

ESTUDO SOBRE FALHAS EM EIXOS VIRABREQUIM APLICADOS NOS MOTORES DIESEL

Eduardo Freitas Silva, Júlio Maria de Oliveira, Mateus Zardini Jantorno Costa¹,
Isadora Potiguara Gotardo²

¹Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Capixaba Serra - MULTIVIX.

²Professor Orientador Mestre em Engenharia Civil, docente da Faculdade Capixaba da Serra - MULTIVIX.

RESUMO

Com o desenvolvimento tecnológico, ferramentas sofisticadas foram desenvolvidas para otimizar processos, possibilitando a análise de comportamento dos componentes a esforços, tensões, antes mesmo de sua fabricação, sendo uma alavanca para o desenvolvimento de motores eficientes energeticamente e confiáveis. Porém pouco se fala dos processos de recondicionamento de peças, que se tornam viáveis em termos financeiros e de sustentabilidade. Observa-se em muitos casos que a definição de procedimentos de remanufatura de componentes surgem através de tentativa e erro em oficinas, sem o auxílio de um corpo de engenharia, com poucas informações relacionadas as características do material e o processo de fabricação. O eixo virabrequim é um componente essencial nos motores a combustão interna, uma vez fraturado, impede que o ciclo de transferência de energia seja completo, tornando o motor inoperante. O estudo de falhas se justifica na engenharia devido a necessidade de compreender o comportamento dos materiais em relação a fadiga e impedir que essa falha ocorra em outros componentes, uma vez identificada a causa raiz, é possível corrigir os procedimentos e a fonte causadora, identificar os componentes que foram afetados, definir a evolução das micro trincas e programar a manutenção antes da ruptura, reduzindo custos operacionais e riscos à segurança dos colaboradores.

Palavras-chave: Reconcondicionamento. Eixo Virabrequim. Componentes. Motores.

1 INTRODUÇÃO

Impulsionadas pela crescente expansão da exploração mineral e os recordes registrados na produção agrícola brasileira, as empresas que operam as ferrovias nacionais buscam implantar boas práticas de manutenção a fim de alcançar a máxima confiabilidade dos veículos ferroviários e o menor custo operacional. No Brasil, o modal ferroviário é imprescindível para o transporte de cargas, sendo responsável por transportar no ano de 2022, cerca de 91% de todo o volume de minério de ferro que chega aos portos e 42% das commodities agrícolas remetidas a exportação (ANTF, 2023).

As locomotivas diesel-elétricas que compõe a frota brasileira são classificadas como veículos híbridos, possuem em sua composição o seu exclusivo sistema de potência elétrica, sendo capaz de gerar sua própria energia. Para isso, são equipadas com motores diesel que convertem a energia química presente no combustível em energia mecânica, que em seguida é transformada em eletricidade pelo gerador elétrico acoplado ao motor diesel. A energia passa pelo sistema eletrônico de potência, alimentando os motores elétricos de tração que impulsionam os eixos motores, possibilitando a locomotiva mover-se pelos trilhos (Resende,2018).

Para TILLMANN (2013), o motor é constituído de partes auxiliares, denominados componentes, estes trabalham em conjunto garantido o seu funcionamento. Segundo MIALHE, 1980 apud TILLMANN (2013), os componentes essenciais do motor a combustão interna são os que operam para garantir que a transformação energética ocorra de forma eficiente e contínua, entre os principais componentes do motor está o eixo virabrequim.

Segundo MOLLENHAUER AND TSCHOKE, 2010 apud MATEUS (2018), o eixo virabrequim, que compõe o motor a combustão interna, pertence ao grupo de componentes críticos. A qualificação dos eixos virabrequim, empregados nas locomotivas, consiste no processo de limpeza, análise de fadiga, verificação de desgaste, rugosidade e polimento. A remanufatura de peças e componentes se mostra atrativa pela necessidade de redução de custos na manutenção de motores.

O estudo sobre as falhas em eixos virabrequim aplicados nos motores diesel ferroviários se justifica pela necessidade de implantação de procedimentos de manutenção assertivos, a fim de obter maior ciclo operacional do componente, que resulta em motores diesel com maior performance, confiabilidade e menor custo

operacional. Em geral, a falha provoca inconvenientes e perdas financeiras milionárias, além de prejuízo a segurança dos empregados (LIMA, 2015).

De acordo com ROSA (2002), é imprescindível conhecer as características dos materiais que são utilizados na fabricação de componentes de máquinas, sendo a sua resistência determinante na definição do nível de segurança. A resistência deve apresentar compatibilidade com padrão de falha que este material alcançará na ruptura. A relação entre as características físicas dos materiais, processo de fabricação e as condições operacionais são a base para definir os procedimentos de manutenção.

De acordo com CALEGARO (2018), existem várias razões que podem causar a ruptura do eixo, sendo as mais comuns relacionadas à fadiga do material. Entre os fatores que contribuem para a falha estão o desalinhamento, o excesso de vibração, o acúmulo de tensões devido a defeitos no raio de concordância de eixos reconicionados, erros operacionais, falha no sistema de lubrificação, temperatura de operação elevada.

