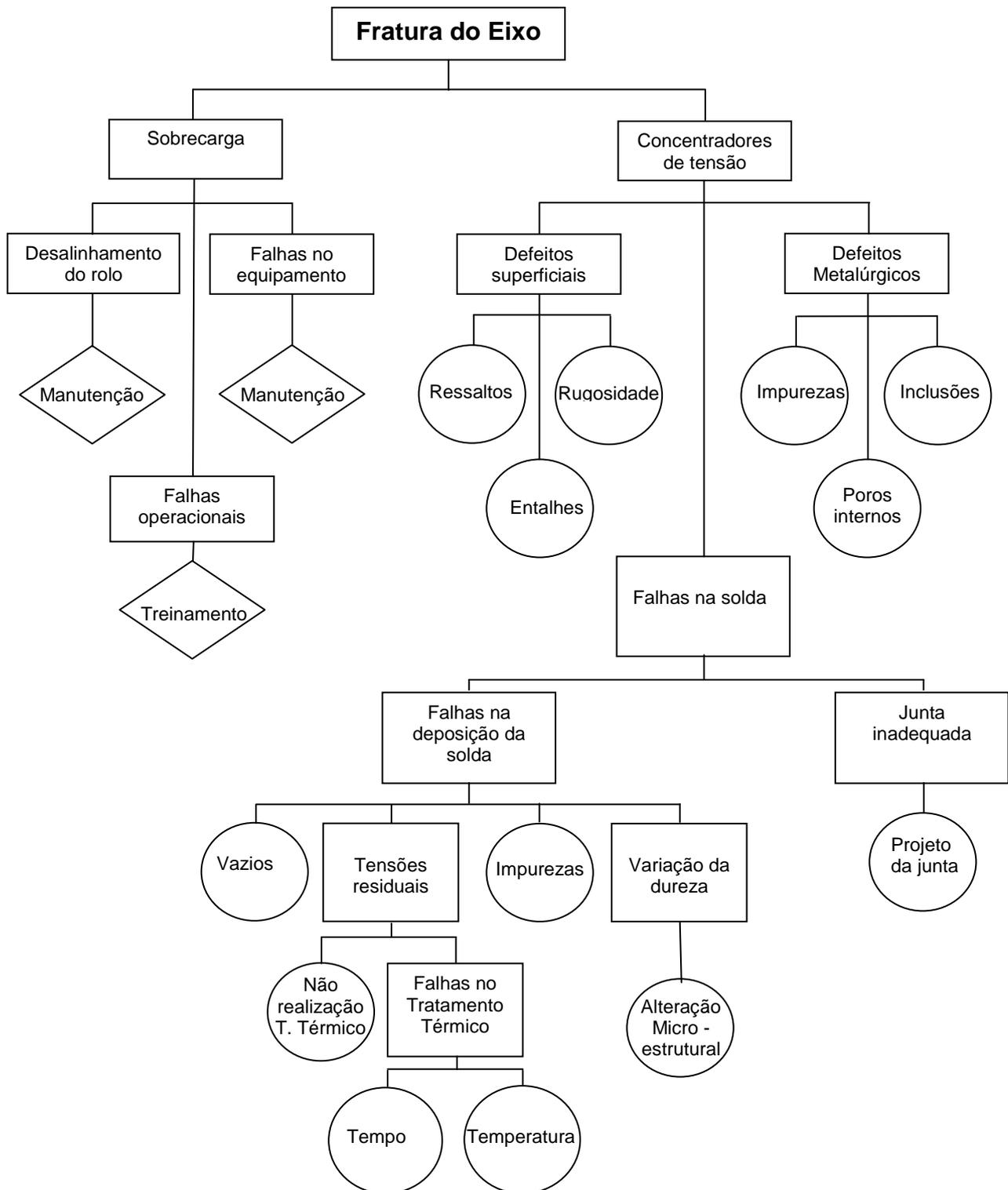


Figura 4. Árvore de Falhas Aplicada ao Reparo de um Eixo Rompido em Serviço.

