

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DHONNE NOGUEIRA MAGALHÃES

DETECÇÃO PRECOCE DE FALHAS EM GARFOS TRASEIROS DE  
MOTOCICLETAS UTILIZANDO O MÉTODO FMEA: UM ESTUDO  
DE CASO

MANAUS – AM  
2025

DHONNE NOGUEIRA MAGALHÃES

DETECÇÃO PRECOCE DE FALHAS EM GARFOS TRASEIROS DE  
MOTOCICLETAS UTILIZANDO O MÉTODO FMEA: UM ESTUDO  
DE CASO

Artigo apresentado à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), por meio da Escola Superior de Tecnologia (EST), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Dr. José Costa de Macedo Neto

MANAUS – AM  
2025

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

M189d      Magalhães, Dhonne Nogueira  
Detecção precoce de falhas em garfos traseiros de motocicletas utilizando o método FMEA: um estudo de caso. / Dhonne Nogueira Magalhães. Manaus : [s.n], 2025.  
34 f.: color.; 21.0 cm.  
  
TCC - Graduação em Engenharia de Materiais- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025.  
Inclui Bibliografia.  
Orientador: Neto, José Costa de Macedo.  
  
1. FMEA. 2. Garfo traseiro. 3. Falhas estruturais. 4. Fadiga mecânica. 5. Confiabilidade. I. Neto, José Costa de Macedo (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)66.03


UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA  
TERMO DE APROVAÇÃO

DHONNE NOGUEIRA MAGALHÃES

DETECÇÃO PRECOCE DE FALHAS EM GARFOS TRASEIROS DE  
MOTOCICLETAS UTILIZANDO O MÉTODO FMEA: UM ESTUDO  
DE CASO


Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, pela seguinte banca examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 JOSE COSTA DE MACEDO NETO  
Data: 08/12/2025 22:25:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Dr. José Costa de Macedo Neto – Orientador

Documento assinado digitalmente  
 ANTONIO DE LIMA MESQUITA  
Data: 09/12/2025 11:39:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Antônio de Lima Mesquita – Membro da Banca

Documento assinado digitalmente  
 ADALBERTO GOMES DE MIRANDA  
Data: 09/12/2025 21:19:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Adalberto Gomes de Miranda – Membro da Banca

Manaus, 02 de dezembro de 2025.

# DETECÇÃO PRECOCE DE FALHAS EM GARFOS TRASEIROS DE MOTOCICLETAS UTILIZANDO O MÉTODO FMEA: UM ESTUDO DE CASO

Dhonne Nogueira Magalhães<sup>1</sup>

José Costa de Macedo Neto<sup>2</sup>

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo aplicar o método Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) na identificação precoce de falhas em garfos traseiros de motocicletas, visando aumentar a confiabilidade estrutural e reduzir riscos operacionais. A pesquisa combinou análise bibliográfica, experimental e estatística, com a realização de ensaios de fadiga, inspeções por líquido penetrante e tratamento de dados por meio de sistemas de aquisição e monitoramento de deformações. Os resultados evidenciaram que a causa raiz identificada foi o excesso de rebarba no furo de fixação, e a ação corretiva reduziu o NPR de 400 para 80 (redução de 80%). A aplicação do método FMEA permitiu classificar as falhas quanto à severidade, ocorrência e detecção, resultando em índices de risco (NPR) que indicaram a necessidade de revisão no ferramental de estamparia e implementação de critérios rígidos de inspeção dimensional. As medidas preventivas propostas, como a padronização do processo e o controle das variáveis críticas, mostraram-se eficazes para a mitigação dos modos de falha. Conclui-se que a integração entre ensaios mecânicos e o método FMEA representa uma ferramenta confiável e de baixo custo para aprimorar a segurança e a durabilidade de componentes motociclísticos.

**Palavras-chave:** FMEA. Garfo traseiro. Falhas estruturais. Fadiga mecânica. Confiabilidade.

## ABSTRACT

This study aimed to apply the *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) method to the early detection of failures in motorcycle swingarms, seeking to improve structural reliability and minimize operational risks. The research combined bibliographic, experimental, and statistical approaches, involving fatigue tests, liquid penetrant inspections, and data acquisition systems for strain monitoring. The results demonstrated that the root cause identified was excessive burr in the mounting hole, and the corrective actions successfully reduced the Risk Priority Number (RPN) from 400 to 80 (an 80% reduction). The application of the FMEA method allowed the classification of failures by severity, occurrence, and detection, resulting in risk priority numbers (RPN) which indicated the need for revisions to stamping tooling and the implementation of strict dimensional inspection criteria. Preventive measures such as process standardization and critical variable control proved effective in mitigating potential failure modes. It is concluded that integrating mechanical testing with the FMEA method provides a reliable and cost-effective tool to enhance the safety and durability of motorcycle components.

**Keywords:** FMEA. Swingarm. Structural failures. Mechanical fatigue. Reliability.

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia da Universidade do Estado do Amazonas – UEA.

<sup>2</sup> Professor e orientador do Curso de Engenharia da Universidade do Estado do Amazonas – UEA.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>8</b>
3.1 ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES ESTRUTURAIS DE MOTOCICLETAS.....	<b>8</b>
3.2 MÉTODO FMEA COMO FERRAMENTA DE PREVENÇÃO DE FALHAS ....	<b>11</b>
3.3 INTEGRAÇÃO ENTRE ANÁLISE DE FALHAS E CONTROLE DE QUALIDADE NA ENGENHARIA DE MATERIAIS.....	<b>14</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>18</b>
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	<b>18</b>
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>21</b>
5.1 ANÁLISE DE FALHA NO ENSAIO DE DURABILIDADE ( ESTUDO DE CASO K1SG ).....	<b>21</b>
5.2 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	<b>22</b>
<b>5.2.1 Monitoramento de Tensões (extensometria)</b> .....	<b>22</b>
<b>5.2.2 Determinação da causa raiz: Fractografia e Metrologia</b> .....	<b>24</b>
<b>5.2.3 Investigação do Limite de Resistência (LR)</b> .....	<b>26</b>
5.3 APLICAÇÃO DE FMEA: CENÁRIO INICIAL .....	<b>27</b>
5.4 AÇÕES CORRETIVAS E MELHORIAS DE PROCESSOS .....	<b>27</b>
5.5 REAVALIAÇÃO DO RISCO E VALIDAÇÃO .....	<b>28</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>31</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia automotiva melhorou a precisão de muitas metodologias, como a análise, para que pudéssemos garantir a qualidade e durabilidade dos componentes mecânicos. O garfo traseiro, também chamado de braço oscilante, é um dos elementos mais importantes em uma motocicleta. Este elo serve para estabilizar o veículo no qual a roda traseira está montada e suporta as tensões das irregularidades do solo, acelerações e frenagens. Devido ao seu papel estrutural, é um elemento da estrutura repetidamente exposto a vibrações, torções e colisões repetitivas, o que leva ao desgaste por fadiga. Segundo Chiou et al. (2024), o garfo traseiro está exposto a falhas de projeto, produção ou manutenção, o que o apresenta como um dos componentes mais vulneráveis a rachaduras e deformações em um projeto.

Nesse contexto, os mecanismos de análise de risco e confiabilidade, como a FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos), surgiram para eliminar falhas ao mesmo tempo em que aprimoram o controle de qualidade na indústria de motocicletas. A FMEA permite a determinação e classificação de todos os possíveis modos de falha antes que causem consequências críticas, priorizando ações corretivas com maior impacto (Ványi, 2016). Essa abordagem é baseada em três parâmetros principais: severidade, ocorrência e detecção, e juntos eles compõem o número de prioridade de risco (RPN). Assim, o processo ajuda engenheiros e gerentes a tomarem decisões sobre os investimentos em trabalhos preventivos para reduzir custos de retrabalho e melhorar a confiabilidade dos componentes automotivos em operação.

A FMEA pode ser de grande importância para a fabricação e montagem de garfos traseiros de motocicletas, pois permite mapear possíveis razões de falha de soldagem, desalinhamento e defeitos metalúrgicos no processo. Ramly e Atan (2018) observam que a implementação de análise preventiva na produção é propícia à padronização nos processos de produto e que há menos variação entre os lotes. Além disso, o uso da FMEA pode ser combinado com tecnologias de monitoramento estrutural, como extensômetros e sensores de vibração, para melhorar a detecção precoce de anomalias também (Mascia, 2020), e pode oferecer leituras em tempo real dos efeitos mecânicos da peça ao passar por testes de fadiga. É essa integração da análise preditiva com a instrumentação eletrônica que representa um grande avanço na prática de manutenção preventiva e confiabilidade dos sistemas veiculares.

A relevância desta pesquisa pode ser explicada pela redução das ocorrências de falhas estruturais em garfos traseiros, que podem levar a acidentes, custos de reparo e também danos à percepção da marca. A questão chave aqui é como exatamente esse processo de FMEA pode ajudar no aviso prévio de erros e na otimização do processo de fabricação desses componentes. O principal interesse deste trabalho, portanto, é perguntar: como a aplicação do método FMEA de maneira organizada pode melhorar a identificação precoce e o controle da falha dos garfos traseiros de motocicletas?