A ruptura dos eixos virabrequim aplicados em motores diesel, observados na Oficina de Locomotivas de Tubarão - Vitória possuem características de falha por fadiga. Segundo Pêcego (2015), entre as hipóteses que levam um material a fadiga estão o acúmulo de tensões, devido a deformações como entalhes, arestas, quinas vivas resultantes do processo de produção e serviços ou a redução da resistência em locais específicos, causada por porosidade e processos de soldagem. Para Feiferes (2018) a geometria da peça, a qualidade do acabamento externo e as tensões e deformações que o componente é exposto, influenciam no surgimento de trincas. Calegato (2018) correlaciona o surgimento da fadiga em materiais com falhas operacionais durante o processo de remanufatura e as condições operacionais em que o eixo é aplicado. Desta forma, destaca o procedimento de remoção dos bujões do eixo, onde se emprega calor demasiado ao material sem o devido controle térmico, podendo ocorrer em pontos de tensão, reduzindo sua resistência a fadiga.

Os planos de manutenção das locomotivas equipadas com o motor GE EFI 7FDL16 não incluem o acompanhamento periódico dos componentes críticos, como bielas e eixo virabrequim. Nesse caso, a falha só é detectada após a ruptura, impossibilitando o estudo da sua evolução e a definição de parâmetros para intervenção preventiva. De acordo com Rosa (2002), o estudo da mecânica da fratura é fundamental para determinar se o componente está apto para utilização ou para

descarte. Essa análise verifica o comportamento do material após o surgimento de trincas, já que a ruptura está relacionada com a evolução das trincas, que são provenientes de falhas no processo de fabricação, tratamentos térmicos, soldagem, fundição, entre outros.

O objetivo desse estudo tem por premissa elucidar a causa raiz das rupturas em eixos virabrequim dos motores diesel e estabelecer métodos de análise e acompanhamento de falhas mais adequados às condições operacionais das locomotivas. Isso pode incluir a implantação de ensaio não destrutivo para verificação dos componentes críticos e propor procedimentos para retirada dos bujões nos furos de lubrificação do eixo virabrequim. Para isso, é essencial dispor de informações e recursos adequados para investigar a falha, além de implementar boas práticas durante o processo de qualificação e montagem do componente.

A ocorrência de ruptura nos eixos virabrequim do motor diesel impede o funcionamento das locomotivas, resultando na interrupção da operação da composição e na restrição do tráfego ferroviário. Uma característica comum da falha é a incidência em motores reconicionados, ou seja, o procedimento de qualificação, montagem ou manutenção provocam a fadiga precoce desse componente crítico para o motor diesel. Assim, a relevância do estudo colabora para a evolução do processo de manutenção e para a definição de métodos de análise de falhas, visando alcançar um diagnóstico preciso sobre a causa raiz do problema e a forma adequada de saná-lo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A falha é caracterizada pela revelação de que uma peça ou componente em operação ficou totalmente inapto ou que continua funcionando, mas não consegue desempenhar sua função com eficácia ou está muito comprometido, a ponto de se tornar até mesmo inseguro para uso contínuo (RUCHERT, 2012, apud FARIA; SILVA e FRAGA, 2021).

A falha de materiais na engenharia, na maioria dos casos é considerada uma situação indesejada, devido a exposição do risco a vida humana, prejuízos econômicos, problemas de gestão e indisponibilidade de recursos. Mesmo possuindo conhecimento em relação as propriedades dos materiais, suas características e fragilidades, identificar falhas de forma preventiva ainda é um obstáculo a ser

ultrapassado. A escolha e o tratamento dos recursos de forma inadequada, irregularidade no projeto e má utilização, estão entre as causas mais comuns de ocorrências de falhas (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

CALLISTER e RETHWISCH (2012), define a fratura simples como a fragmentação de um corpo em duas ou mais partes devido a aplicação de tensões estáticas, de forma contínua ou mesmo variando lentamente com o tempo e exposto a temperaturas muito inferiores ao seu ponto fusão. A fratura também pode ser provocada devido a fadiga do material, ao implicar tensões cíclicas e pela fluência, que ocorre devido a exposição do material a temperatura elevada em um período.

As tensões empregadas nos materiais podem ser de tração, compressão, cisalhamento ou torção, já as fraturas em corpos metálicos acontecem nos modos dúctil e frágil. A fratura dúctil tem característica a deformação plástica nas proximidades de uma fissura que propaga de forma lenta em relação ao tempo. Já a fratura frágil, a trinca se propaga de forma rápida, com pouca deformação plástica, após o surgimento da trinca ela se propaga de forma contínua, mesmo sem o aumento das tensões aplicadas (CALLISTER e RETHWISCH 2012).

Falha dúctil, ocorre em materiais que apresentam elevada capacidade de deformação plástica quando exigidos por uma carga, conforme a figura 1 (a), observamos que a característica desses materiais é resistir a grandes tensões, as fraturas de modo geral remetem principalmente a sobrecargas de tração. Já a fratura frágil, conforme a figura 1 (b), possui a particularidade de não admitir deformação plástica, a ruptura ocorre em tensões muito abaixo do limite de escoamento do material, as descontinuidades se propagam de forma rápida (CALEGARO, 2018).

