ANÁLISE DE FALHAS EM MATERIAIS METÁLICOS: FERRAMENTAS, ESTRATÉGIAS E IMPACTO TECNOLÓGICO

FAILURE ANALYSIS IN METALLIC MATERIALS: TOOLS, STRATEGIES, AND TECHNOLOGICAL IMPACT

ANÁLISIS DE FALLAS EN MATERIALES METÁLICOS: HERRAMIENTAS, ESTRATEGIAS E IMPACTO TECNOLÓGICO

10.56238/edimpacto2025.090-052

Matheus Domingues Silva
Engenheiro de Materiais
Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)
E-mail: md.silva@unifesp.br

Leonardo Contri Campanelli
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)
E-mail: leonardo.campanelli@unifesp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4524-2786
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8983259236829248

Danieli Aparecida Pereira Reis
Doutora em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Instituição: Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP)
E-mail: danieli.reis@unifesp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1871-6475
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7058867464306125

RESUMO
Este capítulo apresenta uma revisão técnico-conceitual sobre as metodologias de análise de falhas aplicadas a metais, com enfoque em sua estruturação, etapas e ferramentas de apoio. São discutidos os principais modelos consagrados na literatura, desde as abordagens clássicas de Colangelo e Heiser até as contribuições recentes de Aidy Ali, evidenciando suas diferenças em profundidade, detalhamento e aplicabilidade. A exposição sistematiza as etapas fundamentais da análise, que incluem a investigação do histórico de serviço do componente, exames macro e microfractográficos, microanálises químicas, metalografia e simulações físicas ou computacionais. O capítulo também destaca o papel das ferramentas de gestão da qualidade, como os 5 Porquês, o Diagrama de Ishikawa, o FMEA e a FTA, como complementos indispensáveis à investigação técnica e à prevenção de recorrências. Ao integrar fundamentos científicos, práticos e gerenciais, o texto enfatiza que a análise de falhas é um instrumento estratégico para o avanço tecnológico e industrial, contribuindo para o aumento da confiabilidade, da segurança operacional e da sustentabilidade dos processos produtivos.

Palavras-chave: Análise de Falhas. Engenharia de Materiais. Metais. Fraturas. Metodologias de Investigação.

ABSTRACT
This chapter provides a technical-conceptual review of failure analysis methodologies applied to metals, focusing on their structure, stages, and supporting tools. It discusses key approaches established in the literature, from classical models by Colangelo and Heiser to recent contributions by Aidy Ali, highlighting their differences in depth, detail, and applicability. The chapter systematizes the fundamental stages of analysis, including the investigation of the component's service history, macro- and microfractographic examinations, chemical microanalyses, metallography, and physical or computational simulations. It also emphasizes the role of quality management tools, such as the 5 Whys, Ishikawa Diagram, FMEA, and FTA, as essential complements to technical investigations and preventive measures. By integrating scientific, practical, and managerial foundations, the chapter underlines that failure analysis is a strategic instrument for technological and industrial advancement, contributing to enhanced reliability, operational safety, and process sustainability.

Keywords: Failure Analysis. Materials Engineering. Metals. Fractures. Investigation Methodologies.

RESUMEN
Este capítulo realiza una revisión bibliográfica sobre la metodología de análisis de fallas aplicada a metales, con énfasis en su sistematización, etapas y herramientas de apoyo. Inicialmente, se discute el concepto de falla como la pérdida de desempeño o integridad estructural de un componente, destacando su carácter inevitable y la importancia de su comprensión para la ingeniería. A continuación, se presentan las principales metodologías reconocidas en la literatura técnica, resaltando sus diferencias en términos de profundidad, detalle y aplicabilidad. El estudio evidencia que el análisis de fallas debe iniciarse con la recopilación sistemática de información sobre el historial y las condiciones de operación del componente, seguido de ensayos macro y microfractográficos, microanálisis químicos, metalografía y, cuando sea necesario, simulaciones físicas o computacionales. Además de las etapas experimentales, el capítulo enfatiza el uso de herramientas de gestión que contribuyen a la determinación de la causa raíz y al perfeccionamiento preventivo de procesos y diseños. Se concluye que el análisis de fallas es un instrumento esencial no solo para el diagnóstico técnico de fracturas y defectos, sino también para la evolución del conocimiento científico e industrial, permitiendo reducir pérdidas materiales, ambientales y humanas, y reforzando el papel del ingeniero como agente de preservación de la seguridad y la vida.

Palabras clave: Análisis de Fallas. Materiales Metálicos. Metalografía. Gestión de Fallas. Ingeniería y Seguridade.

1 INTRODUÇÃO

Há certa dubiedade quanto à origem da palavra falha, que pode ter vindo do latim *fallia* ou do francês *faille* (DA CUNHA, A. G., 2019). Certo é que a "falha" em si sempre tem uma conotação negativa, significando que algo apresenta defeito, incorreção, ausência de perfeição ou erro. Nos componentes mecânicos e estruturais, a falha representa perda de desempenho do conjunto, ocasionada quase sempre por uma fratura – que é a perda de integridade física – tornando a peça (engrenagem, pistão, haste, etc.) incapaz de exercer suas funções (DIETER, G. E., 1981).

De todo modo, o fato é que a sua aparição é inerente à existência de qualquer objeto na natureza (HIDALGO, C., 2015). Absolutamente tudo o que existe está num perpétuo (e as vezes vagaroso) movimento rumo à desintegração, ao caos ou estado de maior entropia (vide 3ª Lei da Termodinâmica), sendo então papel dos engenheiros retardar ao máximo sua ocorrência com o emprego da ciência, por meio do desenvolvimento de projetos robustos e através do aprendizado trazido por meio de análises já realizadas em casos reais, a fim de manter a ordem das coisas (SHAPIRO, H. N. *et al*., 2013).

Isso é especialmente relevante no caso dos metais, uma vez que as falhas são, na maioria das vezes, eventos indesejáveis que geram inúmeras perdas materiais e ambientais todos os anos. Um exemplo marcante foi o "apagão" ocorrido no Brasil em 2001, que afetou 11 estados. Tal corte de energia ocorreu devido ao rompimento de um cabo condutor que sofreu o fenômeno de *fretting*, resultando num prejuízo de mais de 100 milhões de reais (MOURA, A. D. *et al*., 2015).

Quando ainda mais graves, tais falhas podem gerar perdas incalculáveis ao expor pessoas a riscos maiores, como no caso dos aviões *Comet*, que se desintegraram no ar em 1954, resultando na morte de 36 pessoas. A causa foi a fadiga nos metais da fuselagem (DE CASTRO, P. M. S. T. *et al*., 2010).

Esses e muitos outros casos só puderam ser compreendidos, mitigados e prevenidos porque suas causas foram determinadas por meio da aplicação de uma metodologia de análise de falhas, a qual consiste na coleta de informações e dados sobre o evento catastrófico, na realização de testes e na identificação da causa raiz da falha. Trata-se, portanto, de um método de investigação que busca desvendar a casuística por trás de eventos catastróficos, sendo extremamente relevante para a indústria por seu caráter preventivo e por se constituir em uma ferramenta poderosa para peritos e engenheiros (ASM HANDBOOK, 2004).

Tal metodologia tem a finalidade de descobrir as origens de problemas multifatoriais e restringir múltiplas possibilidades a uma única causa principal ou, no mínimo, a um pequeno grupo de causas contribuintes. Portanto, a análise de falhas é importante porque seus resultados contribuem para que haja avanço no conhecimento de fraturas, falhas e defeitos, preservando, direta ou indiretamente, muito mais do que apenas bens, economias e desempenhos: preserva-se o maior patrimônio que pode existir, a vida (BARBOSA, C., 2021).

Mas, afinal, como se desenvolve uma análise de falhas? Quais são suas etapas fundamentais? Existe um padrão metodológico amplamente reconhecido? E de que forma essa metodologia pode ser aplicada na prática? Para responder a essas e outras questões, o presente capítulo propõe uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a metodologia de análise de falhas aplicada a metais, com ênfase em sua sistematização por meio de fluxogramas. Busca-se reunir e discutir as principais contribuições de autores relevantes na área, apresentar os modos de falha e os tipos de fratura mais recorrentes, bem como analisar estudos de caso que evidenciam a aplicação prática e a importância dessa metodologia para a engenharia e para a prevenção de falhas estruturais.

2 FALHA E METODOLOGIA DE ANÁLISE

Uma vez definido o que caracteriza uma falha, é necessário abordar a metodologia sistêmica e investigativa utilizada para determinar suas causas, especialmente em sistemas, componentes ou projetos que envolvem estruturas metálicas e suas ligas. A literatura técnica reconhece amplamente quatro categorias gerais de falhas: sobrecarga, fadiga, desgaste e corrosão.

Todo equipamento ou componente de uma máquina que realiza trabalho mecânico falha segundo regras específicas de uma ou mais das categorias mencionadas, podendo ocorrer de forma isolada ou combinada. Estima-se que cerca de 80% das falhas ocorridas em ambientes industriais sejam passíveis de análise e diagnóstico internos, sem a necessidade de recorrer a especialistas externos ou a testes laboratoriais onerosos (ALI, A., 2017).

A prática demonstra que a atuação conjunta de uma equipe de engenheiros, aliada a uma metodologia bem definida, é suficiente para determinar as causas prováveis das falhas utilizando-se recursos simples (BARBOSA, C., 2021). Sendo assim, busca-se, a partir deste ponto, compreender quais informações são relevantes para o investigador antes de iniciar a rotina de análise, abordando as condições que justificam o início de uma investigação de falhas mecânicas e os primeiros resultados que devem ser obtidos.

