

Universidade Federal de Juiz de Fora
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Análise de Falha em Grampos Ferroviários Tipo *Fastclip*

Angélica de Fátima Nogueira Vicente

Juiz de Fora

2021

Universidade Federal de Juiz de Fora
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Análise de Falha em Grampos Ferroviários Tipo *Fastclip*

Angélica de Fátima Nogueira Vicente

Juiz de Fora

2021

Análise de Falha em Grampos Ferroviários Tipo *Fastclip*

Trabalho Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Coorientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Juiz de Fora

2021

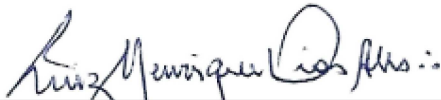
Análise de Falha em Grampos Ferroviários Tipo *Fastclip*

Angélica de Fátima Nogueira Vicente

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 30/03/2021

Por:



Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves



Coorientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini



Dr. Eleir Mundim Bortoleto



Fellipe Castro Barbosa Costa (Engenheiro)

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vicente, Angélica de Fátima Nogueira.

Análise de Falha em Grampos Ferroviários Tipo Fastclip /
Angélica de Fátima Nogueira Vicente. -- 2021.
96 p.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves

Coorientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Grampo de fixação. 2. Ferrovia. 3. Análise de Falha. 4. Fractografia. 5. Fadiga. I. Alves, Luiz Henrique Dias, orient. II. Marcomini, Raphael Fortes, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Luiz Alves, por todo auxílio oferecido e conhecimento compartilhado durante esta pesquisa. Agradeço também ao meu coorientador, Raphael Marcomini, pela disponibilidade e atenção de sempre.

Sou imensamente grata à todos os professores que estiveram presentes durante a minha formação. Muitos se tornaram para mim verdadeiros ídolos e me inspiram a buscar cada vez mais conhecimento.

Agradeço à minha família, por todo o apoio durante a realização deste trabalho. Dedico esta vitória especialmente aos meus pais, Fátima e Armando, por me incentivarem sempre a buscar novos desafios.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial, Mateus, Elza, Odilon, Bruno, Tiago, Amanda, Ana, Jesca, Michella e Érica, por terem me apoiado incondicionalmente.

Sou muito grata à equipe Microraptor, ao IEEE, ao Programa Futuros Engenheiros e à MRS Logística, pelos desafios e aprendizados proporcionados, que contribuíram totalmente para o meu desenvolvimento.

“Não corrigir nossas falhas é o mesmo que cometer novos erros.”

Confúcio

RESUMO

A falha em grampos de fixação tem sido frequentemente encontrada em linhas ferroviárias, o que aumentou o custo de reparo e manutenção, além de redução direta na segurança operacional. Na malha ferroviária da MRS Logística também foi detectada fratura recorrente de grampos. Sendo esse um componente crítico do sistema de fixação do sistema ferroviário moderno, busca-se identificar as possíveis causas que levaram à falha. Para isso, foi feita uma análise de falha em grampos de fixação do tipo *fastclip*. A partir dos estudos e ensaios realizados, foram avaliadas as influências da estrutura metalúrgica e processo de fabricação do grampo nessas falhas. Verificou-se que o material apresenta microestrutura, dureza e composição química condizentes com a especificação do aço mola utilizado e tratamentos térmicos recebidos. Foi possível identificar que, no ponto de falha analisado, o grampo apresenta uma descontinuidade geométrica e um maior grau de oxidação na superfície externa. Tais fatores podem atuar como concentradores de tensão, fazendo com que a tensão local atinja valores acima do limite de resistência do material e, conseqüentemente, levando à falha por fadiga.

Palavras-chave: grampo de fixação; ferrovia; análise de falha; fractografia; fadiga

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Distribuição Modal em 2015 | 16 |
| Figura 2 – Exemplo de grampo de fixação de trilho. | 18 |
| Figura 3 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção | 20 |
| Figura 4 – Procedimentos para análise de falhas – tecnologia de materiais | 22 |
| Figura 5 – Curva característica da vida de um produto (“curva da banheira”) | 24 |
| Figura 6 – Modelo de resolução de problemas | 27 |
| Figura 7 – Analogia de causa raiz | 29 |
| Figura 8 – Exemplo de uma árvore de falhas simplificada | 31 |
| Figura 9 – Gráfico simplificado de evento e fator causal | 32 |
| Figura 10 – Diagrama de Ishikawa para correlação do efeito e suas causas | 34 |
| Figura 11 – Exemplo de utilização da técnica dos cinco porquês. | 35 |
| Figura 12 – Modelos geométricos da estrutura da via utilizando em a) grampos fastclip e b) grampos e-clip. | 40 |
| Figura 13 – Tensões máximas obtidas através de simulação utilizando o critério de Tresca | 41 |
| Figura 14 – (a) A geometria de trincas superficiais e internas. (b) Perfil de tensões esquemático ao longo da linha X-X’ em (a), demonstrando a amplificação da tensão nas extremidades da trinca. | 43 |
| Figura 15 – Esboços de Réaumur das sete categorias de aparência de fratura em ferro e aço | 45 |
| Figura 16 – Sistema de iluminação recomendado para fraturas e superfícies não- planas. | 47 |
| Figura 17 – Morfologia da superfície da fratura: (a) superfície total da fratura; (b) superfície de propagação da fratura e (c) origem das trincas que estão causando a fratura em maior ampliação | 48 |
| Figura 18 – (a) Perfil esquemático de uma seção transversal mostrando a propagação de uma trinca através do interior dos grãos em uma fratura transgranular. (b) Fractografia eletrônica de varredura de um ferro fundido nodular mostrando uma superfície de fratura transgranular. | 50 |
| Figura 19 – (a) Perfil esquemático de uma seção transversal mostrando a propa- gação de uma trinca ao longo dos contornos de grão em uma fratura intergranular. (b) Fractografia eletrônica de varredura mostrando uma superfície de fratura intergranular. | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 – Influência da direção da tensão máxima na forma das microcavidades. (a) Na tração, microcavidades equiaxiais são formadas em ambas as superfícies de fratura. (b) No cisalhamento, microcavidades alongadas apontam em direções opostas nas superfícies de fratura correspondentes. (c) No rasgo por tração, microcavidades alongadas apontam para a origem da fratura em superfícies de fratura correspondentes | 52 |
| Figura 21 – Exemplos do modo de fratura de ruptura por microvazios. (a) Microvazios grandes e pequenos na superfície de fratura de um disco de serra de aço ferramenta temperado. Os microvazios extremamente pequenos no canto superior esquerdo são nucleados por numerosas partículas bem espaçadas. (b) Grandes e pequenas inclusões de sulfeto no aço que servem como locais de nucleação de microvazios | 53 |
| Figura 22 – Ruptura intergranular por microvazios em uma amostra de aço resultante do coalescimento de microvazios nos contornos dos grãos. | 53 |
| Figura 23 – Diferentes tipos de ondulações (microcavidades) formadas durante a união de microvazios. (a) Microcavidades cônicas equiaxiais em uma amostra de aço de mola. (b) Microcavidades rasas em uma amostra de aço maraging | 53 |
| Figura 24 – Os três modos de deslocamento da superfície de uma trinca. (a) Modo I, modo de abertura ou de tração; (b) modo II, modo de cisalhamento; e (c) modo III, modo de rasgamento | 54 |
| Figura 25 – Formação de microcavidades alongadas sob condições de rasgo e cisalhamento. (a) Fratura por rasgo. (b) Fratura por cisalhamento. | 54 |
| Figura 26 – Esquema da formação da fratura de clivagem mostrando o efeito dos contornos de grãos. (a) Limite de inclinação. (b) Limite de torção . . . | 56 |
| Figura 27 – Fratura de clivagem em liga Fe-0,01C- 0,24Mn-0,02Si que foi fraturada por impacto mostrando limite de torção, etapas de clivagem e padrões de rio. | 56 |
| Figura 28 – Fratura de clivagem em ferro Armco mostrando um limite de inclinação, etapas de clivagem e padrões de rio. | 56 |
| Figura 29 – Esquema ilustrando a ruptura por decoesão ao longo dos limites dos grãos. (a) Decoesão ao longo dos limites dos grãos de grãos equiaxiais. (b) Decoesão através de uma fase de limite de grão fraca. (c) Decoesão ao longo dos limites de grãos de grãos alongados. | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 – Ruptura decoesiva em porca de aço AISI 8740 devido à fragilização por hidrogênio. A falha foi devido ao cozimento inadequado após o banho de cádmio; assim, o hidrogênio, que foi coletado durante o processo de galvanização, não foi liberado. (a) Macrografia da superfície de fratura. (b) A visão de maior ampliação da área delimitada em (a) mostrando fratura intergranular típica. | 58 |
| Figura 31 – Garfo de deflexão do trem de pouso principal de aço inoxidável 17-4 PH que falhou devido à corrosão sob tensão intergranular. (a) Macrografia da superfície de fratura. (b) Visão em ampliação maior da área delimitada em (a), mostrando a área de ataque intergranular. | 58 |
| Figura 32 – Superfície de fratura de uma amostra de liga Monel que falhou em mercúrio líquido. A fratura é predominantemente intergranular com alguma contribuição transgranular. | 59 |
| Figura 33 – Fratura por corrosão sob tensão que ocorreu por decoesão ao longo do plano de separação de uma liga de alumínio forjada. | 59 |
| Figura 34 – Três estágios de uma fratura por fadiga: (I) início da trinca, (II) propagação da trinca e (III) fratura final | 60 |
| Figura 35 – Superfície de fratura por fadiga. (a) Com baixo aumento, as marcas de praia indicam a fadiga como o mecanismo de fratura. As setas indicam a direção de propagação da trinca, com a origem na parte inferior da fotografia. (b) Com grande aumento, podem-se observar as estrias que se formam durante cada ciclo do processo de fadiga (aumento original de 1.000x). | 61 |
| Figura 36 – Dispersão na vida em fadiga para arame de mola de aço carbono atirado (ASTM A227). A curva aqui fornece os resultados de 55 testes de fadiga realizados em molas submetidas a shot peening. | 64 |
| Figura 37 – Diagrama de Goodman para vida em fadiga para 10 milhões de ciclos e 95% de probabilidade de sobrevivência para a mola de aço carbono trefilado | 67 |
| Figura 38 – Ensaio de deflexão estática. | 71 |
| Figura 39 – Ensaio de fadiga | 71 |
| Figura 40 – Grampo do tipo <i>fastclip</i> | 72 |
| Figura 41 – Avaliação dinamométrica de carga em grampos | 73 |
| Figura 42 – Amostras de grampos cedidas pela MRS Logística S.A. | 73 |
| Figura 43 – Principais pontos onde as falhas ocorrem | 74 |
| Figura 44 – Dois dos principais modos de falha encontrados nos grampos de fixação instalados | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 – Falha em grampo de fixação <i>fastclip</i> | 75 |
| Figura 46 – Sistema de iluminação recomendado para fraturas e tipos de fontes utilizadas. Fonte: | 75 |
| Figura 47 – Sistema de iluminação montado para registro fotográfico da superfície de fratura | 76 |
| Figura 48 – Amostras de grampos fraturados no Ponto 1 | 76 |
| Figura 49 – Politriz utilizada para fazer o polimento da amostra. | 77 |
| Figura 50 – Microscópio óptico Olympus SC 30 | 78 |
| Figura 51 – Durômetro Portátil Digital, amostra acoplada e bloco padrão | 78 |
| Figura 52 – Amostras de grampos não fraturados que mostram um elevado grau de corrosão na superfície do grampo | 79 |
| Figura 53 – Zona deformada devido ao processo de conformação | 80 |
| Figura 54 – Superfície de fratura da amostra A | 80 |
| Figura 55 – Superfície de fratura da amostra B | 81 |
| Figura 56 – Superfície de fratura da amostra C | 81 |
| Figura 57 – Características da superfície de falha | 82 |
| Figura 58 – Descontinuidade geométrica na região do ponto de falha 2 | 82 |
| Figura 59 – Descontinuidade geométrica na região do ponto de falha 3 | 83 |
| Figura 60 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 100X | 83 |
| Figura 61 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 200X | 84 |
| Figura 62 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 500X | 84 |
| Figura 63 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 100X | 85 |
| Figura 64 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 200X | 85 |
| Figura 65 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 500X. | 85 |
| Figura 66 – Resultado da aferição da dureza em bloco padrão | 87 |
| Figura 67 – Resultado da dureza média encontrada na superfície do grampo | 87 |
| Figura 68 – Microestrutura de um grampo de fixação elástico tipo e-clip feita por microscópio eletrônico de varredura (MEV) | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Exemplos de causas básicas de falha de vaso de pressão e parafuso . . . | 30 |
| Tabela 2 – Elementos de gráfico de eventos e fatores causais | 33 |
| Tabela 3 – Especificação da composição química nominal (em % massa) para aço mola SAE 9254. | 70 |
| Tabela 4 – Faixa de tolerância de força necessária para defletir um grampo. . . . | 70 |
| Tabela 5 – Composição química (em % massa e/ou ppm) do grampo de fixação. . . | 86 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| 6M | Metodologia de análise de falhas |
| ANTF | Associação Nacional de Transportes Ferroviários |
| CNT | Confederação Nacional do Transporte |
| CST | Corrosão sob tensão |
| DIN | Instituto Alemão de Normatização |
| EDS | Espectroscopia de energia dispersiva |
| EPL | Empresa de Planejamento e Logística S.A |
| FEA | Análise de elementos finitos |
| HRC | Escala de Dureza Rockwell |
| MEV | Microscópio eletrônico de varredura |
| MSDS | Dados de segurança de materiais |
| MTBT | Milhões de Toneladas Brutas Transportadas |
| PNL | Plano Nacional de Logística |
| ppm | Partes por milhão |
| RCA | Análise da causa raiz |
| RCM | Manutenção Centrada na Confiabilidade |
| SAE | Sociedade de Engenheiros Automotivos |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| ZTA | Zona Termicamente Afetada |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------|------------|
| Å | Angström |
| Al | Alumínio |
| B | Boro |
| C | Carbono |
| Ca | Cálcio |
| Cr | Cromo |
| Cu | Cobre |
| Fe | Ferro |
| μ | Mícron |
| Mn | Manganês |
| Mb | Molibdênio |
| Nb | Nióbio |
| Ni | Níquel |
| N | Nitrogênio |
| P | Fósforo |
| Pb | Chumbo |
| S | Enxofre |
| Sn | Estanho |
| Ti | Titânio |
| V | Vanádio |
| Zn | Zinco |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 16 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO | 17 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 19 |
| 1.4 | DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA | 19 |
| 1.5 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 20 |
| 2 | ANÁLISE DE FALHA | 22 |
| 2.1 | FALHA | 22 |
| 2.1.1 | Níveis de Falha | 23 |
| 2.1.2 | Taxa de falhas | 24 |
| 2.1.3 | Principais causas físicas de falhas | 24 |
| 2.2 | FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE FALHAS | 27 |
| 2.2.1 | Resolução de problemas | 27 |
| 2.2.2 | Análise da causa raiz de falha | 28 |
| 2.2.2.1 | <i>Níveis de análise de causa raiz</i> | <i>29</i> |
| 2.2.2.2 | <i>Métodos de mapeamento da causa raiz</i> | <i>30</i> |
| 2.2.2.2.1 | Árvore de falhas | 30 |
| 2.2.2.2.2 | Análise de eventos e fatores causais | 31 |
| 2.2.2.2.3 | Análise de Causa e Efeito | 32 |
| 2.2.2.2.4 | Técnica dos cinco porquês | 34 |
| 2.2.3 | Outras ferramentas de análise de falha | 35 |
| 2.2.3.1 | <i>Fontes de entrada e informação</i> | <i>35</i> |
| 2.2.3.2 | <i>Entrevistas de pessoas</i> | <i>36</i> |
| 2.2.3.3 | <i>Investigações de laboratório</i> | <i>37</i> |
| 2.2.3.4 | <i>Análises de tensão</i> | <i>39</i> |
| 2.2.3.5 | <i>Mecânica da fratura</i> | <i>41</i> |
| 3 | FRACTOGRAFIA | 44 |
| 3.1 | HISTÓRICO DA FRACTOGRAFIA | 44 |
| 3.2 | EXAME VISUAL DA SUPERFÍCIE DE FRATURA | 46 |
| 3.3 | ANÁLISE MACROGRÁFICA | 47 |
| 3.4 | ANÁLISE MICROGRÁFICA | 49 |
| 4 | MODOS DE FRATURA | 50 |

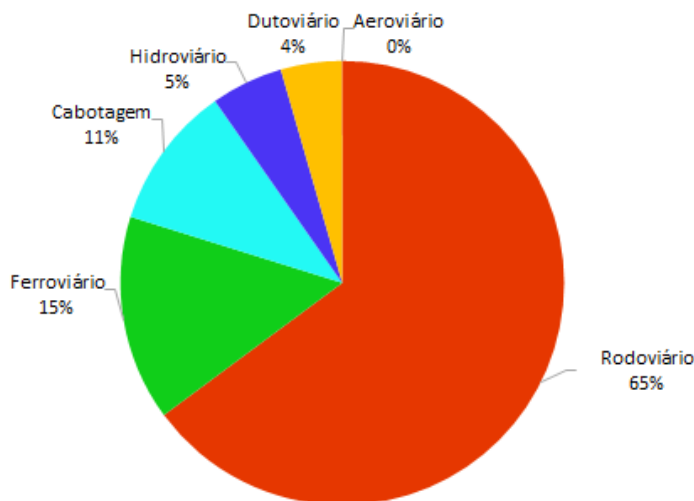
| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1 | RUPTURA POR MICROVAZIOS (<i>DIMPLES</i>) | 51 |
| 4.2 | CLIVAGEM - SEPARAÇÃO ENTRES PLANOS CRISTALINOS | 55 |
| 4.3 | RUPTURA POR DECOESÃO ENTRE OS GRÃOS | 57 |
| 4.4 | FADIGA | 59 |
| 4.4.1 | Fadiga em molas | 63 |
| 4.4.1.1 | <i>Mecanismos de fadiga em molas</i> | 63 |
| 4.4.1.2 | <i>Fatores de desempenho</i> | 65 |
| 5 | METODOLOGIA | 69 |
| 5.1 | INVESTIGAÇÃO | 70 |
| 5.1.1 | Especificação técnica | 70 |
| 5.1.2 | Processo de fabricação | 71 |
| 5.1.3 | Inspeção técnica | 72 |
| 5.1.4 | Coleta das amostras | 73 |
| 5.2 | EXAME VISUAL E REGISTRO FOTOGRÁFICO | 73 |
| 5.3 | SELEÇÃO DAS AMOSTRAS | 76 |
| 5.4 | ANÁLISES EM LABORATÓRIO | 77 |
| 5.4.1 | Preparação da amostra | 77 |
| 5.4.2 | Análise microestrutural | 77 |
| 5.4.3 | Análise química | 78 |
| 5.4.4 | Ensaio de dureza | 78 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 79 |
| 6.1 | RESULTADOS DAS ANÁLISES | 79 |
| 6.1.1 | Exame visual e registro fotográfico | 79 |
| 6.1.2 | Análise microestrutural | 83 |
| 6.1.3 | Análise química | 86 |
| 6.1.4 | Ensaio de dureza | 86 |
| 6.2 | DISCUSSÕES DOS RESULTADOS | 88 |
| 7 | CONCLUSÕES | 90 |
| | REFERÊNCIAS | 91 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para garantir o desenvolvimento de um país é fundamental pensar em um sistema de transporte robusto e eficiente que equilibre sua matriz considerando todos os modais disponíveis. No Brasil há cinco modais de transporte: rodoviário, ferroviário, aquaviário (hidroviário e cabotagem), dutoviário e aeroviário que, de acordo com a simulação feita para o Plano Nacional de Logística (PNL), apresentava em 2015 o panorama da movimentação do transporte inter-regional de cargas no Brasil mostrado na Figura 1. (EPL, 2018)

Figura 1 – Distribuição Modal em 2015



Fonte: Plano Nacional de Logística (PNL).

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2019), a alta capacidade de movimentação de cargas por grandes distâncias é o que torna o modal ferroviário um destaque dentre os demais modais terrestres.

Sobre a capacidade de transporte das ferrovias, a Associação Nacional de Transportes Ferroviários - ANTF (2018) destaca que um vagão graneleiro é capaz de carregar a mesma quantidade de soja que 2,5 caminhões bitrens, consumindo 70% menos combustível. Isso contribui para um transporte 52% mais barato e 66% menos poluente. Além dos fatores econômico e ambiental, o modal ferroviário destaca-se por uma expressiva vantagem no quesito segurança.

Sendo assim, o Ministério da Infraestrutura do Brasil planeja investir nas ferrovias nacionais, explorando seu maior potencial logístico para escoamento da produção brasileira. Atualmente, de toda a matriz de transporte brasileira apenas 15% é referente ao sistema

ferroviário. O Governo Federal tem como objetivo até 2030 elevar essa taxa para 30%. Dessa forma, o propósito é reduzir o custo do transporte e melhorar a eficiência logística do agronegócio, que ainda é muito dependente do modal rodoviário. A ideia é interligar as ferrovias aos portos brasileiros. (BRASIL, 2020)

Para assegurar a competitividade das ferrovias, a manutenção adquire valor estratégico. Como descrito por Oliveira e Silva (2012), a manutenção tem o papel de garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações com confiabilidade, segurança e preservação do meio ambiente, buscando sempre atingir o menor custo possível, de modo a atender a um processo de produção ou de serviço.

A confiabilidade e disponibilidade de um sistema dependem da correta realização das seguintes fases: projeto, fabricação, instalação, operação e manutenção. As fases de manutenção e operação terão como propósito assegurar a função dos equipamentos, sistemas e instalações ao longo de sua vida útil e a não-degeneração do desempenho. Nestas fases normalmente são identificadas as falhas geradas no projeto, fabricação e instalação. (KARDEC; NASCIF, 2009)

Azevedo e Cescon (2018) comenta que as falhas de componentes de engenharia geralmente acarretam gastos muito superiores ao custo unitário do componente fraturado, além de colocar em risco o meio ambiente e vidas humanas. A presença de defeitos originados no processo de fabricação, a utilização de materiais inadequados, a falha devido à erros de projeto ou de montagem, manutenção e uso, são os fatores que mais contribuem para a falha de componentes de engenharia.

De modo geral, é possível identificar as causas das falhas, prevenindo quedas de desempenho ou ruptura. A análise de falhas possibilita o aprimoramento dos níveis de exigência e de segurança dos componentes de engenharia. Estudos de casos de análise de falhas geram materiais que embasam uma perspectiva mais detalhada do modo que um determinado setor produtivo organiza as atividades científicas e tecnológicas, podendo ainda contribuir para a solução de problemas da indústria que envolvam aspectos comerciais e jurídicos. (AZEVEDO; CESCO, 2018)

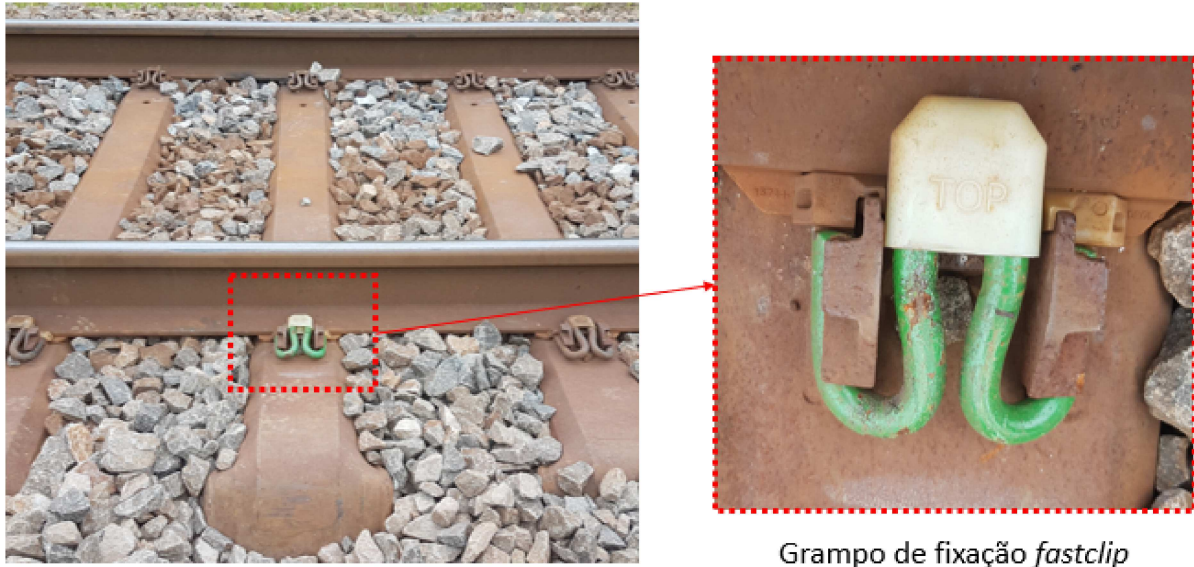
O presente trabalho busca fazer uma análise de falha em grampos ferroviários do tipo *fastclip*, a fim de detectar as causas de falha para este tipo de componente de fixação utilizado em ferrovias.

1.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com Hasap et al. (2018), o sistema de fixação no sistema ferroviário moderno é composto por vários componentes como amortecedor de trilho, isoladores (*toe*

insulator e *side post insulator*), grampo e placa de base, conforme ilustrado pela Figura 2. Um componente crítico desse sistema é o grampo, que aplica força compressiva e mantém o trilho nas posições vertical, lateral e longitudinal.

Figura 2 – Exemplo de grampo de fixação de trilho.



Fonte: MRS Logística S.A.

Como aponta Ali et al. (2020), os grampos de fixação sem parafusos roscados têm sido amplamente utilizados em trilhos ferroviários devido às vantagens de fácil instalação e remoção, forças de fixação bem distribuídas e baixo custo de manutenção. Porém, a falha em grampos de fixação tem sido frequentemente encontrada em linhas ferroviárias, o que aumentou o custo de reparo e manutenção, além de redução direta na segurança operacional. Segundo os autores, esse tipo de falha pode levar ao alargamento da bitola, desgaste do trilho e instabilidade da via.