O desenvolvimento de qualquer árvore de falhas está limitado às informações disponíveis sobre o problema e o nível de conhecimento técnico dos responsáveis pela análise. Contudo, seria pouco provável conseguir identificar todos os eventos direta e indiretamente relacionados ao problema, pois a análise tornar-se-ia inviável. A análise da árvore de falhas deste estudo possui caráter apenas qualitativo, por isso não foram utilizadas portas lógicas em sua representação gráfica. Nesta árvore, as falhas básicas são representadas por retângulos, os círculos indicam os eventos limites e os losangos caracterizam os eventos não desenvolvidos por falta de informações. A análise da árvore de falhas associada a informação de que a fratura do eixo ocorreu ao longo de todo o perímetro do cordão de solda indica que a provável causa da fratura está relacionada a falhas no processo de soldagem.

5.2 Análise da Superfície de Fratura

A inspeção visual da superfície de fratura sugere que o eixo rompeu por um processo de fadiga por flexão rotativa. Um perímetro subsuperficial, a uma profundidade coincidente com a raiz do cordão de solda, apresenta pontos característicos de nucleação de fadiga, que podem ser observados na Figura 5. Há uma extensa superfície de propagação da fratura, partindo de vários pontos ao longo desse perímetro e propagando tanto para fora, na superfície externa, quanto para o interior do eixo. A fratura final ocorreu ligeiramente deslocada do centro, indicando certo desalinhamento do eixo. A presença de diversas reentrâncias, semelhantes a degraus, na região do cordão de solda e uma pequena área de ruptura final sugerem que a falha ocorreu sob baixo carregamento e alta concentração de tensões em vários pontos da zona da raiz do cordão de solda.

Toda a superfície de fratura indica que o processo de soldagem foi desnecessário. Mesmo após a fadiga ter propagado produzindo a completa separação do cordão de solda, não há sinais de movimento relativo entre o eixo e o rolo. A solda foi adicionada ao eixo com o objetivo de aumentar a fixação entre as peças. Assim, quando a fadiga tivesse propagado a ponto de separar totalmente a região do cordão, a solda não exerceria mais seu efeito e causaria o deslizamento do eixo ao rolo. No entanto, a fadiga continuou a propagar em direção ao interior do eixo, e a coincidência das marcas de nucleação do lado do cordão e do lado do eixo sugere que não houve movimento relativo.