Este artigo descreve o uso de um estudo de caso que estuda o design e construção de um garfo traseiro do modelo de motocicleta K1SG. O estudo aborda o exame de uma falha estrutural experimentada em testes de validação e a implementação do método FMEA na correção de processos de produção, incluindo a validação de novas ferramentas de estampagem. Revela que a análise experimental de falhas combinada com ferramentas de gestão de risco foi crítica para a avaliação da integridade estrutural e aceitação do componente para testes de fadiga.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Aplicar o método Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) na análise de falhas potenciais em garfos traseiros de motocicletas, com o propósito de aprimorar o processo produtivo e aumentar a confiabilidade estrutural do componente.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar os modos de falha mais recorrentes no processo de fabricação e montagem do garfo traseiro.
- Avaliar a severidade, a ocorrência e a capacidade de detecção de cada modo de falha, elaborando a matriz FMEA correspondente.
- Propor ações corretivas e preventivas que reduzam o índice de prioridade de risco (NPR).
- Otimizar o controle de qualidade e a durabilidade do componente, minimizando custos com manutenção e falhas em uso.
- Contribuir para o fortalecimento das práticas de engenharia preventiva no setor motociclístico.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Análise de Falhas em Componentes Estruturais de Motocicletas

Falhas na análise do sistema estrutural de motocicletas constituem uma área importante tanto na engenharia mecânica quanto na confiabilidade do sistema veicular. De todos os elementos que constituem a motocicleta, o garfo traseiro, também chamado de braço oscilante, está entre os mais vulneráveis à fadiga, que é um subproduto de suas cargas dinâmicas. É aqui que a roda traseira se conecta ao quadro e atua diretamente na absorção de impactos, suporte de peso e manutenção da estabilidade do veículo em movimento. Chiou et al. (2024) observaram que o garfo traseiro está exposto a forças contínuas, vibrações, variação térmica e é considerado um ponto crítico relacionado à segurança do veículo.

De acordo com Chiou et al. (2024), a causa da falha dos garfos traseiros está principalmente associada à fadiga mecânica, o que significa uma degradação persistente do material submetido a pressões cíclicas abaixo de seu pico de resistência. Esse tipo de falha geralmente começa com microfissuras em áreas de concentração de tensão; ou seja, soldas, furos, bordas e ligações metálicas que ao longo dos anos se desenvolvem e resultam na falha total da peça. O comportamento de fadiga e o comportamento de fadiga do material são influenciados pelo material utilizado, condições de acabamento e qualidade do processo de soldagem/geométrica da peça. Assim, a controlabilidade da produção e a análise preditiva são extremamente significativas para prevenir falhas precoces como resultado.

De acordo com o exame de Sakamoto (2009) das peças de motocicletas, a maioria das rupturas do sistema estrutural ocorre após longas horas de uso, quando pequenas discontinuidades de superfície se transformam em fissuras muito significativas. Ele mencionou que o garfo traseiro também depende da resistência do chassi e da condição do solo. Na aplicação de motocicletas em ambientes expostos a vibrações e impactos (por exemplo, estrada não pavimentada), a chance de falha é maior. Devido aos extensômetros para medir com precisão as tensões de trabalho (como exemplo), este resultado destaca a necessidade de análise de fadiga ligada a equipamentos experimentais na avaliação em tempo real das tensões operacionais.

Além dos fatores estruturais, a literatura enfatiza o impacto e a importância das técnicas de fabricação na durabilidade dos componentes. Como observa Mascia (2020), sem padronização dos procedimentos de soldagem e inspeção, seria perigoso colocar

peças metálicas em níveis instáveis. Iniciadores de trincas como porosidade, não penetração e inclusões metálicas também levam a uma diminuição significativa na vida útil de fadiga. Para garfos traseiros, ligas de alumínio e aço carbono são selecionadas e temperatura, velocidade de deposição e tipo de eletrodo devem ser geridos adequadamente. Onde essas variáveis não são controladas, a peça é suscetível a falhas causadas por acúmulo de tensão e região na forma de deformações plásticas.

O efeito das características de carga e das características do piloto é outro fator contribuinte. Supriyanto (2024) relata que motocicletas colocadas em condições de alta carga (totalizando cargas além da resistência da carga ou condução brusca) produzem a região de desgaste acelerado do garfo traseiro. Isso acontece à medida que a mudança da força vertical e lateral altera a distribuição de tensões resultando em deformações além dos limites especificados no projeto. Desta forma, vemos a durabilidade do componente em termos de controle de fabricação e, além disso, com o comportamento do usuário e condições de manutenção.

Do ponto de vista da engenharia de confiabilidade, a análise de falhas não é apenas ver danos que já ocorreram. É uma forma estruturada de identificar possíveis causas, prever a resposta dos componentes e desenvolver medidas preventivas. De acordo com Ramly e Atan (2018), com a integração da análise de falhas juntamente com o controle estatístico de processos, a detecção de anomalias pode ocorrer desde o estágio inicial de produção. Os dados sobre desempenho e histórico de falhas podem ajudar a criar planos de manutenção preditiva. Isso significa, no contexto das motocicletas, garantir que pontos críticos de solda e zonas de máxima demanda mecânica esteja sendo monitorados 24 horas por dia, 7 dias por semana.

As técnicas de simulação computacional avançaram e também ajudam a detectar falhas na estrutura. O software de análise de elementos finitos (FEA) pode prever áreas de concentração de tensão, economizando mais tempo para testes destrutivos. Com essas ferramentas, a resposta mecânica do garfo traseiro às condições de carga pode ser verificada, permitindo projetar o design antes que ele possa ser produzido (Ványi, 2016). Este processo permite maior confiabilidade e segurança, reduz custos de prototipagem e, o mais importante, anda de mãos dadas com o monitoramento experimental.

Embora apenas a análise computacional não seja suficiente. As simulações devem ser combinadas com inspeções experimentais e técnicas de ensaio não destrutivo (END). Ultrassom, radiografia industrial e líquido penetrante são métodos frequentemente usados para estudar fissuras internas e descontinuidades em superfícies (DZIUBA, 2021). Em

conjunto com a análise preditiva, essas abordagens oferecem uma visão abrangente do estado do componente, permitindo uma tomada de decisão rápida e assertiva. Para garfos traseiros, neste caso, o método de líquido penetrante é muito adequado para encontrar fissuras mais finas nas áreas soldadas e locais de difícil acesso.

Além disso, os princípios de confiabilidade estatística permitiram uma previsão mais sofisticada para a vida útil dos elementos estruturais. Aleksic et al. (2025) mencionaram que o uso de modelos probabilísticos e análise de dados de falhas permitiu calcular o tempo médio até a falha (MTTF) e, portanto, fazer melhores planos de manutenção. Este método quantitativo é altamente relevante para organizações cujas motocicletas são produzidas em massa e onde permite a previsão de comportamento em lotes de peças a partir de amostras representativas.

A análise de falhas também está relacionada à filosofia de melhoria contínua. Os dados coletados do estudo das causas de falhas não devem visar apenas a correção de defeitos, mas também a prevenção de erros (de Aguiar 2015). Isso significa registro preciso de cada ocorrência, análise de causa raiz e ações corretivas escritas. Assim, para o processo de produção de garfos traseiros, esta etapa ajuda na melhoria contínua do processo e também no fortalecimento da cultura de qualidade na organização.

Por fim, a análise da quebra estrutural de motocicletas em componentes estruturais deve ser considerada em um sistema holístico de qualidade e segurança e não apenas isoladamente. Estende-se desde a concepção do projeto até o uso no final da vida útil; não apenas uma única fase. Combinando métodos como abordagem analítica, experimental e estatística, esperamos identificar falhas além de entender seus mecanismos e potencial de prevenção. Portanto, de acordo com Mascia (2020), o desafio atual da engenharia é transformar dados de falhas em conhecimento acionável com base em decisões estratégicas orientadoras e melhoria contínua do desempenho do produto.

O estudo das quebras nos garfos traseiros de motocicletas é uma investigação multidisciplinar de materiais, processo, design e desempenho de serviço. O uso de ferramentas preditivas (incluindo FMEA) juntamente com processamento experimental e computacional pode eliminar riscos no design de produtos mais estáveis e confiáveis. Esta combinação de diagnóstico e gestão de qualidade reúne a preocupação das indústrias de motocicletas com a segurança e eficácia de seus veículos.

### **3.2 O Método FMEA como Ferramenta de Prevenção de Falhas**

A análise de modos de falha e efeitos (FMEA) é uma medida comum de desempenho dentro do controle de qualidade de materiais, visando prever e prevenir falhas na fabricação e aplicação de produtos e processos. Proposta inicialmente para a indústria aeroespacial na década de 1940 e utilizada na indústria automotiva na década de 1960, o objetivo central da FMEA é prever o comportamento de mau funcionamento identificando modos de falha potenciais antes que se concretizem e estimando seus efeitos na operabilidade e segurança do sistema. Esta ferramenta, conforme descrito por Ványi (2016), desenvolveu-se em uma parte integral da prevenção de falhas e melhoria contínua, pois permite o estudo sistemático dos determinantes e efeitos dos defeitos, categorizando este tipo de defeito com base na gravidade, chance e possibilidade de detecção.