A escolha do tema veio da recorrência de fraturas em grampos de fixação na MRS Logística, empresa ferroviária brasileira criada em 1996, quando o governo transferiu a gestão do sistema ferroviário nacional à iniciativa privada. Tal problema foi detectado em quatro lotes de grampos de fixação, portanto houve a necessidade de uma substituição em massa dos componentes desses lotes que já haviam sido instalados para garantir a segurança operacional da via.

As falhas em grampos de fixação são um problema recorrente em vários países de diferentes regiões do mundo. Portanto, nesse contexto, Xiao, Wang e Zhang (2017) destacam que há uma necessidade imediata de pesquisas relacionadas ao mecanismo de fratura de grampos de fixação, pois isso fornecerá orientação teórica para o projeto de estrutura de via com maior desempenho, bem como o controle efetivo sobre reparo e

manutenção.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar as possíveis causas que levam à falha de um componente de fixação utilizado na Via Permanente de uma ferrovia – o grampo ferroviário – a partir de análises em grampos fraturados na MRS Logística S.A.

Para atender a esse objetivo principal faz-se necessário os seguintes objetivos específicos:

- Determinar com base no estado da arte levantado em periódicos e livros os possíveis modos de falha de grampos ferroviários;
- Fazer uma correlação desses modos de falha com os verificados em grampos quebrados na MRS Logística S.A.;
- Avaliar a influência da estrutura metalúrgica e do processo de fabricação nessas falhas;
- Propor uma rotina para análise de falha de componentes mecânicos e estruturais em geral.

1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se de pesquisa aplicada, conforme caracteriza Gerhardt e Silveira (2009), tendo em vista que seu objetivo é gerar conhecimentos para aplicação prática, que é a análise de falhas em grampos ferroviários para a identificação correta das causas.

Quanto ao objetivo, este estudo possui caráter descritivo exploratório por ter a intenção de proporcionar maior familiaridade com o problema, ao mesmo tempo em que pretende descrever os fatos e fenômenos de determinada realidade. (TRIVIÑOS, 1987 apud GERHARDT; SILVEIRA, 2009)

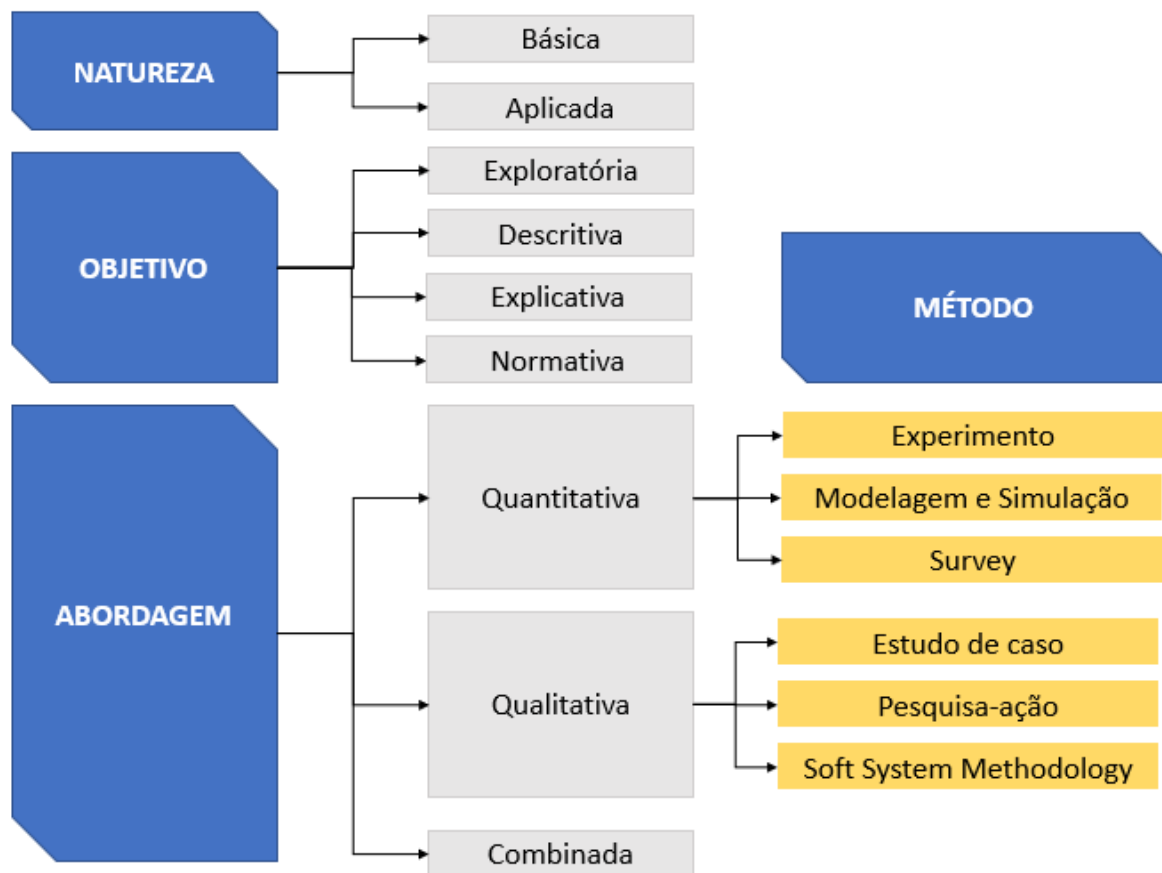
A abordagem adotada nesta pesquisa é qualitativa, visto que não se preocupa com representatividade numérica, mas sim com o aprofundamento da compreensão do problema. (GERHARDT; SILVEIRA, 2009)

O método adotado é o de estudo de caso. De acordo com Cauchick-Miguel (2019), o estudo de caso é uma abordagem metodológica valiosa para a condução de pesquisas em diversas áreas do conhecimento. Neste tipo de metodologia, a problemática ou fenômeno

que será investigado podem ser extraídos e compreendidos a partir de um mapeamento e análise da literatura existente sobre o tema.

A Figura 3 apresenta o esquema proposto por Miguel (2010) para metodologia de pesquisa científica.

Figura 3 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção



Fonte: Miguel, 2010 (Adaptado).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a realização da contextualização sobre o tema e a definição dos objetivos que se pretende alcançar com a realização do trabalho, faz-se necessário apresentar a estrutura que será seguida para a elaboração do mesmo, deixando claro a metodologia a ser utilizada para a análise de falha em grampo de fixação ferroviário.

No Capítulo 1 são feitas considerações iniciais com relação à importância da análise e prevenção de falhas para se garantir a confiabilidade e segurança no transporte ferroviário. É apresentada a motivação para o desenvolvimento do trabalho, destacando a importância do objeto de estudo e quais as implicações de sua falha, bem como os objetivos da pesquisa e a definição de sua metodologia.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre análise de falha, abordando alguns conceitos relacionados a falhas e quais são suas principais causas físicas, seguido por uma explicação geral sobre as ferramentas para análise de falhas.

No Capítulo 3 é apresentado o conceito de fractografia, um pouco de sua história e algumas análises importantes para esse estudo.

O Capítulo 4 finaliza a fundamentação teórica abordando brevemente sobre os principais modos de fratura. Dado que o objeto deste estudo é um elemento de fixação elástico e seu principal modo de fratura é a fadiga, é dado enfoque para o estudo de fadiga em molas, seus mecanismos de fratura e os fatores que mais influenciam em seu desempenho.

No Capítulo 5 é proposta uma sequência de etapas para a realização de uma boa análise de falha em grampos de fixação ferroviários, apresenta dados sobre os grampos e os métodos aplicados para a realização das análises.

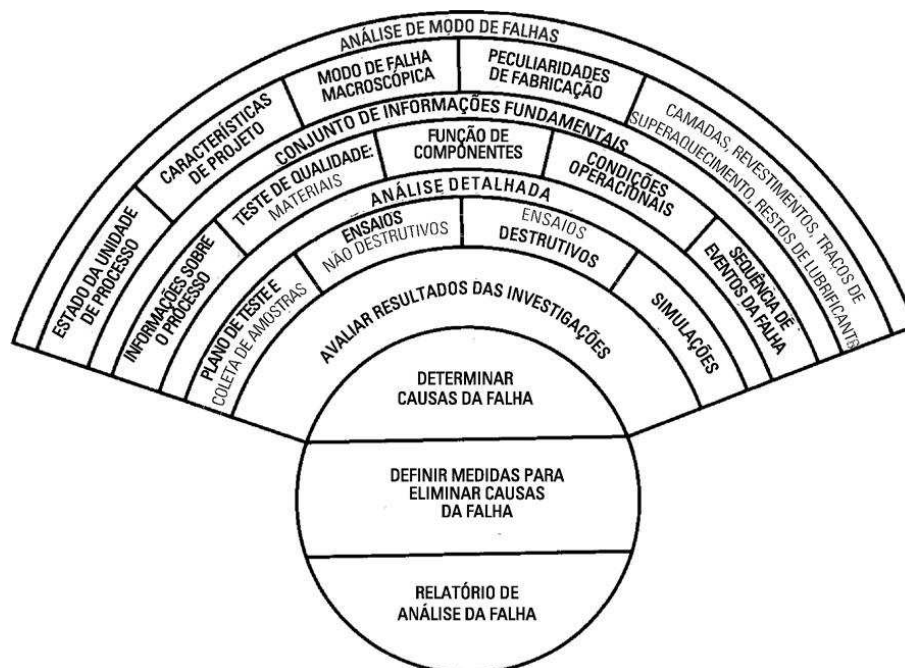
O Capítulo 6 mostra a análise dos resultados e uma discussão acerca deles.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas com a realização do presente trabalho, bem como as sugestões para a execução de uma melhor análise de falha em grampos ferroviários.

2 ANÁLISE DE FALHA

A análise de falha, segundo Scutti e McBrine (2002), é o exame das características e causas da falha de um produto. Na maioria dos casos, essa análise envolve a consideração de evidências físicas e o uso de princípios científicos e de engenharia, além da utilização também de ferramentas analíticas. Em seu estudo, Geitner e Bloch (2015) apontam como uma descrição de etapas para análise de falhas de material a que está sintetizada pela Figura 4.

Figura 4 – Procedimentos para análise de falhas – tecnologia de materiais



Fonte: Geitner e Bloch (2015).

Inicialmente este estudo abordará os conceitos relacionados a falha e quais são suas principais causas físicas, seguido por uma explicação geral sobre as ferramentas para análise de falhas, o que é a fractografia e algumas técnicas aplicadas a esse estudo. Seguindo a lógica representada na Figura 4, que descreve procedimentos para análise de falhas, também será feita uma análise sobre os quatro principais modos de fratura. Dado que o objeto deste estudo é um elemento de fixação elástico e seu principal modo de fratura é a fadiga, será dado enfoque para o estudo de fadiga em molas, seus mecanismos de fratura e os fatores que mais influenciam em seu desempenho.

2.1 FALHA

A falha de materiais de engenharia é um evento geralmente indesejável pois pode causar perdas financeiras, colocar o ambiente e vidas humanas em risco, além de interferir

na disponibilidade de produtos e serviços. De acordo com Callister (2016), embora seja possível saber as causas das falhas e o comportamento dos materiais, ainda assim é difícil garantir a prevenção de falhas. O autor afirma também que as causas mais comuns são a inadequada seleção e processamento de materiais, além de erros no projeto ou da má utilização de um componente.

Para Scutti e McBrine (2002), uma abordagem de análise de falha lógica requer primeiramente uma compreensão clara da definição de falha e a distinção entre indicador (ou seja, sintoma), causa, mecanismo de falha e consequência. Segundo os autores, saber essa diferenciação ajuda a focar as ações investigativas.

Os indicadores são monitorados como precursores ou sintomas da falha e as causas são o foco das ações de mitigação. Com base em definições de engenharia contidas na literatura, é possível descrever como o material falhou levando-se em consideração os mecanismos de falha. Porém, se o mecanismo não for totalmente compreendido, não serão identificadas todas as causas verdadeiras, o que prejudicará a eficácia da ação corretiva.

2.1.1 Níveis de Falha

Scutti e McBrine (2002) apontaram três diferentes níveis para a falha de um sistema ou componente, tais como: perda de função, perda de vida útil ou inoperabilidade. Segundo esse estudo, a perda de função se refere a uma falha onde o sistema ou componente opera, mas não executa a função pretendida. Um motor a jato que funciona, mas só pode produzir empuxo parcial (insuficiente para permitir que uma aeronave decole) é um exemplo de perda de função.

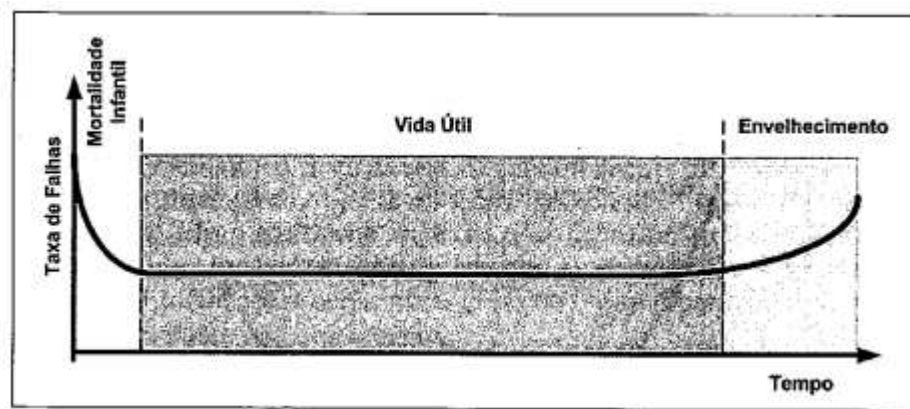
A perda de vida útil refere-se ao tipo de falha onde há perda de confiabilidade ou segurança na execução da função do sistema ou componente, mesmo que este ainda opere. Por exemplo, um cabo de aço para um elevador perdeu sua vida útil quando sofreu fraturas por fadiga de alguns dos fios individuais, devido a irregularidades no enrolamento sobre a polia. Mesmo que o cabo de aço continue a funcionar, a presença de fraturas por fadiga de alguns dos fios resulta em uma condição insegura e, portanto, é considerada uma falha. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Donato (2011) descreveu a inoperabilidade como a falha que resulta na completa falta de capacidade de um sistema ou componente executar sua função (falha total). Como exemplo pode-se citar a perda da capacidade de carga de um parafuso estrutural em serviço devido à fratura.

2.1.2 Taxa de falhas

Deve-se entender que as falhas não podem ser totalmente evitadas, mas devem ser melhor compreendidas, antecipadas e controladas. Para isso é importante, ao observar os padrões de falha, compreender como a distribuição típica de falhas para o produto deve ser fatorada com o tempo. Essa distribuição é mostrada pela curva característica típica da vida de um produto (Figura 5), também conhecida como “curva da banheira”, que expressa a taxa de falhas (número de falhas por unidade de tempo) em função do tempo (vida). (SCUTTI; MCBRINE, 2002; KARDEC; NASCIF, 2009)

Figura 5 – Curva característica da vida de um produto (“curva da banheira”)



Fonte: Kardec e Nascif (2009).

Essa curva mostra três períodos distintos: mortalidade infantil, vida útil e envelhecimento. A mortalidade infantil é o período que representa as falhas no princípio da vida operacional do componente. A vida útil é o período em que a taxa de falhas é significativamente menor e constante ao longo do tempo, ocorrendo devido a fatores menos controláveis e a principal fonte responsável é a variabilidade no ambiente de operação. Por fim, o aumento na taxa de falhas no período de envelhecimento é decorrente da própria deterioração do produto, que é natural ao longo do tempo. (KARDEC; NASCIF, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009)

O estudo de Scutti e McBrine (2002) reforça que com o gerenciamento do ciclo de vida de um componente, produto ou sistema é possível reduzir custos de projetos e fabricação e pode-se otimizar a manutenção e outras atividades para prolongar sua vida útil.

2.1.3 Principais causas físicas de falhas

Scutti e McBrine (2002) elencam as quatro categorias fundamentais onde se enquadram as causas raízes físicas de falhas, que são: problemas de projeto, defeitos de

materiais, defeitos de fabricação/instalação e anomalias na vida útil do componente.

O processo de desenvolvimento de um projeto abrange também a seleção e especificação de materiais e processos de fabricação, definição dos requisitos de desempenho, antecipação das condições de serviço durante a utilização, restrições no projeto e criticidade ou riscos associados à falha. Qualquer entalhe ou descontinuidade geométrica pode atuar como um concentrador de tensões e, portanto, como local para a iniciação de uma trinca de fadiga. Essas características de projeto incluem sulcos, orifícios, rasgos de chaveta, fios de roscas, e assim por diante. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

De acordo com Callister (2016), a concentração de tensões será mais severa quanto mais afilada for uma descontinuidade (ou seja, quanto menor for seu raio de curvatura). Evitando essas irregularidades estruturais, pode-se reduzir a probabilidade de falhas por fadiga. Outra alternativa é fazer modificações no projeto para que sejam eliminados os contornos com mudanças bruscas de geometria, que levam à formação de cantos agudos.

A seleção de um material que é incapaz de fornecer propriedades mecânicas adequadas para a aplicação (incluindo resistência, resistência à fadiga, tenacidade à fratura, resistência à corrosão, resistência à temperatura elevada, etc.) também é um tipo de deficiência de projeto. Contudo, há casos onde o material é selecionado adequadamente, mas as falhas ocorrem devido às descontinuidades do próprio material, como defeitos superficiais, trincas, inclusões, porosidade e segregação. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Segundo Scutti e McBrine (2002), todo e qualquer processo de fabricação ou instalação tem muitas variáveis que, quando permitido desviar em direção a ou exceder os limites de controle, podem resultar em um produto com defeito. Durante processos de usinagem, pequenos riscos e ranhuras são introduzidos na superfície da peça de trabalho pela ação da ferramenta de corte, o que, na visão de Callister (2016), são marcas superficiais que podem limitar a vida em fadiga. Procedimentos de tratamento térmico podem causar crescimento de grãos, transformação de fase incompleta, decarbonetação, precipitação inadequada e inomogeneidades na microestrutura, fatores que também podem levar a falhas.

A vida útil de um componente ou sistema depende muito das condições sob as quais o produto opera em serviço. A vida útil de um produto inclui sua operação, manutenção, inspeção, reparo e modificação. Falhas devido a anomalias em qualquer um desses aspectos da vida útil são exclusivas daquelas criadas durante o projeto, aquisição de materiais e fabricação de produtos, conforme descrito anteriormente. A operação do equipamento fora dos parâmetros de projeto do fabricante, manutenção imprópria ou realização de modificações inadequadas, são exemplos de fatores que podem levar um componente à falha durante sua vida útil. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

O ambiente, que se refere a todas as condições externas que atuam no material antes ou durante a fratura, pode afetar significativamente a taxa de propagação da fratura. Callister (2016) destaca dois tipos de falhas por fadiga que são assistidas por fatores ambientais: fadiga térmica e fadiga associada à corrosão.

Segundo Sehitoglu (1996), fadiga térmica ou fadiga por tensão térmica diz respeito à situação onde as tensões em um componente se desenvolvem sob o ciclo térmico sem carregamento externo. Este processo pode ocorrer em um material isotrópico perfeitamente homogêneo e pode ser causado por gradientes abruptos de temperatura em um componente ou através de uma seção. Por exemplo, quando a superfície é aquecida, ela é restringida pelo material mais frio abaixo da superfície e, portanto, a superfície sofre tensões de compressão. Após o resfriamento, a deformação ocorre na direção reversa e podem se desenvolver tensões de tração. Em ciclos de calor/resfriamento, a superfície sofrerá danos por fadiga térmica. Exemplos de fadiga térmica são encontrados em rodas ferroviárias submetidas à ação da sapata de freio, que gera gradientes de temperatura e, conseqüentemente, tensões internas.

De acordo com Callister (2016), a fadiga associada à corrosão é aquela onde a falha ocorre pela ação simultânea de uma tensão cíclica e de um ataque químico. Para Andresen (1996), os efeitos ambientais desempenham um papel dominante no comportamento de fadiga, produzindo um aumento profundo nas taxas de crescimento de trincas. Até ambientes aparentemente inócuos, como água de alta pureza, ar de laboratório e pressões parciais muito baixas de oxigênio, hidrogênio ou vapor de água, podem colaborar com o aumento dessas taxas de crescimento.

Segundo Pao (1996), as taxas de crescimento de trincas podem ser substancialmente maiores no ambiente corrosivo do que aquelas obtidas em um ambiente benigno (como no vácuo), podendo depender de um grande número de produtos químicos e variáveis eletroquímicas não presentes em um ambiente benigno.

Callister (2016) explica que podem ser formados pequenos pits a partir de reações químicas entre o ambiente e o material, os quais podem servir como pontos de concentração de tensões e, portanto, como locais para a nucleação de trincas. A natureza dos ciclos de tensão influencia o comportamento em fadiga; por exemplo, uma redução na frequência de aplicação da carga leva a períodos mais longos, durante os quais a trinca aberta está em contato com o ambiente, e a uma redução na vida em fadiga. Existem vários procedimentos para a prevenção da fadiga associada à corrosão.

Para a prevenção da fadiga associada à corrosão, pode-se tomar medidas para reduzir a taxa de corrosão, utilizar técnicas como a aplicação de revestimentos superficiais de proteção, selecionar materiais mais resistentes à corrosão e reduzir a corrosividade do

ambiente. (CALLISTER, 2016)

2.2 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE FALHAS

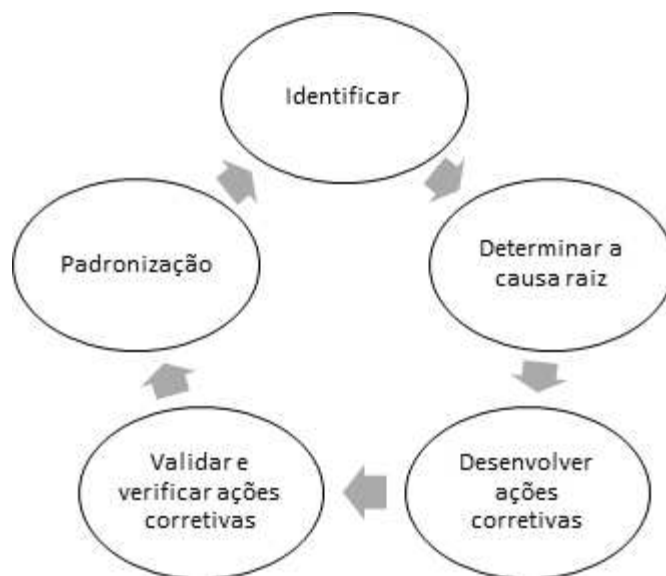
De acordo com Scutti e McBrine (2002), a análise de falhas é o processo de determinar as causas e fatores que levam às falhas nos componentes mecânicos, especialmente aos sujeitos às solicitações dinâmicas. É um processo complexo e multidisciplinar que utiliza diferentes técnicas de observação, inspeção e muitas vezes análises em laboratório.

Um dos fatores chave na realização adequada de uma análise de falha é ter uma observação holística da falha e ao examinar e analisar, buscar as evidências para promover uma perspectiva clara e imparcial sobre a real causa, ou seja, o que levou de fato a falha. Para isso algumas ferramentas podem ser utilizadas, estabelecendo métodos para auxiliar essas análises. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

2.2.1 Resolução de problemas

Na visão de Scutti e McBrine (2002), há um modelo sucinto para resolução de problemas que tem aplicabilidade específica na análise e prevenção de falhas. Esse modelo, retratado na Figura 6, possui um formato contínuo e circular, indicando que o processo será reiniciado quando a primeira iteração trouxer à luz um problema ou toda vez que um novo problema for encontrado.

Figura 6 – Modelo de resolução de problemas



Fonte: Adaptado de Scutti e McBrine (2002).

No modelo proposto por Scutti e McBrine (2002), as etapas do processo de resolução de problemas iniciam com a fase de identificação. Tal parte consiste em descrever a situação

atual, definir as falhas em termos de sintomas (indicadores), determinar o impacto da falha do componente, estipular uma meta e coletar dados para fornecer uma medida da falha. Já a segunda etapa do modelo introduz um processo muito significativo que é a análise do problema e definição das causas. Essa relevância se deve à impossibilidade de se desenvolver soluções para prevenir a recorrência de problemas sem a identificação da causa raiz.

Ainda segundo os autores citados, a fase de desenvolvimento das ações corretivas envolve elencar as possíveis soluções para mitigar e prevenir a recorrência do problema, gerar alternativas e desenvolver um plano de implementação. Em seguida deve ser feita a validação e verificação dessas ações testando-as em um estudo inicial, determinando a eficácia da mudança proposta, validando as melhorias e, por fim, observando se houve a correção do problema.

Finalizando o modelo há a etapa de padronização, onde as ações corretivas são incorporadas ao sistema de documentação da empresa, organização ou indústria para evitar a recorrência de falhas em produtos ou sistemas semelhantes. Entretanto, para garantir a eficácia, é necessário que as mudanças sejam monitoradas. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

2.2.2 **Análise da causa raiz de falha**

É muito comum que uma análise de falha seja realizada visando caracterizar as causas da falha com o objetivo geral de evitar a repetição de falhas semelhantes. No entanto, a análise das evidências físicas por si só pode não ser adequada para atingir esse objetivo.

O escopo de uma análise de falha pode, mas não necessariamente, levar a uma causa raiz corrigível da falha. Muitas vezes, uma análise de falha termina incorretamente na identificação do mecanismo de falha e, possivelmente, das influências causais. Os princípios da análise da causa raiz (Root-Cause Analysis - RCA) podem ser aplicados para garantir que a causa raiz seja compreendida e as ações corretivas apropriadas possam ser identificadas. A prática da RCA pode ser simplesmente um exercício mental momentâneo ou uma extensa análise de mapeamento logístico. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Com base nos conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade (do inglês Reliability Centered Maintenance - RCM), na visão de Kardec e Nascif (2009), evitar as falhas é a principal motivação. De acordo com os autores, é possível classificar as falhas em evidentes e ocultas.