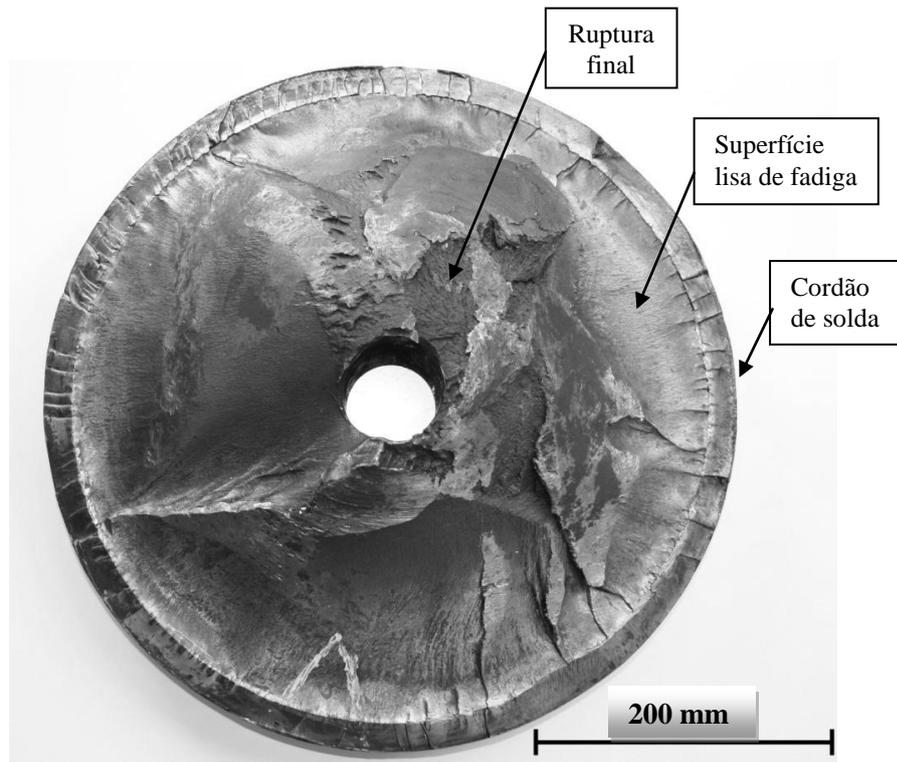


Figura 5. Macrografia da superfície de fratura do eixo.

5.3 Caracterização Microestrutural e Perfil de Microdureza

A Figura 6 apresenta a macrografia da região de solda, zona afetada pelo calor e metal base, representadas pelas letras “a”, “b” e “c”, que correspondem respectivamente às microestruturas dendritas de ferrita acicular e carbonetos dispersos, martensita e bainita. A seta, próxima a superfície de fratura na Figura 6, sugere a direção de propagação de uma trinca secundária, nucleada na interface entre o metal depositado por solda e a zona afetada pelo calor.

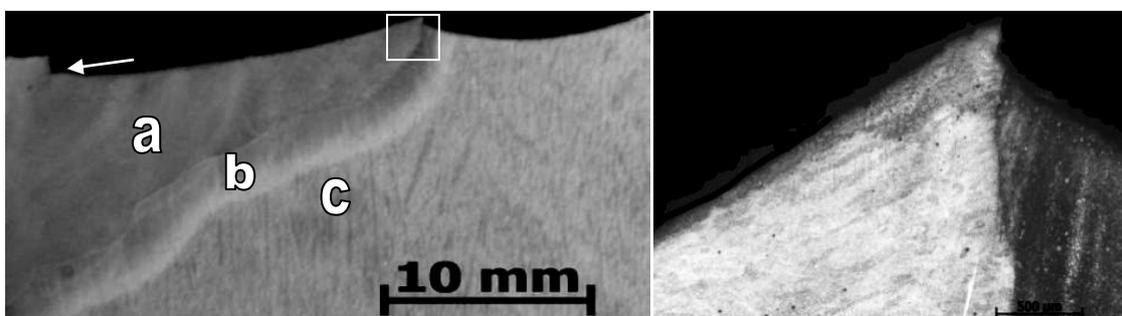


Figura 6. Macrografia da seção de corte do eixo. A direita, detalhe da solda, indicado no quadrado da imagem anterior.

As trincas geralmente iniciam em regiões de solda devido à alta concentração de tensões residuais induzida pela ZAC, uma região cujas propriedades de tamanho de grão e dureza devem ser controladas. Desta forma, a presença dessa trinca secundária, aproximadamente paralela a superfície de fratura do eixo, sugere que a região em destaque, no quadrado, corresponde a um dos pontos de nucleação da fadiga.

Para a realização do ensaio de microdureza foi feito um perfil ao longo da amostra metalográfica, partindo da região de solda até o metal base. Foi utilizada a escala Vickers com uma carga de 300 gf ($HV_{0,3}$). Na Figura 7 podem ser observados os diferentes valores de dureza presentes em cada região do perfil.