O procedimento é gerar uma matriz de análise, que contém modos de falha potenciais, causas, impactos e ações corretivas/preventivas. Três indicadores básicos avaliam cada falha: gravidade (S), que mede o efeito no sistema do mecanismo falho; ocorrência (O), que mede a frequência do mecanismo defeituoso; e detecção (D), que indica a probabilidade de identificação antes que o problema seja encontrado pelo usuário final. Cada um desses três fatores juntos gera o Número de Prioridade de Risco (RPN) para organizar as falhas e a prioridade de ação. Esta metodologia quantitativa permite focar todos os recursos e esforços da empresa nas falhas críticas (MASACIA, 2020).

Como sugerido por Mascia (2020), a FMEA não é apenas um dispositivo técnico, mas também uma ferramenta de gestão que promove a interação entre design, produção, manutenção e qualidade. Tal integração é importante, particularmente no setor de motocicletas, onde o design e a fabricação impactam a confiabilidade dos componentes. A precisão do método depende da expertise dos profissionais envolvidos na identificação, e assim, para a identificação dos modos de falha, são necessários dados completos e condições de uso do produto, bem como o processo de produção. Portanto, a FMEA é uma forma de conectar a engenharia de produto e a engenharia de processo em direção à prevenção em vez da correção.

Para peças automotivas e de motocicletas, a FMEA alcançou grandes benefícios para minimizar falhas e maximizar a produção. Como mencionado por Supriyanto (2024), o método acima levou à redução de eventos de falha crítica em linhas de montagem de peças metálicas em até 40% e também à extensão da vida útil do produto da máquina. O autor referenciou um estudo de caso de um fabricante de motocicletas na Indonésia, onde a incorporação da FMEA, em conjunto com o controle estatístico de processos, e a

possibilidade de detectar falhas devido à soldagem ou deformação plástica antes da inspeção final foi demonstrada. Esses achados apoiam o efeito preventivo da FMEA como um mecanismo estratégico de confiabilidade.

Ramly e Atan (2018) esclarecem que um processo FMEA apropriado depende da coleta e análise de dados históricos de falhas, o que lhes dá uma visão realista da causa mais comum. O método precisa ser atualizado continuamente para obter dados de relatórios de manutenção, verificações e reclamações de clientes. Com garfos traseiros de motocicletas, é importante incorporar essa informação, pois as causas e consequências da falha podem envolver várias fontes, desde a falha no processo de fabricação (por exemplo, rachaduras na solda, desalinhamentos na solda) até o mau estado de uso (por exemplo, sobrecarga, falha de manutenção). Assim, a FMEA serve como um sistema de feedback, onde cada nova ocorrência é esperada para ter resultados de projeto melhorados.

Além de seu uso no controle de qualidade, a FMEA é relevante para a fase de desenvolvimento de produtos. Renu (2016) recomenda que a abordagem seja empregada nas fases iniciais de design, pois os custos de correção podem ser muito menores. Esta prática é referida como Design FMEA (DFMEA), com o objetivo de prever falhas no design, como dimensionamento incorreto, escolhas erradas de material ou falhas de montagem. A FMEA de Processo (PFMEA), no entanto, tem como alvo a fase de produção, como falhas na fabricação, montagem e inspeção. Ambos os tipos podem ser combinados e, por exemplo, para a geometria do garfo traseiro, DFMEA para a geometria e resistência estrutural da peça e PFMEA para controle de variáveis de processo em relação à qualidade e acabamento da solda.

A literatura emergente demonstra o potencial para integrar a FMEA com novas tecnologias digitais. Okazaki et al. (2025) descreveram um modelo de aprendizado de máquina que automatiza parte do processo de identificação de falhas, ligando dados de sensores e inspeções visuais, juntamente com registros de produção. Este método, denominado FMEA orientado por dados, aumenta a precisão das análises e minimiza a natureza subjetiva do humano, tornando o método mais confiável e compatível com os princípios da Indústria 4.0. Na prática, isso implica que os sistemas podem identificar padrões de anomalias em tempo real e recomendar atividades de correção para evitar que defeitos se transformem em falhas catastróficas.

Na indústria de motocicletas, o FMEA também foi integrado a estudos experimentais e simulações computacionais para melhorar a precisão do diagnóstico. Chiou et al. (2024) mostraram que o FMEA, quando combinado com a análise de

elementos finitos (FEA), permite uma previsão mais precisa dos pontos de concentração de tensão nos garfos traseiros. Essa integração facilita a correlação dos resultados das simulações teóricas com os dados experimentais usando extensômetros, resultando em um banco de dados mais sistemático para a tomada de decisões. Essa prática é crítica para componentes sujeitos a cargas variáveis e dinâmicas, como acontece em motocicletas usadas em ambientes extremos.

O FMEA, no entanto, só funciona se houver apoio organizacional e unidade de cultura de qualidade. Segundo de Aguiar (2015), a metodologia precisa ser considerada como um elemento no sistema de gestão, não como uma tarefa independente. Treinamento adequado, interação interdepartamental e envolvimento da liderança são fatores críticos para sua implementação bem-sucedida. A falta de integração setorial é uma das principais razões para o fracasso no uso do FMEA, pois envolve uma perspectiva sistêmica do produto. Empresas que o utilizam estritamente de forma documental, sem traduzir suas análises em ações reais, geralmente obtêm benefícios mínimos.

O FMEA se presta à versatilidade, tecnicamente um dos principais benefícios. Pode ser implementado em sistemas manuais e automatizados, em nível de produto ou sistema de alto nível. De acordo com Aleksic et al. (2025), essa versatilidade é o que torna a prática aplicável mesmo à medida que a tecnologia cresce e muda. Os autores enfatizam que a metodologia ainda ressoa na prática, pois é baseada nos benefícios simples e práticos de um modelo que é eficiência prática acoplada à simplicidade conceitual, a simplicidade do método acoplada à sua integração com outras ajudas, como Six Sigma e Lean Manufacturing. Essa abordagem pode remediar falhas de um lado da equação, focando em falhas de todos os lados: falha técnica, econômica e gerencial.

Outro fato importante é o papel do FMEA na gestão do conhecimento. As análises de falhas relatadas nos FMEAs anteriores, de acordo com Dziuba (2021), podem servir como uma importante base histórica para informar projetos futuros e evitar que cometam os mesmos erros a tempo. Quando atualizada periodicamente, essa memória técnica é um ativo estratégico que minimizará o tempo de reação e ajudará as equipes de engenharia a trabalharem de forma mais eficiente. Para motocicletas, no entanto, padronizar essas análises é importante porque fatores semelhantes também estão presentes em cada modelo e modos semelhantes de ocorrência existem para cada tipo de modelo.

Por último, mas não menos importante, o método FMEA deve ser conceituado como um sistema dinâmico para auxiliar a aprendizagem organizacional. Sua utilidade depende de sua capacidade de transformar descobertas de falhas em estratégias a serem

implementadas preventivamente, para que qualidade, confiabilidade e eficiência estejam no cerne de seus valores. É possível não apenas evitar falhas estruturais ao usá-lo para aplicar aos garfos traseiros montados em motocicletas, mas também melhorar sistematicamente o processo de design e produção. Assim, o FMEA torna-se um meio indispensável de comunicação para a engenharia contemporânea, através de habilidades analíticas técnicas, estratégias de tomada de decisão e prevenção de riscos, a pedra angular da construção segura e sustentável de um veículo de duas rodas.

### **3.3 Integração entre Análise de Falhas e Controle de Qualidade na Engenharia de Materiais**

A fusão da análise de falhas e do controle de qualidade de materiais é um pilar da gestão industrial moderna. No campo das motocicletas, essa integração é vital para manter a integridade de componentes críticos, como o garfo traseiro, durante o ciclo de vida do produto. Segundo de Aguiar (2015), o controle preventivo de falhas deve ser incluído desde as primeiras etapas do design, pois as decisões tomadas nesse momento podem afetar diretamente a confiabilidade, segurança e custos de manutenção. Essa abordagem preventiva conecta a análise de falhas mais estreitamente ao processo de controle de qualidade de materiais, integrando assim uma mentalidade sistêmica ao processo de melhoria.

O controle de qualidade de materiais é definido como o conjunto de princípios e métodos que visam garantir que produtos e processos atendam aos requisitos estabelecidos de desempenho, confiabilidade e segurança (DZIUBA, 2021). A análise de falhas tem seu lugar ao oferecer medições mais concretas do que ocorrerá sob condições ativas para revelar quais são os fatores imediatos do comportamento defeituoso e permitir correções. A FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) é uma das ferramentas utilizadas nessa integração, permitindo a conversão de dados de falhas em conhecimento aplicável e servindo também como base para decisões estratégicas. Essa conexão é particularmente presente na indústria de motocicletas, onde cada possível avaria pode representar uma ameaça direta à segurança do usuário.

Assim, conforme a norma ISO 9001:2015, a análise de riscos tornou-se um aspecto obrigatório do sistema de gestão da qualidade. De cima para baixo, a norma sugere que as organizações usem uma abordagem baseada em riscos, identificando e abordando potenciais não conformidades antes que impactem o cliente. Ványi (2016) explica que a FMEA atende a toda essa necessidade, pois é um meio de mapear e mitigar

riscos em produtos e processos. Na prática, isso significa que qualquer etapa da fabricação, desde a soldagem até o controle das dimensões do garfo traseiro, deve ser avaliada quanto à probabilidade de falha e ao efeito que poderia ter. Assim, vincular a FMEA e a ISO 9001 contribui para a rastreabilidade e consistência ao longo do processo de produção.