Imagem 1: (a) Fratura do tipo taça e cone em alumínio. (b) Fratura frágil em um aço doce



(a)

Fonte: Callister e rethwisch (2012)

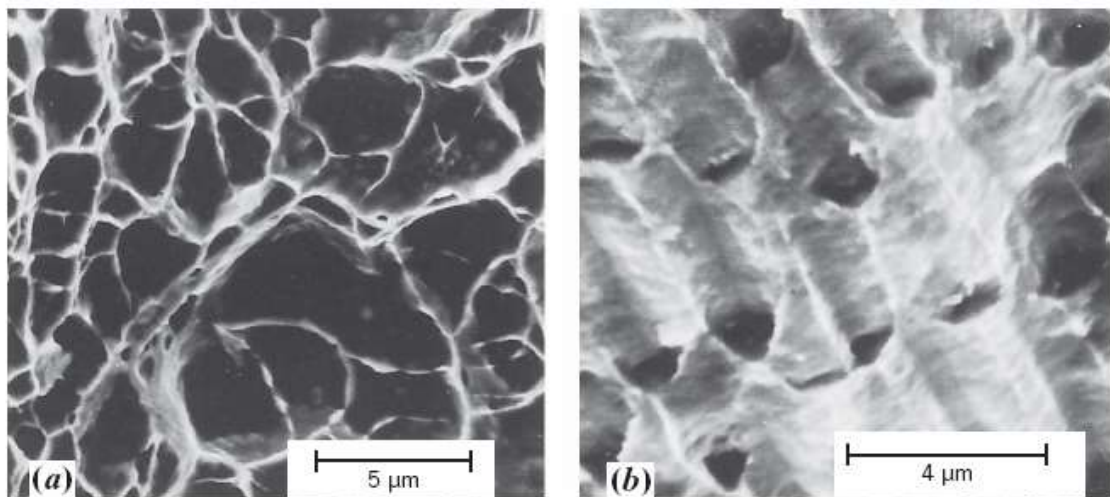
(b)

Segundo CALLISTER e RETHWISCH (2012, p. 202), “qualquer processo de fratura envolve duas etapas – formação e propagação de trincas – em resposta à imposição de uma tensão. O tipo de fratura é altamente dependente do mecanismo de propagação da trinca.”

A superfície da fratura apresenta umas das principais referências para identificação da causa da falha, sendo a fractografia o estudo que desempenha o papel crucial analisando as características da fratura, relacionando a topografia de sua superfície com as causas e comportamentos mais comuns da falha. (AMERICAN SOCIETY, 1987 apud FARIA; SILVA e FRAGA, 2021).

De acordo com CALLISTER e RETHWISCH (2012), a análise fractográfica detalha informações em relação ao mecanismo de ruptura de forma mais usual, emprega-se um microscópio eletrônico de varredura para especificar os aspectos superficiais da ruptura. Examinando a superfície de ruptura de uma fratura, tipo taça e cone, com o emprego do microscópio de varredura, conclui que ela possui “microcavidades” esféricas causadas pela tração uniaxial.

Imagem 2: (a) Fractografia eletrônica de varredura mostrando microcavidades esféricas características de uma fratura dúctil resultante de cargas de tração uniaxiais. Ampliadas de 3300 \times . (b) Fractografia eletrônica de varredura mostrando microcavidades com formato parabólico, característica de fratura dúctil resultante de uma carga cisalhante. Ampliação 5000 \times .



Fonte: HERTZBERG, R. W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 3a ed. Copyright © 1989 por John Wiley & Sons, Nova York. Reimpressa sob permissão de John Wiley & Sons, Inc. Apud Callister e Rethwisch (2012).

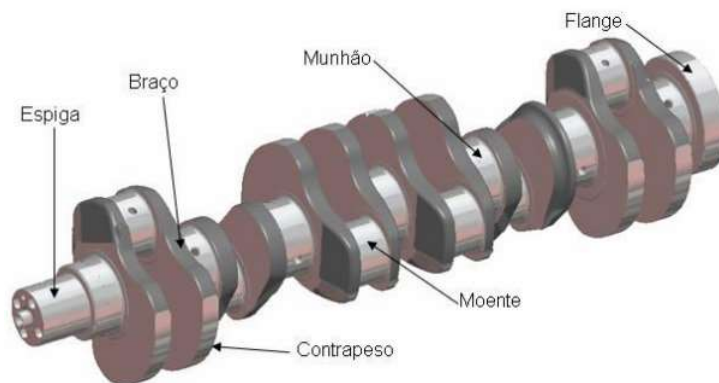
Os motores a combustão interna que operam obedecendo o ciclo diesel, estão sobre o mesmo princípio termodinâmico. Se assemelham independente das aplicações, destacando as industriais, marítimas, estacionários e veiculares (BORBA, 2009).

Na atualidade, os principais motores ferroviários são configurados com 12, 16 e 20 cilindros, distribuídos em V (ângulo de 45°) com variação de rotação entre 400 e 1500 rpm.

Para Calegato (2018, p. 32), o eixo virabrequim desempenha função essencial para o funcionamento do motor.