As falhas evidentes são aquelas ligadas que podem ser percebidas pelo pessoal de operação, ou seja, impactam na segurança e no meio ambiente ou afetam a produção, qualidade do produto e custos operacionais. Já as falhas ocultas não são perceptíveis pelo

pessoal da operação, portanto geralmente estão relacionadas a dispositivos e sistemas de proteção passíveis de falha. (KARDEC; NASCIF, 2009)

A Figura 7 apresenta a analogia da análise de causa raiz. Os galhos da árvore representam os indicadores (ou sintomas), que é o que podemos observar. O tronco simboliza as causas evidentes, que são frequentemente os resultados obtidos na análise de falha, ou seja, são causas que contribuem para o problema ou seu agravamento, mas não representam o problema de fato. Por fim, as raízes da árvore retratam a causa-raiz oculta, que é onde reside realmente a origem do problema.

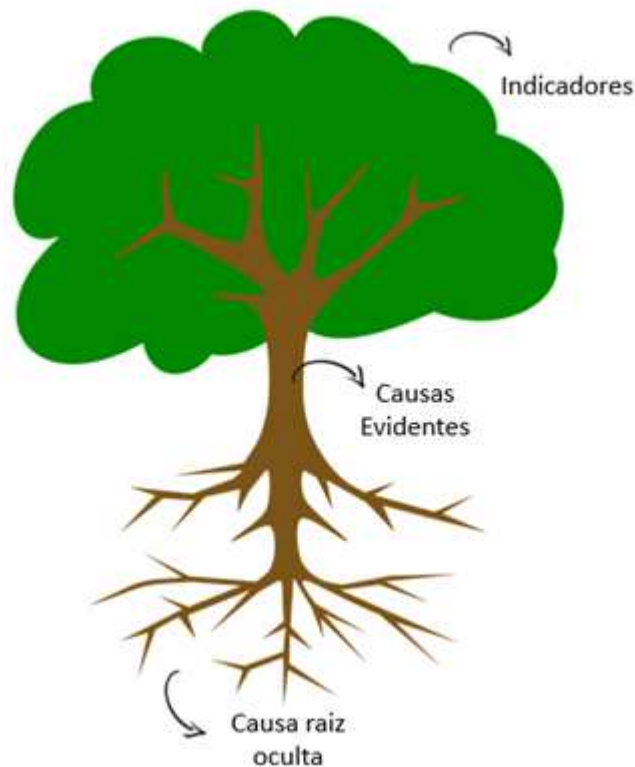


Figura 7 – Analogia de causa raiz

Fonte: Autor.

2.2.2.1 *Níveis de análise de causa raiz*

O trabalho de Scutti e McBrine (2002) explica que os três níveis de análise de causa raiz são: raízes físicas, raízes humanas e raízes latentes.

As raízes físicas, ou raízes dos problemas do equipamento, são onde muitas análises de falha param. Essas raízes podem ser o resultado de uma investigação de laboratório ou análise de engenharia e, muitas vezes, são descobertas em nível de componente ou de material. Já as raízes humanas envolvem fatores humanos que causaram a falha, como um erro de julgamento humano, por exemplo. Por fim, tem-se as raízes latentes, que nos levam

às causas do erro humano e incluem raízes que são organizacionais ou procedimentais por natureza, bem como raízes ambientais ou outras que não podem ser controladas. A Tabela 1 apresenta dois exemplos que ilustram bem os três níveis de causa raiz citados. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Tabela 1 – Exemplos de causas básicas de falha de vaso de pressão e parafuso

| Tipo de raiz | Falha do vaso de pressão | Falha de parafuso |
|-----------------|--|--|
| Raízes físicas | Danos por corrosão, diluição da parede | Trinca por fadiga; vibração do equipamento; isolamento |
| Raízes humanas | Inspeção inadequada realizada | Instalação imprópria do equipamento |
| Raízes latentes | Treinamento de inspetor inadequado | Processo inadequado de verificação de especificação |

Fonte: Adaptado de Scutti e McBrine (2002).

De acordo com os autores citados, a profundidade com que se investiga as causas raízes depende dos objetivos da RCA. Esses objetivos geralmente são baseados na complexidade da situação e no risco associado a falhas adicionais. Na maioria dos casos, deseja-se identificar as causas raízes que sejam razoavelmente corrigíveis.

2.2.2.2 *Métodos de mapeamento da causa raiz*

Existem muitas ferramentas que podem auxiliar na execução da RCA. O elemento mais importante, entretanto, é a preservação de uma mente aberta por parte do investigador ou da equipe de investigação. Ideias pré-concebidas ou a existência de um viés investigativo frequentemente obstruem investigações de causa raiz eficazes. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Representações visuais em geral são mais facilmente compreendidas do que uma longa descrição narrativa. Tendo isso em vista, os métodos gráficos são utilizados para facilitar a organização lógica das informações e, dessa forma, auxiliar na execução de uma RCA. Os parágrafos a seguir apresentam de forma simplificada vários métodos comuns de gráficos que podem ser úteis para essa execução.

2.2.2.2.1 *Árvore de falhas*

Segundo o estudo realizado por Scutti e McBrine (2002), uma análise de árvore de falhas é uma análise dedutiva que identifica um evento principal, neste caso uma falha, e então avalia todas as maneiras confiáveis pelas quais esse evento poderia ter ocorrido, identificando as inter-relações de eventos básicos ou condições que levaram à falha. A árvore é organizada identificando todas as sequências de eventos que levam ao evento

principal e conectando-as a um “portão” que representa a relação lógica. A Figura 8 mostra um exemplo de uma árvore de falhas simplificada.

Figura 8 – Exemplo de uma árvore de falhas simplificada



Fonte: Adaptado de Scutti e McBrine (2002).

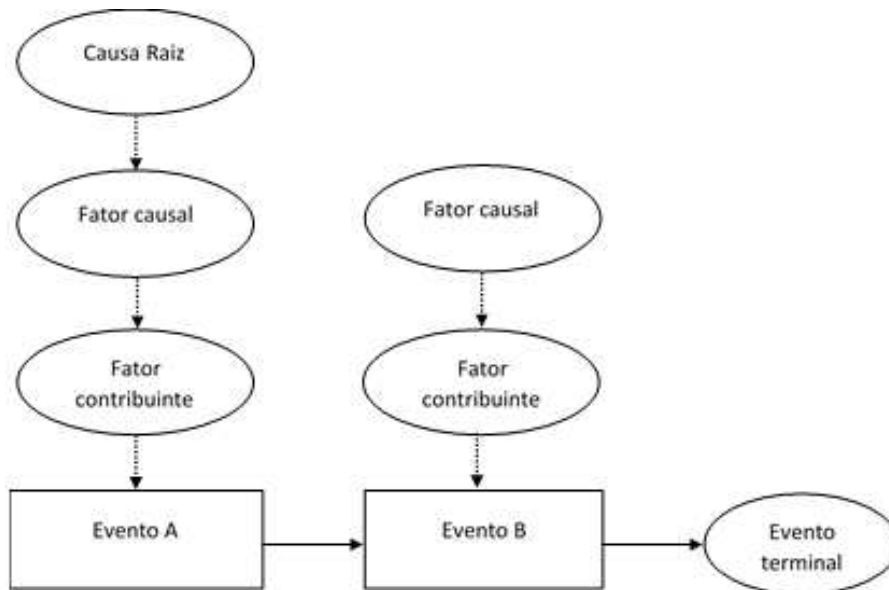
2.2.2.2.2 Análise de eventos e fatores causais

Segundo Scutti e McBrine (2002), o gráfico de análise de eventos e fatores causais é uma ferramenta muito flexível e muito útil para realizar uma análise lógica da sequência cronológica de eventos e fatores causais. A construção começa com um cronograma básico com a adição de condições relacionadas, eventos secundários e suposições.

Para a construção desse gráfico, os eventos são colocados em retângulos e conectados em sequência da esquerda para a direita usando setas sólidas. O evento terminal deve ser listado na extremidade direita dentro de um círculo, conforme mostra a Figura 9. São listadas em formas ovais as condições, fatores causais e fatores contribuintes. As relações entre os eventos, por sua vez, são mostradas com setas tracejadas. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Os eventos constituem a espinha dorsal do gráfico, enquanto as condições são circunstâncias pertinentes à situação. O objetivo da análise é identificar as principais falhas do equipamento, falhas do processo ou erros humanos que permitiram a ocorrência do evento de perda. Uma vez que o gráfico é apresentado, os fatores causais são identificados.

Figura 9 – Gráfico simplificado de evento e fator causal



Fonte: Adaptado de Scutti e McBrine (2002).

Estes são identificados como os fatores que, se eliminados, teriam evitado a ocorrência ou reduzido a gravidade do evento de perda. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Em seu trabalho, Ammerman (1998) apresenta os símbolos que podem ser utilizados para a construção do gráfico de eventos e fatores causais, conforme mostra a Tabela 2.

2.2.2.2.3 Análise de Causa e Efeito

Segundo Scutti e McBrine (2002), uma análise de causa e efeito é uma maneira de relacionar as causas a uma falha na tentativa de encontrar a causa raiz. As causas podem ser problemas de projeto, desempenho humano, fabricação deficiente e assim por diante.

Uma análise de causa e efeito simples pode assumir a forma de um diagrama de espinha de peixe, também conhecido como diagrama de Ishikawa. Em seu trabalho, Campos (2014) afirma que sempre que quando algo acontece (fim, efeito, resultado) é porque há influência de um conjunto de causas (meios). Segundo o autor, este diagrama teve origem na necessidade de que, em trabalhos multidisciplinares e de grupo, todas as pessoas envolvidas pudessem exercitar a distinção entre os fins e os meios.

O diagrama de Ishikawa, representado na Figura 10, constitui uma base organizada para o registro e análise das causas de um problema que permite evidenciar o relacionamento entre as diferentes causas. Esse diagrama permite a classificação do problema em seis famílias de causas (6M), são eles: matérias primas, máquinas, medidas, meio ambiente, mão de obra e método. (CAMPOS, 2014)

Tabela 2 – Elementos de gráfico de eventos e fatores causais


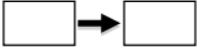









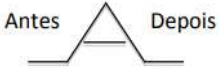
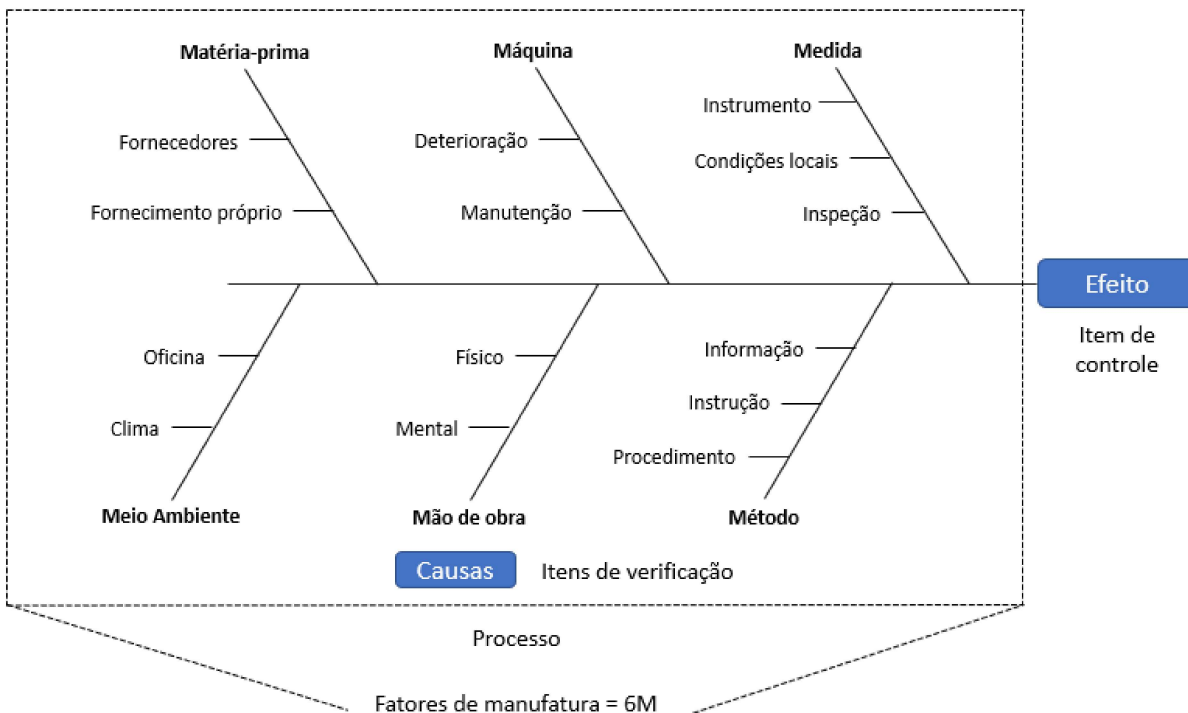
| Símbolo | Definição/ Explicação |
|---|---|
|  | Evento: ação ou acontecimento ocorrido durante alguma atividade. |
|  | Evento primário: ação ou acontecimento que leva a um efeito primário. A sequência primária de eventos deve ser construída na horizontal. A sequência no tempo em geral é da esquerda para a direita. |
|  | Evento indesejado: evento que foi crítico, ou seja, sua ocorrência foi crucial para a situação analisada ou o problema ocorrer. A grande dificuldade em definir esse evento não é definir a sua ocorrência em si, mas a maneira errônea de definir a sua ocorrência, propiciada por exemplo por condições inadequadas. |
|  | Evento secundário: ação ou acontecimento que impacta o evento primário, mas não está envolvido diretamente na situação. (a diferença entre os eventos primários e secundários estão na espessura da seta). Ele posiciona-se acima ou abaixo da linha de eventos primários. |
|  | Evento terminal: o ponto final da análise. Também é usado para marcar o evento inicial da análise. |
|  | Condições: circunstâncias que podem ter influenciado no curso dos eventos. Podem estar ligadas a outras condições ou a um evento. |
|  | Evento presumível: ação ou acontecimento que logicamente parece ter ocorrido, mas não pode ser provado. |
|  | Fator causal: fator que dá forma ao resultado da situação (de problema). |
|  | Fator causal presumível: fator que é assumido, mas não comprovado (parece afetar outra condição ou evento). |
|  | Barreira: medidas auxiliares (físicas ou administrativas) que fazem parte das condições de trabalho e existem para prevenir pessoas ou equipamentos de condições inseguras ou de danos. |
|  | Falha de barreira: falhas nas medidas auxiliares abordadas na linha anterior. |
|  | Mudança: comparação de uma atividade que tem sido realizada de forma bem sucedida com uma mesma atividade quando está sendo realizada insatisfatoriamente. |

Figura 10 – Diagrama de Ishikawa para correlação do efeito e suas causas



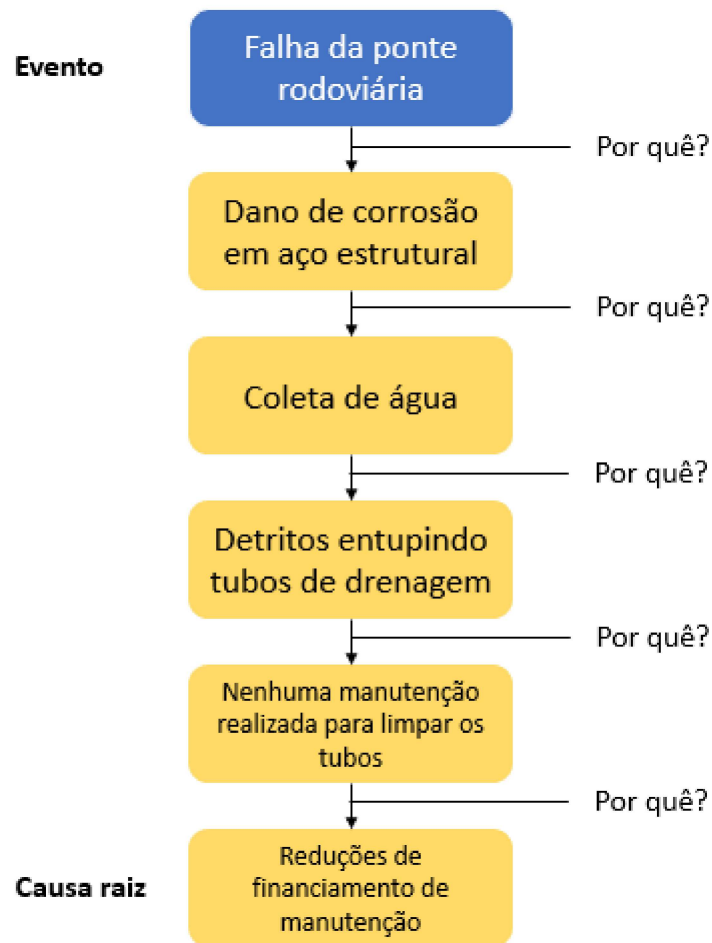
Fonte: Adaptado de Campos (2014).

2.2.2.2.4 Técnica dos cinco porquês

Conforme explica o trabalho de Scutti e McBrine (2002), essa é uma técnica simples que tem como objetivo conduzir o usuário a níveis mais profundos de identificação de causa, levando-o ainda mais à causa raiz. O objetivo geral é perguntar “por quê” depois que cada causa identificada até que as verdadeiras causas raízes sejam identificadas.

Para atingir o nível desejado de causa raiz pode ser necessário, na verdade, utilizar mais ou menos de cinco “porquês”. O exemplo mostrado na Figura 11 demonstra esse conceito simples.

Figura 11 – Exemplo de utilização da técnica dos cinco porquês.



Fonte: Autor.

2.2.3 Outras ferramentas de análise de falha

De acordo com o estudo desenvolvido por Scutti e McBrine (2002), existem muitas outras ferramentas que precisam ser consideradas na execução de uma análise de falha, como a revisão de todas as fontes de entrada e informação, a realização de entrevistas de pessoas, investigações de laboratório, análise de tensão e análise da mecânica da fratura. Portanto, considerando a necessidade de tais conhecimentos para o sucesso da análise, essas ferramentas serão aqui apresentadas a seguir.

2.2.3.1 Fontes de entrada e informação

Segundo o trabalho de Scutti e McBrine (2002), esta é uma etapa fundamental para o andamento da análise de falha, pois é quando são reunidas todas as informações necessárias para iniciar o processo investigativo. Com esse objetivo, são coletados dados físicos, amostras de influências ambientais, fotografias, registros de coleta de dados (pressão,

temperatura, velocidade, etc.) e dados base. Os autores destacam as evidências físicas, dados base e pessoas como alguns elementos chave na investigação.

As evidências físicas são os indicadores da falha, como as peças quebradas, amostras, componentes com defeito, posições, configurações e assim por diante. Para que seja feita uma investigação eficaz, é necessário que haja preservação, coleta e registro apropriado das evidências físicas. Essas evidências são preservadas quando se restringe o acesso a um local de falha, preservando as configurações e posições, fazendo um registro fotográfico da situação como encontrada, fazendo esboços, registrando as variáveis do processo (pressão, temperatura, posição, etc.), marcando e etiquetando peças e posições. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Ainda de acordo com os autores citados, tem-se que os dados base são os dados de projeto, especificações, dados técnicos, análises ou resultados de simulação, entre outros. Esses dados servirão como base para ponderação e discussão de resultados obtidos durante a análise de falha.

O último elemento chave destacado por Scutti e McBrine (2002) é o referente às pessoas. Esse elemento está relacionado às testemunhas, operadores, projetistas, equipe de manutenção, especialistas e outras pessoas que possam estar envolvidas no processo. Ou seja, pessoas que têm informações que podem contribuir para a detecção da causa da falha.

Um exemplo de coleta de dados e informações encontra-se no estudo de Liu et al. (2020), onde uma análise multiaxial de falha por fadiga em grampos de fixação foi desenvolvida através do método de análise de elementos finitos. Para isso, se basearam na condição operacional real de cerca de 300 trens por dia, com 24 conjuntos de rodas cada, a uma velocidade de 70 km/h, em uma via curva com raio de 300 m sob carga dinâmica induzida pelas rodas. Os parâmetros dos grampos utilizados na simulação foram obtidos através da literatura e de testes experimentais.

2.2.3.2 *Entrevistas de pessoas*

Consideradas por Scutti e McBrine (2002) como uma fonte essencial de embasamento em qualquer investigação de falha, as entrevistas aumentam os conhecimentos coletados por dados físicos ou pesquisas quando as informações são solicitadas e documentadas de maneira adequada.

O processo de entrevistas fornece dados em primeira mão pois baseia-se nas informações de testemunhas e outras pessoas envolvidas. Permite também a obtenção de dados de base e circunstanciais, já que possibilita reaver experiências históricas, eventos relacionados, percepções situacionais, entre outros. Por fim, a coleta de dados por meio

de entrevistas garante a ampliação do conhecimento técnico devido à interação com especialistas. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Após a ocorrência da falha as entrevistas daqueles que possuem dados em primeira mão devem ser realizadas o quanto antes. Essa premissa é seguida considerando que informações importantes podem ser corrompidas pela perda de alguns detalhes sutis ao longo do tempo ou pela tendência de ter o conhecimento de primeira mão evoluindo ao discutir o evento com outras pessoas. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Em seu trabalho, Scutti e McBrine (2002) destacam alguns pontos importantes que devem ser considerados ao realizar o processo de entrevistas:

- Explicar o porquê da realização das entrevistas e procurar manter a confidencialidade.
- Quando possível, realizar as entrevistas de forma individual ou em pequenos grupos. Evitar fazer a entrevista de alguém com a presença de seu supervisor ou gerente ou em qualquer ambiente de influência ou restrição.
- Tornar o ambiente de entrevista o mais confortável e menos intimidante possível.
- Fazer perguntas abertas e não orientar as respostas.
- Fazer a distinção entre conhecimento de primeira e segunda mão.
- Solicitar dados quantitativos específicos, dados qualitativos e opiniões.
- Obter referências a outras pessoas que possam ter informações pertinentes e outras fontes de dados.
- Reconhecer preconceitos e paradigmas ao interpretar as respostas.

2.2.3.3 *Investigações de laboratório*

A investigação laboratorial geralmente é necessária para analisar completamente as evidências físicas e identificar o mecanismo de falha após coletados os dados e amostras pertinentes. Nesta etapa é importante garantir a coleta e manuseio adequados das amostras.

Scutti e McBrine (2002) descrevem algumas regras para a coleta de amostras in situ (no local da falha) para exame laboratorial:

- Coletar peças com defeito, fragmentos próximos e, quando for o caso, amostras de lubrificantes e fluidos.
- Deve-se coletar evidências além do que é aparente no momento da avaliação inicial.

- Coletar amostras não danificadas de componentes semelhantes para comparação com o danificado.
- Desenhar diagramas para indicar a posição das peças e locais de coleta de amostra.
- O ideal é tirar muitas fotos e documentar a cena. Tire fotos de todos os ângulos e sempre tenha um objeto escalonável na foto, de preferência uma escala regulada.
- É necessário fazer marcações in situ de níveis de fluido ou outras posições que devem ser registradas antes de interferir no local.
- Ter a documentação apropriada e as ferramentas de coleta em um local com falha é importante para se preparar para atividades que podem não ser previstas antes da chegada do examinador que irá coletar as amostras.
- Geralmente, as amostras devem ser coletadas em potes ou bolsas de polietileno usando luvas de proteção e ferramentas de coleta adequadas.
- As amostras de líquido devem ser coletadas em potes de vidro com tampas forradas de Teflon.
- As amostras para análise microbiológica devem ser coletadas em recipientes estéreis e mantidos resfriados para análise imediata.
- As superfícies devem estar livres de impressões digitais ou outras fontes de contaminação.
- As amostras devem ser protegidas umas das outras e de outras fontes de dano, especialmente quando se tratar de itens delicados e superfícies de fratura.
- Marque ou rotule as amostras para indicar quando e por que foram coletadas, como foram orientadas, quem as removeu e quais foram as observações in situ relevantes.
- Geralmente, é desejável coletar a maior amostragem possível para exame laboratorial antes do seccionamento e remoção de amostras menores.

Após a coleta, recebimento, manuseio, rotulagem e armazenamento adequados da amostra, é essencial garantir que evidências importantes não sejam perdidas ou alteradas. As amostras devem ser sempre mantidas em um local seco e seguro e um registro de armazenamento deve ser mantido. Uma folha de dados de segurança de materiais (do inglês Materials Safety Data Sheet - MSDS) deve ser adquirida e os requisitos de armazenamento adequados de materiais perigosos observados. Um investigador experiente também deverá apressar o descarte de material perigoso após a conclusão da investigação. Especialistas

devem ser chamados para remover e descartar o material adequadamente. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Após o seccionamento e remoção de amostras menores das peças fraturadas deve ser feito o preparo desses corpos de prova para exames laboratoriais, como ensaios metalográficos, análise da composição química e ensaios de dureza. Segundo Colpaert (2008), a técnica de preparo de um corpo de prova abrange a escolha e localização da superfície a ser estudada; a preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido e o ataque dessa superfície por um reagente químico adequado.

Algumas características macroestruturais do grampo que são melhor analisadas a partir do corte de uma seção transversal são: homogeneidade do material; forma e intensidade de segregação; mapeamento de porosidades, trincas e bolhas; regularidade e profundidade da aplicação de tratamento termoquímico e profundidade de têmpera. Já o corte longitudinal deve ser selecionado para verificar eventuais defeitos nas proximidades da fratura ou a extensão de tratamentos térmicos superficiais. (COLPAERT, 2008)

Para análise da composição química e microestrutura de um grampo do tipo e-clip, Ali et al. (2020) obtiveram amostras por meio de corte transversal utilizando fresa metalográfica equipada com lâmina de diamante. O corte foi realizado na região do arco posterior que ficava a aproximadamente 30 mm da área da fratura para garantir que a superfície da fratura não fosse afetada pela possível causa do corte. Em seguida, a amostra foi polida e condicionada com solução contendo 2 mL de ácido nítrico e 98 mL de metanol, para observação em microscópio óptico e análise de composição por microscópio eletrônico de varredura equipado com aparelho de espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS).

