

**ANÁLISE DE FALHA NO COMANDO FINAL DE UM TRATOR DE
ESTEIRA KOMATSU D51EX**

Leonardo Inacio Casarotto¹
Maria Regina Thomas²
Keila Daiane Ferrari Orso³
Euclésio Giuliani⁴
Simone Merlini⁵

RESUMO

A pesquisa analisa a falha ocorrida no comando final de um trator de esteira Komatsu D51EX, relacionando danos observados a condições de operação e práticas de manutenção utilizadas no equipamento. O estudo caracteriza-se como exploratório, qualitativo e estruturado como um estudo de caso, fundamentado em revisão bibliográfica e inspeção visual das engrenagens danificadas. Os resultados evidenciam rupturas severas no conjunto planetário nº 2, engrenagem solar nº 2 e engrenagem anelar, sem presença de desgaste progressivo ou problemas com lubrificação, indicando falha repentina por sobrecarga ou impacto. A análise operacional mostrou que o equipamento atuava em terrenos irregulares, com ausência de padronização operacional e inexistência de rotinas de manutenção preditiva. Como principal contribuição, propõe-se um plano de manutenção preventiva composto por *checklist* para inspeções de rotina e ficha preditiva para medições periódicas, visando mitigar falhas em componentes do material rodante.

Palavras-chave: Comando final. Trator de esteira. Manutenção preditiva.

1 INTRODUÇÃO

Tratores de esteiras são amplamente utilizados no setor de construção civil, mineração e agricultura, oferecendo soluções eficientes para a movimentação de materiais, preparação e regularização do solo. Seu principal método de trabalho é empurrar material de um ponto a outro, concentrando todos os esforços em seu trem de força, o que demanda um sistema robusto e confiável.

Para entregar resultados de forma eficiente o material rodante de um trator de esteira é composto por diversos elementos mecânicos que desempenham funções essenciais para seu funcionamento, como correntes, sapatas, roletes, roda guia, roda motriz. Dento desse conjunto

¹ Graduando em Engenharia Mecânica (UCEFF, 2025). E-mail: Leocasarotto5@gmail.com

² Mestre em Tecnologia e Gestão da Inovação. UNOCHAPECÓ - E-mail: maria@uceff.edu.br.

³ Docente da UCEFF Faculdades. E-mail: keila@uceff.edu.br.

⁴ Mestre em Projetos e Processos de Fabricação – Universidade de Passo Fundo (UPF) – E-mail: euclesio@uceff.edu.br.

⁵ Docente da UCEFF Faculdades.

o comando final exerce papel determinante, pois é responsável por multiplicar o torque proveniente dos motores hidrostáticos e transmiti-lo diretamente para a roda motriz.

O trator Komatsu D51EX destaca-se pela sua robustez e confiabilidade em condições severas de operação. Entretanto o desgaste e a falha de componentes, podem ocorrer de forma natural ao longo do tempo e serem alavancadas por manutenções incorretas, como falta de óleo lubrificante e ausência de manutenção preditiva através de inspeção visual dos sistemas. Para minimizar falhas, um programa de manutenção preventiva deve ser implantado e adequado as condições de trabalho. A manutenção em sistemas rodantes envolve inspeções visuais frequentes, controle e métodos corretos em corretivas e monitoração frequente. Aplicando esses cuidados de forma sistêmica, é possível diminuir o risco de falhas progressivas, que podem resultar na indisponibilidade do equipamento, elevação dos custos operacionais e comprometimento da vida útil do equipamento. Particularmente, falhas no comando final acarretam em tempos de parada prolongados e alto custo em reposição de peças e mão de obra especializada, devido sua alta complexidade.

O presente estudo surgiu a partir de uma falha real observada no comando final de um trator Komatsu D51EX, percebendo a necessidade de um plano de manutenção adequado para evitar que o problema se repita no futuro. O estudo não se limita apenas a observação de danos, mas busca compreender como o ambiente de trabalho e operação, bem como a rotina de manutenção contribuíram para a falha. Assim, a situação problema central é: **Quais práticas de manutenção e operação contribuem para falha do comando final e sistema rodante de um trator D51EX?**

A partir desta problemática, define-se como objetivo geral relacionar condições de operação e procedimentos de manutenção preditiva com a falha do comando final, propondo melhorias. Os objetivos específicos incluem, descrever o funcionamento do trem de força; analisar visualmente danos no conjunto planetário do comando final; avaliar condições de operação; propor um plano de manutenção que possibilite identificar a falha previamente.

O estudo é relevante levando em consideração a importância de tratores de esteira para empresas do setor, impactando diretamente em seu planejamento. Uma parada forçada interrompe obras, elevando o custo com tempo inutilizado, aquisição de peças e mão de obra qualificada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSMISSÃO DA FORÇA

O sistema de tração é um dos componentes mais importantes, sendo responsável por transformar a potência gerada pelo motor em energia mecânica útil, impulsionando o trator. O trem de força do trator Komatsu D51EX utiliza um sistema de transmissão hidrostática (HST) com controle eletrônico, controlando a vazão da bomba e motores de deslocamento (motores HST) (Komatsu, 2018).