O virabrequim, também chamado de virabrequim ou árvore de manivelas, presente em muitos tipos de motores, tem a função de transformar a energia química da queima do combustível em uma energia mecânica aproveitada pelas rodas, ou seja, transforma o movimento alternativo produzido pela força do gás em movimento rotativo. O virabrequim é um dos elementos principais no processo de locomoção do veículo.

Imagem 3 - Elementos principais do virabrequim



Fonte: Ferreira (2008).

A seguir, a descrição das principais partes do virabrequim

- **Espiga:** em motores ferroviários é instalada o amortecedor de vibrações (damper) engrenagem condutoras das bombas de pressão de óleo e água de arrefecimento;
- **Braço:** Seção de ligação entre os moentes e munhões do eixo.
- **Contrapeso:** Proporciona força centrípeta contrária ao moente, possibilitando o equilíbrio entre as forças atuante no motor.
- **Moente:** É a seção do eixo onde é fixada as bielas, conhecido também como mancal de bielas. Sendo excêntrico ao eixo de rotação da árvore de manivelas.

- **Munhão:** conhecido como mancal fixo e Mancal principal, é instalado sobre o mancal fixo do bloco, sobre os casquilhos, onde é envolvido em um filme de óleo lubrificante, reduzindo o atrito. A dimensão do munhão é definida no projeto, a fim de proporcionar a resistência necessária aos carregamentos de flexão e torção, que estará exposto;
- **Flange:** em motores ferroviários é situada na extremidade traseira do motor, onde é acoplado ao gerador principal, responsável em transformar a energia mecânica em eletricidade.

Os processos de fabricação mais comuns desse componente são forjamento e fundição, a se definir levando em consideração, as características mecânicas, a geometria e o custo, observando a Tabela 1, constata-se a diferença entre esses processos e os motivos que levam a escolha do processo de forja para fabricação de eixos de máquinas pesadas.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos processos de fabricação dos virabrequins

	Forjamento	Fundição
Vantagens	Melhores propriedades mecânicas Confiabilidade (utilizado em peças críticas) Sem a necessidade de tratamento do metal líquido	Alta taxa de produção Viabilidade de peças grandes e complexas Flexibilidade de projeto
Desvantagens	Defeitos de dobra, falha de enchimento, quebra da matriz Forma limitada quando reentrâncias ou seções ocas são necessárias Custo total geralmente superior Múltiplos passos necessários	Trincas, soldas frias, falhas de enchimento Projeções metálicas Porosidade devido ao encolhimento Inclusões Requer um controle de processo maior

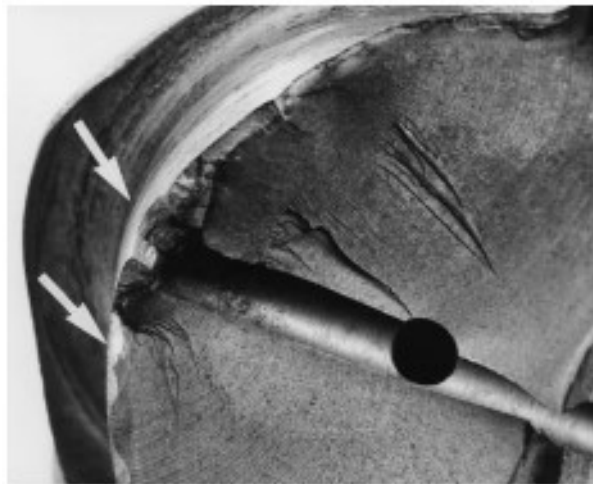
Fonte: Ferreira (2008).

2. 1 FALHAS TÍPICAS EM VIRABREQUIM

De acordo com Heyes (1998 apud MATEUS, 2018), eixos virabrequim de motores do ciclo diesel, normalmente falham em decorrência da deficiência de lubrificação e da utilização de componentes como rolamentos, além da vida útil predeterminada. No estudo proposto, avaliou-se um eixo virabrequim reutilizado, que sofreu intervenção por soldagem em uma sessão de apoio e, posteriormente, por serviços de usinagem para chegar na dimensão adequada em concordância com as medidas originais de fábrica.

Inspecionando visualmente o material em conjunto com o estudo de análise macroscópica, determinou-se o modo de falha, resultado da fadiga onde ocorreu a evolução lenta e constante das secções de fissuras. Observando o componente na sessão da fratura, é possível constatar problemas relacionados ao serviço de soldagem, como a má fusão entre o material do eixo e o consumível, bem como o revestimento deficitário no moente recuperado.

Imagem 4 - Sessão do eixo fraturada em corte



Fonte: Heyes (1998) Apud Mateus (2018).

Em acordo com os estudos empregados no respectivo eixo, verifica-se que o processo de condicionamento possui uma má qualidade, ocasionando na redução da vida útil do componente, comprometendo sua resistência mecânica (HEYES, 1998 apud MATEUS, 2018).

A trinca se propagou a partir do furo de lubrificação, resultando na interrupção do fluxo do lubrificante, esse efeito gera tensões no material, além das suportadas em condições normais de trabalho. Este fato evidencia que os princípios relacionados a característica e qualidade do material empregado no condicionamento dos eixos virabrequim precisam ser reavaliados, bem como a construção de procedimentos para a manutenção.