2.2.3.4 *Análises de tensão*

O desempenho de uma análise de tensão é frequentemente uma parte crítica de uma análise de falha estrutural. Técnicas de análise de tensão são normalmente usadas para determinar o estado de tensão como resultado de carregamentos externos ou outras fontes de tensão, como transientes térmicos ou acelerações aplicadas. As técnicas de análise de tensão disponíveis incluem cálculos manuais usando teorias de resistência dos materiais, aproximações derivadas de fontes de referência, fontes e métodos derivados empiricamente e técnicas computadorizadas, como o método de análise de elementos finitos (do inglês Finite-Element Analysis - FEA).

Amplamente utilizado como ferramenta de projeto e ferramenta de investigação de análise de falhas, o método FEA pode ser aplicado a muitas áreas úteis na análise de falhas, sendo as mais comuns a análise de tensão, transferência de calor, fluxo de fluido e propriedades eletromagnéticas. A utilização da análise de elementos finitos se deve

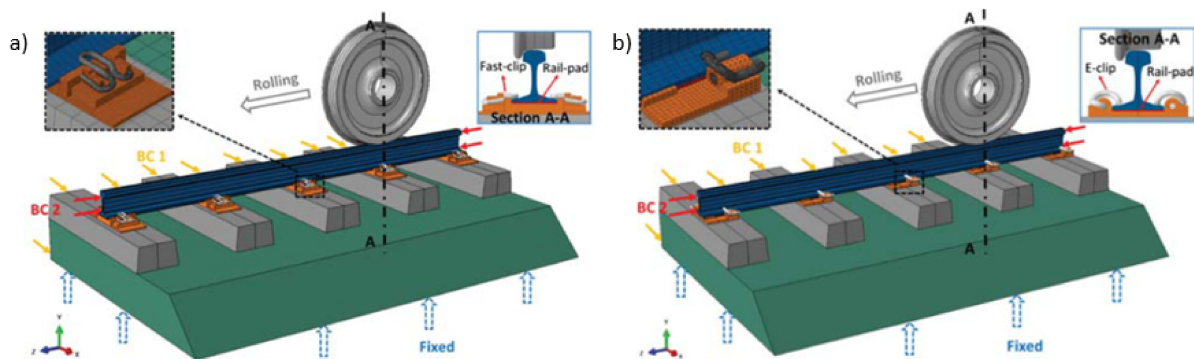
principalmente por sua capacidade de modelar condições complexas e lidar com condições transientes e não lineares que normalmente não são executadas usando cálculos manuais ou outras aproximações analíticas devido à sua complexidade. (SCUTTI; MCBRINE, 2002)

Scutti e McBrine (2002) ressaltam que na análise de falha a atenção é voltada para o local da falha. Então, para capturar concentrações de tensão ou outros efeitos localizados, utiliza-se nessa região uma malha mais fina. São aplicados carregamentos baseados no histórico de carregamentos reais associados à falha e inclusos eventos que ocorrem, mas não estão associados às considerações normais de projeto. Por fim, os resultados de um modelo de análise de falha são comparados aos critérios de falha, como resistência ao cisalhamento, resistência ao escoamento e assim por diante, ou deformação real observada do componente.

O método FEA foi utilizado por Liu et al (2020) para fazer uma análise multiaxial de falha por fadiga em grampos de fixação ferroviários do tipo e-clip e *fastclip*. Os autores desenvolveram experimentos de carga de fadiga em grampos *fastclip* para determinar a relação deformação-vida com base nos critérios de von Mises, Tresca e máxima deformação principal.

Para prever a vida em fadiga desses dois tipos de grampos de fixação, foi empregado por Liu et al. (2020) o critério Fatemi-Socie aplicado em modelos implícitos e explícitos de elementos finitos de estruturas de via (Figura 12) submetidas a carga operacional induzida por trens e estados de tensão e deformação do grampo.

Figura 12 – Modelos geométricos da estrutura da via utilizando em a) grampos *fastclip* e b) grampos e-clip.



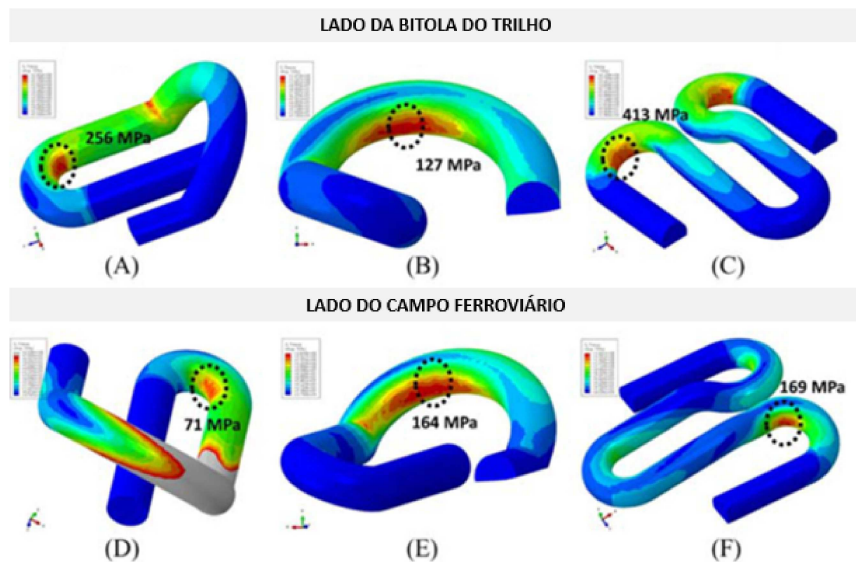
Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020).

Foram extraídos da simulação feita por Liu et al. (2020) os históricos de tensões e deformações nos grampos e processados para análise de fadiga multiaxial com base no critério de fadiga chamado Fatemi-Socie. Isso permitiu encontrar a amplitude máxima de

tensão de cisalhamento e as tensões normais máximas perpendiculares ao plano crítico, possibilitando o cálculo do dano por fadiga para os grampos de fixação de trilhos.

A Figura 13 mostra as simulações feitas nos grampos a fim de obter as tensões máximas utilizando o critério de Tresca.

Figura 13 – Tensões máximas obtidas através de simulação utilizando o critério de Tresca



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020).

Hong et al. (2018) também utilizaram o método FEA para avaliar o desempenho e prever a vida em fadiga de grampos de fixação do tipo e-clip sob carregamento cíclico. Dessa forma, foi possível perceber que a parte interna do arco traseiro do grampo de fixação do tipo e-clip tem a menor vida à fadiga, o que já era esperado devido as observações de campo. Com essa análise, os pesquisadores perceberam também que a profundidade de inserção do arco traseiro do grampo no ombro fundido e a deflexão do grampo são dois dos parâmetros mais importantes para a vida em fadiga.

2.2.3.5 Mecânica da fratura

De acordo com Scutti e McBrine (2002), Gross e Lampman (1996) e Reed-Hill (1982), a mecânica da fratura foi uma disciplina desenvolvida a partir da necessidade de se fabricar estruturas duráveis, prolongando a vida útil do produto. A princípio essa disciplina buscava entender as relações entre imperfeições semelhantes a trincas, tensões e tolerância a trincas. Porém, conforme o contínuo desenvolvimento de tal campo do conhecimento, a utilidade da mecânica da fratura na análise de falha foi reconhecida e a técnica passou a ser utilizada.

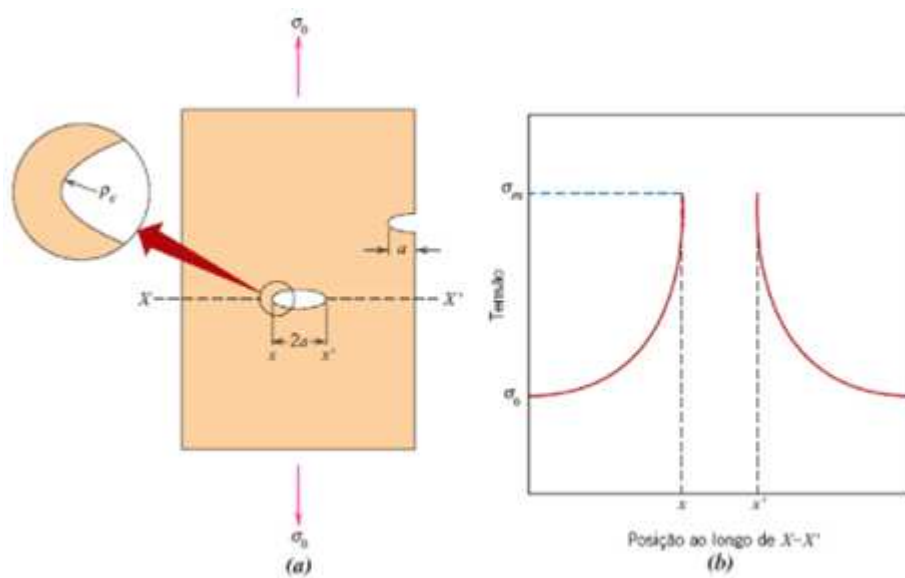
Para Callister (2016), a mecânica da fratura permite quantificar as relações entre as propriedades dos materiais, o nível de tensão, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trincas. Dessa forma, de acordo com Scutti e McBrine (2002), é possível obter uma estimativa das cargas e/ou tensões que atuaram no momento da fratura ou para determinar que o material de fato não tinha as propriedades assumidas.

Extremo cuidado deve ser tomado ao realizar tal análise mecânica da fratura, uma vez que existem incertezas na análise da falha e nas soluções do fator de intensidade de tensão do componente com falha. Os resultados da análise de tensão e da análise mecânica da fratura devem ser consistentes com as informações fractográficas em macro e microescala e com as informações microestruturais. (SCUTTI; MCBRINE, 2002; GROSS; LAMPMAN, 1996; REED-HILL, 1982)

A resistência à fratura teórica de um material, que é obtida por meio de cálculos baseados nas energias das ligações atômicas, costuma ser significativamente maior do que a medida para a maioria dos materiais. A presença de defeitos ou trincas microscópicas presentes no material é o que gera essa diferença entre a resistência à fratura teórica e a real. Esses defeitos atuam como amplificadores de tensão sendo que a magnitude da amplificação depende da orientação e geometria da trinca. Tal fenômeno é demonstrado na Figura 14, que apresenta um perfil de tensões ao longo de uma seção transversal (X – X') que contém uma trinca interna. Esse perfil mostra que quanto mais afastado da extremidade da trinca, mais essa tensão localizada reduz e se aproxima da tensão nominal σ_0 , ou seja, a carga aplicada dividida pela área da seção transversal da amostra (perpendicular a essa carga). Esses defeitos são algumas vezes chamados concentradores de tensões, visto que têm a capacidade de amplificar uma tensão aplicada em suas posições. (CALLISTER, 2016)

A utilidade da mecânica da fratura como ferramenta para análise de falhas continua a se desenvolver. Um dos objetivos é conseguir a capacidade de reconstruir o tamanho e a taxa de crescimento da fissura ao longo do tempo e considerar questões como: intervalo adequado de inspeção, se durante uma inspeção uma rachadura detectável foi perdida, se alguma operação de manutenção contribuiu de alguma forma para a rachadura, se a fissuração se deu por mudança nas condições de serviço ou parâmetros operacionais, entre outras. (SCUTTI; MCBRINE, 2002; GROSS; LAMPMAN, 1996; REED-HILL, 1982)

Figura 14 – (a) A geometria de trincas superficiais e internas. (b) Perfil de tensões esquemático ao longo da linha X-X' em (a), demonstrando a amplificação da tensão nas extremidades da trinca.



Fonte: Callister (2016).

3 FRACTOGRAFIA

De acordo com González-Velázquez (2018), a fractografia é o estudo de superfícies fraturadas com o objetivo de conhecer suas características topográficas, identificar os tipos de fratura, entender o que causa a fratura e, eventualmente, determinar seus mecanismos. Hoje em dia, é uma ferramenta muito útil na ciência e engenharia de materiais, bem como na análise de falhas. Conhecendo os mecanismos de fratura, podemos identificar, para um determinado material, as características que aumentam sua resistência à fratura, de forma que materiais mais resistentes possam ser projetados, enquanto na análise de falha, podemos fazer a determinação essencial da causa do fracasso.

Para o estudo da fractografia, é necessário ter uma definição técnica do que é uma fratura para diferenciá-la de outras superfícies. Segundo González-Velázquez (2018), fratura é o processo de separação ou fragmentação de um corpo sólido sob a ação de cargas ou tensões, criando assim novas superfícies, que são denominadas de “superfície fraturada”. Com base nessa definição, fica claro que o termo “fratura” sempre envolverá pelo menos duas novas superfícies, que são objetos de estudo dentro da fractografia. Além disso, uma fratura é o resultado da ação de cargas ou tensões, portanto, faz parte do campo do comportamento mecânico. Existem várias maneiras de separar um material sólido em pedaços para criar novas superfícies, como corte à chama, erosão, dissolução química, etc., mas como não envolvem a ação direta de tensões, não são consideradas fraturas.

Na visão de Rezende (2007), a fractografia é uma ferramenta fundamental para se determinar a sequência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar qual o estado de tensões atuantes no momento em que a falha ocorreu. Esta ciência possibilita também a análise de outros fatores que podem contribuir para o início, crescimento e término da fratura, como condições ambientais, defeitos do material e outras anomalias.

Algumas técnicas geralmente adotadas na fractografia são: observação visual, macroscopia óptica, seguida da microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e, em alguns casos, microscopia eletrônica de transmissão. Durante a observação é fundamental considerar todas as informações que possam ajudar a determinar as causas da falha, além de identificar e documentar a morfologia da falha. Para isso deve-se classificar o tipo de falha, fazer o mapeamento da trinca e fazer a análise química da superfície da fratura. (REZENDE, 2007)

3.1 HISTÓRICO DA FRACTOGRAFIA

De acordo com Parrington (2002), a fractografia é sem dúvida a ferramenta mais valiosa disponível para o analista de falha e tem sido usada há séculos como parte do

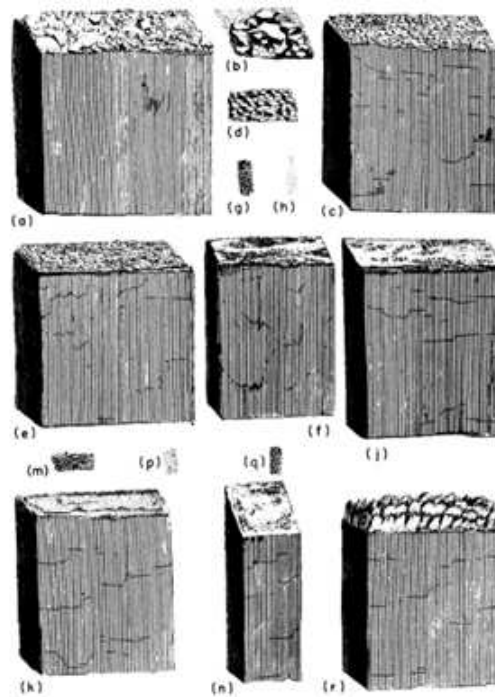
campo da metalurgia. Fractografia é o termo cunhado em 1944 para descrever a ciência que busca analisar as características da fratura e tentar relacionar a topografia da superfície da fratura com as causas e/ou mecanismos básicos da fratura.

Na Idade da Pedra o homem já possuía um conhecimento prático sobre fratura. Descobertas arqueológicas de implementos líticos, armas e ferramentas moldadas de pedra por fratura controlada indicam que o homem pré-histórico sabia como selecionar rochas com comportamento de fratura favorável, usar fragmentação térmica para separar rocha do núcleo de trabalho e modelar pedra por descamação de pressão. (PARRINGTON, 2002)

Segundo Parrington (2002), a fractografia, como a conhecemos hoje, desenvolveu-se no século XVI como uma prática de controle de qualidade empregada na usinagem de metais ferrosos e não ferrosos. De La Pirotechnia, publicado por Vannoccio Biringuccio em 1540, é um dos primeiros documentos a detalhar técnicas fractográficas.

Ainda segundo o autor, a invenção do microscópio óptico em 1600 forneceu uma nova ferramenta significativa para a fractografia, porém não foi usada extensivamente pelos metalúrgicos até o século XVIII. Em 1722, R.A. de Réaumur publicou um livro com gravuras que retratavam superfícies de fratura macroscópica e microscópica de ferro e aço. Curiosamente, as categorias de características macroscópicas desenvolvidas por de Réaumur permaneceram essencialmente inalteradas ao longo dos séculos e estão representadas na Figura 15.

Figura 15 – Esboços de Réaumur das sete categorias de aparência de fratura em ferro e aço



Fonte: ASM Handbook, Vol. 12 – Fractography (1998).

O interesse pela microfractografia diminuiu durante o século XIX, em parte, devido ao desenvolvimento de técnicas metalográficas para examinar seções transversais de metais. Os metalúrgicos continuaram a usar técnicas fractográficas para fins de garantia de qualidade, mas, na maioria das vezes, pesquisadores e publicações ignoraram a fractografia. (PARRINGTON, 2002)

Vários desenvolvimentos tecnológicos no século XX revitalizaram o interesse pela fractografia. Carl A. Zapffe desenvolveu e utilizou extensivamente técnicas fractográficas para estudar a fragilização por hidrogênio de aços. Seu trabalho levou à descoberta de técnicas para fotografar superfícies de fratura em grandes ampliações. As primeiras fractografias foram publicados por Zapffe em 1943. (PARRINGTON, 2002)

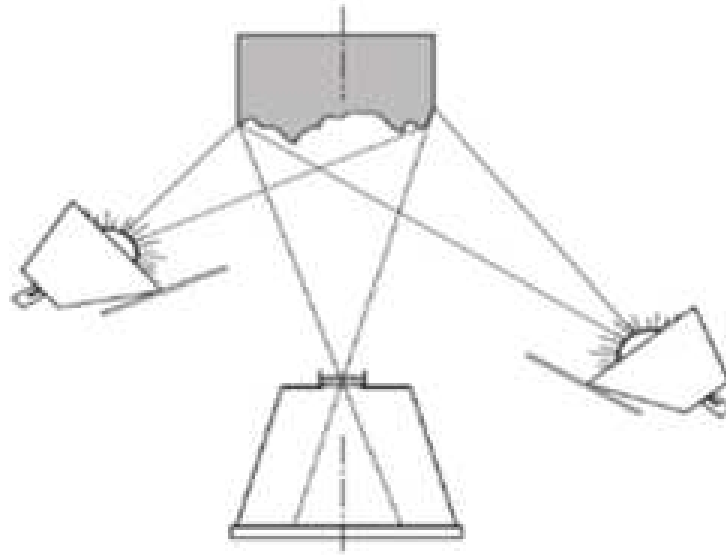
Um desenvolvimento ainda mais revolucionário foi a invenção do microscópio eletrônico de varredura (MEV). O primeiro MEV apareceu em 1943. Ao contrário do microscópio eletrônico de transmissão, que foi desenvolvido alguns anos antes, ele poderia ser usado para examinar superfície de fratura. Um MEV com uma resolução garantida de aproximadamente 500 Å tornou-se disponível comercialmente em 1965. Comparado com o microscópio óptico, o MEV expande a resolução em mais de uma ordem de magnitude e aumenta a profundidade do foco em mais de duas ordens de magnitude. (PARRINGTON, 2002)

3.2 EXAME VISUAL DA SUPERFÍCIE DE FRATURA

Um processo importante na análise de falhas é a observação da peça fraturada e sua superfície de fratura. Segundo Colpaert (2008), são necessários alguns cuidados para que se possa atingir um melhor nível de qualidade no registro de ensaios macrográficos ou fractográficos.

Quando se trata de uma superfície de fratura que possui relevos, Colpaert (2008) recomenda a montagem do sistema de iluminação conforme mostra a Figura 16. Deve ser utilizado uma fonte luminosa mais forte à esquerda do observador, posicionada um pouco acima e à frente do objeto. A segunda fonte deve ser mais fraca e deve ficar à direita do observador para reduzir o contraste produzido pela primeira fonte. Dessa forma, é possível obter um maior detalhamento nas áreas sombreadas da superfície de fratura.

Figura 16 – Sistema de iluminação recomendado para fraturas e superfícies não-planas.



Fonte: Colpaert (2008).

3.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA

Segundo Voort (1998), um objetivo primário da fractografia para análises de falha bem-sucedidas é localizar a origem da fratura. As marcações de fratura formadas durante o evento são como um roteiro que o analista usa para avaliar a fratura. O início e a propagação da fratura produzem certas marcas características na face da fratura, como marcas de rio, linhas radiais, divisas ou marcas de praia, que indicam a direção do crescimento da fissura. O analista rastreia essas características de trás para frente para encontrar a origem ou origens. O aparecimento dessas marcas na face da fratura é função do tipo de carregamento, por exemplo, tensão, cisalhamento, flexão, fadiga ou torção; a natureza do sistema de estresse; sua magnitude e orientação; a presença de concentradores de tensão; fatores ambientais e fatores materiais. Essas análises são feitas através do exame macroscópico das superfícies de fratura.

De acordo com McDanel (2002), a análise macrográfica pode ser realizada em ampliações de 1 a 50 ou aumento de 100x. Tal observação pode ser conduzida a olho nu, com uma lente de mão ou lupa, um microscópio estereoscópico de baixa potência ou um MEV. A fotografia macroscópica com ampliação de até 20x requer uma câmera de alta qualidade e lentes especiais; como alternativa, uma grande lente de aumento pode ser usada para ampliar uma área específica da foto, como uma trinca ou outro pequeno detalhe. Um microscópio metalográfico com foco macro e luzes pode ser usado para ampliações um pouco maiores. No entanto, a profundidade de campo torna-se extremamente limitada com a ótica de luz.

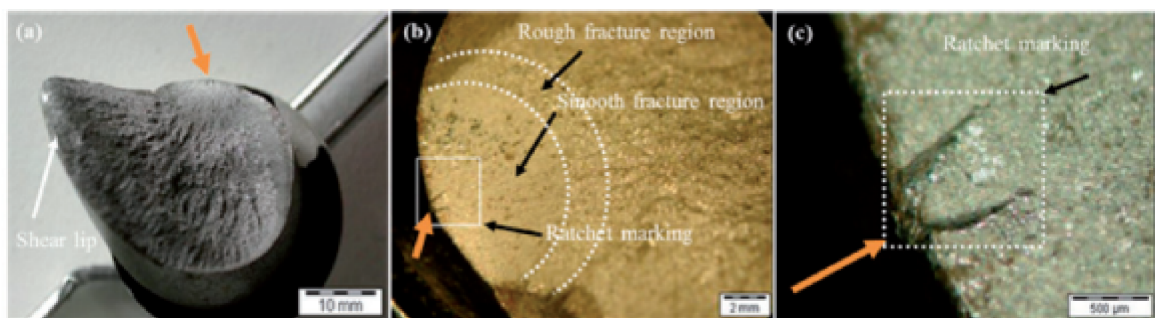
Para uma profundidade de campo muito maior, um MEV pode ser usado para fotografia de baixa ampliação, bem como para trabalhos de ampliação mais alta. Fotografias estéreo ou tridimensionais também podem ser feitas para revelar as características topográficas de uma fratura ou outra superfície. (MCDANELS, 2002)

Em sua pesquisa, Ali et al. (2020) utilizou uma câmera Olympus, um estereomicroscópio óptico Nikon SMZ800N e um MEV Philips XL-30 LaB para realizar a análise macrográfica.

A partir das imagens mostradas na Figura 17, em uma fratura de grampo do tipo e-clip, foi identificado por Ali et al. (2020) a região de início da trinca (Figura 17a) que possui aspecto mais liso com um tom de cinza mais claro, seguida por uma zona de fratura mais rápida com aparência brilhante. O lábio de cisalhamento é o modo de final da fratura, que geralmente ocorre sob carregamentos combinados. Tais carregamentos são geralmente esperados no grampo e-clip durante o serviço.

A região de fratura lisa, conforme mostrado na Figura 17b, tem forma semi-elíptica (marrom claro) e anéis concêntricos, representando características típicas de falha por fadiga. As duas trincas mostradas na Figura 17c são iniciadas a partir da superfície e se estendem por até 500 mm, podendo, em um estágio posterior, causar falha catastrófica. Essas trincas também têm morfologia semelhante às marcações da catraca, que fornecem informações sobre o caminho de crescimento da trinca durante a falha por fadiga. As marcas de catraca de superfície são características comuns do local de início da fadiga e geralmente aparecem em regiões de tensão altamente localizadas.

Figura 17 – Morfologia da superfície da fratura: (a) superfície total da fratura; (b) superfície de propagação da fratura e (c) origem das trincas que estão causando a fratura em maior ampliação



Fonte: Adaptado de Ali et al. (2020).

3.4 ANÁLISE MICROGRÁFICA

Colpaert (1951) apud Costa e Silva (2008) relata que, para se observar, em escala microscópica, a estrutura de aços e ferros fundidos, há diversas técnicas usuais. Quando se observa a microestrutura através das seções, muitas dessas técnicas requerem preparação de amostras muito semelhantes. Algumas técnicas que são muito uteis na análise de falhas, são aquelas onde é possível observar a microestrutura da superfície praticamente sem preparação, como a microscopia eletrônica de varredura. (COSTA E SILVA, 2008)

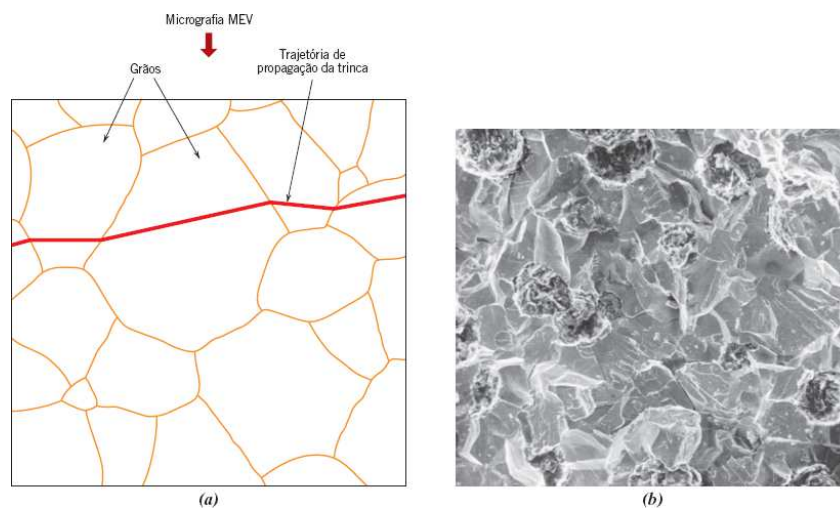
McDanel (2002) afirma que um MEV tem vantagem sobre a microscopia óptica por causa da grande profundidade de campo e ampliações muito altas que podem ser atingidas, normalmente de 5.000 a 10.000x. Além disso, os MEVs são frequentemente equipados com recursos microanalíticos, por exemplo, espectroscópios de raios-X de dispersão de energia (EDS), que são úteis para analisar a composição química e confirmar a química das características microestruturais que podem ser confundidas com as características da fratura.