Além disso, serão apresentadas as etapas dessa investigação orientada, bem como as contribuições de importantes autores para a estruturação de um fluxograma de análise de falhas, que propõe roteiros com técnicas e ferramentas de caracterização úteis para complementar as referências bibliográficas e os estudos de caso sobre falhas mecânicas (AFFONSO, L. O., 2014). Por fim, ferramentas da Gestão da Qualidade, como os 5 Porquês, o Diagrama de Ishikawa, o FMEA e o FTA, também podem ser empregadas, oferecendo uma visão mais abrangente da falha e de suas circunstâncias.

3 INFORMAÇÕES BÁSICAS PARA INICIAR ANÁLISE

Inicialmente, a análise de falhas deve ser conduzida de forma a obter todos os detalhes pertinentes e relacionados às possíveis causas do evento. O primeiro e mais importante passo nesse processo consiste em registrar e analisar as evidências visuais da(s) parte(s) falhada(s) e das regiões adjacentes, de modo a possibilitar um questionamento adequado sobre as origens do problema (BARBOSA, C., 2021). De acordo com o grau de conhecimento disponível e/ou a frequência da falha a ser analisada, recomenda-se coletar informações conforme os itens listados no Quadro 1 (DE MORAIS, W. A. *et al*., 2014).

Quadro 1 – Compilado de informações que o perito técnico deve estabelecer antes de iniciar a análise.

FALHAS	1. Referências dos entrevistados 2. Descrição da falha pelos entrevistados 3. Registro da falha "in loco" 4. Aspecto do componente falhado
CONDIÇÕES	1. Condições de operação 2. Ambiente de utilização 3. Geometria e projeto 4. Fabricação e processamento 5. Partes adjacentes 6. Montagem 7. Anexos

Fonte: Adaptado de DE MORAIS, W. A. *et al*. (2014).

É altamente recomendável que a primeira coleta de informações realizada pelo investigador ou perito sobre o componente e/ou estrutura envolvida na falha seja composta por dados relacionados ao projeto original: material empregado, desenho de projeto, método de fabricação ou construção, tipo de montagem, regime de funcionamento e desempenho esperado (BARBOSA, C., 2021).

Essas informações oferecem ao analista um panorama das condições de solicitação e do desempenho previsto do equipamento ou componente que apresentou falha, permitindo identificar possíveis desvios em relação ao comportamento esperado e, consequentemente, potenciais causas primárias da falha (COLANGELO, V. J.; HEISER, F. A., 1987).

Durante a coleta de dados, deve-se dar atenção especial às condições ambientais de uso do componente, tais como variações de temperatura, presença de gradientes térmicos, operação em ambientes corrosivos e possibilidade de sobrecargas acidentais. O registro histórico de uso do componente falhado depende do grau de controle existente antes da ocorrência do evento. Em outras palavras, quanto mais detalhado for o histórico operacional, maior será a capacidade do analista de identificar a causa raiz da falha (BARBOSA, C., 2021).

Recomenda-se que o recolhimento das informações seja realizado logo no início do processo de análise, preferencialmente no local da falha, de modo que, caso algum dado importante esteja ausente, o analista possa obtê-lo diretamente com o pessoal envolvido (BARBOSA, C., 2021). Também é aconselhável que o analista ouça os relatos dos operadores, técnicos e engenheiros

relacionados à ocorrência, pois esses depoimentos podem fornecer informações adicionais relevantes, permitindo uma avaliação mais crítica e prática do evento. A metodologia de análise de falhas proposta por Colangelo e Heiser contempla todos esses passos (vide Tabela 5) (COLANGELO, V. J.; HEISER, F. A., 1987).

Nessas situações, entretanto, exige-se cautela por parte do analista, uma vez que os dados obtidos por meio de entrevistas podem ser parciais, conflitantes ou imprecisos, por se basearem em informações memorizadas. Por essa razão, é importante manter contato com uma pessoa de referência ("contraparte") que possua conhecimento técnico sobre o equipamento analisado, já que as informações inicialmente coletadas podem se mostrar insuficientes, tornando necessária uma nova coleta posterior (DE MORAIS, W. A. *et al.*, 2014).

De modo geral, o resultado final de uma falha em um componente e/ou estrutura corresponde a um conjunto de partes fraturadas, dispostas de diversas maneiras, como ilustrado na Figura 1 (DE MORAIS, W. A. *et al.*, 2014).

Figura 1 – Exemplo de disposição de peças fraturadas logo após o evento.

Fonte: Adaptado de DE MORAIS, W. A. *et al*. (2014).

É essencial que, logo no início, seja realizado o registro da disposição das partes fraturadas no ambiente após a ocorrência da falha. Esse registro servirá como uma referência fundamental durante todo o processo de análise, funcionando como um guia para a compreensão das circunstâncias que levaram ao evento (ALI, A., 2017).

O registro fotográfico fiel do cenário da falha constitui uma etapa obrigatória em qualquer análise de falhas, de forma análoga à documentação da cena de um crime. Muitos detalhes presentes na chamada "cena da falha", quando registrados imediatamente após o evento, podem conter informações cruciais para sua elucidação, mesmo que não sejam inicialmente perceptíveis ao analista (BARBOSA, C., 2021).

Essa precaução é particularmente importante quando a falha é provocada por eventos externos ao componente que apresentou o defeito. Nesses casos, é imprescindível que o registro seja feito com o mínimo de interferência possível nas condições originais da cena, a fim de preservar o vínculo entre

os elementos direta e indiretamente relacionados ao evento (COLANGELO, V. J.; HEISER, F. A., 1987).

As fotografias e registros visuais devem ser realizados sob vários ângulos e posições, conforme o julgamento do analista, pois detalhes relevantes podem não ser visíveis em apenas algumas tomadas. Caso não seja possível efetuar o registro no local exato da ocorrência, recomenda-se, como alternativa, documentar um componente similar em funcionamento normal, de modo a suprir as limitações de observação (DE MORAIS, W. A. *et al.*, 2014).

Concluídas as etapas iniciais e definidas as boas práticas de investigação, passa-se agora à apresentação de roteiros sistêmicos propostos por diversos pesquisadores, que sintetizam a metodologia aplicada à análise de falhas em metais.

4 ROTEIROS PROPOSTOS PARA EXECUTAR ANÁLISES

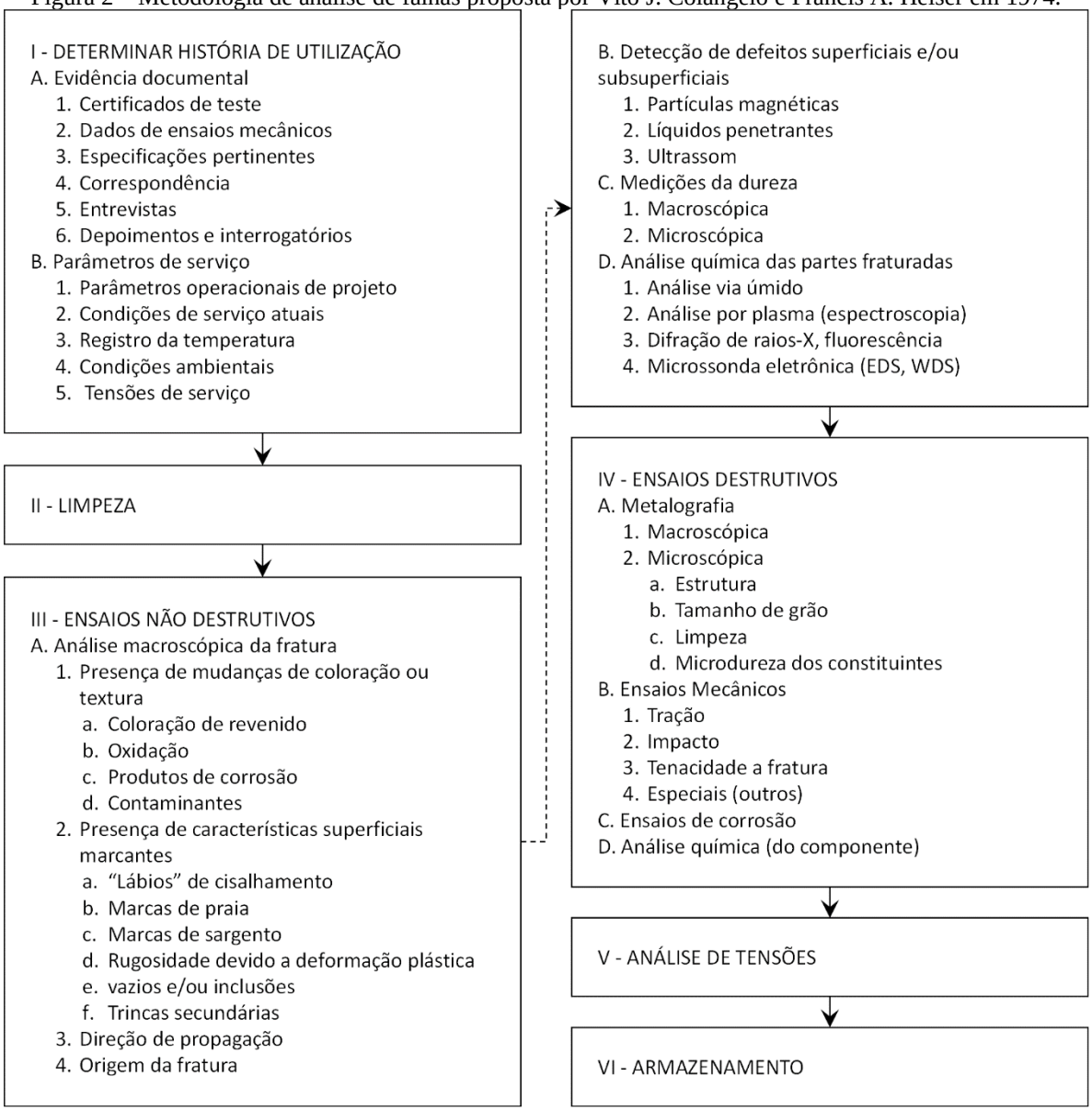
Assim como em qualquer área do conhecimento, nesta vereda existem diversos roteiros disponíveis na literatura para a execução de uma análise de falhas, cada um com suas próprias características, méritos e aplicabilidades, a depender da falha ou do evento a ser analisado.