Um estudo proposto para analisar a perda de um motor diesel, onde a fratura de um eixo virabrequim instalado em um motor CATERPILLAR V 12, rompeu em três pontos distintos, após passagem do motor por uma intervenção completa. O eixo em

questão passou por processos de inspeção visual e recondicionamento (Calegaro, 2018).

Calegaro (2018, p.41), apresenta a análise de falha em motor diesel recondicionado:

Após 15.657 horas de operação o motor em questão foi retirado da máquina devido a danos nos balancins do sexto e oitavo cilindro e também por apresentar grande quantidade de limalha. Depois de passar por reforma geral (troca de peças e serviços de retifica) o motor operou por 2.559 horas e parou devido à quebra do virabrequim e quebra do bloco, consequentemente perda total do motor.

Imagem 5 - Partes do virabrequim fraturado



Fonte: Adaptado de Calegaro (2018).

Para realizar a análise de falhas, é necessário observar registros e evidências do motor, de posse das peças e informações, concluiu que o eixo virabrequim não falhou por deficiência de lubrificação ou avaria nos sistemas. As análises de óleo preventivas, estavam dentro da conformidade, isentas de contaminação. Quanto aos procedimentos de montagem, folgas, torques, estavam dentro da tolerância admitida pelo fabricante. Ao avaliar os serviços que foram executados no eixo virabrequim, constatou que os mancais principais foram retificados, porém foi admitida medidas fora de padrão, menor do que recomendado em projeto, conforme imagem 6 (CALEGARO, 2018).

Imagem 6 - Especificação dimensional do munhão do eixo virabrequim

	Tamanho original	Abaixo da medida 0.63 mm
Especificações do manual	120.650 +/- 0.020 mm	120.015 +/- 0.020 mm
Valor medido	-	120.010 mm

Fonte: Caterpillar (2018), apud Calegato (2018).

Calegato (2018, p. 53), concluiu que ocorreu fadiga “devido a esforços repetitivos oriundo das flexões alternadas do próprio funcionamento do motor, levando a abertura de uma trinca na região do raio de concordância entre a pista do mancal principal no 4 e o braço”.

2.2 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO EM EIXO VIRABREQUIM

Nas últimas décadas, os métodos de análises não destrutivos, evoluíram e são indispensáveis para os processos de produção e qualidade. Sua utilização se destaca na Indústria, para a avaliação de materiais e identificação de descontinuidade.

Para Roque (2018, p. 17), “Descontinuidades são interrupções na estrutura normal de um material, tais como: pequenas falhas superficiais ou trincas, todas passíveis de serem percebidas durante a realização de um ensaio não destrutivo.”

Define-se como ensaios não destrutivos (END), os que ao serem empregados em materiais, componentes, não alteram suas características, nem prejudicam seu emprego posterior, ou seja, não causam danos ao material (ROQUE, 2018).

De acordo com Roque (2018, p. 17), os ensaios não destrutivos possuem uma vasta gama de aplicações:

Uma descontinuidade não necessariamente é um defeito. [1] Os END's constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade e são utilizados na inspeção de produtos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros, com vasta aplicação nos setores petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, naval, autopeças e transporte rodoferroviário. Eles contribuem para a qualidade dos bens e serviços, redução de custo, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam. [1] Os END's incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos e/ou descontinuidades de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em

serviço de componentes, equipamentos e estruturas. [2] O método a ser utilizado depende, entre outras coisas, das propriedades físicas do material. Um conhecimento geral dos métodos de END disponíveis é necessário para a seleção do método adequado. [3] Os ensaios não destrutivos são aplicados para: garantir a confiabilidade de produtos através de critérios de aceitação definidos em norma; informar sobre a necessidade de reparo; prevenir acidentes; redução de custos. [3] Para obter resultados satisfatórios e válidos, é fundamental observar os seguintes elementos: pessoal treinado, qualificado e certificado; conduzir o ensaio segundo um procedimento qualificado elaborado com base em normas e critérios de aceitação.

2.2.1 Ensaio Visual

A utilização do ensaio visual permite o diagnóstico parcial da falha, sendo aplicado nos mais variados campos. A sua eficiência depende de condições externas, como iluminação, boa visão e limpeza. De acordo com as circunstâncias, a análise seguirá de acordo com as regras da ótica geométrica e propriedades ondulatória da luz. (ROQUE, 2018).

2.2.2 Ensaio Líquido Penetrante

De acordo com Filho e Guedes (2018, p.2) “Consistem num método específico para a detecção de descontinuidades superficiais, de inspeção indireta, fundamentado no fenômeno da capilaridade”.

Para alcançar a confiabilidade dos END's por líquido penetrante em juntas soldadas e peças postas é necessário que se estabeleça procedimentos adequados, fundamentados em normas técnicas, que descrevam com exatidão todos os passos da tarefa e estabeleça medidas de controle adequadas. (FILHO e GUEDES, 2018).