A principal limitação da análise por MEV é o tamanho da amostra. Uma análise em MEV deve ser conduzida em vácuo para que a amostra seja colocada em uma câmara que normalmente contém uma amostra com menos de 20 cm de diâmetro. Embora existam alguns recursos de superfície de fratura que são comumente associados a modos de falha específicos, o analista de falha novato deve ser muito cuidadoso em análises fractográficas. (MCDANELS, 2002)

4 MODOS DE FRATURA

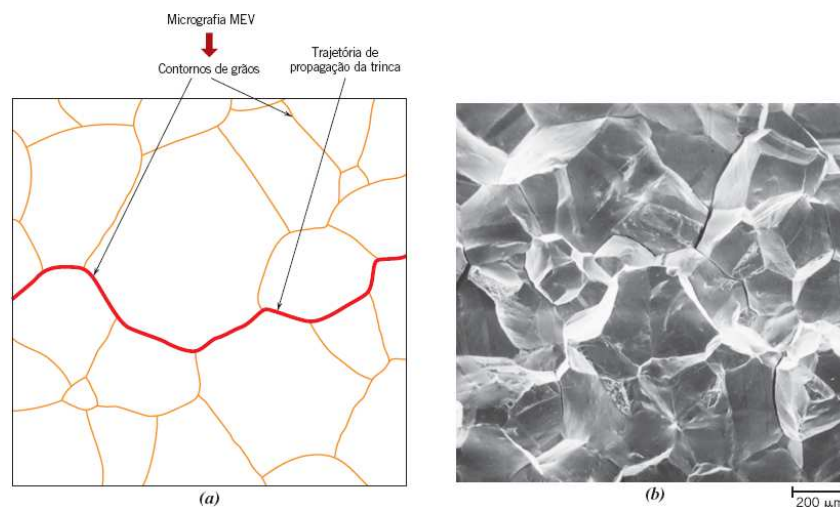
De acordo com Kerlins e Phillips (1998), a fratura em ligas metálicas pode ocorrer de duas formas: transgranular ou intergranular. A fratura transgranular (Figura 18) é aquela que ocorre devido à propagação da trinca através dos grãos. Já a fratura intergranular (Figura 19) está relacionada à trinca que se propaga ao longo dos contornos de grãos.

Figura 18 – (a) Perfil esquemático de uma seção transversal mostrando a propagação de uma trinca através do interior dos grãos em uma fratura transgranular. (b) Fractografia eletrônica de varredura de um ferro fundido nodular mostrando uma superfície de fratura transgranular.



Fonte: Callister (2016).

Figura 19 – (a) Perfil esquemático de uma seção transversal mostrando a propagação de uma trinca ao longo dos contornos de grão em uma fratura intergranular. (b) Fractografia eletrônica de varredura mostrando uma superfície de fratura intergranular.



Fonte: Callister (2016).

Porém, segundo os autores citados, independente do caminho da fratura, há essencialmente quatro modos de fratura principais: (1) ruptura por microvazios/microcavidades (dimples), (2) separação entre planos cristalinos (clivagem), (3) ruptura por decoesão entre grãos e (4) fadiga (trincas que se propagam após microfratura plástica na sua ponta). Cada um desses modos tem uma aparência de superfície de fratura característica e um mecanismo ou mecanismos pelos quais a fratura se propaga.

Neste capítulo serão mostradas as características da superfície de fratura e alguns dos mecanismos associados aos modos de fratura. A maioria dos mecanismos propostos para explicar os vários modos de fratura são frequentemente baseados em interações de deslocamento, envolvendo deslizamento complexo e relações cristalográficas. A discussão dos mecanismos nesta seção apresentará os mecanismos em termos mais gerais, a fim de transmitir uma compreensão prática, bem como a capacidade de identificar os modos básicos de fratura corretamente. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

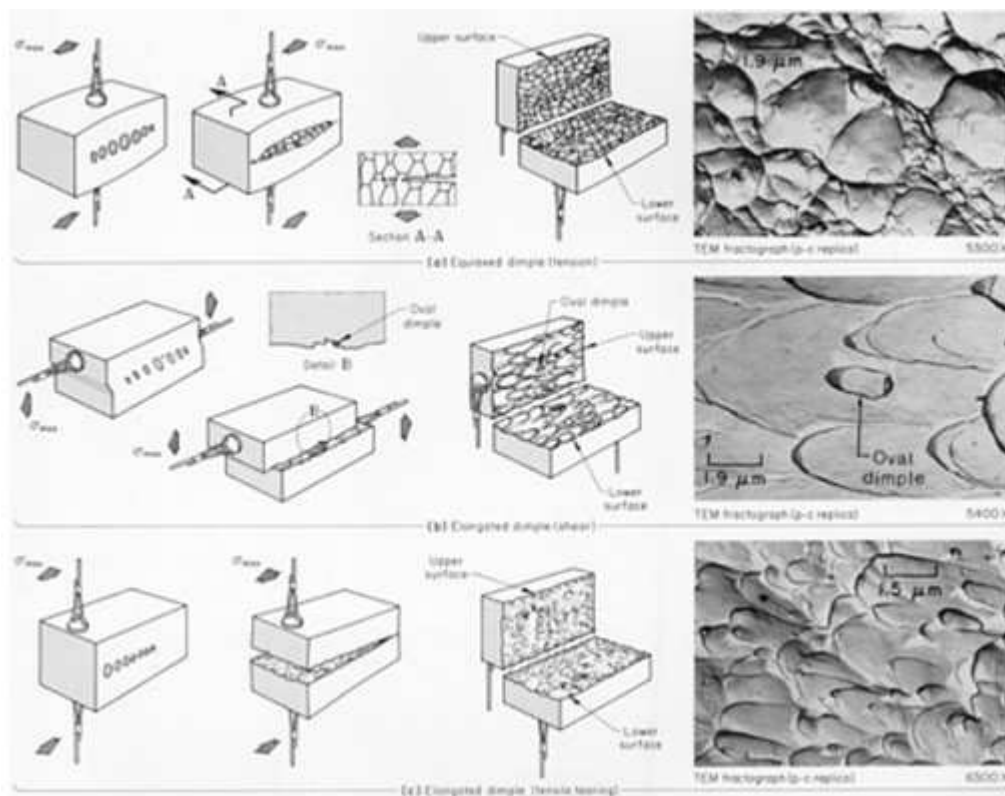
4.1 RUPTURA POR MICROVAZIOS (*DIMPLES*)

Quando a sobrecarga é a principal causa da fratura, as ligas estruturais mais comuns falham por um processo conhecido como coalescência de microvazios, denominados também como dimples ou alvéolos. Pequenas cavidades (ou “microvazios”) são nucleados em regiões de descontinuidade de tensão localizada, como aquela associada a partículas de segunda fase, inclusões, contornos de grão e acúmulo de deslocamento. Conforme a deformação no material aumenta, essas pequenas cavidades crescem, se unem e, eventualmente, formam uma superfície de fratura contínua (Figura 20). Este tipo de fratura exhibe numerosas depressões em forma de cúpula que são o resultado direto da união das microcavidades. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

Segundo o estudo realizado por Kerlins e Phillips (1998), o tamanho da microcavidade em uma superfície de fratura está diretamente relacionado ao número e distribuição de microvazios que são nucleados. Quando os locais de nucleação são poucos e amplamente espaçados, os microvazios crescem até um tamanho grande antes de coalescer e o resultado é uma superfície de fratura que contém grandes cavidades. Pequenas cavidades são formadas quando numerosos locais de nucleação são ativados e microvazios adjacentes se unem (coalescem) antes de terem a oportunidade de crescer para um tamanho maior.

A distribuição dos locais de nucleação dos microvazios pode influenciar significativamente a aparência da superfície de fratura. Uma superfície de fratura que exhibe vários tamanhos de microvazios (Figura 21) é originada quando, em algumas ligas, a distribuição de partículas de segunda fase ou inclusões é não uniforme, e a nucleação e crescimento de microvazios isolados acontece no início do ciclo de carregamento. Quando os microvazios

Figura 20 – Influência da direção da tensão máxima na forma das microcavidades. (a) Na tração, microcavidades equiaxiais são formadas em ambas as superfícies de fratura. (b) No cisalhamento, microcavidades alongadas apontam em direções opostas nas superfícies de fratura correspondentes. (c) No rasgo por tração, microcavidades alongadas apontam para a origem da fratura em superfícies de fratura correspondentes

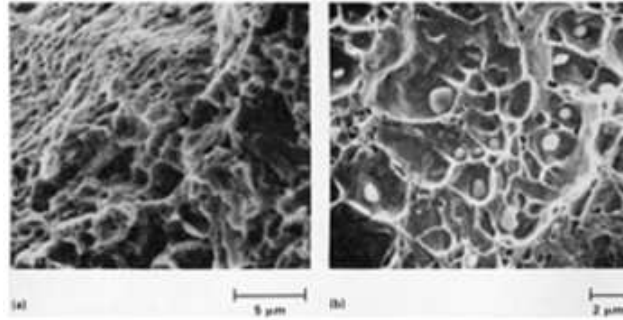


Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

são nucleados nos contornos dos grãos (Figura 22), ocorre a ruptura por microvazios intergranular. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

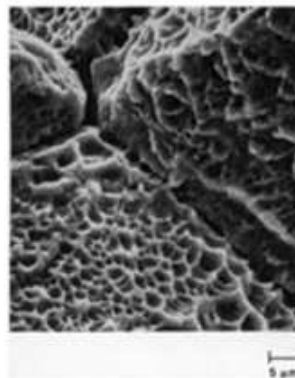
A forma ondulada caracterizada pela união dos microvazios é controlada pelo estado de tensão dentro do material. A fratura sob condições de carga de tração uniaxial (Figura 20a) resulta na formação de microcavidades essencialmente equiaxiais delimitadas por um lábio ou borda (Figura 22 e Figura 23a). Dependendo da microestrutura e da plasticidade do material, as cavidades podem exibir uma forma cônica muito profunda (Figura 23a) ou podem ser bem rasas (Figura 23b). A formação de microcavidades rasas pode envolver a junção de microvazios por cisalhamento ao longo das faixas de deslizamento. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

Figura 21 – Exemplos do modo de fratura de ruptura por microvazios. (a) Microvazios grandes e pequenos na superfície de fratura de um disco de serra de aço ferramenta temperado. Os microvazios extremamente pequenos no canto superior esquerdo são nucleados por numerosas partículas bem espaçadas. (b) Grandes e pequenas inclusões de sulfeto no aço que servem como locais de nucleação de microvazios



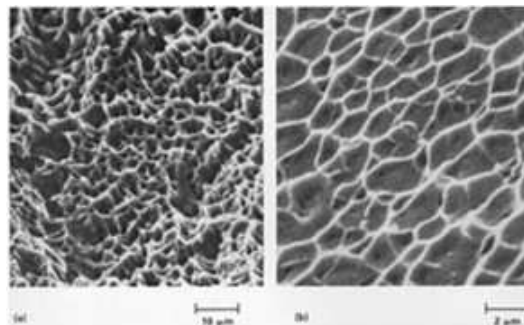
Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

Figura 22 – Ruptura intergranular por microvazios em uma amostra de aço resultante do coalescimento de microvazios nos contornos dos grãos.



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

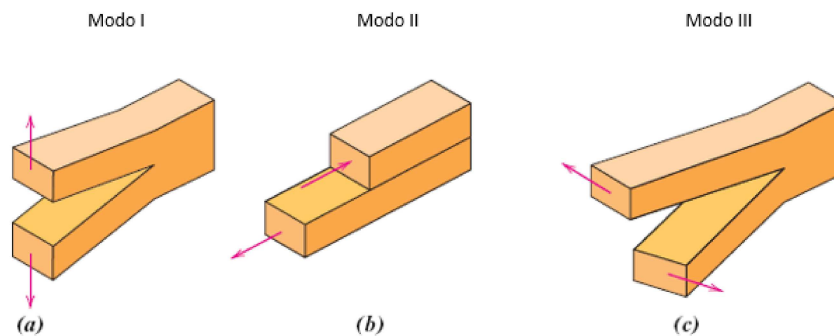
Figura 23 – Diferentes tipos de ondulações (microcavidades) formadas durante a união de microvazios. (a) Microcavidades cônicas equiaxiais em uma amostra de aço de mola. (b) Microcavidades rasas em uma amostra de aço maraging



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

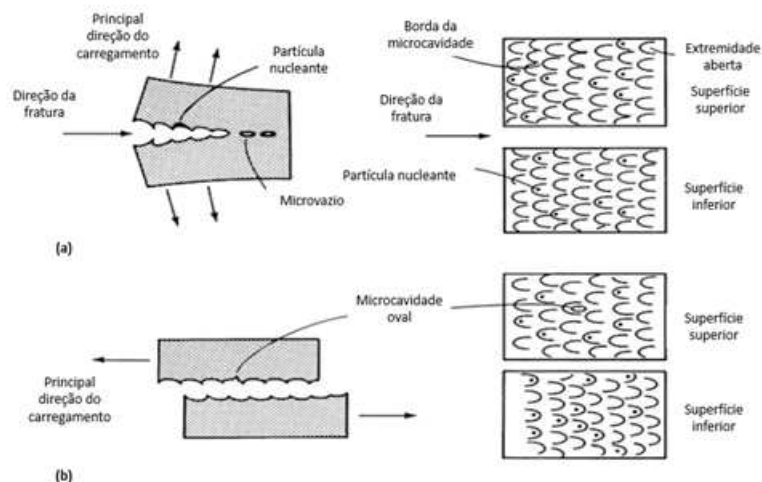
Segundo Callister (2016), as superfícies de fratura que resultam de condições de carregamento de abertura ou de tração (Modo I), cisalhamento (Modo II) e de rasgo (Modo III) (Figura 24) exibem microcavidades alongadas. De acordo com Kerlins e Phillips (1998), as características de uma microcavidade alongada são que ela é, como o nome indica, alongada (um eixo da microcavidade é mais longo que o outro) e que uma das extremidades da microcavidade é aberta; ou seja, a microcavidade não é completamente circundada por uma borda. No caso de uma fratura por rasgo de tração (Figura 25a), as microcavidades alongadas em ambas as faces da fratura são orientadas na mesma direção; e as extremidades fechadas apontam para a origem da fratura. Uma fratura de cisalhamento, no entanto, exibe microcavidades alongadas que apontam em direções opostas nas faces de fratura correspondentes (Figura 25b).

Figura 24 – Os três modos de deslocamento da superfície de uma trinca. (a) Modo I, modo de abertura ou de tração; (b) modo II, modo de cisalhamento; e (c) modo III, modo de rasgamento



Fonte: Adaptado de Callister (2016).

Figura 25 – Formação de microcavidades alongadas sob condições de rasgo e cisalhamento. (a) Fratura por rasgo. (b) Fratura por cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Kerlins e Phillips (1998).

Kerlins e Phillips (1998) apontam que, na prática, microcavidades correspondentes em faces de fratura coincidentes raramente têm o mesmo tamanho ou raramente apresentam correspondência angular equivalente. Como as fraturas reais raramente ocorrem por pura tensão ou cisalhamento, as várias combinações dos modos de carregamento I, II e III, bem como a mudança constante na orientação do plano local da fratura conforme a trinca se propaga, resultam em uma deformação assimétrica da junção das superfícies de fratura.

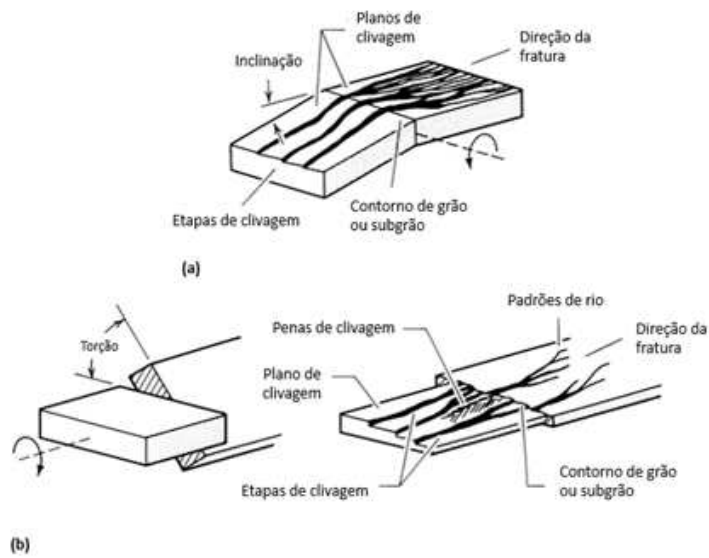
4.2 CLIVAGEM - SEPARAÇÃO ENTRES PLANOS CRISTALINOS

Segundo Callister (2016), a clivagem é uma fratura onde a trinca se propaga a partir de uma ruptura sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo de planos cristalográficos específicos, conhecidos como planos de clivagem. Kerlins e Phillips (1998) ressaltam que, teoricamente, uma fratura de clivagem deve ter faces perfeitamente correspondentes e deve ser completamente plana e sem características. Porém, esse tipo de clivagem é raramente observado, pois as ligas metálicas são policristalinas e contêm contornos de grãos e subgrãos, inclusões, discordâncias e outras imperfeições que afetam a propagação de uma fratura de clivagem. Essas imperfeições e mudanças na orientação da rede cristalina produzem diferentes características de superfície de fratura de clivagem, como etapas de clivagem, padrões de rio, marcas de pena, fratura estriada (espinha de peixe) e línguas.

O esquema apresentado na Figura 26 mostra que as fraturas de clivagem frequentemente iniciam em muitos planos de clivagem paralelos. Porém, à medida que a fratura avança, o número de planos ativos diminui por um processo de união que forma etapas de clivagem progressivamente maiores. Essa rede de etapas de clivagem se une na direção da propagação da trinca por meio de ramos conhecidos como padrões de rio. Essas marcações podem ser usadas para estabelecer a direção local da fratura. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

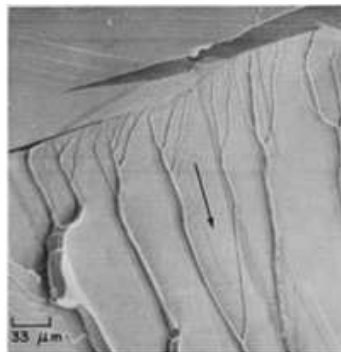
Segundo Kerlins e Phillips (1998), quando os principais planos de clivagem formam um pequeno ângulo entre si resultante de uma ligeira rotação em torno de um eixo comum paralelo à interseção, há um limite de inclinação (Figura 26a). Nesse caso, o caminho de fratura de clivagem é virtualmente ininterrupto e os planos e etapas de clivagem se propagam através do limite. No entanto, um limite de torção é resultante quando os planos de clivagem principais são rotacionados em torno de um eixo perpendicular ao limite (Figura 26b). Observando uma fratura de clivagem que se propaga através de um limite de torção, percebe-se que as etapas de clivagem não se cruzam, mas novas etapas são iniciadas no limite. Entretanto, a maioria dos limites, em vez de ser simples inclinação ou torção, são uma combinação dos dois tipos (limites inclinação-torção). As figuras 27 e 28 apresentam, respectivamente, limites de torção e inclinação de uma fratura por clivagem.

Figura 26 – Esquema da formação da fratura de clivagem mostrando o efeito dos contornos de grãos. (a) Limite de inclinação. (b) Limite de torção



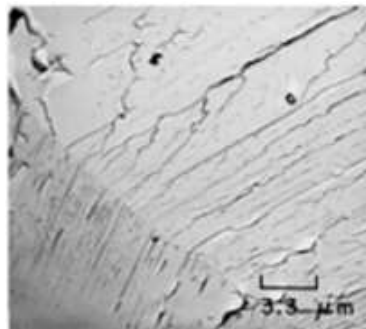
Fonte: Adaptado de Kerlins e Phillips (1998).

Figura 27 – Fratura de clivagem em liga Fe-0,01C- 0,24Mn-0,02Si que foi fraturada por impacto mostrando limite de torção, etapas de clivagem e padrões de rio.



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

Figura 28 – Fratura de clivagem em ferro Armco mostrando um limite de inclinação, etapas de clivagem e padrões de rio.

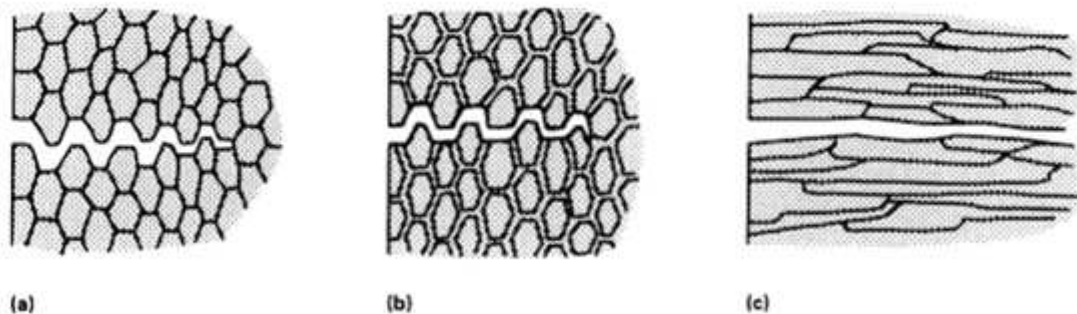


Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

4.3 RUPTURA POR DECOESÃO ENTRE OS GRÃOS

Para Kerlins e Phillips (1998), uma fratura é referida como ruptura por decoesão entre os grãos quando exibe pouca ou nenhuma deformação plástica em massa e não ocorre por ruptura de microvazios, clivagem ou fadiga. Esse tipo de fratura geralmente resulta de um ambiente reativo ou de uma microestrutura única e está associado quase exclusivamente à ruptura ao longo dos limites de grão. Segundo os autores, os limites dos grãos contêm os constituintes do ponto de fusão mais baixo de um processo de liga. São considerados também caminhos fáceis para difusão e locais para a segregação de elementos como hidrogênio, enxofre, fósforo, antimônio, arsênio e carbono; os íons haletos, como cloretos; bem como as rotas de penetração dos metais de baixo ponto de fusão, como gálio, mercúrio, cádmio e estanho. A presença desses constituintes nos limites pode reduzir significativamente a resistência coesiva do material nos limites e promover a ruptura por decoesão (Figura 29).

Figura 29 – Esquema ilustrando a ruptura por decoesão ao longo dos limites dos grãos. (a) Decoesão ao longo dos limites dos grãos de grãos equiaxiais. (b) Decoesão através de uma fase de limite de grão fraca. (c) Decoesão ao longo dos limites de grãos alongados.



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

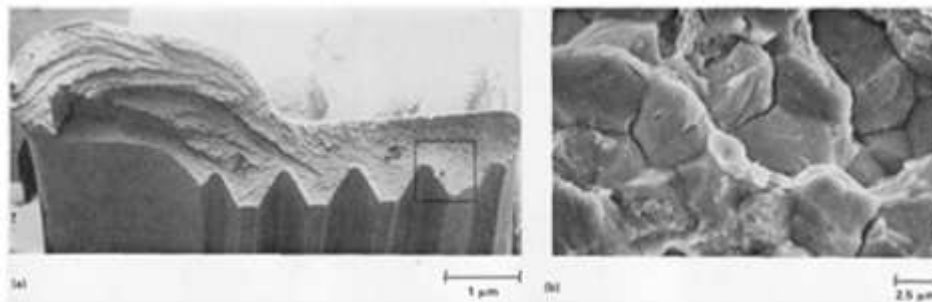
A ruptura por decoesão não é o resultado do processo único de fratura, mas pode ser causada por vários mecanismos diferentes. Os processos decoesivos envolvendo o enfraquecimento das ligações atômicas, a redução na energia superficial necessária para a deformação localizada, pressão molecular do gás, a ruptura de filmes protetores e a dissolução anódica em locais ativos estão associados com fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão (CST).

A fratura da membrana fraca dos limites de grãos (como aqueles resultantes da penetração de limite de grão por metais de baixo ponto de fusão), a ruptura de constituintes de limites de grãos fundidos e resolidificados (como em ligas de alumínio superaquecidas) ou a separação de material fundido nos limites antes de solidificar (como em trincas nas

zonas termicamente afetadas de soldas - ZTAs, uma condição conhecida como trinca a quente) podem produzir uma ruptura decoesiva. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

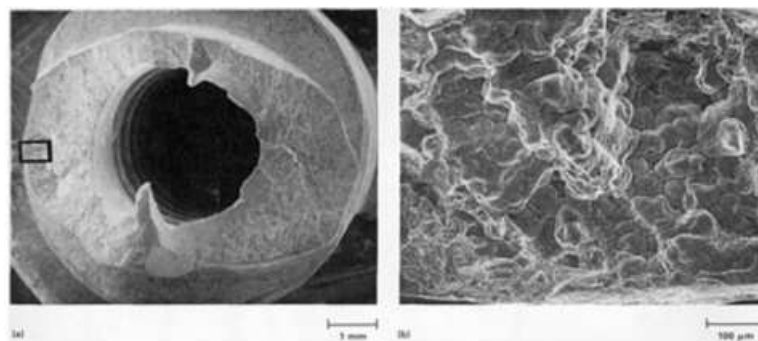
As figuras 30, 31 e 32 mostram exemplos de ruptura decoesiva. Uma ruptura decoesiva resultante de fragilização por hidrogênio é mostrada na Figura 30 e a Figura 31 mostra uma ruptura decoesiva em um aço inoxidável endurecível por precipitação devido a uma corrosão sob tensão (CST). Uma fratura ao longo de um filme de limite de grão de baixa resistência resultante da difusão de mercúrio líquido é mostrada na Figura 32. Quando uma ruptura decoesiva ocorre ao longo de grãos achatados e alongados que formam planos quase ininterruptos através do material, como em ligas extrudadas e ao longo dos planos de separação de alguns forjados, resulta uma fratura relativamente lisa e sem características (Figura 33). (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

Figura 30 – Ruptura decoesiva em porca de aço AISI 8740 devido à fragilização por hidrogênio. A falha foi devido ao cozimento inadequado após o banho de cádmio; assim, o hidrogênio, que foi coletado durante o processo de galvanização, não foi liberado. (a) Macrografia da superfície de fratura. (b) A visão de maior ampliação da área delimitada em (a) mostrando fratura intergranular típica.