Os dados requeridos nesses roteiros devem ser coletados de modo a permitir a reconstrução, na medida do possível, da sequência de eventos que levaram à falha, bem como a correlação destes com as possíveis medidas de controle e eliminação do problema. Diversos autores se dedicaram à sistematização de um "passo a passo" para a condução dessas investigações, e aqui serão apresentadas, em ordem cronológica, algumas dessas propostas.

4.1 COLANGELO E HEISER

O primeiro roteiro a ser abordado é o de Vito J. Colangelo e Francis A. Heiser, que, desde a primeira edição de seu aclamado livro *Analysis of Metallurgical Failures*, publicado em 1974 (1ª ed.), apresentaram uma metodologia de análise de falhas bastante detalhada, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Metodologia de análise de falhas proposta por Vito J. Colangelo e Francis A. Heiser em 1974.



Fonte: Adaptado de COLANGELO, V. J. e HEISER, F. A. (1987).

Essa metodologia contém mais exemplos do que qualquer outra citada neste trabalho, pois reúne uma ampla gama de possibilidades de ensaios e testes. O foco do passo a passo proposto por esses autores é fornecer ao perito o máximo de opções possíveis, garantindo versatilidade à investigação. O método é composto por seis etapas principais (de I a VI), subdivididas em subetapas (de A a D), seções (de 1 a 6) e subseções (de a a f) (COLANGELO, V. J.; HEISER, F. A., 1987).

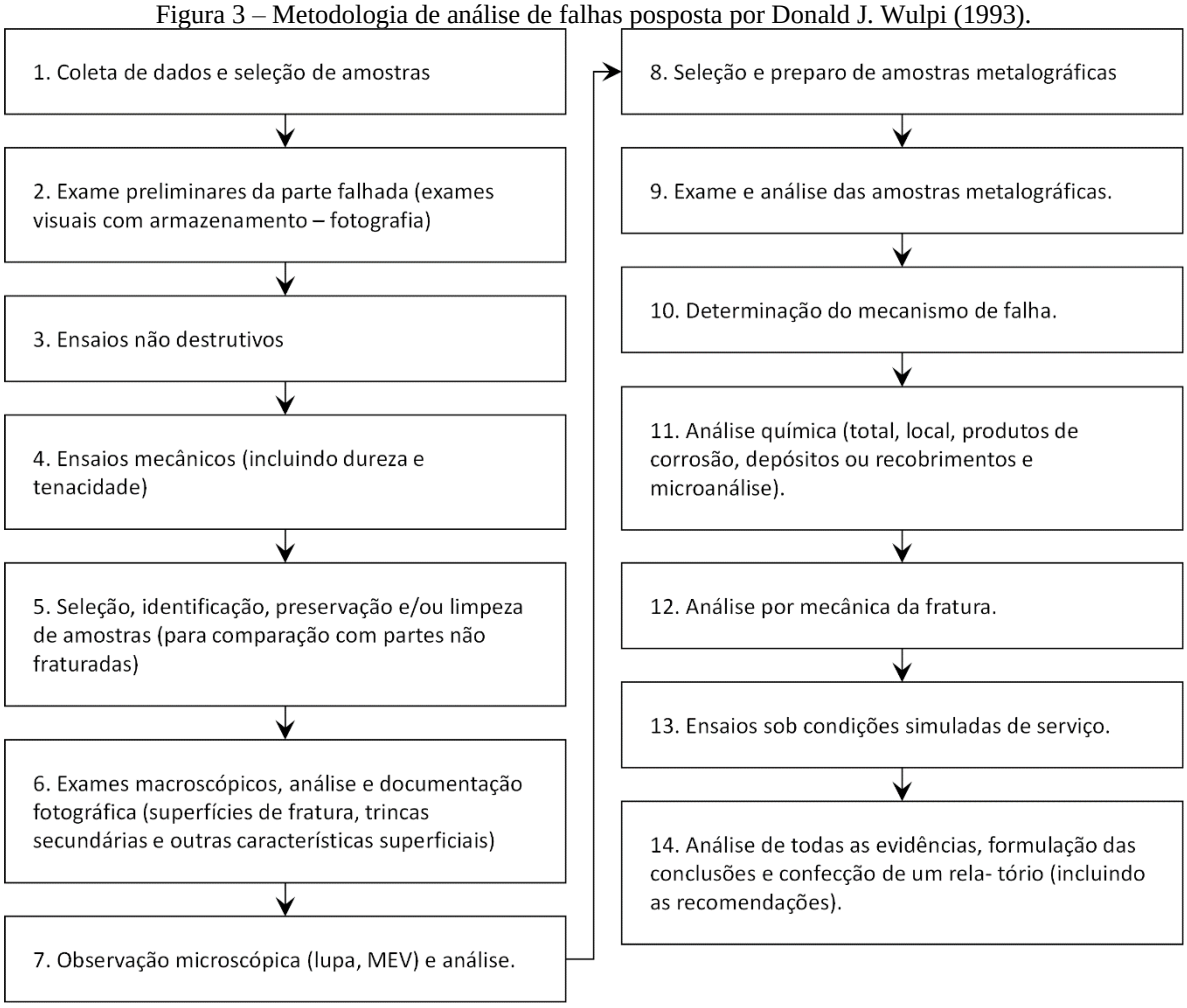
A abordagem de Colangelo e Heiser foi essencial para o desenvolvimento das metodologias subsequentes. A partir dela, consolidou-se a base teórica das análises de falhas, cujo conhecimento foi amplamente disseminado em universidades e escolas técnicas, permitindo o surgimento de variações mais simplificadas e com propostas mais diretas, voltadas à aplicação prática por profissionais experientes (COLANGELO, V. J.; HEISER, F. A., 1987).

De modo geral, o modelo proposto por Colangelo e Heiser é utilizado com fins didáticos, especialmente em contextos de formação de estudantes ou profissionais iniciantes, que estão aprendendo a selecionar os tipos adequados de ensaios e ferramentas para obtenção de informações, bem como os parâmetros e critérios a serem observados. Isso se deve ao fato de o modelo apresentar múltiplos níveis e subníveis de detalhamento, oferecendo uma visão abrangente e estruturada do processo de investigação

4.2 DONALD J. WULPI

Algo distinto ocorre com a segunda proposta de metodologia de análise de falhas, idealizada por Donald J. Wulpi e apresentada desde 1993 na primeira edição de seu livro *Understanding How Components Fail*. Conforme ilustra a Figura 3, Essa metodologia consiste em uma coletânea de quatorze etapas que conduzem o perito desde a análise preliminar, passando pelos possíveis ensaios e testes, até a elaboração do relatório conclusivo.

Figura 3 – Metodologia de análise de falhas posposta por Donald J. Wulpi (1993).



Fonte: Adaptado de WULPI, D. J. (1993).

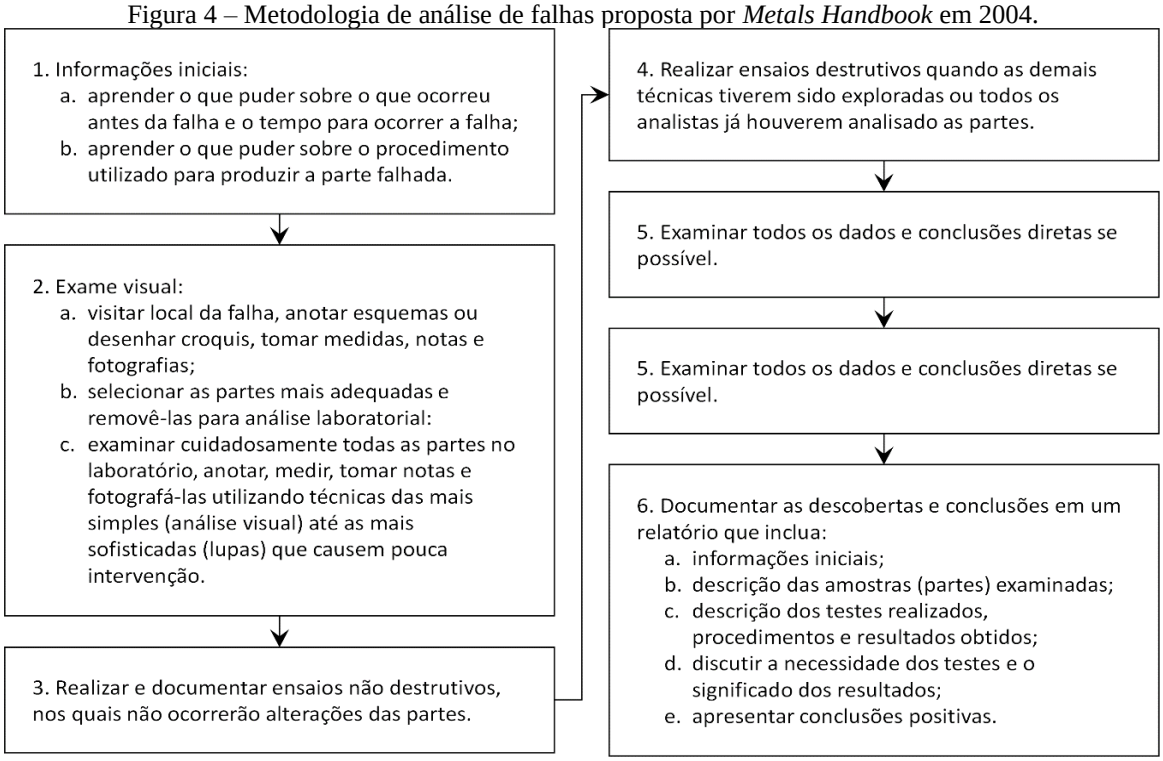
Embora seja mais sucinta e direta na descrição das etapas do que a proposta de Colangelo e Heiser, a visão de Wulpi apresenta um nível de detalhamento superior ao de outras metodologias que ainda serão discutidas (como a do *Metals Handbook*). Ainda assim, o autor busca apresentar apenas o essencial, exemplificando e sugerindo apenas alguns testes possíveis em cada fase. Diferentemente do modelo de Colangelo e Heiser, as etapas do método de Wulpi não possuem subdivisões, sendo organizadas de forma sequencial, do passo um ao passo quatorze.