A melhoria contínua, no coração do controle de qualidade de materiais, também se conecta diretamente à análise de falhas. Como afirma Mascia (2020), o exame sistemático das causas dos defeitos não deve ser punitivo, mas sim um conhecimento destinado ao aprendizado organizacional. Para cada falha descoberta, um evento deve ser registrado, a fonte identificada e ações implementadas para melhorá-la. A documentação e o monitoramento desse processo servem para construir a cultura de qualidade em um ciclo de feedback apoiado por uma cultura de qualidade. Como exemplo, na produção de garfos traseiros, rachaduras identificadas em seções de soldagem resultarão em uma revisão dos parâmetros de soldagem ou em uma modificação do tipo de material envolvido, o que posteriormente possibilita o processo contínuo.

Aleksić et al. (2025) argumentam que a integração entre análise de falhas e controle de qualidade de materiais é também uma questão de cultura corporativa. Empresas que valorizam a qualidade não tratam o FMEA apenas como um documento obrigatório, mas como um instrumento vivo de gestão. Isso significa que a equipe de engenharia utiliza os resultados das análises para direcionar projetos, revisar métodos e definir prioridades de investimento. Essa integração favorece a tomada de decisões baseada em evidências, em vez de intuições, e promove o alinhamento entre os departamentos de projeto, produção e manutenção. Quando essa cultura é consolidada, a empresa passa a operar de forma mais previsível, reduzindo variações e melhorando sua competitividade.

Um segundo aspecto relevante é a incorporação tanto da FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) quanto de outros indicadores de qualidade, como o Controle Estatístico de Processos (CEP), o Planejamento de Experimentos (DOE) e o Seis Sigma. Tais metodologias servem para complementar a FMEA, gerando informações numéricas que confirmam as hipóteses baseadas na análise de falhas. Isso é útil para mitigar a subjetividade no processo de avaliação e definir melhores medidas de desempenho (Supriyanto 2024). Para linhas de montagem de motocicletas, a combinação de FMEA e CEP permite a identificação em tempo real de desvios de processo, minimizando assim a produção de peças fora das especificações nas etapas subsequentes.

A digitalização e a inteligência artificial também são utilizadas na integração. Okazaki et al. (2025) observam que a Indústria 4.0 mudou a forma como as análises de falhas são produzidas, com dados de produção agora sendo processados e acessados automaticamente por sistemas automatizados. Com a ajuda de algoritmos de aprendizado de máquina, é possível descobrir padrões que antecedem falhas ou até mesmo emitir alertas. Nesse sentido, a revolução da engenharia de confiabilidade orientada por dados melhora significativamente a eficiência da FMEA e seus níveis de qualidade. Para componentes como o garfo traseiro, isso significa detectar microdiferenças nas condições de soldagem ou nas propriedades dos materiais que podem prenunciar o início de falhas futuras.

O ganho econômico além das realizações técnicas, a ligação entre a análise de falhas e o controle de qualidade dos materiais também representa um grande benefício econômico a ser considerado. Ramly e Atan (2018) afirmam que o custo para corrigir uma falha na fase de produção é até dez vezes menor do que o custo de reparo após a entrega ao cliente. Usada de forma preventiva, a FMEA é utilizada para evitar recalls, retrabalho e perda de valor da marca. No negócio de motocicletas, onde a segurança é uma categoria sensível e, se não estiver preparado para as falhas mais perigosas, as pessoas podem não confiar em você, então, se não puderem prever essas falhas, não confiarão no seu produto. Dessa forma, a qualidade não é uma necessidade técnica, mas uma vantagem competitiva.

Aplicações práticas dessa integração podem ser encontradas nos processos de soldagem e montagem de garfos traseiros, com o papel da FMEA em determinar parâmetros críticos de controle. De acordo com Chiou et al. (2024), a avaliação de estresse obtida por simulações e instrumentação experimental fornece dados cruciais que informam a matriz FMEA, permitindo uma correlação entre falhas teóricas e reais. Essa ligação é vital para garantir que o sistema de qualidade funcione, pois mantém a ação preventiva contra problemas reais e não apenas contra os sintomas. Portanto, a FMEA preenche a lacuna entre a engenharia de produto e o controle de qualidade e facilita a consistência tanto na fase de design quanto na de implementação.

O fator humano também se tornou digno de consideração. Muitas dessas falhas não são devidas a questões técnicas, mas a falhas operacionais, de comunicação ou de treinamento (Dziuba, 2021). Portanto, programas de treinamento em análise e prevenção de falhas devem ser incorporados ao controle de qualidade dos materiais. Equipes interdisciplinares de engenheiros, técnicos e operadores fortalecem o sistema FMEA e

facilitam o compartilhamento de conhecimento entre os membros da cadeia de comando. O compromisso do grupo melhora ainda mais a segurança e a superioridade do produto final.

A análise de falhas e o controle de qualidade dos materiais andam de mãos dadas e compartilham um com o outro de uma forma que é tanto tecnológica quanto social. Como afirma Mascia (2020), prevenir falhas de produtos industriais baseia-se no dever das empresas de proteger a vida e a saúde dos consumidores. Para uma motocicleta, quando o piloto está completamente exposto, a confiabilidade dos componentes é considerada crítica. O garfo traseiro, que protege a estabilidade e a capacidade de condução do veículo, é uma chave de segurança para o veículo. Por essa razão, as falhas de tal parte não são simplesmente problemas de produção, mas de ética profissional e compromisso social.

Em última análise, é necessário um sistema de gestão bem estruturado, capaz de análise contínua desses resultados e respostas rápidas, para consolidar essa integração. O ciclo de melhoria contínua de Deming, planejar, fazer, verificar, agir (PDCA), mantém uma referência fundamental. No contexto do framework FMEA, esse ciclo permite que as organizações realizem análises regulares de índices de risco periodicamente e integrem novos conhecimentos. Essa prática mantém o sistema de qualidade atualizado. Também significa que as lições aprendidas podem ser aplicadas de forma eficaz.

Em conjunto, a análise de falhas do setor de motocicletas pode se tornar nada sem a ferramenta de controle de qualidade dos materiais. Assim, na maior parte, uma abordagem harmonizada envolvendo tanto a análise de falhas mecânicas quanto o controle de qualidade dos materiais nesse campo de desenvolvimento de produtos é indispensável. Tais métodos (como a FMEA) podem ser integrados a outros sistemas modernos de gestão e práticas de gestão digital para garantir que as empresas antecipem problemas, minimizem desperdícios e melhorem sua reputação no mercado. Além de um procedimento técnico, essa integração significa uma mudança: uma evolução de uma mentalidade reativa para uma cultura organizacional preventiva, na qual a qualidade é definida não como um imperativo técnico, mas como um valor fundamental.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adotou uma abordagem experimental quantitativa integrada à metodologia de análise de risco. O objeto de estudo foi o garfo traseiro de motocicleta modelo K1SG, fabricado em aço SAE 1020 (fornecedor: Usiminas) e conformado em tubo retangular, componente crítico para a estabilidade e segurança do veículo. O aço 1020 é amplamente utilizado na indústria devido às suas características favoráveis de usinabilidade, soldabilidade e resistência mecânica.

### 4.1 Materiais e Equipamentos

Para a realização dos ensaios de durabilidade e análises metalúrgicas, foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- **Corpo de Prova:** Garfos traseiros retirados da linha de produção (lotes de inspeção mensal e de validação PP1 do modelo K1SG/K68), fabricados com processo de soldagem MIG/MAG.

**Figura 1 – Garfo traseiro – Modelo K1S K68.**



Fonte: Autoria própria (2025)

- **Ensaio de Fadiga:** Equipamento *Swing Arm Fatigue Tester* (Fabricante: Masuda Seisakusho Co., Ltd.), configurado para aplicação de cargas cíclicas verticais conforme especificação (SPEC TEST 5210A-GHA-6201) - (Figura 2).

**Figura 2 – Máquina de teste de fadiga Masuda Seisakusho Co., Ltd.**



Fonte: Autoria própria (2025)

- **Análise Fractográfica e Dimensional:**
  - Estereoscópio Stemi 305 (Zeiss) para inspeção macroscópica.
  - Microscópio Óptico GX51 (Olympus) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo JSM IT-200 (Jeol) para análise de superfície de fratura.
  - Microdurômetro Qness 60 (Q-ATM).
- **Instrumentação (Extensometria):** Extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*) modelo FLKB-2-11-3HL-F e sistema de aquisição de dados SR-200 (Deicy Corp.) para monitoramento de deformações em microstrain. Para preparo da amostra foram utilizadas Lixas (80 e 120) e limpador (SKC-S) para retirada de impurezas, a Figura 3, ilustra esses materiais.

Figura 3 – (a) Lixas 80 e 240; (b) Extensômetros (Strain Gauges); (c) Adesivo cianoacrilatos; (d) Equipamento de dados (SR- 200); (f) Limpador (SKC-S).



Fonte: Autoria própria (2025)

- **Ensaio Não Destrutivo (END):** Kit de Sprays (Figura 4) de limpeza e inspeção da linha Magnaflux (Penetrante SKL-WP2 e Revelador SKD-S2) conforme norma ASTM E1417.