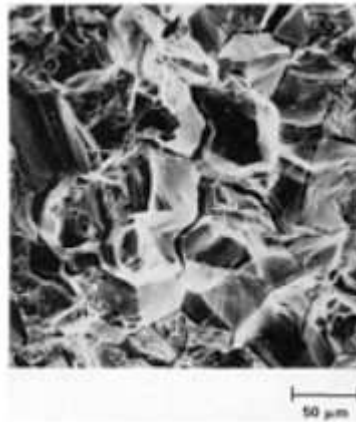
Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

Figura 31 – Garfo de deflexão do trem de pouso principal de aço inoxidável 17-4 PH que falhou devido à corrosão sob tensão intergranular. (a) Macrografia da superfície de fratura. (b) Visão em ampliação maior da área delimitada em (a), mostrando a área de ataque intergranular.



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

Figura 32 – Superfície de fratura de uma amostra de liga Monel que falhou em mercúrio líquido. A fratura é predominantemente intergranular com alguma contribuição transgranular.



Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

Figura 33 – Fratura por corrosão sob tensão que ocorreu por decoesão ao longo do plano de separação de uma liga de alumínio forjada.



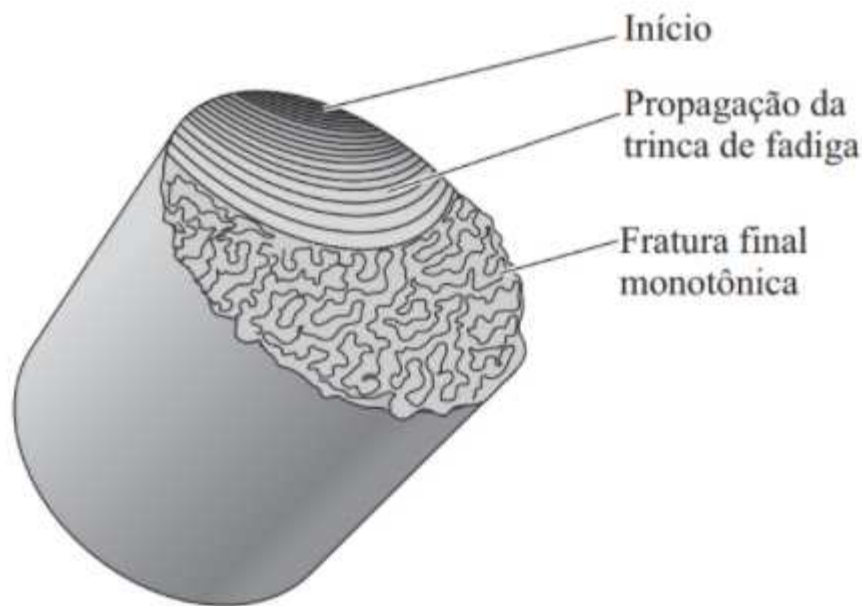
Fonte: Kerlins e Phillips (1998).

4.4 FADIGA

Kerlins e Phillips (1998) definem como fratura por fadiga aquela resultante de carregamento repetitivo ou cíclico. Callister (2016) observa que sob essas circunstâncias é possível haver falha sob um nível de tensão bastante inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática. De acordo com Askeland e Wright (2014), isso acontece, pois, apesar de a tensão total aplicada permanecer abaixo do limite de escoamento, a fratura por fadiga ocorre porque esse valor pode exceder a resistência à tração de forma local, por consequência de pontos concentradores de tensão.

Uma fratura por fadiga geralmente ocorre em três estágios, como mostrado na Figura 34: (I) início da trinca, (II) propagação da trinca e (III) fratura catastrófica. Conforme descrito por Callister (2016), as trincas associadas a falhas por fadiga quase sempre se iniciam (ou nucleiam) em algum ponto de concentração de tensões na superfície de um componente. Então, riscos superficiais, ângulos vivos, rasgos de chaveta, fios de roscas, marcas de pancada e afins, são alguns elementos que costumam atuar como locais de nucleação de trincas. Além disso, resultantes do escorregamento de discordâncias, descontinuidades superficiais microscópicas podem ser produzidas pelo carregamento cíclico, atuando também como concentradores de tensão e, portanto, como pontos para a iniciação de trincas. (DIETER, 1982)

Figura 34 – Três estágios de uma fratura por fadiga: (I) início da trinca, (II) propagação da trinca e (III) fratura final



Fonte: Askeland e Wright (2014).

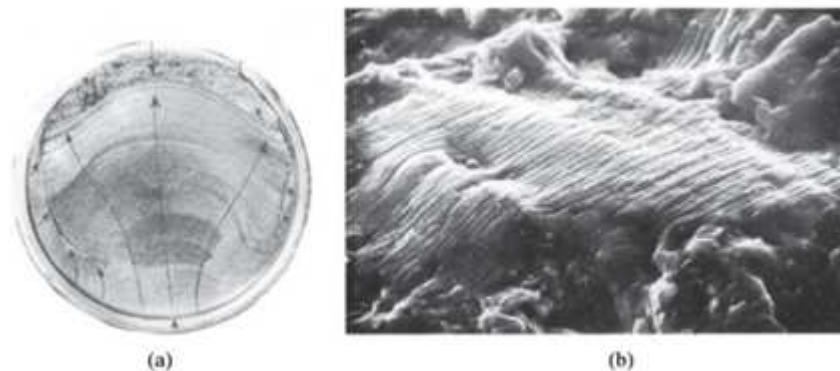
Kerlins e Phillips (1998) ressaltam que a trinca tende a seguir planos cristalográficos, mas muda de direção em descontinuidades, como contornos de grão. Segundo os autores, as trincas por fadiga podem iniciar nos limites de grão quando submetidas a grandes amplitudes de deformação plástica. No estágio I, as superfícies da fratura por fadiga são facetadas, assemelhando-se à clivagem com frequência e não exibindo estrias de fadiga. A fadiga de estágio I está presente normalmente em fraturas de baixa tensão e alto ciclo e quase sempre ausente na fadiga de alta tensão e ciclo baixo.

O segundo estágio onde pode ocorrer uma fratura por fadiga é o de propagação

da trinca. Uma vez que a trinca foi nucleada devido a pontos de concentração de tensão, inclusão ou defeito metalúrgico, começam a surgir estrias ou marcas de praia. Segundo Callister (2016), apesar de ambas serem características da superfície de fratura por fadiga que possuem aparências semelhantes, elas são, no entanto, diferentes tanto na origem quanto no tamanho, podendo haver milhares de estrias em uma única marca de praia.

De acordo com Askeland e Wright (2014), as marcas de praia se desenvolvem quando a carga varia de forma bastante irregular durante o uso do componente ou quando a carga é intermitente, permitindo tempo para a oxidação na frente de propagação da trinca. As marcas de praia podem ser observadas a olho nu devido às suas dimensões macroscópicas (Figura 35a). Já as estrias são bem menores e podem ser vistas apenas com microscópio (Figura 35b). Kerlins e Phillips (1998) constatam que, em condições normais, cada estria é o resultado de um ciclo de carga e marca a posição da frente da trinca de fadiga no momento em que o estriamento foi formado. No entanto, quando há uma diminuição repentina na carga aplicada, a trinca pode parar temporariamente de se propagar e nenhuma estria é formada. A trinca retoma a propagação somente após um certo número de ciclos a serem aplicados em uma tensão mais baixa. Acredita-se que este fenômeno de retenção de trinca seja devido à presença de um campo de tensão compressiva residual dentro da zona plástica produzida na ponta da trinca após o último ciclo de fadiga de alta tensão.

Figura 35 – Superfície de fratura por fadiga. (a) Com baixo aumento, as marcas de praia indicam a fadiga como o mecanismo de fratura. As setas indicam a direção de propagação da trinca, com a origem na parte inferior da fotografia. (b) Com grande aumento, podem-se observar as estrias que se formam durante cada ciclo do processo de fadiga (aumento original de 1.000x).



Fonte: Askeland e Wright (2014).

Geralmente a fratura por fadiga no estágio de propagação da trinca é do tipo transgranular, sendo majoritariamente influenciada pela magnitude da tensão alternada e menos pela tensão média ou microestrutura.

A essência da ausência de formação de estrias nas superfícies de fratura por fadiga de metais testados no vácuo tende a fundamentar a suposição de que a oxidação reduz a reversão do escorregamento durante o fechamento da trinca, o que resulta na formação de estrias. A falta de oxidação no vácuo rígido promove uma reversão de deslizamento mais completa, o que resulta em uma superfície de fratura por fadiga lisa e relativamente sem características. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

O último estágio de uma fratura por fadiga é o estágio III. Nesta fase ocorre a propagação terminal de uma trinca de fadiga, na qual o modo de formação de estrias é progressivamente deslocado pelos modos de fratura estática, como fratura por formação de microvazios (dimples) ou separação entre planos cristalinos (clivagem). A taxa de crescimento da trinca aumenta durante esta etapa até que a trinca por fadiga se torne instável e culminando em uma súbita fratura do material. Como a propagação da trinca é cada vez mais dominada pelos modos de fratura estática, a fadiga do neste estágio é sensível tanto à microestrutura quanto à tensão média. (KERLINS; PHILLIPS, 1998)

Callister (2016) ressalta que a causa de uma falha pode ser diagnosticada após um exame das superfícies de falha. Quando há presença de marcas de praia e/ou de estrias em uma superfície de fratura, pode-se confirmar que a causa da falha foi fadiga. Porém, a ausência de qualquer uma ou de ambas não exclui a possibilidade de fadiga. Segundo o autor, nem todos os metais que experimentam fadiga apresentam estrias e a probabilidade de se manifestarem pode depender do estado de tensões. Com a formação de produtos de corrosão de superfície e/ou películas de óxidos, fica mais difícil detectar as estrias com o passar do tempo. Além disso, à medida que superfícies de trincas opostas se esfregam umas contra as outras durante o ciclo de aplicação de tensões, pode ocorrer ação abrasiva que destruirá as estrias, eliminando este tipo de vestígio de fadiga.

Smith e Hashemi (2012) citam alguns fatores, além da composição química e presença de concentradores de tensão, que afetam a resistência à fadiga de um metal, são eles: rugosidade superficial, estado da superfície e ambiente. Os autores afirmam que quanto mais lisa for a superfície da amostra metálica, maior será sua resistência à fadiga, pois superfícies rugosas originam concentradores de tensão e, como dito anteriormente, estes facilitam a nucleação de trincas. O estudo também aponta que qualquer alteração no estado da superfície do material metálico é capaz de afetar sua resistência à fadiga, já que grande parte das fraturas por fadiga têm início aí. Então, tratamentos de endurecimento superficial do aço, como a cementação e a nitretação, ao endurecerem a superfície, aumentam a resistência à fadiga do aço. Por outro lado, a decarbonetação amacia a superfície do aço tratado termicamente e diminui a resistência à fadiga.

Uma forma de elevar a resistência à fadiga é introduzir um estado favorável de

tensões residuais de compressão na superfície do material metálico. Um exemplo de processo que atua dessa forma é o shot peening, onde pequenas esferas de metal são lançadas contra a superfície do componente, gerando tensão residual de compressão na superfície e, conseqüentemente, elevando sua resistência à fadiga. Quanto ao ambiente, se, durante a aplicação das tensões cíclicas ao material metálico, existir um ambiente corrosivo, o ataque químico acelera fortemente a velocidade com que a trinca de fadiga se propaga, gerando o que é conhecido como fadiga por corrosão. (SMITH; HASHEMI, 2012)

4.4.1 Fadiga em molas

Segundo Hayes (1996), mais da metade de todas as molas metálicas que falham em teste ou serviço o fazem por um mecanismo de fadiga. Às vezes, a trinca por fadiga é iniciada por defeitos ou trincas preexistentes, corrosão, desgaste ou dano mecânico, mas na maioria dos casos não há "falha" significativa identificada que tenha iniciado a falha.

Uma vez iniciada em consequência da tensão aplicada repetidamente, uma trinca por fadiga aumentará um pouco através da seção da mola até que a seção efetiva da mola seja reduzida e não possa mais suportar a tensão máxima aplicada, momento em que ocorrerá falha por sobrecarga. A fadiga é um mecanismo de falha provável para todos os tipos de molas (compressão, extensão, torção, trabalho de prensagem, espiral, força constante, disco, etc.), bem como para todos os tamanhos de mola (ocorre fadiga em molas feitas de materiais de 0,1 mm de espessura até 80 mm de diâmetro). (HAYES, 1996)

As molas são invariavelmente fabricadas com materiais de alta resistência, dos quais os mais importantes são aços carbono, aço de baixa liga, aços inoxidáveis e ligas de níquel, cobalto, cobre e titânio. Apesar de sua alta resistência, todos esses materiais são suscetíveis a falhas por fadiga. (HAYES, 1996)

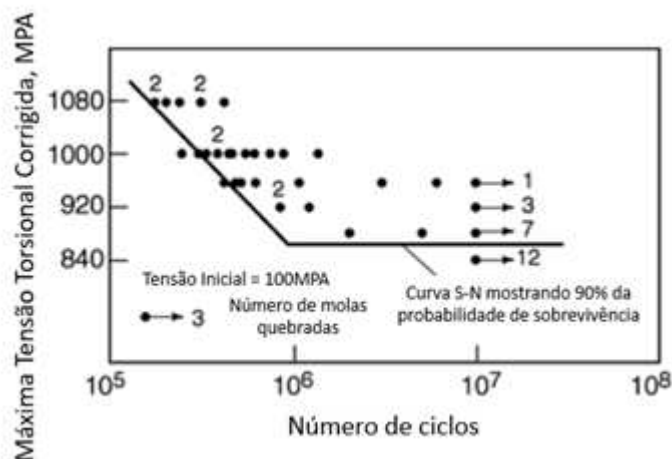
4.4.1.1 Mecanismos de fadiga em molas

De acordo com Hayes (1996), mais de 95% de todas as falhas por fadiga da mola começam na superfície, e as superfícies de alta integridade (ou seja, aquelas com poucos danos em sua superfície após o processo de usinagem) são melhores para resistir ao início da trinca por fadiga. A importância do início da trinca fica clara quando as seguintes observações são consideradas em relação ao teste de fadiga de molas:

- Mesmo que um longo comprimento de material seja exposto à tensão máxima na carga cíclica, as molas falham em uma posição
- Quando molas com falha são examinadas metalograficamente, é raro encontrar qualquer evidência de trinca de fadiga longe da fratura em si.

- Quando um grande número de molas é testado sobre uma faixa de tensão dada, a dispersão em ciclos para a falha é muito ampla, conforme mostrado no gráfico da Figura 36. Não é raro que algumas molas sobrevivem a 10 milhões de ciclos quando outras molas do mesmo lote, testadas ao mesmo tempo, falham em 400.000 ciclos.

Figura 36 – Dispersão na vida em fadiga para arame de mola de aço carbono atirado (ASTM A227). A curva aqui fornece os resultados de 55 testes de fadiga realizados em molas submetidas a shot peening.



Fonte: Adaptado de Hayes (1996).

Em geral a iniciação da trinca é muito pequena para ser vista durante o exame metalográfico, mas uma vez que a propagação começa, ela ocorre de forma relativamente rápida e normalmente antes que outras trincas no processo de iniciação comecem a se propagar. (HAYES, 1996)

Segundo Hayes (1996), o resultado da variabilidade e da influência da iniciação para a primeira pequena trinca é a dispersão. Por essa razão, os dados de fadiga da mola são tratados de maneira estatística. Além disso, a falha de uma mola metálica por um mecanismo de fadiga é quase sempre repentina e catastrófica, ocorrendo sem aviso de falha iminente. Em um minuto a mola está funcionando de maneira totalmente satisfatória e está dividida em duas partes no minuto seguinte. Também não há métodos não destrutivos ou outros métodos disponíveis para prever falhas iminentes.

O mecanismo de iniciação de trinca é tipicamente investigado pelo exame das superfícies de fratura resultantes. No entanto, para a maioria das molas com qualidade de superfície de alta integridade e uma posição claramente definida de tensão máxima, a falha é geralmente iniciada nessa posição. (HAYES, 1996)

Hayes (1996) afirma que a tensão residual é uma variável chave que influencia a resistência à fadiga. Tal tensão é gerada durante a fabricação da mola e, portanto, o limite

de tensão para a propagação da trinca por fadiga será alcançado com tensões aplicadas muito mais baixas quando tensões de tração residuais estão presentes. Quando tensões residuais compressivas estão presentes, a tensão aplicada necessária para atingir o limite de tensão para o crescimento da trinca por fadiga terá que ser alta para anular a tensão compressiva residual. Além disso, a resistência à fadiga é afetada pela rugosidade da superfície (é por isso que o shot peening, em vez do jateamento, é amplamente empregado na fabricação de molas).

Ainda segundo o autor citado, a tensão residual e a rugosidade da superfície são fenômenos interrelacionados que são correlacionados, em algum grau, pela superfície e o processo. Por exemplo, o desbaste geralmente produz tensões residuais de alta tração; retificação "fina", tensões de tração mais baixas; polimento e lixamento, compressão moderada; lapidação e polimento, tensões de compressão altas (mas superficiais) e assim por diante. Na realidade, a tensão residual produzida na superfície pelos métodos de acabamento é o efeito chave na vida à fadiga, não a rugosidade da superfície em si.

O efeito da tensão residual na resistência à fadiga parece ser um fator mais potente do que a rugosidade da superfície. Assim, a tensão residual superficial é um fator predominante que afeta a vida em fadiga, desde que sejam evitadas descontinuidades superficiais brutas. (HAYES, 1996)

Se a tensão compressiva residual da superfície é aumentada, é possível que a tensão máxima aplicada ocorra abaixo da superfície. Quando essa circunstância surge (como deveria ocorrer em uma mola bem ajustada), o início da fratura por fadiga pode não ser na superfície da mola, mas pode ocorrer entre 150 e 400 μm abaixo da superfície. No entanto, para iniciar uma trinca por fadiga abaixo da superfície, é necessário que exista um aumento de tensão significativo nesta posição, e quase sempre esse aumentador de tensão é uma inclusão não metálica. Segundo observações de fraturas e uma teoria dos mecanismos de fadiga em materiais de alta resistência, essa inclusão deve ser superior a 15 μm . (HAYES, 1996)

4.4.1.2 *Fatores de desempenho*

Segundo Hayes (1996), há alguns fatores críticos que afetam o desempenho da mola em fadiga. As discussões acima resumiram brevemente os fatores de integridade de superfície, tensão aplicada, tensão residual e início de trinca abaixo da superfície. No entanto, também vale a pena listar os fatores práticos que têm uma influência direta no desempenho da mola e as circunstâncias em que a fadiga pode ocorrer.

Hayes (1996) diz que a falha por fadiga pode ocorrer após apenas 4.000 ciclos quando uma mola está sujeita a tensões de flexão muito altas perto do limite elástico

do material, mas geralmente 10.000 a 50.000 ciclos são necessários para causar a falha por fadiga. A probabilidade de falha por fadiga está relacionada a fatores materiais fundamentais (como tensão residual), mas também a cada um dos seguintes fatores de aplicação:

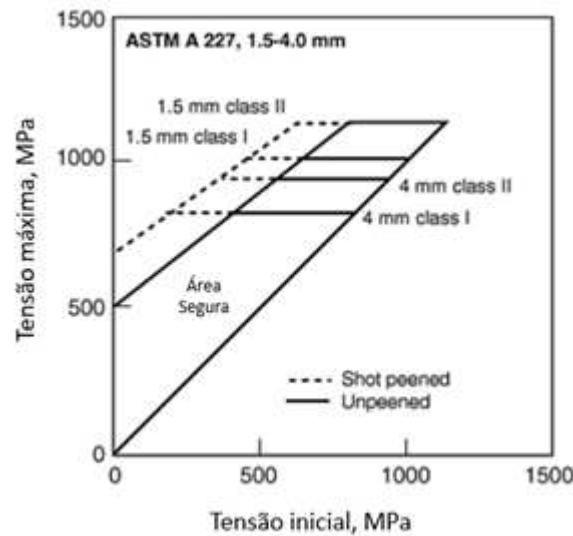
- Tipo de material da mola e força
- Condições de tensão, como tensão máxima aplicada, faixa de tensão aplicada, regime de tensão (dobramento, torção ou uma combinação) e número de ciclos na faixa de tensão máxima
- Qualidade da superfície
- Processos de fabricação de molas, tensão residual e rugosidade superficial
- Meio ambiente, corrosão e temperatura
- Taxa de aplicação de carga
- Desgaste e fretting
- Fragilização e trinca

A taxa de crescimento de trincas por fadiga é relativamente pouco preocupante, já que a chave para prevenir a falha por fadiga em molas é evitar o início de trincas. Outro fator que não é tão crítico é o impacto, pois raramente ocorre em molas a falha por impacto (mesmo em temperaturas muito baixas nas quais os materiais da mola são muito frágeis). Isso deve-se à deformação elástica das molas como consequência da carga de impacto. (HAYES, 1996)

Normalmente, as molas são fabricadas apenas com materiais de alta resistência (ou alta dureza). A resistência máxima utilizada é frequentemente determinada por considerações de conformabilidade (em molas pequenas) ou pela preocupação com o risco de falha por fragilidade.

Condições de tensão, como tensão máxima e tensão média, são fatores óbvios de fadiga. O desempenho de fadiga de molas é geralmente ilustrado por um diagrama modificado de Goodman, como o apresentado na Figura 37. O diagrama de Goodman não se aplica se a mola estiver sujeita a sobrecargas periódicas ou ocasionais. Esses diagramas não seriam aplicáveis se o regime de tensões estivesse em flexão ou se uma combinação de tensões de torção e flexão estivesse presente. Algumas molas podem operar de qualquer lado de sua posição sem carga, em que circunstâncias os benefícios a serem obtidos com o pré-tensionamento não são aplicáveis. (HAYES, 1996)

Figura 37 – Diagrama de Goodman para vida em fadiga para 10 milhões de ciclos e 95% de probabilidade de sobrevivência para a mola de aço carbono treilado



Fonte: Adaptado de Hayes (1996).

Depois que um material de mola é selecionado com base nos requisitos de resistência e ambiente, o próximo fator mais importante é a qualidade da superfície. Defeitos superficiais típicos encontrados em materiais de mola são costuras, dobras e descarbonização. A profundidade máxima desses defeitos pode ser controlada pelos produtores de matéria-prima e é limitada nas melhores especificações internacionais de materiais de mola (por exemplo, nenhum defeito permitido que exceda uma profundidade de 1% do diâmetro do arame ou $40\mu m$, o que for menor). (HAYES, 1996)

Os processos de fabricação de molas mais comuns podem ter alguma influência na tensão residual ou na rugosidade da superfície e, portanto, afetarão o desempenho da fadiga da mola. Segundo Hayes (1996), os princípios mais importantes envolvidos são:

- A conformação de uma mola envolve geralmente dobrar o arame ou fio no formato desejado. Nesse processo, o material da mola ficará curvado e, em seguida, voltará. As tensões residuais são aquelas decorrentes do retorno elástico.
- O alívio de tensões, ou tratamento térmico de baixa temperatura, após a formação da mola estabilizará o formato da mola e aliviará algumas, mas não todas, as tensões residuais introduzidas durante a moldagem. Se as molas forem temperadas e revenidas ou austemperadas após a conformação, as tensões residuais serão muito próximas de zero.
- Pré-tensionamento é um processo amplamente utilizado na indústria de molas em que a mola é defletida além de sua posição normal de trabalho, causando deliberadamente

deformação plástica do material na direção de carregamento e, portanto, induzindo um limite elástico mais alto e tensões residuais benéficas.

- Shot peening é o processo mais importante para resistência à fadiga na maioria das molas carregadas dinamicamente.
- Outros processos de engenharia de superfície que são capazes de aumentar as tensões compressivas residuais e/ou a rugosidade da superfície das molas, incluem implantação iônica, nitrocarbonetação, processamento de choque a laser, deposição física de vapor cuidadosamente controlada e eletropolimento, mas ainda esses processos são de importância comercial limitada.
- Os processos de proteção contra corrosão geralmente não têm grande influência na resistência à fadiga, mas podem causar uma pequena tensão residual de tração em uma superfície de mola e, conseqüentemente, são prejudiciais. Exemplos de tais processos são o uso de arame pré-galvanizado e molas de galvanoplastia com zinco ou outros metais.

Na visão de Hayes (1996), se uma carga for aplicada ou removida rapidamente de uma mola, a mola pode não reagir tão rápido quanto a carga é aplicada. Uma mola tem uma frequência natural que determina sua velocidade máxima de operação. Além disso, sob condições de carregamento dinâmico, uma mola, ou sistema massa-mola, pode estar sujeita à ressonância. Em qualquer uma dessas circunstâncias, a faixa de tensão real para a mola pode ser significativamente maior do que a calculada e, conseqüentemente, o desempenho de fadiga pode ser muito pior do que o esperado.

Conforme Hayes (1996), desgaste e fretting às vezes ocorrem quando uma mola está em contato com componentes próximos ou com ela mesma. A resistência ao desgaste dos materiais da mola é muito boa, mas a região de desgaste é obviamente mais suscetível a falhas por fadiga. A fadiga por atrito ocorre quando as peças acopladas sofrem pequeno deslocamento oscilatório em relação umas às outras.