4.3 METALS HANDBOOK

Seguindo a tendência de suprimir etapas e detalhes considerados desnecessários, surge em 2004 a metodologia de análise de falhas em metais pelo *Metals Handbook* apresentada na Figura 4. Essa proposta sugere uma sequência de procedimentos mais concisa e técnica, composta por seis etapas principais e pequenas subetapas entre cada uma delas, com o objetivo de conduzir uma análise completa de forma mais direta e objetiva.

Nesse modelo, destaca-se a clareza na descrição de cada etapa e o enfoque técnico conferido à parte documental, que já antecipa, de forma estruturada, o sumário das principais divisões do relatório final a ser elaborado pelo perito ao término da investigação. Além disso, a metodologia do *Metals Handbook* evidencia a preocupação do analista quanto à importância do planejamento e do rigor durante todo o processo de análise de falhas, ressaltando que a qualidade dos resultados depende diretamente da organização e do cuidado adotados em cada etapa.

Figura 4 – Metodologia de análise de falhas proposta por *Metals Handbook* em 2004.



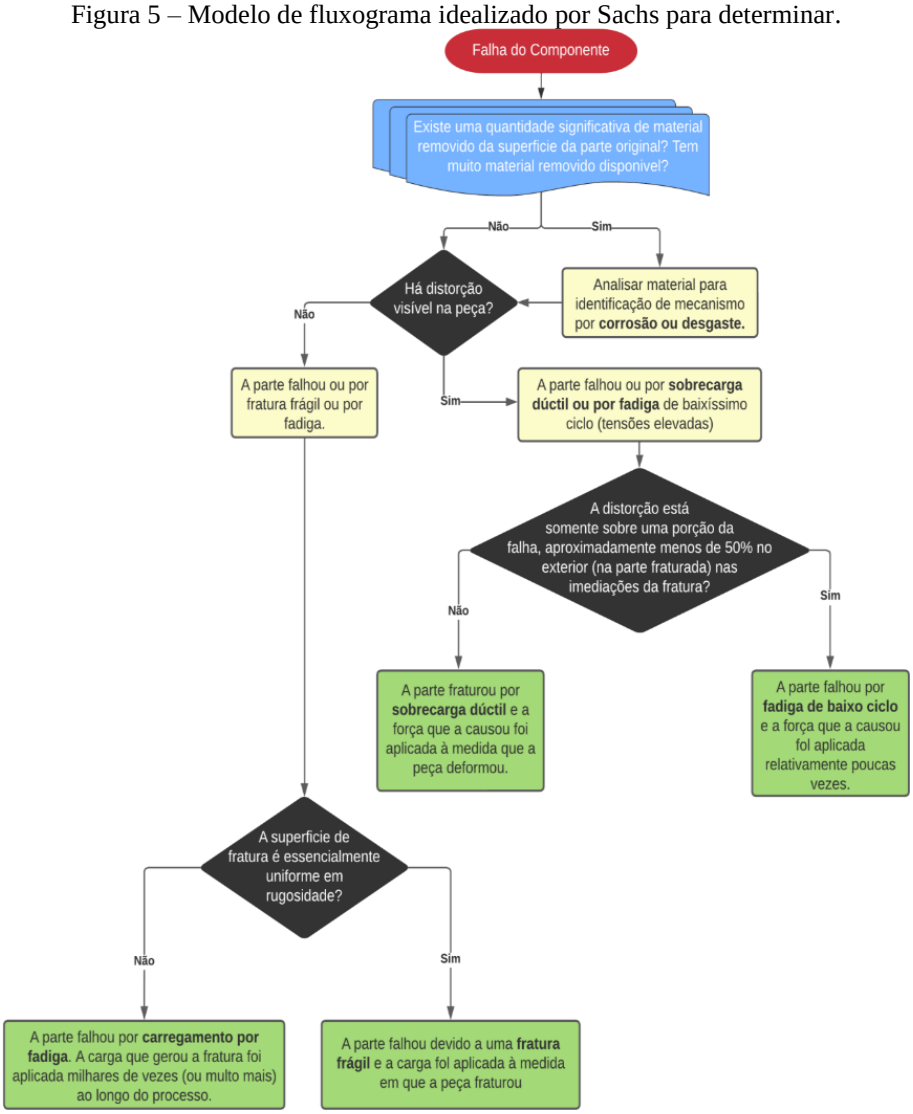
Fonte: Adaptado de METALS HANDBOOK (2004).

De maneira geral, percebe-se que o *Metals Handbook* busca ser sucinto e generalista em relação à metodologia de análise de falhas que propõe, uma vez que apenas menciona os tipos de ensaios, suprimindo detalhes mais específicos. Seu principal diferencial está em apresentar informações relevantes sobre a parte documentacional – o relatório conclusivo, que constitui o dossiê responsável por reunir o resultado da investigação, indicando a causa raiz determinada e as respectivas justificativas evidenciais que a sustentam.

4.4 N. W. SACHS

Em 2007, N. W. Sachs apresentou mais uma contribuição relevante: a esquematização das etapas da metodologia por meio de um fluxograma, um layout perspicaz que visa auxiliar o perito na identificação de quatro possíveis mecanismos básicos de falha (corrosão, desgaste, fadiga e sobrecarga). A Figura 5 apresenta o modelo.

Figura 5 – Modelo de fluxograma idealizado por Sachs para determinar.



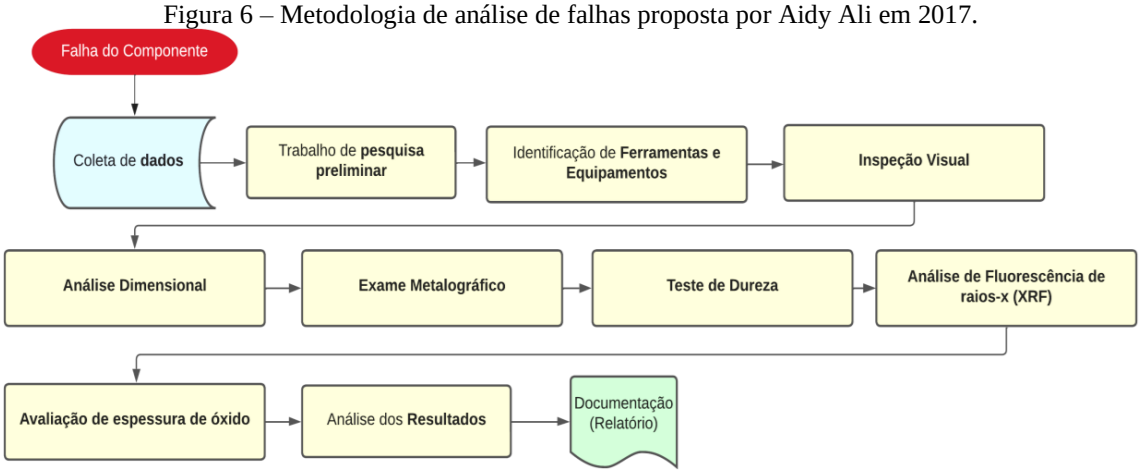
Fonte: Adaptado de SACHS, N. W. (2007).

O roteiro elaborado por Sachs foi desenvolvido com base em sua ampla experiência na avaliação de falhas e deve ser utilizado como ferramenta de apoio após a conclusão das etapas propostas pelas metodologias de análise de falhas de Colangelo e Heiser, Wulpi e do *Metals Handbook*. Dessa forma, diferentemente das demais abordagens, o método de Sachs tem caráter complementar e apresenta maior especificidade em sua análise, sendo destinado exclusivamente à determinação das causas relacionadas à corrosão, aos mecanismos de desgaste, fadiga ou sobrecarga.

4.5 AIDY ALI

Um dos modelos mais recentes e diretos a serem seguidos pode não ser tão detalhado quanto o de Colangelo e Heiser, nem tão técnico quanto o proposto pelo *Metals Handbook*. No entanto, em termos de simplicidade, o modelo de Aidy Ali (2017), apresentado na Figura 6, supera diversas expectativas, apresentando uma abordagem prática e objetiva. Esse modelo é composto por apenas onze etapas e, assim como a proposta de Sachs, é estruturado na forma de um fluxograma.

Figura 6 – Metodologia de análise de falhas proposta por Aidy Ali em 2017.



Fonte: Adaptado de ALI, A. (2017).