Figura 4 –Sprays de inspeção Magnaflux: Líquido Penetrante (SKL-WP2) e Revelador (SKD-S2).



Fonte: Autoria própria (2025)

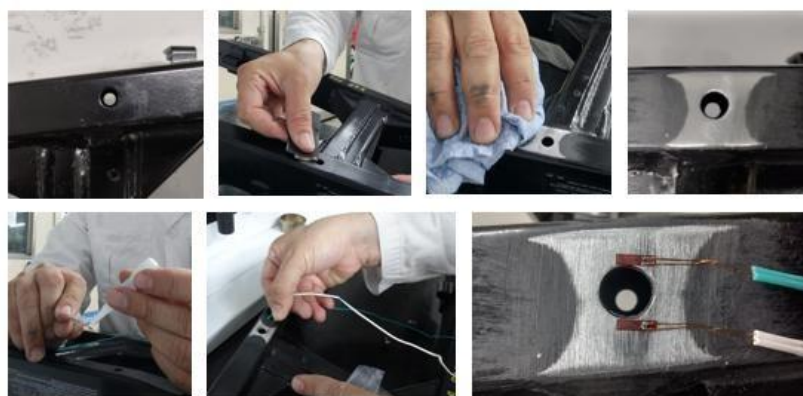
## 4.2 Procedimento Experimental

A metodologia seguiu três etapas principais: validação experimental de fadiga, investigação de causa raiz e aplicação do método FMEA.

Inicialmente, o componente foi submetido ao teste de durabilidade conforme a especificação Spec 5211Z-GHA-6201. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga vertical controlada de **5,93 kN (~600 kgf)** no eixo traseiro, simulando condições severas de uso. O critério de aprovação estabelecido foi a ausência de trincas ou rupturas após **230.000 ciclos**.

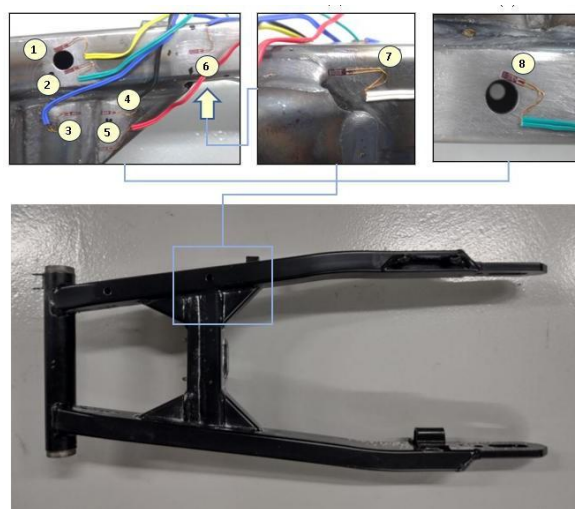
Paralelamente, realizou-se a instrumentação do garfo com extensômetros posicionados em regiões críticas (próximas às soldas e furos de fixação da travessa/ *cross member*), permitindo o mapeamento das tensões atuantes e a correlação com os pontos de falha. Os procedimentos experimentais seguiram normas técnicas de análise estrutural, com ênfase na preparação de superfície, instrumentação, calibração e ensaio. Inicialmente, a superfície do garfo traseiro foi lixada com lixas de granulações progressivas (80 e 240), depois é feita a limpeza com o limpador SKC-S, garantindo uma região livre de impurezas. Em seguida, aplicou-se o adesivo cianoacrilato CN Adhesive para fixação dos extensômetros, de forma alinhada à direção principal das tensões esperadas, conforme as Figuras 5 e 6.

**Figura 5 – Preparação e instrumentação do garfo traseiro.**



Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 6 – Regiões instrumentadas no garfo traseiro de motocicleta.**



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a ocorrência de falhas, procedeu-se à análise de causa raiz via fractografia para identificar o mecanismo de fratura (fadiga, sobrecarga ou defeito de material) e medição dimensional de precisão para verificar não conformidades geométricas, especificamente a altura de rebarbas em furos estampados. O procedimento iniciou-se com uma inspeção visual e macroscópica utilizando estereoscópio para identificar a região de nucleação da trinca. Em seguida, utilizou-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para analisar a morfologia da superfície de fratura, buscando identificar estrias de fadiga e defeitos de fabricação, como rebarbas ou inclusões, que pudessem atuar como concentradores de tensão.

Os dados obtidos alimentaram a matriz FMEA de Processo (PFMEA), onde os modos de falha foram classificados quanto à Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). A partir do Número de Prioridade de Risco (NPR) calculado, foram definidas e implementadas ações corretivas no processo de fabricação, seguidas de uma reavaliação para validar a redução dos riscos.

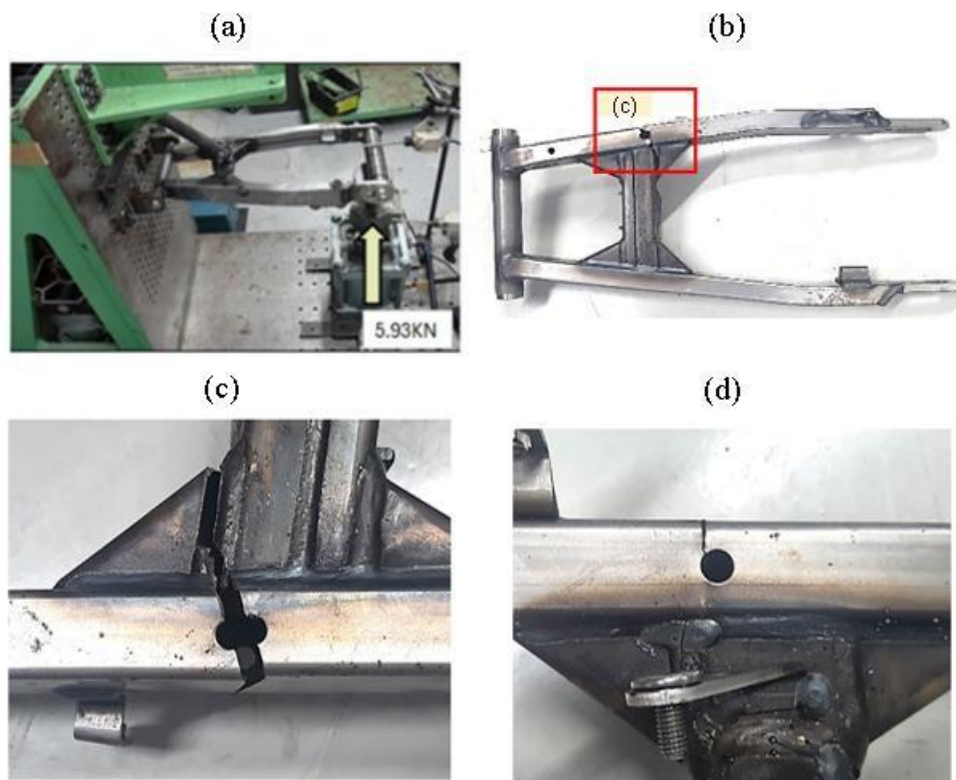
## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Análise de Falha no Ensaio de Durabilidade (Estudo de Caso KISG).**

Durante os testes de validação de rotina de inspeção mensal, uma amostra do garfo traseiro apresentou falha estrutural (Figura 7). Embora a peça tenha tecnicamente atingido

o ciclo de vida alvo, suportando a carga até **233.912 ciclos** (superando levemente o limite de 230.000 ciclos), a ocorrência de uma fratura completa no tubo exige investigação rigorosa para garantir margens de segurança adequadas.

**Figura 7 – (a) Metodologia do ensaio; (b) Fratura detectada no tubo do garfo; (c) Início da fratura no lado inferior do garfo; (d) Região superior apresenta fratura parcial**



Fonte: Autoria própria (2025)

A inspeção visual indicou que a ruptura se iniciou na região inferior do tubo, propagando-se em direção à travessa (*cross member*) e resultando na separação parcial da estrutura, conforme observado nas análises macroscópicas.

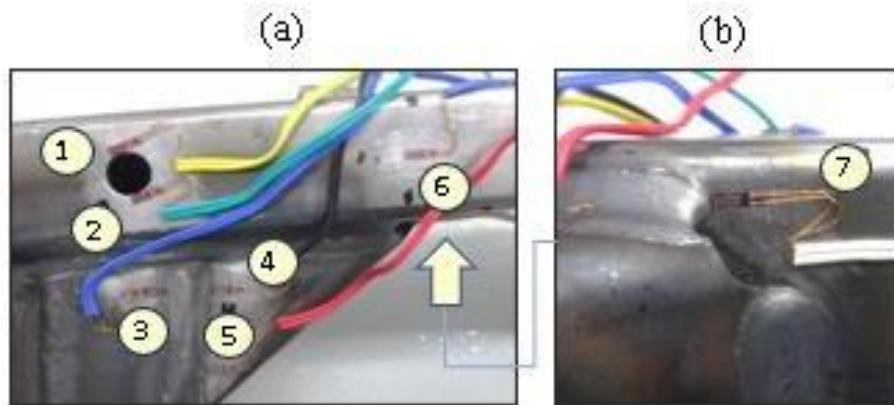
## 5.2 Investigação Experimental

### 5.2.1 Monitoramento de Tensões (Extensometria)

Para descartar a hipótese de erro de projeto ou subdimensionamento da peça, foi realizada uma análise experimental de tensões utilizando extensometria elétrica (*strain gauges*). Foram instrumentados pontos críticos do garfo traseiro, com destaque para a

região do furo de fixação (Gauges 1 e 2) e as zonas de solda (Gauge 7), conforme ilustrado na metodologia (Figura 6).