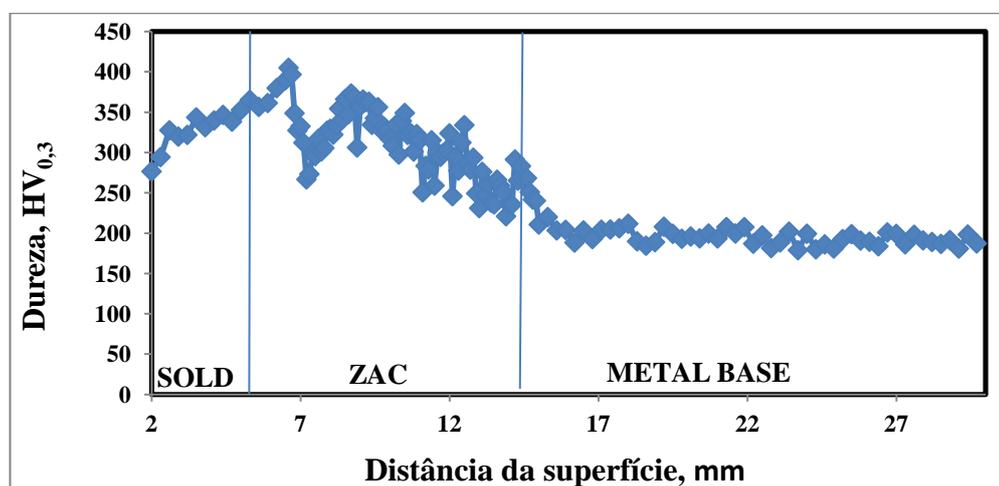


Figura 7. Gráfico de microdureza *Vickers* que constitui o perfil da região do cordão de solda até o metal base do eixo.

A variação do valor de dureza ao longo do perfil de microdureza é influenciada pelas diferentes microestruturas nessa região. Isso implica em diferentes respostas às solicitações mecânicas impostas ao eixo, devido à estrutura cristalina das regiões de solda, ZAC e metal base. A zona afetada pelo calor apresenta o maior valor de dureza de cerca de 405 HV, seguido por uma queda progressiva dos valores de dureza até 250 HV, numa provável região de refino de grãos da ZAC. Operações de soldagem inadequadas produzem zonas de alta dureza, baixa ductilidade e grande concentração de tensões de natureza metalúrgica. Para minimizar esses e outros efeitos, é necessário um controle rigoroso dos procedimentos de pré-aquecimento e resfriamento do material durante

a soldagem. O aquecimento após a soldagem também é importante para melhorar as propriedades mecânicas e aliviar as tensões internas do material (WAINER, 2010; KOU, 2002).

6 CONCLUSÃO

Através da ferramenta de gerenciamento de riscos, Análise de Árvore de Falhas, foi possível organizar as informações sobre o rompimento do eixo em serviço, de forma a facilitar a compreensão e a atuação dos mecanismos envolvidos na fratura. O uso previu dessa ferramenta, a realização da Análise de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais, facilitou o entendimento do problema, auxiliou na escolha dos testes que comprovariam a causa efetiva da falha, e otimizou o tempo de resposta para determinação das causas do problema e o uso de recursos em ensaios, bem como os testes laboratoriais.

Na Análise de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais foi observado que a utilização da solda para aumentar a fixação do eixo ao rolo foi desnecessária e introduziu no equipamento, vários mecanismos que atuaram de forma combinada para o desenvolvimento da fratura por fadiga. O eixo rompeu por fadiga devido à solicitação de flexão rotativa. A falha iniciou na raiz da solda. Nessa região foi encontrada uma elevada dureza e uma microestrutura tipo martensítica, fatores associados à nucleação da fratura no eixo.

Portanto, pode-se afirmar que o uso combinado da ferramenta de gerenciamento de riscos “Análise da Árvore de Falhas” a Análises de Falhas por Técnicas da Engenharia de Materiais apresenta vários benefícios, sendo totalmente viável a sua aplicação ao setor de manutenção para determinação de causas e modos de falhas de equipamentos. Provavelmente, se essa metodologia de análises tivesse sido adotada durante as primeiras falhas apresentadas pelo eixo (desgaste do eixo na região do mancal e a presença de trincas), o segundo reparo teria sido evitado e, conseqüentemente, todos os transtornos causados por ele. Apesar de todos os seus benefícios, o sucesso desse método de análises está diretamente relacionado às informações disponíveis sobre o problema e à equipe técnica responsável pelas análises.