Por fim, percebe-se que não existe uma ferramenta, ou conjunto de ferramentas, que garanta por si só a resolução de qualquer análise de falha. O que ocorre, na prática, é que algumas ferramentas acabam sendo mais frequentemente empregadas por diferentes razões, tais como: a familiaridade do analista; a disponibilidade de equipamentos, tempo e recursos; e a representatividade dos resultados obtidos.

Observa-se, a partir desta coletânea de metodologias apresentadas, que todas elas se iniciam pela investigação da história e do desempenho prévio do componente e/ou estrutura, os quais devem ser devidamente conhecidos e registrados, conforme descrito. Em seguida, podem ser necessários ensaios complementares, como os propostos por Colangelo e Heiser e por Wulpi, com o objetivo de detalhar os aspectos metalúrgicos do material analisado.

5 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ETAPAS

5.1 MACROFRACTOGRAFIA

O exame do aspecto visual da fratura pode ser realizado a olho nu ou com pequenas ampliações (até cerca de 50 vezes), utilizando-se, por exemplo, diferentes tipos de lupas. Esse exame está intimamente associado ao mecanismo de falha ocorrido e à história de utilização do componente e/ou estrutura (BARBOSA, C., 2021).

A análise visual permite inferir, entre outros aspectos, o sistema de tensões que provocou a fratura, o ponto de início da falha, o tempo estimado de propagação, bem como as condições de carregamento mecânico existentes. Essas informações são fundamentais para subsidiar a compreensão metalúrgica da falha e, consequentemente, contribuir para a determinação da causa e a definição da solução final.

O levantamento de dados deve ser realizado logo no início do processo de análise, preferencialmente no próprio local da ocorrência da falha (BARBOSA, C., 2021). O registro fotográfico detalhado do cenário da falha e das partes envolvidas constitui uma etapa praticamente obrigatória em qualquer análise de falhas.

5.2 MICROFRACTOGRAFIA

Cada tipo de fratura apresenta uma morfologia específica em nível microestrutural, que a torna única. Assim, para analisar e compreender os mecanismos de fratura nos materiais, mesmo quando estes não estão bem caracterizados em nível macroscópico, torna-se necessária a utilização de técnicas de microscopia (BARBOSA, C., 2021). Essa é uma ferramenta fundamental não apenas para a determinação do real mecanismo de falha, mas também para sua adequada documentação.

Entre as técnicas mais comumente empregadas destacam-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a Microscopia Óptica (MO), a Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), a Microscopia de Força Atômica (AFM) e a Microscopia de Luz Polarizada (MOLP), entre outras. A escolha de uma ou mais de uma para compor as evidencias do relatório de análise ao final depende da estratégia, da disponibilidade e da habilidade do perito ou investigador.

5.3 MICROANÁLISE QUÍMICA

A maioria dos equipamentos de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) oferece a possibilidade de realizar análises químicas localizadas no material sob observação. Esse tipo de ensaio fornece informações extremamente relevantes, pois permite identificar e correlacionar o tipo de inclusão, segregação ou partícula estranha presente, ou diretamente associada, à falha observada. Além disso, a técnica possibilita inferir as condições de formação e evolução das trincas, por meio da identificação e análise de possíveis produtos de corrosão ou contaminantes.

Entretanto, nem sempre a superfície de fratura se encontra em estado de conservação adequado para uma observação direta. Nesses casos, uma alternativa consiste em recriar, em laboratório, as condições de carregamento que originaram a falha, por meio de Corpos de Prova (CDPs), os quais podem ser analisados com maior facilidade e controle experimental.

5.4 METALOGRAFIA

Juntamente com os ensaios mecânicos, a metalografia fornece um panorama do desempenho do material, e não é incomum que surjam descobertas inesperadas durante a análise metalográfica. Isso ocorre especialmente quando o exame é realizado na região onde a falha se originou, pois torna-se possível caracterizar o tipo de estrutura presente e associá-la a algum tratamento termomecânico, de produção ou acidental, que tenha sido determinante para a ocorrência da falha.

Inclusões e precipitados grosseiros associados à falha podem ser diretamente observados, permitindo documentar sua relação com o dano ocorrido. Cabe ao analista, ou ao profissional designado para tal, estabelecer as devidas correlações entre a microestrutura observada nas amostras do componente falhado, sua composição química e o histórico de fabricação do material. Com base nessas informações, a análise final da falha e a definição das medidas de contenção tornam-se significativamente mais precisas e eficazes.

5.5 OUTROS (ENSAIOS DESTRUTIVOS, NÃO DESTRUTIVOS, QUÍMICOS)

Os ensaios destinados à determinação da composição química e das propriedades mecânicas são, em geral, indispensáveis para a correta caracterização do material utilizado na estrutura ou no componente falhado (HELLIER, C. J., 2013). Esses ensaios podem ser realizados tanto para verificar se o material atende às especificações corretas, identificando possíveis trocas ou substituições indevidas, quanto para avaliar se suas características foram alteradas em decorrência de algum tratamento, operação de manutenção ou procedimento de reparo, entre outros fatores.

5.6 SIMULAÇÕES FÍSICAS OU COMPUTACIONAIS

As simulações são extremamente úteis na etapa de projeto de uma estrutura ou componente, pois permitem antecipar possíveis falhas que poderiam ocorrer sob condições de carregamento ou degradação contínua durante o uso. Por outro lado, os ensaios de simulação de carregamento mecânico podem tornar-se necessários durante uma análise de falha, basicamente por duas razões: (i) quando não há disponibilidade de partes em quantidade e/ou qualidade superficial suficientes para serem analisadas; (ii) quando se busca um nível mais aprofundado de compreensão sobre a evolução do processo de falha.

6 FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA ANÁLISE

Além da metodologia de análise de falhas e de suas etapas, já apresentadas nas seções anteriores, importantes aliados na determinação de causas são as ferramentas da qualidade, que serão abordadas a seguir. Aplicadas ao longo de anos, essas ferramentas têm se mostrado extremamente úteis na concepção e na melhoria de processos, produtos e serviços.

Com forte caráter investigativo, elas atuam, na maioria das vezes, de maneira preventiva, partindo de dados e de um amplo conjunto de informações sobre falhas obtidas a partir da aplicação das metodologias previamente discutidas. Essas ferramentas são consideradas essenciais para engenheiros da qualidade, peritos e projetistas, sendo fundamentais para o diagnóstico e a prevenção de falhas.

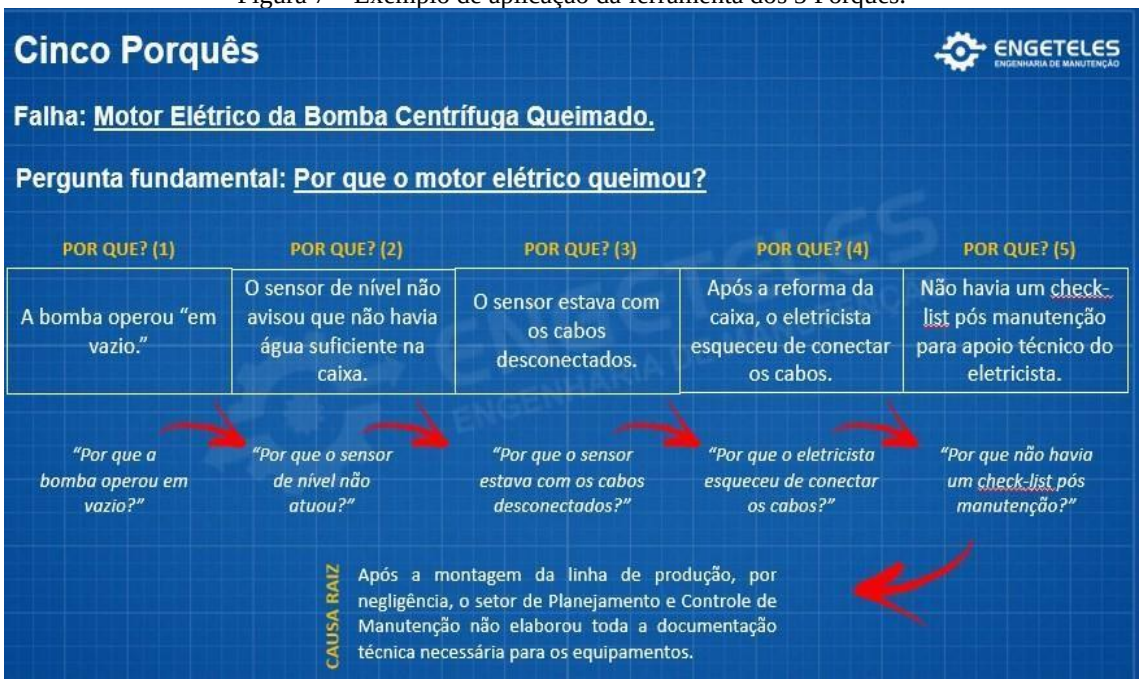
6.1 5 PORQUÊS

Quando ocorre um evento inesperado, a reação inicial geralmente é questionar as razões (os "porquês") que levaram a tal ocorrência. Uma ferramenta inicial de análise de falhas, porém extremamente eficaz, consiste justamente em explorar essa linha de questionamento repetidamente até se chegar a uma provável causa (ALBERTIN, M.; GUERTZENSTEIN, V., 2018).

A ferramenta dos porquês baseia-se em uma sequência de perguntas que contribuem para compreender a causa raiz do problema. A resposta à primeira pergunta gera uma segunda pergunta, cuja resposta origina a terceira, e assim sucessivamente, constituindo o mecanismo central da ferramenta. Em média, cinco perguntas são suficientes para identificar o início do problema, ou seja, o porquê principal. Caso seja necessário aprofundar a análise, mais perguntas podem ser incluídas (TÁSSIA, A.; DE OLIVEIRA, L. B., 2020).