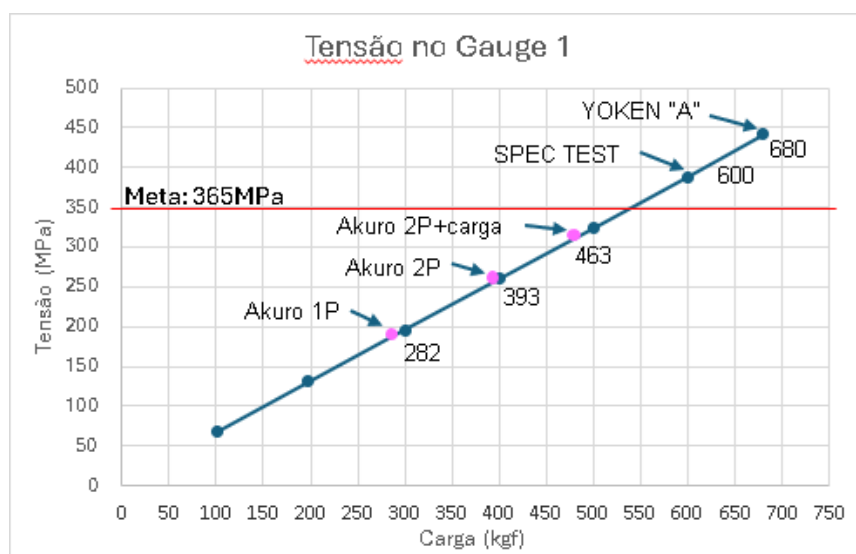
**Figura 8 – Sensores instrumentados no garfo traseiro: (a) Vista inferior; (b) Vista lateral.**



Fonte: Autoria própria (2025)

Os testes dinâmicos simularam condições severas de uso ("Piloto + Passageiro + Carga de 8kg") em velocidades de 40 km/h e 50 km/h. Os resultados obtidos, apresentados no Gráfico 1, demonstraram que as tensões máximas atuantes na região do furo (Gauge 1) atingiram picos de 304 MPa, mantendo-se abaixo da meta de projeto estabelecida em 365 MPa e do limite de escoamento do material.

**Gráfico 1 – Tensão no gauge 1 (sensor crítico)**



Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 9 – Resultados de extensometria sob condição de carga máxima.**

N.	Meta	Somente Piloto (1P)				Piloto + Garupa (2P)				N.	Meta	Piloto+Passag +carga (8kg)					
		40km/h		50km/h		40km/h		50km/h				40km/h		50km/h			
		Ld Esq	Ld Dir	Ld Esq	Ld Dir	Ld Esq	Ld Dir	Ld Esq	Ld Dir			Ld Esq	Ld Dir	Ld Esq	Ld Dir		
1	365MPa	+ 225		215		264		232		1	450MPa	+ 304		281			
		- 33		-39		-12		-41				- 15		-9			
2	365MPa	+ 225	107	216	113	263	158	231	155	2	450MPa	+ 305	173	282	166		
		- 32	-19	-33	-15	-9	14	-37	9			- 19	13	-6	0		
3	313MPa	+ 39	34	37	39	48	43	50	42	3	419MPa	+ 45	47	41	42		
		- 3	-3	-1	-2	2	2	3	1			- 2	-1	0	-2		
4	313MPa	+ 126	122	121	128	165	169	152	171	4	419MPa	+ 182	192	181	184		
		- 22	-16	-15	-12	7	6	-12	4			- 13	11	6	11		
5	313MPa	+ 140	135	133	146	186	191	171	192	5	419MPa	+ 187	217	195	206		
		- 20	-19	-6	-16	11	4	7	1			- 8	9	4	13		
6	365MPa	+ 170	154	164	159	207	197	184	216	6	450MPa	+ 240	246	222	237		
		- 26	-28	-25	-17	-5	-4	-20	12			- 14	19	-2	8		
7	256MPa	+ 165	178	163	196	229	253	212	248	7	300MPa	+ 232	288	246	266		
		- 36	-34	-15	-39	0	36	14	-20			- 2	10	-13	15		
8	450MPa	+ 39	---	43	---	-4	---	-2	---	8	554MPa	+ -12	---	-5	---		
		- 206	---	-178	---	-277	---	-263	---			- 291	---	-304	---		
				Carga: 280kgf	Carga: 282kgf					Carga: 385kgf	Carga: 393kgf					Carga: 463kgf	Carga: 445kgf

Fonte: Software – DPR 2 – para extração de dados do SR-200 (2025)

Esses dados corroboram que o componente possui resistência estrutural adequada para as cargas operacionais previstas. A ocorrência da fratura, portanto, não se deveu a uma sobrecarga global da estrutura, mas sim à intensificação local de tensão provocada pela rebarba de 0,253 mm encontrada no furo, que atuou como um detonador da falha por fadiga. O comportamento registrado é compatível com o apresentado por Mascia (2020), que ressalta que a variação geométrica e o acabamento superficial são fatores determinantes na propagação de fadiga em componentes automotivos de liga leve.

A aplicação do método Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) possibilitou identificar e hierarquizar os modos de falha potenciais do garfo traseiro. Entre os principais modos de falha destacados estão: rebarba excessiva no diâmetro interno do furo (>0,05mm), trinca na zona termicamente afetada (ZTA) e cordões de solda. Cada modo foi avaliado conforme os critérios de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), conforme preconiza a norma AIAG & VDA (2019). O cálculo do número de prioridade de risco (NPR) permitiu priorizar as falhas críticas, que obtiveram valores entre 400 e 216, indicando necessidade de ações corretivas imediatas. Já as falhas secundárias, como limite de resistência (LR) do material abaixo do especificado (<590MPa), apresentaram NPR inferiores, com valor de 160.

### 5.2.2 Determinação da Causa Raiz: Fractografia e Metrologia

A análise via MEV revelou a presença de marcas de praia (*beach marks*), conforme observado na Figura 10. Segundo Callister (2020), essas marcas são

características macroscópicas clássicas de falhas por fadiga, indicando a posição da frente da trinca durante os ciclos de carregamento intermitentes.

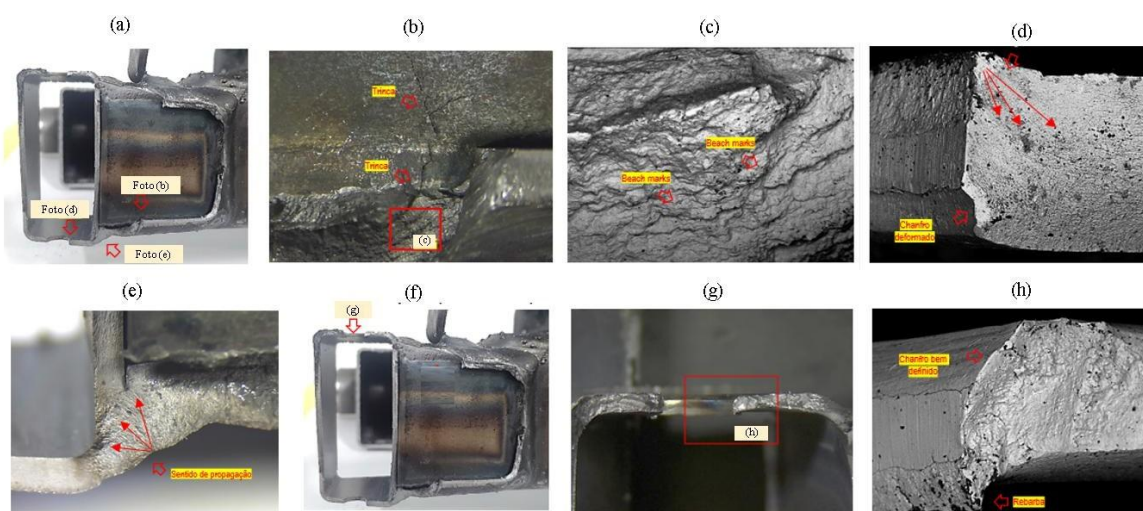
Ao investigar a origem da trinca, constatou-se que o ponto de nucleação não estava associado a defeitos de soldagem (como porosidade ou falta de fusão), mas sim a uma descontinuidade geométrica no furo de fixação da travessa. As medições de precisão revelaram uma rebarba excessiva no diâmetro interno do furo, agindo como um severo concentrador de tensão.

Os dados comparativos confirmaram a anomalia:

- **Peça Reprovada (Genbutsu):** Apresentou altura de rebarba de **0,253 mm** na face inferior e 0,228 mm na face superior.
- **Peça Aprovada (Referência):** Em lotes sem falha, a rebarba foi medida em apenas **0,006 mm** a 0,053 mm.