ABSTRACT

Failure analysis techniques are important tools for risk management, helping to identify failures and contributing to the correction and continuous improvement of systems. In any economic sector, maintenance processes present challenging operational problems to the most experienced professionals. In this study two techniques were used to analyze the failure of a compactor roller which fractured its shaft suddenly in service after the second repair to correct structural failures. Initially, Fault Tree Analysis (FTA) was applied with the objective of understanding the mechanisms of causes of failure of the system and facilitating the identification of the cause of the fracture. The information raised by the AAF analysis suggested that the probable cause of the fracture would have been some failure in the shaft welding process. From this, Fatigue Analysis by Materials Engineering Techniques (FAMET) was applied for the evaluation and characterization of weld properties. The techniques of Visual Inspection of the Surface of Fracture, Microstructural Characterization by Metallography and Microhardness Profile were used. The analysis of the results of Materials Engineering Techniques confirmed that the welding process presented several defects that contributed to fatigue fracture of the compactor roll shaft. In addition, in a preliminary analysis, it is possible to suggest that the welding process was unnecessary.

Key words: AFTEM. Fatigue. FTA. Risk Management. Shaft. Weldin.

REFERÊNCIAS

ASI, Osman. “**Fatigue Failure of a rear axle shaft of an automobile**”, *Engineering Failure Analysis*, v. 13, pp. 1293-1302, 2006.

CALLISTER, William D. Jr., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2002.

DIETER, George Ellwood, **Metallurgy Mechanic**. 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara S. A., 1988.

FERRANTE, Maurizio. **Seleção de Materiais**. 2 ed. São Carlos, Edufscar, 2009.

GERDUN, Viktor et. al. **“Failures of Bearings and axles in railway Freight Wagons”**, *Engineering Failure Analysis*, v. 14, pp. 884-894, 2007.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2 ed. New Jersey, Wiley-Interscience Publication, 2002.

MATTOS, Ubirajara; MÁSCULO, Francisco. **Higiene e Segurança do Trabalho**. Rio de Janeiro: Elsevier/ Abepro, 2011.

MORAES, Giovanni A. **Sistema de Gestão de Riscos: princípios e Diretrizes – ISO 31.000/ 2009 Comentada e Ilustrada**. Rio de Janeiro: Gerenciamento Verde Editora, 2010. Volume 1.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 2 ed. Porto Alegre, Bookman, 2004.

NISHIDA, Shin ichi. **“Failure Analysis in Engineering Applications”**, Butterworth-Heinemann, Great Britain, 1992.

OGNJANOVIC, M.; SIMONOVIC, A.; RISTIVOJEVIC, M. et. al. **“Research of Rail Traction Shafts and Axles Fractures Towards Impact of Service Conditions and Fatigue Damage Accumulation”**. *Engineering Failure Analysis*, v. 17, pp. 1560-1571, 2010.

RESENDE, Gomes dos Santos., **Transformações de Fases em materiais metálicos**. 1 ed. Campinas-SP, Editora Unicamp, 2006.

ROJAS, Pablo. **Técnico em Segurança do Trabalho**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

SALEHI, I., KAPOOR, A., MUTTON, P. **“Multi-Axial Fatigue Analysis of Aluminothermic Rail Welds Under High Axle Load Conditions”**. *International Journal of Fatigue*, v. 33, pp. 1324-1336, 2011.

SAMPAIO, Gilberto M. A. **Pontos de Partida – em Segurança Industrial**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

SHIGLEY, Joseph E. **Mechanical Engineering Design**. 8 ed. United States of America, McGraw-Hill Companies, 2006.

SILVA, A. A. M, LIMBERGER, I. F, REGULY, A. **“Análise de Falha e Caracterização Metalúrgica de um Segmento de Trilho Soldado por Aluminotermia”** *IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, pp. 799-806, Agosto de 2000.

WAINER, Emilio. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 7 ed. São Paulo, Edgard Blucher LTDA, 2010.