Na Figura 7, apresenta-se um exemplo hipotético de aplicação dessa ferramenta: suponha que um motor industrial tenha queimado. A pergunta inicial seria: "Por que esse motor queimou?" A partir desse questionamento, desenvolvem-se as perguntas subsequentes que permitem identificar a causa raiz da falha.

Figura 7 – Exemplo de aplicação da ferramenta dos 5 Porquês.



Fonte: ENGETELES (s.d.).

Como qualquer método, a ferramenta dos 5 Porquês apresenta vantagens e limitações, sendo essencial conhecê-las para sua aplicação eficaz no trabalho do perito. Entre suas principais vantagens, destaca-se o fato de ser um método flexível e simples, cujo sucesso depende do nível técnico dos envolvidos na análise. Além disso, não exige um grande grupo de especialistas para ser concluído e tende a se basear mais em evidências do que em opiniões. A ferramenta é particularmente útil na análise de falhas de componentes mecânicos, como rolamentos, retentores, rotores, bombas e componentes elétricos, cujos parâmetros de construção, manutenção e operação são bem definidos, o que facilita a identificação da causa raiz do problema.

Por outro lado, a ferramenta dos 5 Porquês apresenta algumas limitações. Ela pressupõe que cada falha tenha uma única causa, podendo negligenciar fatores importantes, já que falhas podem resultar da ação combinada de múltiplos eventos. Também possui limitações para identificar causas humanas ou organizacionais. Além disso, a análise pode se tornar complexa quando existem múltiplos caminhos para cada porquê, sendo, nesse caso, recomendável combiná-la com outras ferramentas de análise de falhas.

6.2 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

O diagrama de Ishikawa, também conhecido como "Espinha de Peixe" ou "Causa e Efeito", é uma ferramenta gráfica utilizada para identificar possíveis causas raízes e para determinar qual categoria de variações no processo representa a maior fonte de variabilidade na saída. Trata-se de uma das ferramentas mais empregadas em conjunto com a metodologia de análise de falhas. Kaoru Ishikawa, seu criador, integrou e expandiu conceitos de gerenciamento de outros pensadores para o

sistema japonês, e em 1962 apresentou sua principal contribuição à Gestão da Qualidade com o desenvolvimento do conceito de Círculo de Qualidade, posteriormente oficializado como Diagrama de Causa e Efeito em 1982 (CAVALCANTI, R. C.; DE FILHO, F. J., 2015).

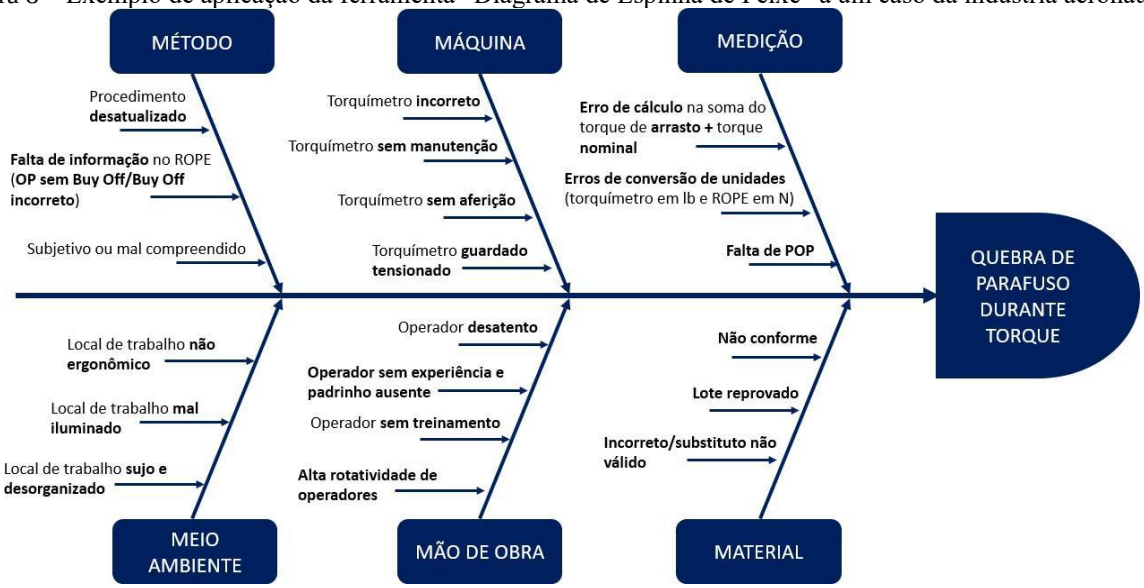
O método parte da hipótese de que, para cada problema, existe um número limitado de causas primárias, secundárias, terciárias, e assim sucessivamente. Inicialmente desenvolvido para sistemas industriais, o diagrama agrupa as causas em seis categorias, conhecidas como os 6 M's do processo:

- "Máquina" se refere a falhas no maquinário durante o processo, como funcionamento incorreto ou falhas mecânicas;
- "Materiais" engloba situações em que a matéria-prima ou material utilizado não está conforme as especificações, como produtos fora de tamanho, vencidos ou em temperatura inadequada;
- "Mão de obra" envolve atitudes ou dificuldades na execução do processo, incluindo pressa, imprudência ou falta de qualificação;
- "Meio ambiente" considera fatores externos ou internos que favorecem a ocorrência de problemas, como contaminantes, poluentes, calor, falta de espaço ou layout inadequado;
- "Método" trata de procedimentos ou métodos que influenciam a ocorrência do problema, questionando se houve planejamento adequado, execução conforme o roteiro ou uso das ferramentas corretas;
- "Medidas" refere-se às métricas utilizadas para monitorar ou controlar parâmetros do processo, incluindo acuidade de instrumentos, indicadores ou metas estabelecidas.

O objetivo da ferramenta é categorizar as possíveis falhas e, quando o diagrama estiver completamente preenchido, permitir identificar claramente as causas potenciais e, eventualmente, a causa raiz do problema (CAVALCANTI, R. C.; DE FILHO, F. J., 2015). O preenchimento do diagrama ocorre da direita para a esquerda, iniciando pelo efeito da falha (consequência) e seguindo com as possíveis causas distribuídas em suas respectivas categorias. Um diagrama de espinha de peixe completo inclui uma espinha central e ramificações que lembram o esqueleto de um peixe, sendo estas usadas para categorizar as causas por sequência ou função do processo.

Por exemplo, na Figura 8, foi realizada a análise do rompimento de um parafuso durante uma operação de torque, onde, em cada categoria, as causas potenciais foram listadas e avaliadas quanto à validade utilizando evidências (vindas muitas vezes de relatórios de análise de falhas, oriundos das rotinas já vistas) ou outras ferramentas analíticas (CAVALCANTI, R. C.; DE FILHO, F. J., 2015).

Figura 8 – Exemplo de aplicação da ferramenta “Diagrama de Espinha de Peixe” a um caso da indústria aeronáutica.



Fonte: Elaboração própria.

A ferramenta desenvolvida por Ishikawa, assim como outras ferramentas citadas, apresenta virtudes e limitações, sendo essencial que o perito as conheça para sua aplicação eficaz. Entre suas principais vantagens, destaca-se a clareza das relações estabelecidas entre causas e efeitos, facilitando a percepção do problema. Ela é especialmente útil para problemas multifatoriais, pois considera a hierarquia das causas na análise. Além disso, embora tenha sido originalmente concebida para análise de falhas de componentes com limites de construção, manutenção e operação bem definidos, também pode ser aplicada a problemas mais complexos de ordem humana ou burocrática, uma vez que seus M’s permitem agrupar diferentes tipos de causas.

Por outro lado, a ferramenta apresenta algumas limitações. Pode incentivar uma abordagem abrangente, na qual há a tendência de tentar corrigir todas as causas identificadas, mesmo que nem todas sejam relevantes. Além disso, tende a ser mais dependente da opinião do analista ao selecionar as causas primárias, secundárias e terciárias, e não exclusivamente baseada em evidências, o que pode influenciar a acurácia da análise.

6.3 FMEA

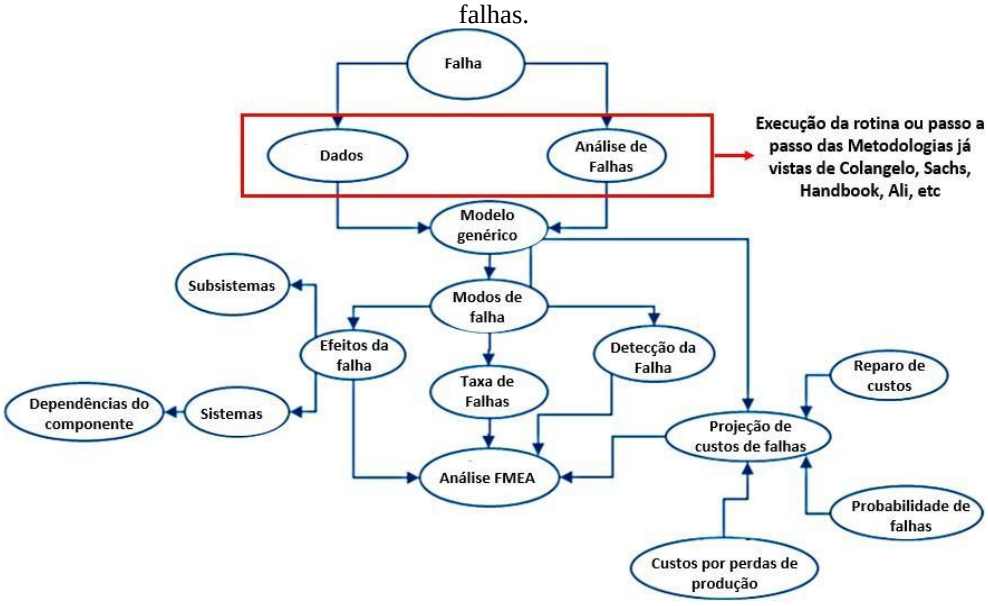
FMEA, sigla para *Failure Mode and Effect Analysis*, ou Análise de Modos e Efeitos de Falha em português, é uma ferramenta voltada para o mapeamento de potenciais causas de falhas que ainda não ocorreram, possuindo caráter indutivo e preventivo. Empresas comprometidas com a qualidade e a prevenção de falhas utilizam essa ferramenta para minimizar os impactos de eventos indesejáveis na indústria, buscando identificar falhas em processos ou produtos e tomar ações preventivas e prioritárias de melhoria. De acordo com a literatura, o uso do FMEA teve início no final dos anos 1940, durante períodos de intensos conflitos militares, com o objetivo de avaliar a confiabilidade de sistemas e a ocorrência de falhas em equipamentos (SCAPIM, C. A., 2013).