A fragilização por hidrogênio ou metal líquido pode causar a falha das molas se essas condições de fragilização surgirem quando a mola estiver sob carga, sem a necessidade de qualquer mecanismo de fadiga. No entanto, se a fragilização ou trinca ocorreu como consequência de tensões de tração residuais, então a mola pré-trincada pode falhar muito cedo como consequência do carregamento dinâmico. Exemplos de tais falhas de fadiga ocorreram em molas com pequenas trincas de têmpera, trincas de corrosão por tensão, trincas de enrolamento (através da falha em aliviar a tensão de aço cromo-silício imediatamente após o enrolamento) e fragilização de metal líquido por solda ou ligas de chumbo, estanho, zinco ou cádmio. (HAYES, 1996)

5 METODOLOGIA

As falhas em grampos de fixação ferroviários são geralmente detectadas durante a realização de inspeções técnicas da via. Quando essas falhas se tornam recorrentes passa a ser essencial a análise para identificação da causa raiz.

Com base nas metodologias para análise de falhas apontadas por Geitner e Bloch (2015) e McDanelis (2002), propõe-se a seguinte sequência para realizar uma boa análise de falhas em grampos de fixação ferroviários:

1. Investigação: coleta de dados e informações, fotos do ambiente de falha e coleta de amostras
2. Exame visual da peça fraturada e registro fotográfico.
3. Seleção, preservação, identificação e limpeza das amostras.
4. Análise macrográfica.
5. Análise micrográfica.
6. Análise química.
7. Ensaio de dureza.
8. Análises de tensão.
9. Simulação experimental.
10. Análise de todas as evidências levando à formulação de conclusões.
11. Elaboração de um relatório com inclusão das recomendações.

A princípio, o objetivo deste estudo seria colocar em prática a sequência sugerida acima para a realização de uma análise. Entretanto, devido ao cenário atual causado pela pandemia da Covid-19, a utilização dos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) para a realização das análises citadas foi prejudicada e nem todas as análises puderam ser realizadas.

Baseado na coleta de informações sobre os grampos de fixação para o processo de investigação, no exame visual e registro fotográfico das amostras dos grampos de fixação selecionados para o estudo, com posterior análise micrográfica, avaliação da composição química e realização de ensaio de dureza, o objetivo deste trabalho é fazer a caracterização das falhas e identificar quais são suas possíveis causas.

5.1 INVESTIGAÇÃO

Conforme dito anteriormente, esta é uma etapa fundamental para a realização da análise de falha, pois é quando são reunidas todas as informações necessárias para iniciar o processo investigativo. Com esse objetivo, foram coletados alguns dados técnicos do grampo estudado que são apresentados a seguir.

5.1.1 Especificação técnica

O grampo que será analisado é um elemento de fixação elástico, produzido com arame de 16 mm de bitola. É fabricado em aço mola temperado e endurecido em óleo, obedecendo à especificação SAE 9254, 55-Si-7 (DIN-17222) ou similar. A Tabela 3 apresenta a diretriz estabelecida para composição química de um aço para molas SAE 9254.

Tabela 3 – Especificação da composição química nominal (em % massa) para aço mola SAE 9254.

| C | Mn | P | S | Si | Cr |
|-------------|-------------|------|------|-------------|-------------|
| 0,51 – 0,59 | 0,60 – 0,80 | 0,03 | 0,04 | 1,20 – 1,60 | 0,60 – 0,80 |

Fonte: MRS Logística S.A.

A faixa especificada para a dureza superficial é de 42 a 48 Rockwell - escala C.

Para o ensaio estático, as forças necessárias para defletir o grampo às distâncias compatíveis com o tipo, deverão estar dentro da faixa de tolerância, conforme mostra a Tabela 4. A Figura 38 ilustra um ensaio de deflexão estática.

Tabela 4 – Faixa de tolerância de força necessária para defletir um grampo.

| Modelo Grampo | Aplicação | Deflexão (mm) | Força (kgf) |
|--------------------|---------------|---------------|-------------|
| Fastclip – Ø 16 mm | TR-68 e TR-57 | 10,0 | 550 |
| | | 12,2 | 900 |

Fonte: MRS Logística S.A.

No ensaio dinâmico ou teste de fadiga, são ensaiados um par de grampos, conforme é mostrado na Figura 39. Tal ensaio consiste em solicitar o par de grampos desde a posição 0 até 100% do deslocamento nominal. Os itens deverão suportar uma amplitude de oscilação de 1,0 mm, ou seja, de -0,5 mm à +0,5 mm. A frequência de oscilação deverá ser de 25 Hz e o par de grampos deverá resistir a 3×10^6 (três milhões) de ciclos no mínimo. Ao término do ensaio, os grampos são examinados minuciosamente, não devendo apresentar trincas, fraturas ou defeitos de superfície oriundos do teste.

Figura 38 – Ensaio de deflexão estática.



Fonte: MRS Logística S.A.

Figura 39 – Ensaio de fadiga



Fonte: MRS Logística S.A.

5.1.2 Processo de fabricação

O processo de produção do grampo inicia-se com o corte da bobina de barra redonda de 16 mm em barras unitárias de comprimento definido para a dobra do grampo. A etapa seguinte consiste na conformação a quente, ou seja, a barra é aquecida no forno e depois dobrada e estampada (operação que dá forma e ângulos ao grampo). Finalizando esta etapa, o grampo é inserido em um tanque de óleo com temperatura controlada para a realização da têmpera.

Para a correção da tenacidade e dureza excessiva consequente do processo de

têmpera, o grampo passa pelo tratamento térmico de revenimento. Esta etapa consiste no aquecimento dos grampos e permanência na temperatura especificada por determinado tempo e posterior resfriamento lento.

O grampo então é submetido ao shot peening, que consiste no bombardeamento da superfície da peça com esferas metálicas (granalha), com força suficiente para gerar uma leve deformação plástica. Esse processo é responsável por produzir uma camada de tensão residual, melhorar a resistência à fadiga do material e remover a carepa formada durante os processos de aquecimento/resfriamento para possibilitar a pintura das peças.

Por fim, o grampo passa por um tanque com tinta para pintura, devendo apresentar camada uniforme e compatível com a vida útil do grampo. A pintura tem a função de proteger o grampo contra a oxidação. O grampo resultante desse processo é ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Grampo do tipo *fastclip*



Disponível em: www.condutec.com.br. Acesso em: 02 fev. 2021

Consta na especificação técnica do material que o acabamento dos grampos deverá ser esmerado, com superfície lisa, não devendo apresentar marcas de ferramentas, fendas, dobras, trincas ou quaisquer outros defeitos que prejudiquem sua utilização. Conforme foi mostrado no referencial teórico deste estudo, tais fatores podem atuar como concentradores de tensão e causar a falha do componente.

5.1.3 Inspeção técnica

Junto à empresa, foram coletadas fotos da inspeção técnica feita na via e documento referente à inspeção do grampo. De acordo com tal documento, verificou-se que as cargas compressivas exercidas pelos grampos fraturados não estavam de acordo com o especificado. A Figura 41 mostra a realização de uma avaliação dinamométrica de carga em grampos de fixação na malha da MRS.

Figura 41 – Avaliação dinâmométrica de carga em grampos



Fonte: MRS Logística S.A.

5.1.4 Coleta das amostras

A Figura 42 mostra as amostras de grampos do tipo *fastclip* que foram cedidas pela MRS. Fazem parte do conjunto grampos fraturados e não fraturados.

Figura 42 – Amostras de grampos cedidas pela MRS Logística S.A.



Fonte: Autor.

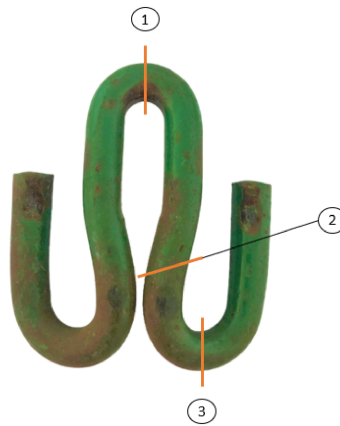
Foi informado pela MRS que os grampos estavam aplicados tanto em curvas quanto em tangentes, porém as fraturas estavam concentradas em maior totalidade nas curvas. O tempo de aplicação dos grampos no trecho da Linha do Centro, onde foram concentradas as aplicações, foi de, aproximadamente, 3 anos e 10 meses (de 01/03/2016 a 31/12/2019). A vida média dos grampos em milhões de toneladas brutas transportadas (MTBT) foi de 120 MTBT.

5.2 EXAME VISUAL E REGISTRO FOTOGRÁFICO

Foi feito o exame visual do conjunto de grampos coletado. Os três principais pontos de falha identificados são apresentados na Figura 43. Como o grampo é um componente

simétrico, as falhas podem ocorrer dos dois lados.

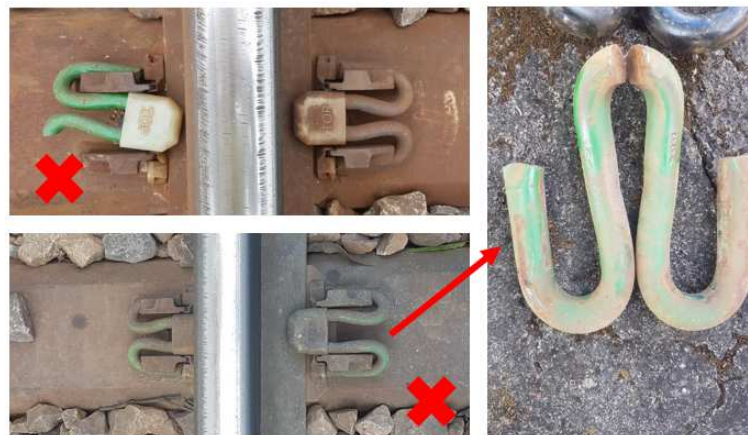
Figura 43 – Principais pontos onde as falhas ocorrem



Fonte: Autor.

Na Figura 44 estão ilustrados os modos de falha representados pelos números 1 e 3 na Figura 43. A Figura 45 mostra a falha representada pelo número 2.

Figura 44 – Dois dos principais modos de falha encontrados nos grampos de fixação instalados



Fonte: MRS Logística S.A.

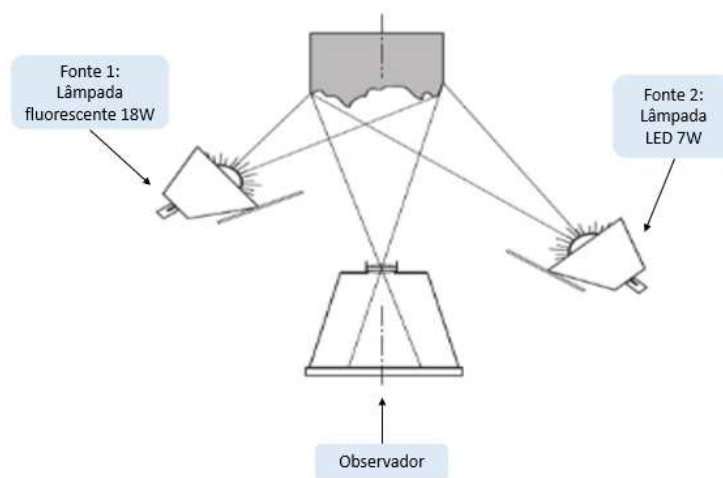
Figura 45 – Falha em grampo de fixação *fastclip*



Fonte: Autor.

Para o registro fotográfico das superfícies de fratura foram seguidas as orientações de Colpaert (1951) apud Costa e Silva(2008) para o registro fotográfico de superfícies fraturadas ou não-planas. O sistema foi montado conforme mostra o esquema da Figura 46.

Figura 46 – Sistema de iluminação recomendado para fraturas e tipos de fontes utilizadas. Fonte:



Fonte: Adaptado de Colpaert (2008).

Para o ensaio foi utilizada uma câmera Nikon D5300, utilizando as seguintes configurações:

- Velocidade do obturador: 1/100
- Abertura do diafragma: f/9
- ISO 100

A Figura 47 mostra como o registro fotográfico foi realizado.

Figura 47 – Sistema de iluminação montado para registro fotográfico da superfície de fratura

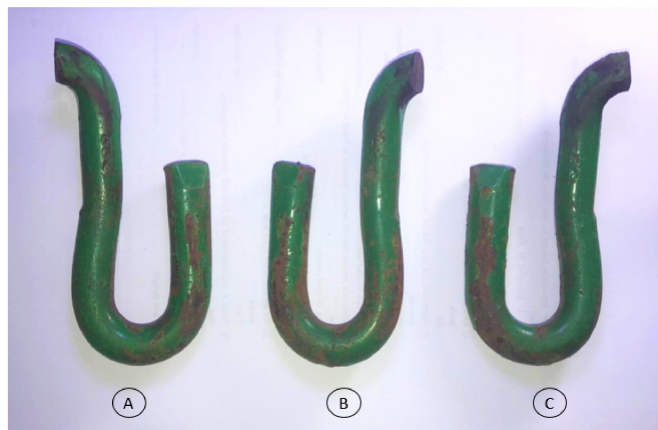


Fonte: Autor.

5.3 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste trabalho foram analisadas somente as falhas ocorridas no ponto 1 (ver Figura 43), pois foi possível obter um maior número de amostras para este ponto de falha, que permitirão realizar uma melhor análise visual. A Figura 48 apresenta as três amostras que foram selecionadas para o registro fotográfico da superfície de fratura.

Figura 48 – Amostras de grampos fraturados no Ponto 1



Fonte: Autor.

Como as amostras apresentaram oxidação, foi utilizado na superfície de fratura um lubrificante com ação anticorrosiva para permitir uma melhor visualização da morfologia da falha.

5.4 ANÁLISES EM LABORATÓRIO

5.4.1 Preparação da amostra

No laboratório de análises metalográficas da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), a amostra foi preparada e polida utilizando-se a mesma lixadeira rotativa, apenas trocando-se o prato. A Figura 49 mostra a politriz utilizada nesse processo.

Figura 49 – Politriz utilizada para fazer o polimento da amostra.



Fonte: Autor.

O processo de preparação seguiu a prática metalográfica, iniciando com lixa d'água grão 180 e concluindo com lixa grão 2000. Em seguida, a amostra foi lavada em água corrente e a limpeza foi finalizada com a utilização de detergente comum. Após devidamente lavada, a amostra foi polida com pasta de diamante de $1,0\mu\text{m}$ devidamente refrigerada com álcool 99% P.A.

Após polida, a amostra foi atacada com Nital 3% por 5 segundos. Em seguida foi lavada com água e imediatamente imersa em álcool 99% P.A. (para proteger de oxidação) e logo após, seca com ar quente empregando secador de cabelo convencional.

A amostra corresponde ao corte de uma seção transversal do grampo, próxima à região de fratura.

5.4.2 Análise microestrutural

Os ensaios microestruturais foram realizados no laboratório de metrologia da Faculdade de Engenharia da UFJF. Para as análises microscópicas empregou-se microscópio óptico da marca Olympus e modelo SC 30, conforme mostra a Figura 50.

Figura 50 – Microscópio óptico Olympus SC 30



Fonte: Autor.

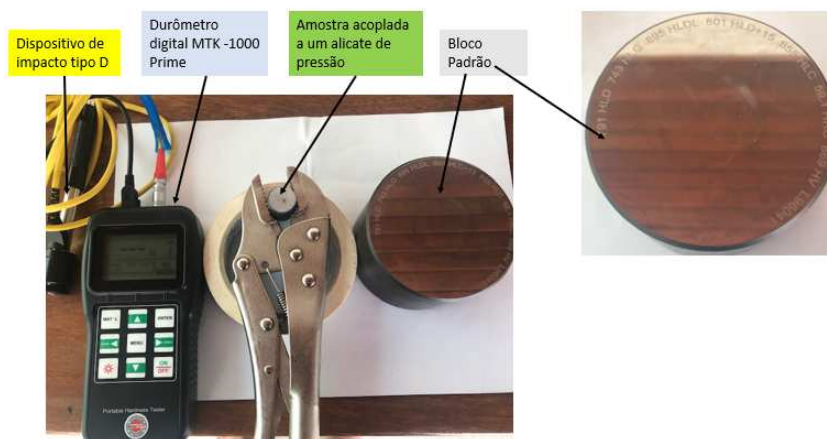
5.4.3 Análise química

A análise química foi realizada em espectrômetro de emissão óptica modelo ARLW 3460, a partir da realização de duas queimas em uma amostra de um dos grampos fraturados.

5.4.4 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com durômetro portátil digital por impacto, marca MetroTokyo, modelo MTK-1000 Prime, devidamente calibrado conforme certificado 0973-1930 em anexo (ver Anexo C). Antes da análise, foi realizado um teste no padrão que acompanha o equipamento. A Figura 51 apresenta o durômetro, o padrão e a amostra, que devido às suas dimensões e massa, por recomendação do próprio procedimento do equipamento, deveria estar fixada ou acoplada em suporte.

Figura 51 – Durômetro Portátil Digital, amostra acoplada e bloco padrão



Fonte: Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, seguindo a sequência descrita na metodologia, são apresentados os resultados das análises visual, química, metalográfica e de dureza dos grampos de fixação ferroviários.

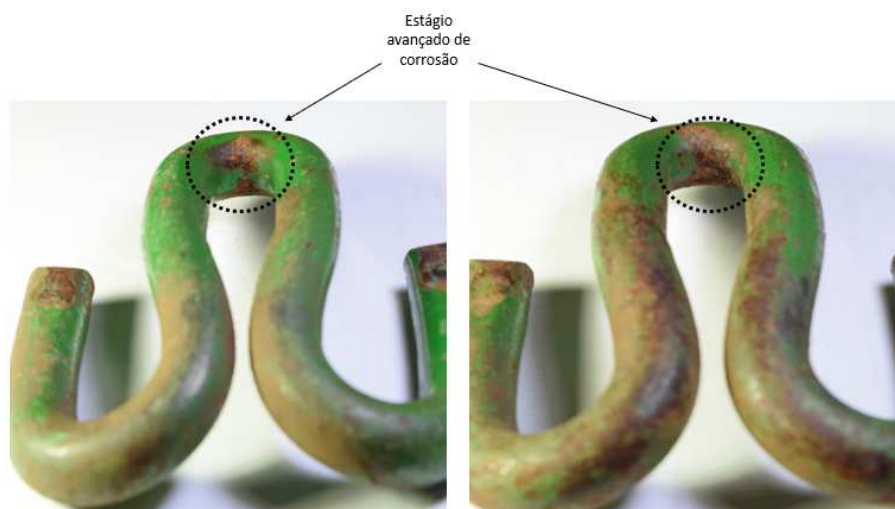
6.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES

6.1.1 Exame visual e registro fotográfico

Analisando a região das falhas que ocorreram no ponto 1 (ver Figura 43), foram observados alguns aspectos que podem contribuir para a investigação da causa raiz da falha. A Figura 52 mostra que nesse local há um elevado grau de corrosão na superfície do grampo.

No mesmo ponto é observado, conforme indica a Figura 53, uma marca de deformação provavelmente originada no processo de conformação do grampo, que não consta no desenho técnico empregado pela MRS. Isso provoca uma descontinuidade geométrica que pode ser um tipo de concentrador de tensões e, portanto, um possível local para a iniciação de uma trinca de fadiga.

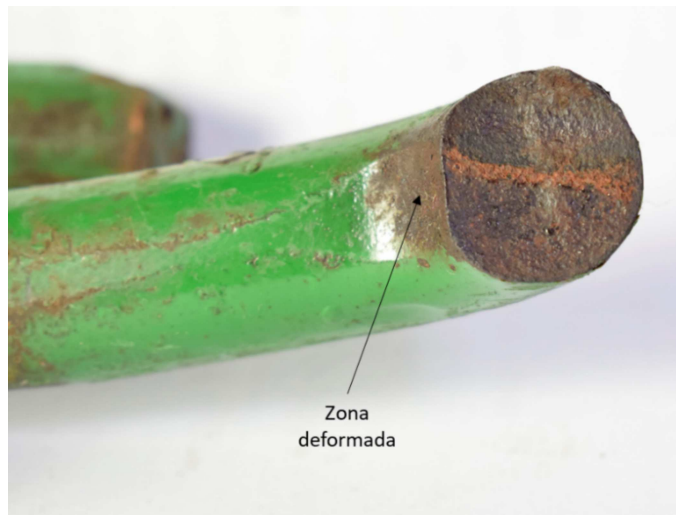
Figura 52 – Amostras de grampos não fraturados que mostram um elevado grau de corrosão na superfície do grampo



Fonte: Autor.

As figuras 54, 55 e 56, mostram as superfícies de fratura dos três grampos selecionados como objeto deste estudo. Nessas imagens percebe-se algumas áreas brilhantes e lisas, clássico de fratura frágil. Percebe-se ainda faixas de região oxidada, partindo do ponto com deformação superficial, conforme mostrado na Figura 53, provavelmente gerados no processo de conformação dos grampos. Apesar de ter sido aplicado na superfície um

Figura 53 – Zona deformada devido ao processo de conformação



Fonte: Autor.

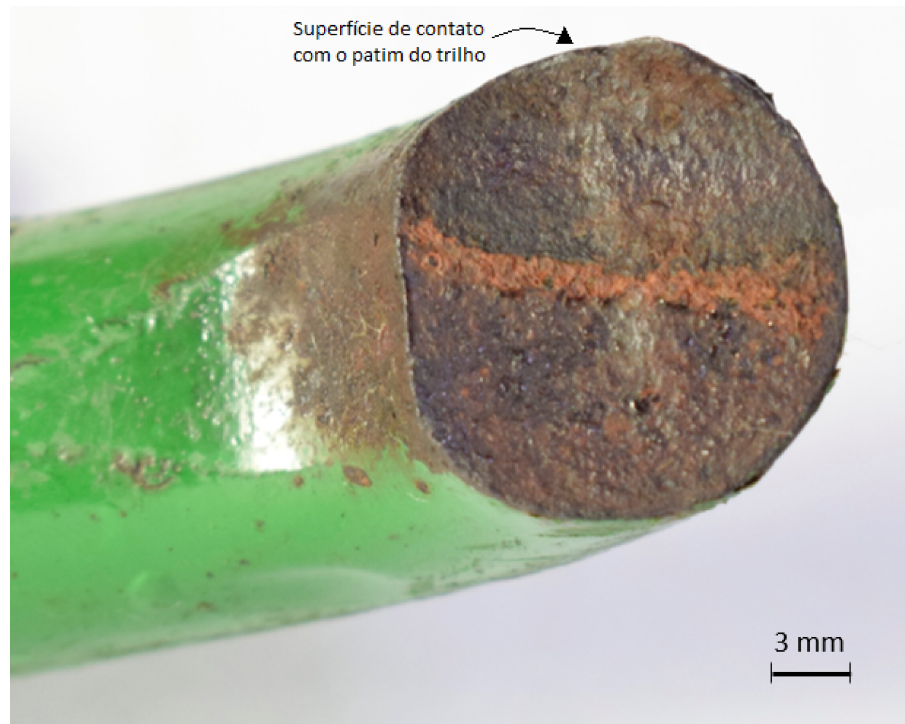
material antioxidante, essas áreas oxidadas permaneceram. Não se nota em nenhum ponto da superfície de fratura deformação plástica aparente, o que sugeriria presença de regiões dúcteis. Na região mais fosca, verifica-se um material também liso. Isso sugere que esse aspecto é todo de material frágil. Para uma análise mais detalhada, seria necessário avaliar essas superfícies por microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 54 – Superfície de fratura da amostra A



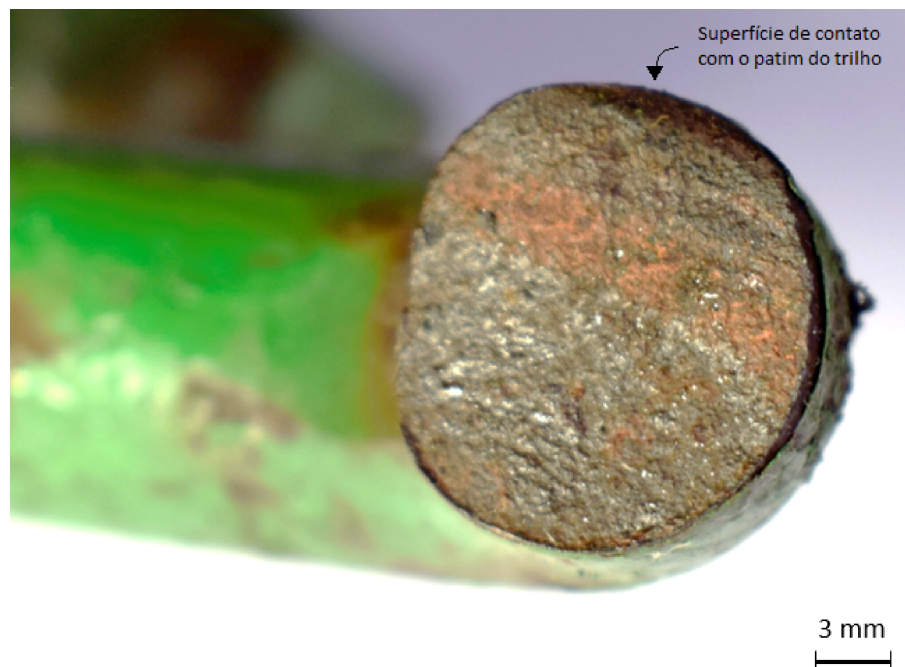
Fonte: Autor.

Figura 55 – Superfície de fratura da amostra B



Fonte: Autor.