Essa disparidade evidenciou que o desgaste do ferramental de estamparia gerou rebarbas acima do aceitável, reduzindo drasticamente a vida em fadiga do componente ao criar pontos preferenciais para iniciação de trincas.

**Figura 10 – Regiões Analisadas: (a) Lado inferior (início da fratura); (b) Trinca Detectada na travessa do garfo; (c) Presença de Beach marks. Fratura por fadiga.; (d) Fratura por fadiga. Origem na rebarba do furo inferior; (e) Aspecto da solda aplicada aos componentes; (f) Lado superior (final da fratura); (g) Regiões do furo superior; (h) Rebarba do furo superior.**



Fonte: Autoria própria (2025)

**Figura 11 – Análise visual da rebarba do furo**

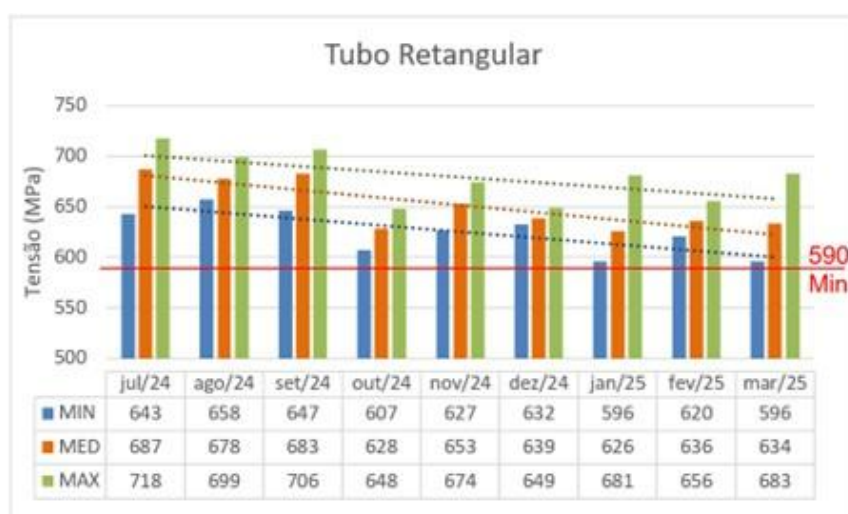


Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.2.3 Investigação do Limite de Resistência (LR)

Além da causa raiz da rebarba, o FMEA indicou a necessidade de monitoramento contínuo. Uma investigação sobre o material revelou uma tendência de queda nos valores do Limite de Resistência (LR) do tubo retangular recebido (Gráfico 2), aproximando-se do limite mínimo de especificação de 590 MPa. Embora a bobina de aço (matéria-prima) mostrasse valores estáveis, o processo de conformação do tubo parecia estar afetando a resistência final. Esta ação de monitoramento é crucial, pois a resistência à fadiga está diretamente ligada ao LR do material. Essa investigação validou o modo de falha nº 3 da matriz FMEA (Tabela 1), onde a variação da matéria-prima apresentava risco médio, exigindo monitoramento estatístico junto ao fornecedor (Usiminas).

**Gráfico 2 – Limite de Resistência do tubo retangular**



Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.3 Aplicação do FMEA: Cenário Inicial

Com base no diagnóstico técnico, aplicou-se o método FMEA para mensurar o risco associado a este modo de falha no processo produtivo vigente.

A Tabela 1 apresenta a matriz de risco "Antes", onde o modo de falha "Presença de rebarba excessiva no diâmetro interno do furo (> 0,05mm)" foi identificado.

**Tabela 1: Matriz FMEA inicial – Evidências levantadas**

Item / Função do Processo	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	S (Sev)	Causas Potenciais da Falha	O (Oco)	Controles Atuais (Detecção)	D (Det)	NPR (Risco Inicial)	Prioridade de Ação (Inicial)
1. Estamparia / Furação da Travessa (Furo de fixação)	Presença de rebarba excessiva no diâmetro interno do furo (> 0,05mm).	Concentração de tensão elevada; Nucleação de trincas por fadiga; Ruptura estrutural do garfo com perda de controle do veículo.	10	Desgaste da ferramenta de corte (punção/matriz); Folga excessiva no estampo; Falta de padrão de manutenção.	5	Inspeção visual simples (operador); Teste de fadiga por amostragem (destrutivo).	8	400	A (Alta)
2. Soldagem da Travessa no Tubo	Trinca na zona termicamente afetada (ZTA) ou cordão de solda.	Redução da vida útil à fadiga; Falha prematura em teste de durabilidade.	9	Parâmetros de soldagem inadequados (corrente/velocidade); Contaminação da superfície.	4	Teste de fadiga cíclica (bancada); Inspeção visual de solda por Líquido Penetrante (LP).	6	216	A (Alta)
3. Conformação do Tubo Retangular	Limite de Resistência (LR) do material abaixo do especificado (< 590 MPa).	Baixa resistência mecânica; Deformação plástica sob carga de uso; Redução da margem de segurança.	8	Variação na matéria-prima (bobina); Processo de conformação degradando propriedades mecânicas.	4	Ensaio de tração em corpo de prova (amostral).	5	160	M (Média)

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se na Tabela 1 que este modo de falha recebeu um índice de Severidade (S) 10, devido ao risco à segurança, e uma Ocorrência (O) 5, resultando em um **NPR (Número de Prioridade de Risco) de 400**. Este valor, classificado como prioridade "Alta" (A), indicou a necessidade urgente de intervenção no processo de estamparia e furação.

### 5.4 Ações Corretivas e Melhorias de Processo

Para mitigar o risco identificado, foram implementadas ações corretivas (Tabela 2) focadas na eliminação da causa raiz (rebarba) e na melhoria dos controles de detecção:

1. **Revisão do Ferramental:** Manutenção corretiva e preventiva nas punções e matrizes de estamparia para garantir corte preciso.
2. **Definição de Parâmetro Crítico:** Estabelecimento de um limite máximo de **0,05 mm** para altura de rebarba em desenho e processo.
3. **Melhoria na Inspeção:** Implementação de critérios rígidos de inspeção visual e verificação de chanfro, além do monitoramento estatístico das propriedades mecânicas da matéria-prima (bobina e tubo) para assegurar o Limite de Resistência > 590 MPa.

4. **Validação Experimental:** Uso de extensometria em protótipos e inspeção escalonada por Líquido Penetrante durante os testes de fadiga para detecção precoce de trincas.

**Tabela 2: Matriz FMEA destacando as ações Corretivas e melhorias de processo.**

Item / Função do Processo	Ações Recomendadas
<b>1. Estamparia / Furação da Travessa (Furo de fixação )</b>	1. Revisar ferramental de estamparia. 2. Definir limite de rebarba máx. 0,05mm. 3. Implementar inspeção com critério rígido.
<b>2. Soldagem da Travessa no Tubo</b>	1. Aplicação de Extensometria (Strain Gauges) em protótipos. 2. Inspeção por Líquido Penetrante (LP) a cada variação de tensão durante o teste.
<b>3. Conformação do Tubo Retangular</b>	1. Monitoramento estatístico da bobina e tubo. 2. Investigação da queda de LR junto ao fornecedor.

Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.5 Reavaliação do Risco e Validação (FMEA Final)

Com base nesses resultados, foram propostas medidas preventivas, entre elas: Revisar ferramental de estamparia; Definir limite de rebarba máximo em 0,05mm; Implementar inspeção com critério rígido de padronização; Aplicação de Extensometria (Strain Gauges) em protótipos; Inspeção por Líquido Penetrante (LP) a cada variação de tensão durante o teste para detecção precoce de trincas; Monitoramento estatístico da bobina e tubo; Como investigação da queda de LR junto ao fornecedor. Essas medidas corroboram as recomendações de Ramly e Atan (2018), que apontam a importância da integração entre o FMEA e os controles de processo para minimizar a variabilidade produtiva. Segundo os autores, a aplicação sistemática do método reduz em até 40% a ocorrência de falhas graves, especialmente quando combinada a ferramentas estatísticas e inspeções não destrutivas. No nosso estudo de caso, em relação ao modo de falha mais crítico (rebarba excessiva) a redução do NPR foi de 80%, que saiu de 400 para 80

A correlação entre os dados experimentais e as análises da literatura também permite validar o uso do método FMEA como ferramenta de apoio ao controle de

qualidade de materiais. A matriz FMEA construída com base nos resultados dos ensaios demonstrou que os riscos associados à fadiga podem ser significativamente reduzidos com ações preventivas simples, como aumentar a frequência de inspeções e ajustar parâmetros nos processos. Supriyanto (2024) destaca que o uso do FMEA em linhas de montagem automotivas eleva o nível sigma do processo e aprimora o valor percebido pelo cliente, reforçando a confiabilidade do produto final.

Os resultados obtidos também evidenciam a importância da integração entre análise experimental e gestão da qualidade. De acordo com Dziuba (2021), a retroalimentação das informações obtidas em FMEAs anteriores permite a criação de um banco de dados de falhas, essencial para prevenir reincidências. No caso do garfo traseiro, o registro detalhado das trincas e rupturas serve como referência para futuras melhorias no design e no processo produtivo. Essa abordagem fortalece a cultura da qualidade e assegura a rastreabilidade das ações corretivas.