Atualmente, o FMEA se consolidou como uma ferramenta da qualidade aplicada por diversas organizações, desde a NASA e a Ford até a SpaceX, sendo útil para garantir segurança e eficiência em dois principais contextos: produtos, quando aplicado para identificar falhas que saem do padrão e das especificações definidas em um projeto; e processos, quando aplicado para mapear falhas em etapas de produção, geralmente observadas após a identificação de não conformidades em produtos. O uso da ferramenta permite que produtos e processos se tornem mais assertivos, reafirmando o compromisso da empresa com a qualidade superior de seus bens manufaturados ou serviços prestados (SCAPIM, C. A., 2013).

Além dos benefícios qualitativos, o FMEA também gera vantagens econômicas significativas. A redução de falhas em processos de fabricação está diretamente associada à diminuição de desperdício de matéria-prima, menor alocação de horas-homens para correções, redução de custos com paradas não programadas e diminuição dos custos de não qualidade, relacionados a não conformidades inesperadas. Dessa forma, ao evitar desperdícios, maximiza-se o lucro da companhia. Os benefícios não se restringem apenas a donos ou acionistas, mas também alcançam o consumidor final, já que produtos com menor risco de falhas de fabricação podem ser disponibilizados a preços mais acessíveis (SCAPIM, C. A., 2013).

No entanto, todos esses benefícios só se concretizam se o FMEA for constantemente atualizado com novas potenciais causas identificadas na rotina de execução das metodologias de análise de falhas. Esse processo cria um ciclo virtuoso: as rotinas de análise de falhas identificam as causas subjacentes a falhas em componentes, seguindo os passos metodológicos já descritos, e essas causas são então compiladas no FMEA (TAZI *et al*., 2017). A Figura 9 traz um fluxograma de relação entre FMEA e análise de falhas.

Figura 9 – Fluxograma representando a interdependência entre a ferramenta FMEA com a metodologia de análise de falhas.



Fonte: Adaptado de TAZI, N. *et al*., 2017.

O compilado das causas potenciais identificadas é organizado em um painel no formato do FMEA, onde cada causa recebe uma pontuação de severidade, ocorrência e detecção, variando de zero a dez. Esses valores são multiplicados entre si, resultando no *Risk Priority Number* (RPN), que representa a gravidade relativa de cada causa potencial (TAZI *et al*., 2017). Na Figura 10, observa-se um preenchimento hipotético de uma planilha ou quadro FMEA, no qual é possível identificar o mapeamento de, no mínimo, cinco causas potenciais de falha para este tipo de componente, considerando que, segundo a aplicação da metodologia de análise de falhas em casos semelhantes em alguma empresa, tais causas já foram responsáveis por ocorrências anteriores.

Figura 10 – Exemplo de FMEA para o mapeamento das potenciais causas de modos de falha em motores elétricos.

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA POTENCIAL

Nº. FEMEA: 122 **Data de Início:** 27-08-2012 **Responsável:** Cristiano Citisystems
Área: Resfriamento de Cubas **Revisão:** 01 **Preparado por:** João **Telefone:** (15) 3021-6257
Sistema: Bombeamento **Equipe:** João, Felipe, Pedro

Nome do Componente	Função do componente	Modo(s) de falha	Efeito(s) Potencial(is) de Falha(s)	OCORR (tab1) (O)	SEVER (tab2) (S)	DETEC (tab3) (D)	RISCO (RPN) (O)*(S)*(D)	Ação Corretiva Recomendada
M212 - Motor Elétrico	Bombear água para a caixa d'água central	Estator - Falha de isolamento	Perda de Fluxo	1	3	5	15	
		Estator - Enrolamento danificado	Perda de Fluxo	4	4	6	96	Realizar inspeção mensalmente no estator
		Estator – Rotor Queimado	Perda de Fluxo	4	4	5	80	Realizar termografia mensalmente
		Estator – Vibração Excessiva	Perda de Fluxo	5	6	5	150	Realizar análise de vibração mensalmente
		Estator – Rolamento Travado	Perda de Fluxo	5	6	6	180	Realizar inspeção semanal no rolamento

Fonte: SILVEIRA, C. B. (2012).

Essas informações tornam-se úteis na tomada de decisão para implementação de melhorias no processo, que podem atuar na contenção ou eliminação de determinado tipo de falha, reduzindo preventivamente riscos e custos, conforme ilustrado na Figura 9. No entanto, a ferramenta apresenta vantagens e desvantagens que o perito deve conhecer para utilizá-la de forma eficaz.

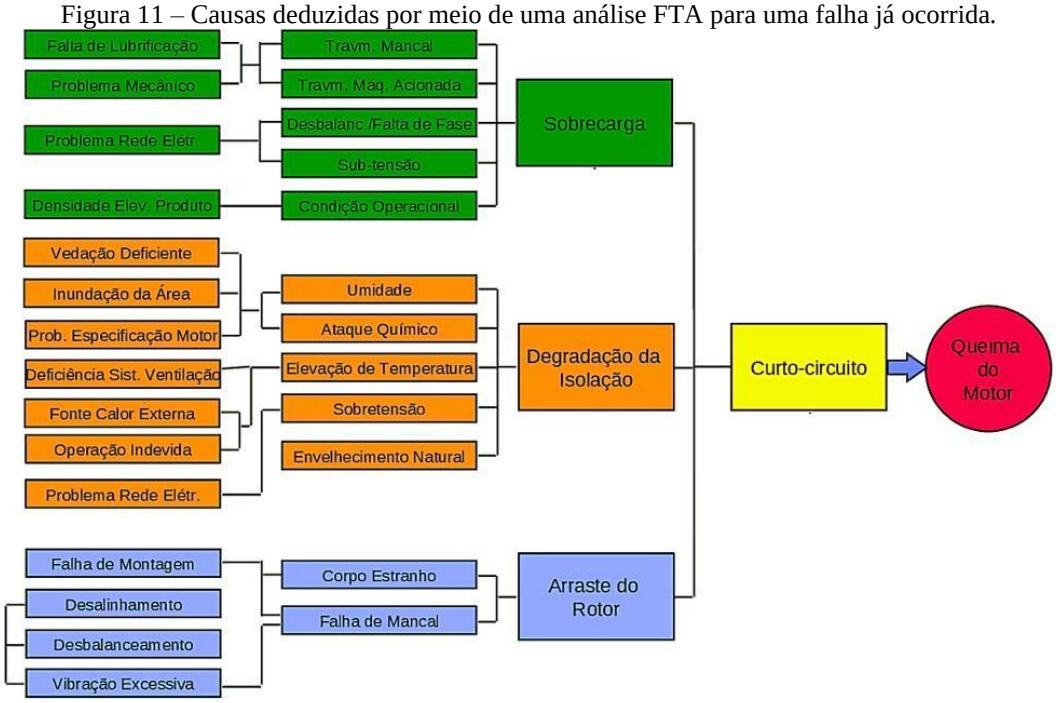
Entre suas principais vantagens, destacam-se a capacidade de evidenciar as causas mais críticas para a falha, favorecendo a assertividade das ações, identificar e eliminar erros precocemente com enfoque preventivo, além de melhorar a qualidade e a segurança do processo. Por outro lado, a ferramenta depende da existência de dados suficientes para análise, e o cálculo do RPN pode, em alguns casos, mascarar falhas graves ou supervalorizar falhas menores devido à forma como é realizado.

6.4 FTA

A árvore lógica de falhas, ou *Fault Tree Analysis* (FTA), é uma ferramenta utilizada para identificar as raízes físicas, humanas e latentes de uma falha já ocorrida ou suposta, conforme ilustra a

Figura 11. Inicialmente, descreve-se a falha funcional que está sendo estudada, etapa fundamental para o sucesso da análise (YAZDI, M. *et al*., 2017). Falha funcional refere-se à perda da função de um equipamento, máquina ou dispositivo dentro de um processo, como a queima de um motor ou a pane de uma bomba hidráulica que deixa de fornecer fluido na vazão projetada.

Figura 11 – Causas deduzidas por meio de uma análise FTA para uma falha já ocorrida.