2.2.3 Inspeção por Partículas Magnéticas

Os ENDS por partícula magnéticas, consistem em introduzir uma fina camada de material ferromagnético sobre a superfície de um componente e com o emprego de um gerador, magnetizar a área em análise. Havendo interação entre o material ferromagnético com o campo magnético, possibilita o alinhamento das partículas em relação ao campo magnético, formando linhas de indução (ANDREUCCI, 2009, apud PEREIRA, 2021).

2.2.4 Ensaio por Ultrassom

Andreucci (2009 apud PEREIRA, 2021, p.5) diz que “o ensaio por ultrassom, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos”.

O teste ultrassônico compete diretamente com o teste radiográfico porque ambos detectam descontinuidades internas nos materiais. No entanto, a imagem radiográfica de uma fratura apresentada no material é sempre mais confiável e mais fácil de interpretar em comparação com a leitura mostrada na tela do aparelho de ultrassom, cujo tipo nem sempre pode ser determinado com certeza. Por esta razão, alguns códigos de construção preferem testes radiográficos a testes de ultrassom. O exemplo é o Código ASME que especifica o nível de teste radiográfico exigido pelo projeto do equipamento já em produção. Com o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de ultrassom digital, o já citado código permite a substituição do exame radiográfico pelo ultrassom, desde que totalmente mecanizado, e com registro digital (ANDREUCCI, 2009, apud PEREIRA, 2021).

3 METODOLOGIA E MÉTODO DA PESQUISA

Com o objetivo de melhorar os métodos de análise de falhas em eixos virabrequim e propor padrão de previsibilidade para acompanhamento de evolução de trincas, a natureza do trabalho será a aplicada e a abordagem, qualitativa. Para embasamento teórico, foi adotada a pesquisa bibliográfica, utilizou-se livros, artigos acadêmicos e outros materiais bibliográficos para respaldar o problema investigado e analisado as obras publicadas a respeito dos principais conceitos de manutenção em eixos virabrequim.

Na revisão bibliográfica foram utilizados livros acadêmicos, teses, dissertações, artigos científicos e sites com ênfase em assuntos de manutenção de eixos virabrequim, visando conteúdos convenientes para o desenvolvimento deste trabalho. A pesquisa bibliográfica é definida por Vergara (2000) como um estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado e acessível ao público.

Para o desenvolvimento do tema, foi utilizado um estudo de caso, ocorrido em uma oficina de manutenção ferroviária situada no complexo de Tubarão em Vitória/ES.

Como base, serão analisados os materiais de uma empresa ferroviária entre os anos de 2016 e 2022. Neste período, houve problemas no processo de manutenção, acarretando avaria de 65 eixos virabrequim. Com isso, gerou impactos financeiros e logísticos, comprometendo a confiabilidade dos ativos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após analisar as falhas recorrentes nas locomotivas Dash 9W da EFVM, constatou-se um padrão de avarias que ocorreram em motores diesel GE EFI 7FDL16, que foram montados na Oficina de Locomotivas em Tubarão a partir do ano de 2012. A princípio foi elaborado um plano de ação, a fim de determinar a causa raiz da ruptura do eixo virabrequim. É importante ressaltar que a quebra do motor em trabalho compromete vários componentes, podendo o virabrequim ser afetado por outras falhas.

Após a desmontagem do motor, e ensaio visual do eixo e demais componentes, como bielas, sessões do eixo de comando de válvulas, conjuntos de força, bloco e cárter, observou-se no eixo virabrequim uma zona com coloração escura de formato circular ao redor dos bujões, instalados nas extremidades da galeria de lubrificação, o que indicou a alteração das microestruturas do aço devido a exposição a fonte de calor, direcionando o estudo para o procedimento de limpeza e qualificação do componente.

Imagem 7 - Sessão do eixo fraturada em corte evidenciando a área de coloração escura ao redor do bujão.



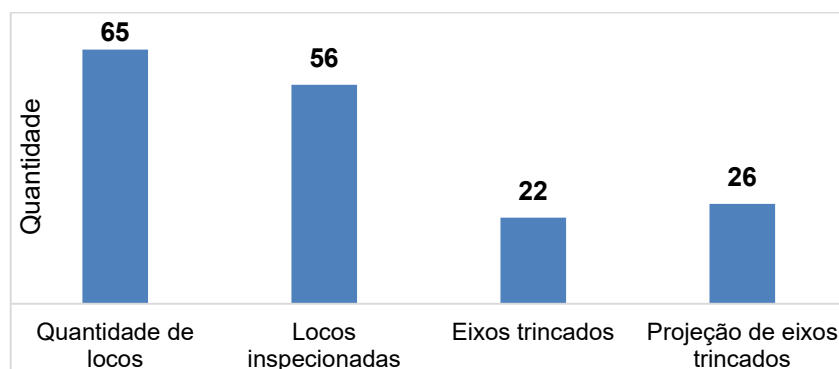
Fonte: Produzido pelo autor

O eixo virabrequim tem um canal interno que recebe óleo lubrificante dos mancais do bloco do motor e o direciona para as bielas e pistões, garantindo sua lubrificação, reduzindo o atrito e facilitando a transferência de calor no conjunto mecânico. No entanto, o óleo lubrificante tende a se deteriorar devido às condições rigorosas de funcionamento do motor e à presença de partículas contaminantes. O sistema de filtragem de óleo presente nas locomotivas não é capaz de remover todas as partículas, o que faz com que esses resíduos se acumulem principalmente nas áreas próximas ao canal de lubrificação do eixo. Com o tempo, essas partículas se depositam, formando borras que obstruem o sistema e comprometem a eficácia da lubrificação do motor.