Outro ponto relevante é a concordância entre os resultados experimentais e os estudos computacionais de simulação por elementos finitos. Pesquisas recentes de Chiu et al. (2024) demonstram que os pontos de maior tensão previstos por modelagem FEA coincidem com as regiões críticas observadas empiricamente. Isso indica que o uso combinado de simulações e ensaios práticos é o caminho mais eficaz para prever falhas e validar projetos estruturais.

Em síntese, os resultados e discussões apresentados demonstram que o garfo traseiro em Aço 1020 apresenta excelente desempenho em fadiga quando fabricado sob parâmetros controlados, o método FMEA mostrou-se eficaz na identificação e priorização das falhas potenciais, o controle de processo e a padronização de soldagem são fatores decisivos para aumentar a confiabilidade estrutural e a integração entre ensaios mecânicos e ferramentas de gestão da qualidade constitui um modelo robusto de prevenção de falhas. Essas conclusões reforçam que a engenharia de confiabilidade deve ser tratada de forma multidisciplinar, unindo análise estrutural, controle de materiais e práticas de melhoria contínua, conforme defendem Mascia (2020) e de Aguiar (2015). A aplicação sistemática dessa abordagem não apenas reduz custos e desperdícios, mas também contribui diretamente para a segurança e durabilidade dos veículos motociclísticos.

Após a implementação das ações, novos lotes de validação (PP1) foram produzidos e testados. As medições mostraram que as rebarbas foram controladas para valores abaixo de **0,038 mm**.

A Tabela 3 apresenta a reavaliação do risco após as melhorias:

Tabela 3: Matriz FMEA final – Após ações corretivas.

Item / Função do Processo	Ações Recomendadas	Responsável	Ações Adotadas (Resultados)	S	O	D	NPR (Risco Final)	Prioridade de Ação (Final)
1. Estamparia / Furação da Travessa (Furo de fixação)	1. Revisar ferramental de estamparia. 2. Definir limite de rebarba máx. 0,05mm. 3. Implementar inspeção com critério rígido.	Engenharia de Processo (Grupo Estampagem)	Ferramenta ajustada; Rebarba controlada (< 0,038mm obtido em PP1); Inclusão de verificação de chanfro.	10	2	4	80	B (Baixa)
2. Soldagem da Travessa no Tubo	1. Aplicação de Extensometria (Strain Gauges) em protótipos. 2. Inspeção por Líquido Penetrante (LP) a cada variação de tensão durante o teste.	Qualidade / Laboratório (Teste do Produto)	Monitoramento de tensão em tempo real (Meta 365 MPa); LP de Inspeção escalonada na amostra testada.	9	2	3	54	B (Baixa)
3. Conformação do Tubo Retangular	1. Monitoramento estatístico da bobina e tubo. 2. Investigação da queda de LR junto ao fornecedor.	Controle de Qualidade (Engenharia / CIQ)	Controle rigoroso de recebimento; Correlação entre dados da usina e testes internos.	8	2	4	64	B (Baixa)

Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme demonstrado na Tabela 3, as ações resultaram em uma redução da Ocorrência (de 5 para 2) e melhoria na Detecção (de 8 para 4). O NPR foi **reduzido drasticamente de 400 para 80**, enquadrando o processo em uma faixa de risco aceitável (Prioridade Baixa).

Além disso, testes de fadiga subsequentes realizados em peças com o novo padrão (rebarba controlada) não apresentaram trincas ou rupturas até o fim do ciclo de 230.000 repetições, validando tecnicamente a eficácia das medidas adotadas. A Figura 12 mostra a avaliação da peça com ensaio de líquido penetrante após os testes de fadiga.

Figura 12 – Resultado do ensaio não destrutivo com líquido penetrante.

Peça isenta de trincas e rupturas após 230.000 ciclos.



Fonte: Autoria própria (2025)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como propósito aplicar o método Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) na identificação e prevenção de falhas em garfos traseiros de motocicletas, demonstrando sua importância como ferramenta de apoio à controle de qualidade de materiais e à confiabilidade estrutural. Por meio da integração entre análise experimental de falhas e a ferramenta de gestão FMEA, foi possível compreender os principais modos de falha que afetam esse componente e propor soluções técnicas para mitigá-los. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação sistemática do FMEA, aliada ao monitoramento experimental, contribuiu significativamente para a redução de riscos, o aumento da durabilidade, o aprimoramento dos processos produtivos e a garantia da confiabilidade estrutural de garfos traseiros de motocicletas.

A investigação do estudo de caso permitiu concluir que:

1. A falha observada no ensaio de fadiga não decorreu de fragilidades na soldagem, mas sim de uma **não conformidade geométrica (rebarba de 0,253 mm)** gerada no processo de estamparia, que atuou como concentrador de tensão crítico.
2. A aplicação do método FMEA foi decisiva para quantificar o risco, evidenciando que o controle da rebarba possuía um NPR crítico de 400, superior a outros modos de falha.
3. As ações corretivas implementadas, especificamente a restrição da rebarba para **máximo 0,05 mm** e a revisão do ferramental, foram eficazes, reduzindo o NPR para 80 e eliminando a recorrência de falhas nos testes de validação.

Conclui-se, portanto, que o controle rigoroso de variáveis geométricas em componentes estampados é tão vital quanto o controle metalúrgico da solda para a resistência à fadiga. Constatou-se, ainda, que a aplicação do FMEA é uma alternativa de baixo custo e alta eficiência, capaz de integrar os setores de engenharia, produção e qualidade, promovendo uma cultura organizacional voltada à prevenção em vez da correção. A metodologia demonstrou sua relevância não apenas como instrumento técnico, mas também como estratégia de gestão, auxiliando no planejamento de manutenção preventiva, na padronização de processos e na redução de desperdícios industriais. Além disso, o estudo reforça que a utilização de práticas baseadas em dados experimentais, associadas à análise de risco, proporciona ganhos expressivos na segurança do usuário e na competitividade das empresas do setor motociclístico.

Por fim, conclui-se que a detecção precoce de falhas estruturais em garfos traseiros de motocicletas, quando apoiada em métodos de análise como o FMEA, representa um avanço significativo na busca por produtos mais seguros, eficientes e sustentáveis. O estudo contribui para o fortalecimento da engenharia da confiabilidade e para o aperfeiçoamento das práticas de controle de qualidade no contexto automotivo. Recomenda-se que futuras pesquisas ampliem a aplicação do método a outros componentes estruturais e explorem o uso de tecnologias digitais e de inteligência artificial na análise preditiva de falhas, potencializando a integração entre inovação e segurança veicular.

## 7. REFERÊNCIAS

AGUIAR, D. C. de. An ISO 9001 based approach for the implementation of Process FMEA in industry. Repositório UNESP, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ALEKSIĆ, A. et al. Failure Mode and Effects Analysis Integrated with Multi-Attribute Decision-Making Methods Under Uncertainty: A Systematic Literature Review. *Mathematics*, v. 13, n. 2, 2025. MDPI. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/mathematics>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

\*Case Study of Automotive Motorcycle Supplier in Indonesia: Reduce the Risk of Failure of the Automotive Part Manufacturing Process using PFMEA (AIAG-VDA). *ResearchGate*, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CHIOU, Y. H. Fatigue Analysis of Motorcycle Rear Swing Arm on Different Road Surfaces. *SAE Technical Paper 2024-32-0046*, 2024. SAE International. Disponível em: <https://www.sae.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Design Failure Modes and Effects Analysis (DFMEA) technique for various components of an ATV (All Terrain Vehicle). *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 2015. Disponível em: <https://www.ijret.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DZIUBA, S. T. Using the PFMEA method as a response to a customer complaint in production of window-guides. *Revista Gestão & Tecnologia*, 2021. Disponível em: <https://revistagt.fpl.emnuvens.com.br>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MASCIA, A. A failure mode and effect analysis (FMEA)-based approach for performance improvement. Springer, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OKAZAKI, S. et al. Fault Cause Identification across Manufacturing Lines through Ontology-Guided and Process-Aware FMEA Graph Learning with LLMs. *arXiv*, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

RAMLY, E. F.; ATAN, H. Case study on development of process failure mode effect analysis (PFMEA) – Issues and recommendation. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2018. Publikasi Mercubuana. Disponível em: <https://publikasi.mercubuana.ac.id>. Acesso em: 12 nov. 2025.

RENU, R. A Knowledge Based FMEA to Support Identification and Risk Analysis for Flexible Vehicle Components. *Procedia CIRP*, Elsevier, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SAKAMOTO, T. Development of Fail-safe Method for Motorcycle's Electronic Throttle Control System. SAE Paper 2009-32-0124, 2009. SAE International. Disponível em: <https://www.sae.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Snooke, N. A.; Lee, M. H. Qualitative Order of Magnitude Energy-Flow-Based Failure Modes and Effects Analysis. arXiv, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SUPRIYANTO, H. Increasing the Sigma Level and Customer Value in the Manufacturing Process by FMEA method. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, v. 13, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.ijmerr.com>. Acesso em: 12 nov. 2025.

Systematic Literature Review of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation in Industries. ResearchGate, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 12 nov. 2025.

VÁNYI, G. Improving the effectiveness of FMEA analysis in automotive. Automotive – Challenges, Issues and Approach, Paradigm, 2016. Disponível em: <https://paradigm.hu>. Acesso em: 12 nov. 2025.