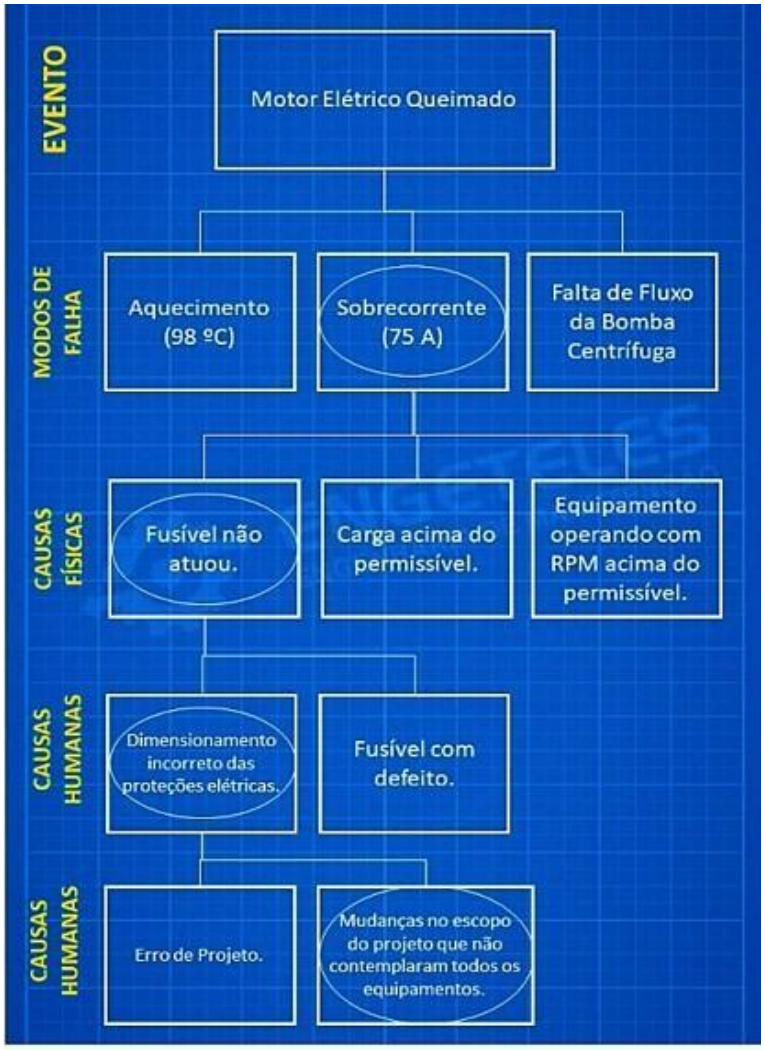


Fonte: ENGETELES (s.d.).

Assim como o Diagrama de Ishikawa, a FTA é uma representação gráfica das inter-relações de causas básicas que resultam em um evento indesejável, desenvolvida por lógica dedutiva para prevenir a recorrência da falha. A partir de um evento, constrói-se um diagrama lógico invertido, adicionando ramificações e sub-ramificações para as prováveis causas até chegar às causas básicas ou eventos primários, cujas probabilidades de ocorrência podem ser estimadas com critério (YAZDI, M. *et al*., 2017).

A técnica é amplamente utilizada nos setores químico, petroquímico, aeronáutico e nuclear para quantificação de eventos. A Figura 12 ilustra uma árvore de falhas desenvolvida para uma falha hipotética de queima de um motor elétrico.

Figura 12 – Exemplo de aplicação da ferramenta FTA para o caso de uma falha catastrófica ocorrida em um motor elétrico.



Fonte: ENGETELES (s.d.).

Diferentemente do FMEA, que parte de um componente e descreve modos de falha potenciais, a FTA inicia da falha ou evento indesejado e deduz retroativamente suas causas físicas e humanas. Essa abordagem é especialmente vantajosa quando há poucas falhas iniciais, pretende-se avaliar o sistema para implementar modos de segurança, analisa-se um sistema complexo com múltiplas interações entre componentes, ou quando existe grande potencial de erro humano ou falha de software, situações que demandam a ativação de modos de segurança.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de falhas em metais representa uma das mais relevantes aplicações da engenharia de materiais, por reunir fundamentos científicos, metodológicos e práticos em prol da segurança e da confiabilidade industrial. Ao longo deste capítulo, foi possível observar que, independentemente da abordagem ou do autor, todas as metodologias convergem para um mesmo propósito: compreender a origem das falhas e transformar esse conhecimento em aprimoramento tecnológico.

Os modelos apresentados (de Colangelo e Heiser a Aidy Ali) demonstram que a evolução das metodologias reflete o avanço da própria engenharia, incorporando desde análises microestruturais até ferramentas modernas de gestão da qualidade, como FMEA, FTA, Diagrama de Ishikawa e os 5 Porquês. Essa integração entre ciência dos materiais e gestão de processos reforça a importância de se tratar a análise de falhas não apenas como um procedimento técnico, mas como um instrumento estratégico de melhoria contínua.

Sob a ótica tecnológica e industrial, o domínio dessas metodologias contribui para aumentar a confiabilidade de sistemas mecânicos, reduzir desperdícios e prevenir acidentes, impactando diretamente na eficiência produtiva e na sustentabilidade das operações. Assim, compreender e aplicar metodologias de análise de falhas é mais do que investigar a causa de um defeito: é promover a inovação, garantir a segurança e fortalecer a cultura de aprendizado dentro da engenharia, um compromisso permanente entre o conhecimento técnico e a preservação da vida.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos Mecânicos: Análise de Falhas e Solução de Problemas.** Qualitymark Editora, 3ª Edição - Rio de Janeiro. ISBN 978-85-414-0036-7. 2014.

ALBERTIN, Marcos; GUERTZENSTEIN, Viviane. **Planejamento avançado da qualidade: sistemas de gestão, técnicas e ferramentas.** Alta Books Editora, 2018.

ALI, Aidy. **Failure Analysis and Prevention.** BoD–Books on Demand, National Defense University of Malaysia, Malaysia. ISBN: 978-953-51-3714-6. 2017.

ASM Handbook. Volume 11. **Failure Analysis and Prevention.** Second printing. Ohio: Materials Park, 2004.

ASM Handbook, Volume 12, **Fractography, ASM (American Society for Metals),** Sixth printing, Materials Park, Ohio, 517 p. 2009.

BARBOSA, Cássio. **Fundamentos da Análise Fractográfica de Falhas de Materiais Metálicos** (Coleção de Coleção de Livros ABM em Metalurgia, Materiais e Mineração - livros ABM) Editora Blücher. Edição do Kindle. 2021.

CAVALCANTI, R. C.; DE FILHO, Farias JR. **Ferramentas da qualidade auxiliando na otimização dos processos do setor de manutenção: um estudo de caso na indústria automobilística.** In: Anais do Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2015.

COLANGELO, V.J.; HEISER, F.A., **Analysis of Metallurgical Failures.** (2nd ed.), Wiley, London, 1987.

DA CUNHA, Antonio Geraldo. **Dicionário Etimológico da Língua Portuguesa.** Lexikon Editora, ISBN 9788586368639. 744 p. 2019.

DE CASTRO, P. M. S. T. et al. **Damage Tolerance of Aircraft Panels.** Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. ISSN, v. 1646, p. 7078, 2010.

DE MORAIS, Willy Ank; DE MORAIS TAVARES, Marcio; FARIAS, Eduardo Sanches. **A análise de falhas: Parte 4.** Universidade Santa Cecília – UNISANTA - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica (2014).

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

ENGETELES. Ferramentas para análise de falhas, s.d. Disponível em: <https://engeteles.com.br/ferramentas-para-analise-de-falhas/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ENGETELES. Análise de árvore de falhas: aplicação na gestão da manutenção, s.d. Disponível em: <https://engeteles.com.br/analise-da-arvore-de-falhas-aplicacao-na-gestao-da-manutencao/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

HELLIER, Charles J. **Handbook of Nondestructive Evaluation.** McGraw-Hill Education, 2013.

HIDALGO, Cesar. **Why Information Grows: The Evolution of Order, From Atoms to Economies.** Basic Books, 2015.

MOURA, Alexandre D'Ávila; GOMES, Breno de Sousa Cartaxo. **Projeto de Adaptação da MTS para Ensaio de Fadiga por Fretting fio a fio.** (Projeto de Graduação II – UnB – DF). 2015.

SACHS, N. W.; **Practical Plant Failure Analysis – A Guide to Understanding Machinery Deterioration and Improving Equipment Reliability.** CRC - Taylor & Francis, USA, 2007.

SCAPIM, Carlos Alberto. **Análise Sistêmica de Falhas**. 2ª Ed. Nova Lima: Editora FALCONI, 2013.

SHAPIRO, Howard N.; MORAN, Michael J. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Grupo Gen - LTC, ISBN 9788521622123. 7ª Ed. 2013.

SILVEIRA, Cristiano B. FMEA – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. **Citisystems**, 2012. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/fmea-processo-analise-modos-falhas-efeitos/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

TÁSSIA, Andrielly; DE OLIVEIRA, Luciana Bazante. **Aplicação de Ferramentas da Qualidade para Análise e Solução de não Conformidades em uma Indústria de Alumínio.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 5, n. 4, p. 48-58, 2020.

TAZI, Nacef; CHÂTELET, Eric; BOUZIDI, Youcef. **Using a Hybrid Cost-FMEA Analysis for Wind Turbine Reliability Analysis.** Energies, v. 10, n. 3, p. 276, 2017.

WULPI, Donald J. **Understanding How Components Fail.** ASM International, 2013.

YAZDI, Mohammad; NIKFAR, Farzaneh; NASRABADI, Mahnaz. **Failure probability analysis by employing fuzzy fault tree analysis. International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 8, n. 2, p. 1177-1193, 2017.