A limpeza e qualificação do eixo virabrequim é realizada de forma manual, com poucos recursos e equipamentos, basicamente é realizada a remoção dos resíduos oleosos da superfície externa com o desengraxante, posteriormente é necessário remover os 17 bujões da galeria de lubrificação para a limpeza interna. Nesta etapa demanda recursos além dos disponíveis na área, esses bujões são fabricados com perfil de rosca NPT, e instalados com trava química aplicando um torque de 75 Lbs, o que dificulta a extração utilizando ferramentas manuais, por essa razão decidiu aquecer o eixo com um maçarico, provocando a dilatação térmica dessa região, facilitando a remoção dos bujões e possibilitando a limpeza interna do eixo.

A atividade de aquecer o eixo foi realizada sem o estudo técnico de viabilidade e implantação de medidas de controle como o monitoramento da temperatura. No período que antecedeu as falhas, foram aquecidos 65 eixos virabrequim, gerando um passivo de 65 composições ferroviária com risco operacional.

Gráfico 1 - Locomotivas inspecionadas



Fonte: Produzido pelo autor

A fim de prever as possíveis rupturas dos eixos virabrequim, foi elaborado o mapeamento dos motores diesel, através da inspeção dos eixos com ensaio não destrutivo por líquido penetrante, possibilitando o mapeamento das trincas, estudar sua evolução e estabelecer parâmetros para intervenção preventiva. A parada da locomotiva para a inspeção ocorre de forma programada aproximadamente a cada 30 dias, de acordo com a passagem do equipamento na oficina para abastecimento e inspeção de viagem.

Imagem 8 - Monitoramento de trincas ao redor do furo de lubrificação



Fonte: Produzido pelo autor

O parâmetro para retenção da locomotiva e desmontagem do motor diesel para substituição do eixo virabrequim, é definida a partir da condição do eixo, evolução da trinca, disponibilidade de materiais e mão de obra para realizar a intervenção. Para a instalação de um novo eixo virabrequim é necessário retirar o motor diesel da locomotiva, realizar sua desmontagem completa, limpeza e recuperação das peças e substituição dos itens obrigatórios, como juntas, vedações, bronzinas, e elementos de fixação.

Imagem 9 - Desmontagem do motor diesel após ruptura do eixo virabrequim



Fonte: Produzido pelo autor

Em paralelo ao monitoramento dos eixos, foi realizado o estudo metalográfico e micro dureza do material, que possibilitou determinar as características do aço, mapeando a área do virabrequim que sofreu mudança microestrutural e propor medidas de contenção de danos ao componente.

Através da análise dos materiais, concluímos que existem duas as possibilidades de redução de risco e de contenção da falha. Uma seria um tratamento térmico de revenimento localizado na zona termicamente afetada a fim de reduzir a dureza da martensita, a outra seria a remoção mecânica da área fragilizada, aumentando o diâmetro externo do furo. Devido à área afetada ter apenas 2mm de profundidade, a remoção mecânica é a mais viável, porém só aplicável apenas para trincas de até 2mm.

Com a participação da engenharia da Vale, empresa cedente dos materiais, estabeleceu um procedimento padronizado para realização da remoção dos bujões, determinando a proibição de utilização de métodos à quente, sendo necessário a extração mecânica do elemento de vedação. A princípio foi utilizado uma furadeira manual, brocas com diâmetro entre 1/8" e 5/8" e extrator para realizar a atividade, desta forma é necessário grande esforço físico e exposição a posição ergonômica desconfortável durante 2 dias, desta forma a atividade se tornou morosa e inviável.

A proposta de melhoria apresentada e desenvolvida foi o projeto de uma base metálica removível para furadeira automática de base magnética, esta base se encaixa no braço de ligação entre moentes e munhões do eixo, possibilitando a fixação do equipamento que irá realizar a furações e deste modo reduzindo o esforço físico e exposição de risco da equipe de manutenção.

A concepção do projeto, se deu de forma pioneira, não existindo solução similar no mercado devido as especificações da atividade, espaço restrito do acoplamento, necessidade de alinhamento da furadeira. A remoção do bujão não pode comprometer a rosca onde está instalado, e caso ocorra poderá causar o descarte do virabrequim que possui um alto valor de mercado.

Imagem 11 - Base para fixação da furadeira automática de base magnética em utilização.



Fonte: Produzido pelo autor

Com a proposta implantada e equipe treinada, a remoção dos bujões ocorre em média em 2 horas de trabalho, sendo aprovada pela engenharia e executantes da atividade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo proposto, foi identificado a necessidade de desenvolver procedimentos operacionais embasados em análises de engenharia, pois mesmo em

etapas aparentemente simples como a limpeza de um componente sendo executada de forma inadequada, poderá acarretar prejuízos financeiros em grande escala.