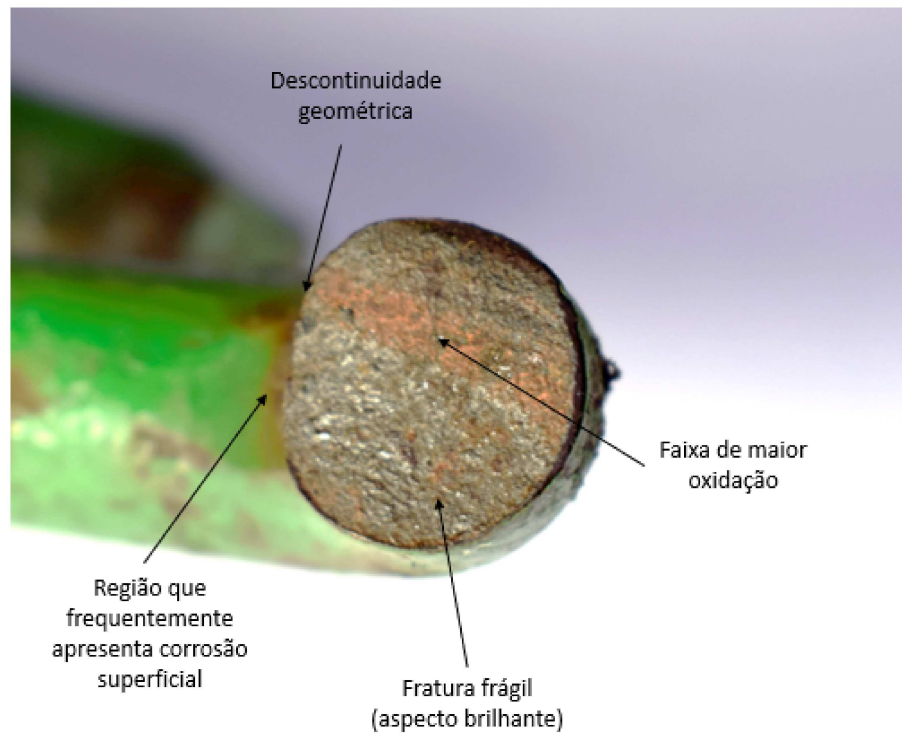
Figura 56 – Superfície de fratura da amostra C



Fonte: Autor.

A Figura 57 mostra as características da peça e superfície de fratura.

Figura 57 – Características da superfície de falha



Fonte: Autor.

Embora os pontos de falha 2 e 3 não tenham sido analisados a fundo neste trabalho, o fator descontinuidade geométrica também esteve presente na região de falha, como mostram as figuras 58 e 59.

Figura 58 – Descontinuidade geométrica na região do ponto de falha 2



Fonte: Autor.

Figura 59 – Descontinuidade geométrica na região do ponto de falha 3

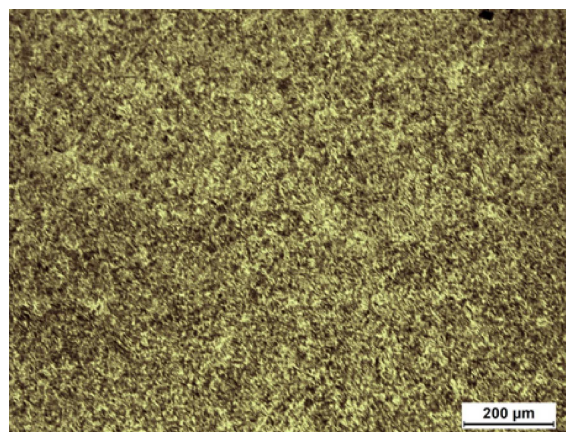


Fonte: Autor.

6.1.2 Análise microestrutural

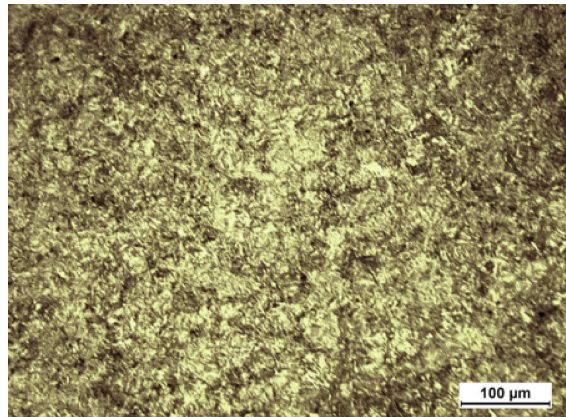
As Figuras 60, 61 e 62, obtidas por microscopia óptica, apresentam a microestrutura típica da região do centro. Elas tratam da mesma área, porém com aumentos diferentes. Analisando as imagens, percebe-se presença maciça de martensita revenida, caracterizada pelo formato de agulhas ou acicular.

Figura 60 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 100X



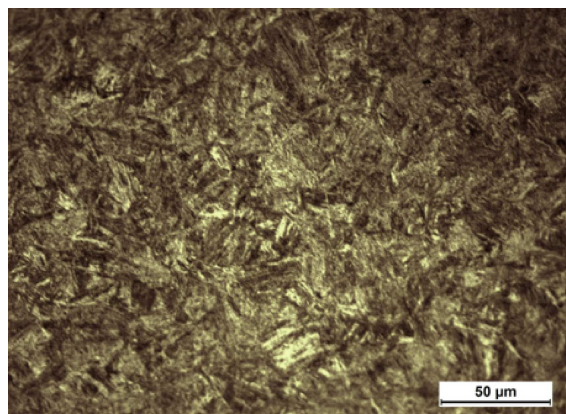
Fonte: Autor.

Figura 61 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 200X



Fonte: Autor.

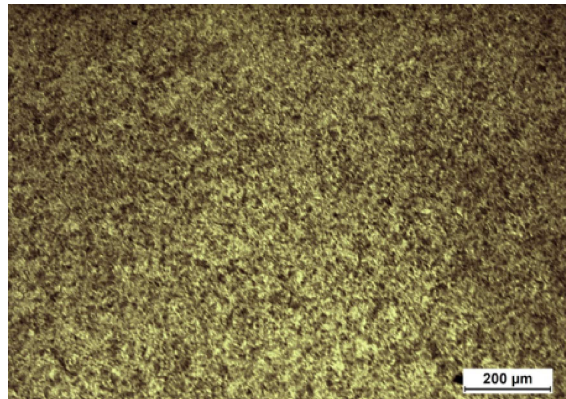
Figura 62 – Análise da microestrutura do grampo próxima ao centro por microscopia óptica com aumento de 500X



Fonte: Autor.

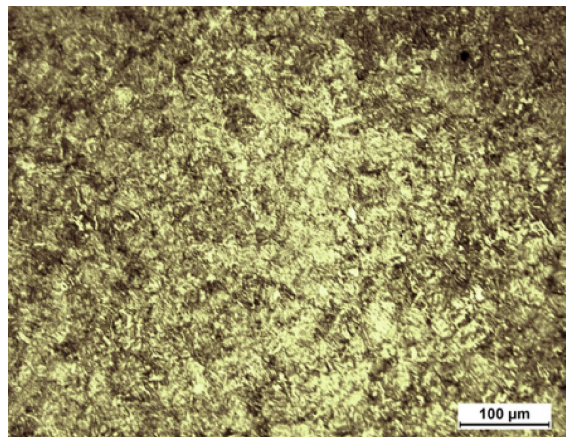
A região próxima à borda também apresentou o mesmo tipo de microestrutura encontrada próxima ao centro, ou seja, presença maciça de martensita revenida. As microscopias dessa região são mostradas na Figura 63, com o aumento de 100X no microscópio; na Figura 64, com o de 200X; e na Figura 65, com 500X de aumento.

Figura 63 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 100X



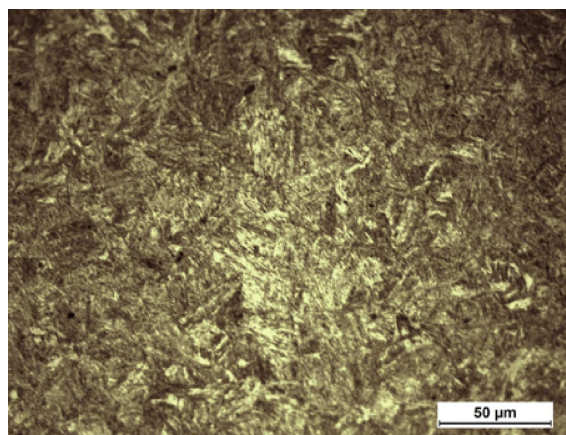
Fonte: Autor.

Figura 64 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 200X



Fonte: Autor.

Figura 65 – Análise da microestrutura do grampo próxima à borda por microscopia óptica com aumento de 500X.



Fonte: Autor.

Tabela 5 – Composição química (em % massa e/ou ppm) do grampo de fixação.

| Elemento | Queima 1 | Queima 2 | Média |
|----------|----------|----------|---------|
| %C | 0,562 | 0,561 | 0,561 |
| %Mn | 0,65 | 0,66 | 0,66 |
| %P | 0,0113 | 0,0113 | 0,0113 |
| %S | 0,0076 | 0,0079 | 0,0077 |
| %Si | 1,47 | 1,46 | 1,47 |
| %Cr | 0,6729 | 0,6752 | 0,6740 |
| %Cu | 0,0077 | 0,0092 | 0,0084 |
| %Ni | 0,0111 | 0,0116 | 0,0114 |
| %Sn | 0,0009 | 0,0016 | 0,0013 |
| %Nb | 0,0009 | 0,0021 | 0,0015 |
| %Mo | 0,001 | 0,0015 | 0,0013 |
| %Al | 0,0017 | 0,002 | 0,0019 |
| %Ti | 0,0017 | 0,0018 | 0,0017 |
| %Ca | 0,0005 | 0,0011 | 0,0008 |
| Pb (ppm) | 0 | 0 | 0 |
| B (ppm) | 2,28 | 2,39 | 2,33 |
| V (ppm) | 10,44 | 13,96 | 12,2 |
| N (ppm) | 75,78 | 52,11 | 63,945 |
| Zn (ppm) | 1,38 | 1,95 | 1,67 |
| %Fe | 96,5917 | 96,5765 | 96,5841 |

Fonte: Autor.

Como a borda da amostra fica abaulada devido aos procedimentos de polimento, não foi possível ter uma visão da microestrutura na região próxima à superfície externa do grampo. Para que isso fosse possível, seria necessário fazer o embutimento da amostra. Essa análise mais próxima à superfície externa do grampo poderia ser importante para verificar se há uma diferença na microestrutura nesta seção e qual o tamanho da faixa de descarbonetação.

6.1.3 Análise química

A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados na análise da composição química do grampo de fixação estudado. Pode-se notar que os valores encontrados para o carbono, manganês, fósforo, enxofre, silício e cromo, estão dentro dos limites estabelecidos pela especificação técnica do grampo (aço SAE 9254) exposta na Tabela 3. Os teores de enxofre e fósforo extremamente baixos sugerem um material bem limpo.

6.1.4 Ensaio de dureza

Para o ensaio, inicialmente foi checado a calibração do equipamento. Empregou-se um padrão com dureza Rockwell C de $59,1 \pm 1,18$ HRC (2% \pm). A Figura 66 apresenta o

resultado de 58,6 HRC verificado na aferição do bloco padrão. Logo, totalmente dentro da faixa de calibração. Em seguida foram realizadas quatro medidas na amostra do grampo. A Figura 67 mostra o resultado da média das quatro análises, uma dureza média de 43,9 HRC, valor dentro do especificado para o material (42 a 48 HRC).

Figura 66 – Resultado da aferição da dureza em bloco padrão



Fonte: Autor.

Figura 67 – Resultado da dureza média encontrada na superfície do grampo

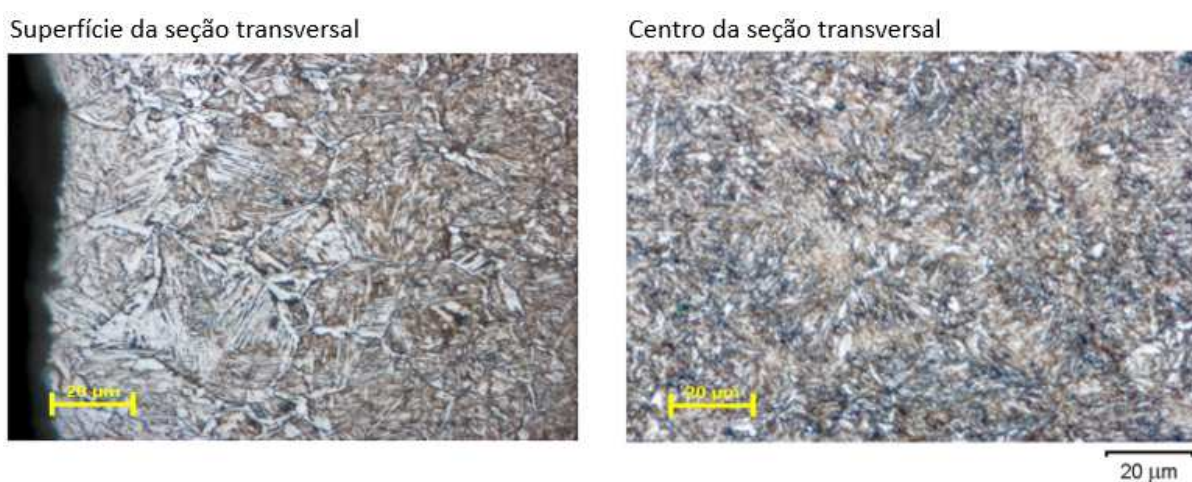


Fonte: Autor.

6.2 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Pela composição química especificada e o tipo de tratamento térmico (têmpera e revenimento) determinado para esse grampo, já era previsto encontrar martensita revenida na análise microscópica. Resultado similar foi apresentado por Hasap et al (2020) para grampos do tipo e-clip, conforme mostra a Figura 68. O mesmo raciocínio pode ser considerado para a dureza e composição química, uma vez que ambos os modelos, e-clip e *fastclip* atendem a mesma especificação.

Figura 68 – Microestrutura de um grampo de fixação elástico tipo e-clip feita por microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: Adaptado de Hasap et al. (2008).

As falhas em grampos de fixação ferroviários geralmente acontecem devido à fadiga. Portanto, analisando a superfície de fratura, esperava-se encontrar marcas de praia, que são aspectos típicos desse modo de falha e podem, geralmente, ser observadas a olho nu. Mas, devido às condições da superfície, com alto grau de oxidação na superfície de fratura, não foi possível observar tais evidências. Porém, vale ressaltar que a ausência dessas marcas não exclui a possibilidade de fadiga. Uma análise mais apurada da superfície da fratura, empregando MEV seria mais indicada, devido ao alto nível de detalhamento assegurado por esse equipamento.

Um ponto relevante observado na literatura é a descarbonetação que ocorre em superfícies de grampos devido ao processo de fabricação, que expõe esses materiais à elevadas temperaturas em atmosferas não controladas. Além disso, deformações e concentradores de tensão também podem contribuir para a falha. No caso dos grampos, objeto de estudo, foi possível identificar que, no ponto de falha analisado, havia descontinuidade geométrica, provavelmente resultante do processo de conformação, com um claro amassamento do material, provavelmente causado pela ferramenta usada para conformação e um maior grau de

oxidação na superfície externa do grampo. Tais fatores podem atuar como concentradores de tensão, fazendo com que a tensão local atinja valores acima do limite de resistência do material e, conseqüentemente, levando à nucleação de trincas que se propagam por fadiga, levando a ruptura do material. Os resultados apresentados por Hasap et al (2020) também corroboram essa suposição.

Como mostrado por Liu et. al (2020), na Figura 13 deste trabalho, a região do ponto de falha 3, apresentado na Figura 43, é onde ocorrem as tensões máximas. Portanto, caso haja nesse ponto uma descontinuidade geométrica, certamente é nele em que a falha ocorrerá, conforme situação apresentada na Figura 59. Porém, as fraturas ocorreram majoritariamente no ponto 1 e, para esses casos, foi observado que esse efeito de amassamento na região do ponto 3 não era acentuado, justificando a falha não ter ocorrido então no ponto de máxima tensão.

Para elevar a resistência à corrosão de aços mola SAE 9254, foi sugerido por Nakano et al. (2000) a adição de Ni em cerca de 0,55%. Isso faz com que os pites de corrosão sejam mais rasos, a superfície mais lisa e a concentração de tensão seja reduzida. Entretanto, essa solução pode se mostrar inviável financeiramente devido ao elevado custo do Ni. Portanto, recomenda-se investir em uma tinta mais resistente para evitar a oxidação do aço.

7 CONCLUSÕES

O grampo é um componente crítico do sistema de fixação no sistema ferroviário moderno. Sua função é aplicar uma força compressiva no trilho, mantendo-o em sua posição lateral, vertical e longitudinal. Porém, a falha em grampos de fixação tem sido frequentemente encontrada em linhas ferroviárias, o que aumentou o custo de reparo e manutenção, além de redução direta na segurança operacional. Esse tipo de falha pode levar ao alargamento da bitola, desgaste do trilho e instabilidade da via.

A pesquisa se apresentou com o objetivo de analisar a falha em grampos de fixação do tipo *fastclip*, visando identificar a causa raiz. As falhas em grampos de fixação ferroviários geralmente acontecem devido à fadiga, pois estão submetidos a um carregamento cíclico induzido pelo tráfego ferroviário.

Foi possível identificar que, no ponto de falha analisado, apresenta-se uma descontinuidade geométrica, provavelmente resultante do processo de conformação, e um maior grau de oxidação na superfície externa do grampo. Tais fatores podem atuar como concentradores de tensão, fazendo com que a tensão local atinja valores acima do limite de resistência do material e, conseqüentemente, levando à falha por fadiga.

Com base nas análises de microestrutura, composição química e dureza, o grampo analisado apresentou as características e propriedades esperadas, o que sugere que o material estava adequado ao uso.

Para uma melhor análise de falha do grampo, sugere-se que as amostras sejam coletadas seguindo os cuidados necessários, garantindo a preservação das características da falha. Propõem-se a utilização de microscópio eletrônico de varredura (MEV) para uma análise da superfície de fratura mais detalhada, visto que isso permitiria identificar características importantes como o ponto de nucleação da trinca, estrias e outras marcas não visíveis a olho nu que são determinantes para a caracterização do modo de falha. É recomendado que, na preparação do corpo de prova para a realização dos ensaios metalográficos, seja feito o embutimento da amostra, pois isso permite a análise da borda da superfície de fratura, possibilitando a análise da faixa de descarbonetação, fator que reduz a vida em fadiga do grampo.

REFERÊNCIAS

- ALI, R. et al. Investigations into fatigue failure in e-type fastening clips used in railway tracks. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Pakistan, v. 1, n. 1, p. 1-8, out./2020.
- ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Ferrovias de carga e o futuro do Brasil**: Propostas da ANTF para o Novo Governo 2019 - 2022. [S. l.], 9 set. 2018. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/propostas-ao-novo-governo/>. Acesso em: 11 jan. 2021.
- AZEVEDO, Cesar Roberto de Farias; CESCÓN, Tibério. **Metalografia e análise de falhas**: Casos selecionados (1993-2003). 1ª. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2018. 411 p. Disponível em: <http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/294>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- BRASIL. **Governo Federal investe em ferrovias para melhorar o escoamento da produção**. Transporte, [S. l.], 13 ago. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/08/governo-federal-investe-em-ferrovias-para-melhorar-o-escoamento-da-producao>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016.
- CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC**: Controle da Qualidade Total no estilo japonês. 9. ed. Nova Lima, MG: Falconi, 2014.
- CAUCHICK-MIGUEL, Paulo Augusto. **Metodologia científica para engenharia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- COLPAERT, Hubertus **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: E. Blücher, 2008.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Atlas CNT do Transporte**. 2ª ed. Brasília: [s. n.], 2019. 1 atlas. Disponível em: <https://atlas.cnt.org.br/>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- DIETER, G. E. – **Metalurgia Mecânica**, 2ª edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro - 1981.
- DONATO, Vitório. **Metodologia para preservação de materiais**: prevenção da falha prematura. 1. ed. [S.l.]: Saraiva Educação, 2011.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S.A. (EPL). **Plano Nacional de Logística PNL - 2025**: Relatório Executivo. [S. l.], 1 jun. 2018. Disponível em: https://www.epl.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=5387. Acesso em: 1 fev. 2021.

GEITNER, Fred K.; BLOCH, Heinz P.. **Análise e solução de falhas em sistemas mecânicos**: Gerenciamento prático de equipamentos mecânicos para indústrias de processos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (organizadoras). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GROSS, T.S.; LAMPMAN, S. **Fatigue Failure in Metals**. In: Fatigue and Fracture ASM Handbook. 1.ed. EUA: ASM International, v.19, p. 104-148, 1996.

GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ, Jorge Luis. **Fractography and Failure Analysis**: Structural Integrity. 3. ed. Mexico: Springer, 2018.

HAYES, Mark. Fatigue of springs. **ASM Handbook**, USA, v. 19, n. 2, p. 897-911, jan./1996.

HASAP, A. et al. **Analysis of the fatigue performance of elastic rail clip**. Engineering Failure Analysis, Thailand, v. 92, n. 1, p. 195-204, mai./2018.

HONG, X. et al. **Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE**. Advances in Mechanical Engineering, China, v. 10, n. 3, p. 1-12, fev./2018.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KERLINS, Victor; PHILLIPS, Austin. Modes of Fracture. **ASM Handbook**, USA, v. 12, n. 2, p. 34-140, jan./1998.

LIU, Z. et al. Finite element and experimental study on multiaxial fatigue analysis of rail clip failures. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, Singapura, v. 43, n. 10, p. 2390-3401, ago./2020.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010

MCDANELS, Steve. Practices in Failure Analysis. **ASM Handbook**, USA, v. 11, n. 1, p. 827-868, dez./2002.

NAKANO, T. et al. **Development of high-strength suspension coil springs in which corrosion fatigue strength is important**, Detroit, Michigan, EUA: SAE, 2000.

OLIVEIRA, J. C. S.; SILVA, A. P. **Análise de indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, Ano 8, nº 3, jul-set/2013, p. 53-69.

PARRINGTON, Ronald J. Fractography of Metals and Plastics. **Practical Failure Analysis**, Lansing, NY, v. 2, n. 5, p. 16-19, out./2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02715463>. Acesso em: 1 fev. 2021.

REED-HILL, R.E., **Princípios de Metalurgia Física**, Ed. Guanabara Dois, 2a. edição, 1.982.

REZENDE, Mirabel C. **Fractografia de Compósitos Estruturais**. Polímeros, São José dos Campos/SP, v. 17, n. 3, p. 4-11, set./2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/po/v17n3/003.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2021.

SCUTTI, James J.; MCBRINE, William J. **Introduction to Failure Analysis and Prevention**. ASM Handbook, USA, v. 11, n. 1, p. 14-64, dez./2002.

SEHITOGLU, Huseyin. **Thermal and Thermomechanical Fatigue of Structural Alloys**. ASM Handbook, USA, v. 19, n. 2, p. 1313-1402, jan./1996.

SMITH, William F; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2012.

VOORT, George F. Vander. **Visual Examination and Light Microscopy**. ASM Handbook, USA, v. 12, n. 2, p. 177-311, jan./1998.

XIAO, Hong; WANG, Jia-bin; ZHANG, Yan-rong. **The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment**. Engineering Failure Analysis, China, v. 81, n. 1, p. 57-68, nov./2017.

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 31 de março de 2021.

Angélica de Fátima Nogueira Vicente

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

201371056

Matrícula

Angélica de Fátima Nogueira Vicente

ASSINATURA

102.158.656-00

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

ANEXO B – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que Angélica de Fátima Nogueira Vicente, ex-estagiária da empresa MRS Logística S.A., possui autorização para divulgar o nome da empresa bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Juiz de Fora, 19 de Maio de 2021.



Lucas Couto Giffoni dos Santos
MATR. 30017574
MRS LOGÍSTICA S. A.

Responsável da Empresa
(carimbo da empresa)

ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO 0973-1930



Laboratório de Metrologia

Certificado de Calibração

0973-1930

Pag. 01/01

- 1- **CONTRATANTE:** FUNDAÇÃO DE APOIO E DESENVOLVIMENTO AO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
ENDEREÇO: Av. Dr. Paulo Japiassu Coelho, 545 - Juiz de Fora / MG
SOLICITANTE: O mesmo
ENDEREÇO: O mesmo
- 2- **INSTRUMENTO:** DURÔMETRO PORTÁTIL DIGITAL POR IMPACTO **Faixa de Medição:** Não consta
Marca: Metrotokyo **Resolução:** 1 HL
Identificação: Não consta **Número de Série:** 000056017485
Modelo / Código: MTK-1000 PRIME **Ordem de Serviço:** 0973/19
- 3- **PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:**
 A realização da calibração foi baseada em nosso procedimento interno: QPCA-02 - Revisão: 02 o qual possui referências as normas aplicáveis e vigentes ao instrumento supra citado.
- 4- **PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S):**

| DESCRIÇÃO | IDENTIFICAÇÃO | CERTIFICADO Nº | ÓRGÃO CALIBRADOR | VALIDO ATÉ |
|------------------|---------------|----------------|------------------|---------------|
| Padrão de dureza | BDQ-02 | 6722 | Durocontrol | Indeterminado |

5- **RESULTADOS:**

GRANDEZA DE DUREZA

| Valor do Padrão | | Média Indicada no Instrumento (HLD) | Erro Sistemático (HLD) | Incerteza (± HLD) | Erro Total (HLD) | Critério Cliente (HLD) | Situação |
|-----------------|-------|-------------------------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------------|----------|
| (HRC) | (HLD) | | | | | | |
| 63,0 | 785,0 | 783 | 2,0 | 5,0 | 8,0 | - | - |

"Os resultados expressos referem-se a média de 5 (cinco) medições."

- 6- **INCERTEZA DE MEDIÇÃO:** Conforme citado na tabela de resultados.
 "A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência $k = 2,00$ para nível de confiança de aproximadamente 95%."

- 7- **CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE A CALIBRAÇÃO:**
 Temperatura: 20 ± 1 °C Umidade relativa do ar: < 80 %UR

- 8- **Outras Informações:**
 Local da Calibração: Metrotokyo Solicitante
 Data de Recebimento: 14/10/19
 Data da Calibração: 14/10/19
 Próxima Calibração: Não informado

Técnico executante: Guilherme Medeiros

Robson de O. Lopes
 Responsável Técnico

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto verificado, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação por escrito deste laboratório.

Avenida Regente Feijó, 944 - Sala 1502B - Jardim Anália Franco - São Paulo / SP - Cep: 03.342-000 - Tel./Fax. (11) 2675-0102

e-mail: contato@metrotokyo.com.br - www.metrotokyo.com.br