Com a realização de ensaios não destrutivos por líquido penetrante nos eixos aquecidos, foram possíveis identificar microtrincas na região termicamente afetada, acompanhar sua evolução, e com essas informações realizar paradas programadas para troca de eixos, antes que estes entrassem em ruptura. A ruptura do eixo com o motor em trabalho compromete outros componentes do motor, o que eleva os gastos com a manutenção.

Não menos importante, o envolvimento dos profissionais executantes das atividades de manutenção nos desafios e projetos de melhoria contínua da área, uma vez que o projeto do dispositivo para fixação de furadeira automática, foi projetado e confeccionado pelos executantes da atividade, e se transformou em uma alternativa eficiente para conter as falhas em eixos virabrequim na Oficina de Locomotivas de Tubarão, com a possibilidade de implantação em outras unidades.

REFERÊNCIAS

ANTF. **Transporte de Grãos Acompanha Avanço da Safra**. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários, 2023. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/avanco-expressivo-do-transporte-de-graos/#:~:text=Escrito%20por%3A%20Antf%20%7C%20postado%20em%3A%2023%2F06%2F2023&text=No%20ano%20passado%2C%20mais%20de,6%25%20das%20commodities%20agr%C3%ADcolas%20exportadas>. Acesso em 22 mai. 2024.

BORBA, José L. **Estrutura das locomotivas diesel-elétricas - Motor diesel ferroviário**. Curitiba: UNIALL - Universidade Corporativa América Latina Logística, 2009. Vol. III. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/325444108/A-Estrutura-das-Locomotivas-Diesel-eletricas-ALL-II-pdf>. Acesso em: 13 nov. 2022.

CALEGARO, Ana Beatriz. **Análise de falha de um eixo virabrequim**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: https://www.ufjf.br/mecanica/files/2009/06/UFJF_2018_TCC_Ana-Beatriz-Calegare.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8° Ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012.

FARIA, Guilherme; SILVA, Stephanie; FRAGA, William. Novembro de 2021. Artigo Científico - Centro Universitário Una. Pouso Alegre, Minas Gerais. **Análise de falha estrutural em um eixo Virabrequim.** Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/18857>. Acesso em: 13 nov. 2022.

FEIFERES, André dos Reis. **Avaliação estrutural de eixo virabrequim sob fadiga multiaxial.** 2018. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35967/35967.PDF>. Acesso em 04 jun. 2024.

FERREIRA, Pedro. **Projeto E Otimização De Árvores De Manivelas.** 2008. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-15092008-143121/publico/dissertacao_pedro_ferreira.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

FILHO, Estevam; GUEDES, Ana Emília. **Ensaio não destrutivo por líquidos penetrantes: instruções específicas para peças soldadas usadas.** Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, Nº. 000139, 06/11/2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/ensaio-nao-destrutivo-por-liquidos-penetrantes-instrucoes-especificas-para-pecas-soldadas>. Acesso em: 14 nov. 2022.

LIMA, DIRCEU ALVES. **Análise de Falha de Peças Rompidas em Serviço,** 2015. Relatório Final - Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. São Paulo. Disponível em https://silo.tips/download/analise-de-falha-de-peas-rompidas-em-servio-dirceu-alves-de-lima#google_vignette. Acesso em 26 maio 2024.

MATEUS, João. **Análise do modo de falha de um motor diesel 1.9 TDI.** Dezembro de 2018. Dissertação - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, Portugal. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/10195>. Acesso em: 12 nov. 2022.

PEREIRA, Fábio. **Importância dos ensaios não destrutivos na garantia da qualidade em processo de soldagem.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade Pitágoras - Poços de Caldas. Poços de Caldas, Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.pgsskroton.com/bitstream/123456789/38509/1/FABIO+ROGERIO+PEREIRA.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

PESSEGO, André Lemos. **Análise fractográfica e metalográfica de uma região de fratura.** 2018. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/25620/25620.PDF>. Acesso em 04 junho.2024

RESENDE, Lucas de Paula. **Simulação de Locomotiva Diesel-Elétrica em um Trajeto Real na Plataforma Open Modelica.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com Habilitação em Energia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: https://www2.ufjf.br/eletrica_energia/wp-

content/uploads/sites/553/2016/11/TCC_Lucas_REVISADO.pdf. acesso em: 26 mai. 2024.

ROQUE, Júlio. **Avaliação do desempenho de técnicas não destrutivas: um estudo de caso na inspeção de juntas soldadas em tubulação de transferência de amônia anidra**. 2020. Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34477/1/UFMG%20-%20TCC%20J%C3%BAlio%20C%C3%A9sar%20de%20Lima%20Roque.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2022.

ROSA, Edson. **ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA - MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA**. 2002. Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2024.

TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. 2013. Caderno de estudos. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fconaege.com.br%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F05%2Fmotores_combustao_interna_e_seus_sistemas-2013.pdf&psig=AOvVaw0vzrHU1LyxyhJBdlw8Che&ust=1717890498830000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAcQrpoMahcKEwjowLeA68qGaxUAAAAHQAAAAQBA. Acesso em 07 jun. 2024.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 3.ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.