Em uma curva o sistema de transmissão hidrostático (HST) distribui a potência para as esteiras em diferentes velocidades através de um motor HST, reduzindo o raio das curvas sem provocar arrastamento. As esteiras também podem se mover em sentidos opostos, fazendo o trator girar em seu próprio eixo (Ricardo; Catalani, 2008).

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA RODANTE

São os elementos que constituem o sistema de locomoção do trator de esteira. Cada um deles é essencial e representa um papel importante para o funcionamento e durabilidade do conjunto. Segundo Komatsu (2013) temos os seguintes componentes:

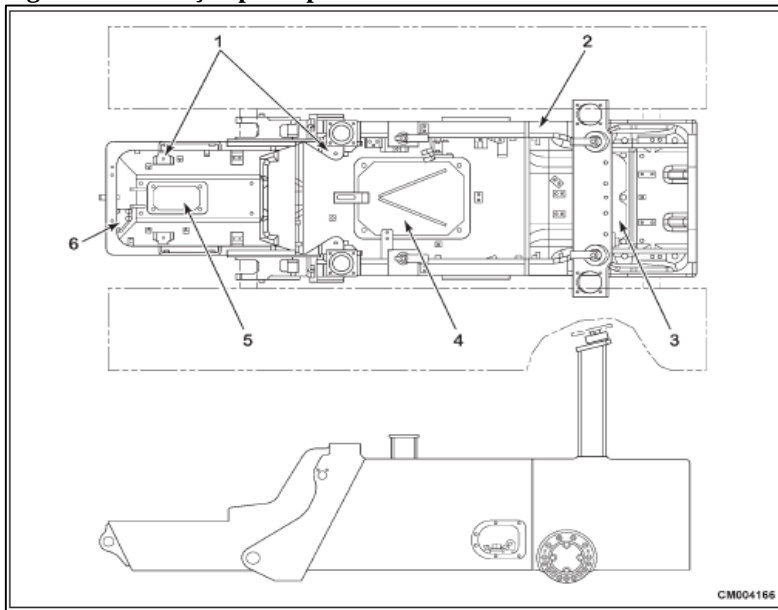
2.2.1 Comando Final

Transmissão por engrenagens de redução do tipo planetária, responsável por aumentar o torque gerado pelo motor e transmitir para a roda motriz (Komatsu, 2013).

2.2.2 Armação principal

A armação principal mostrada na Figura 1, também conhecida como chassi é a principal parte estrutural do trator de esteira, é a partir dele que são montados os sistemas para dar forma ao equipamento. O chassi deve possuir força e rigidez, proporcionado confiabilidade aos demais elementos (Komatsu, 2018).

Figura 1 – Armação principal



Fonte: Komatsu (2013).

Está indicado na Figura 1, os componentes da armação principal, que são: 1- Montagem do motor; 2- Conjunto da armação; 3- Protetor traseiro; 4- Protetor central; 5- Protetor do dreno do óleo.

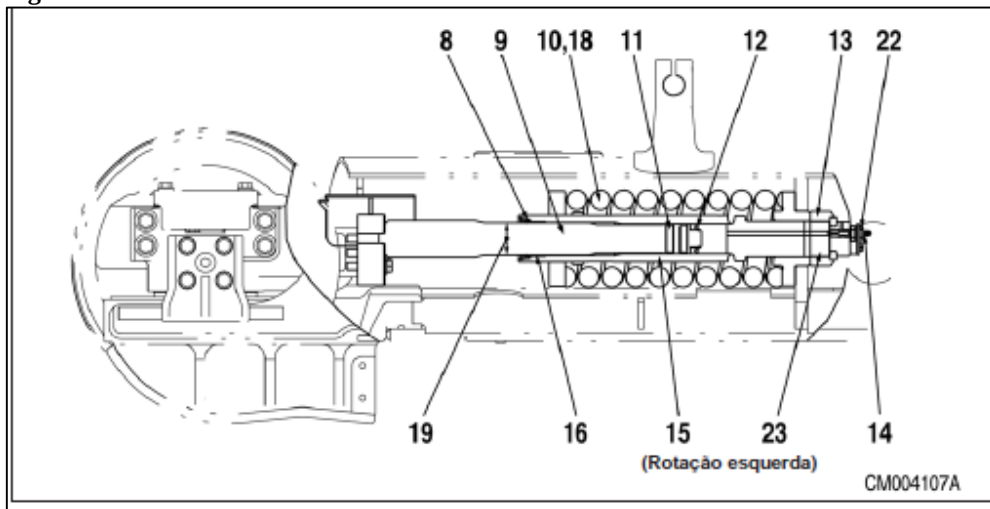
2.2.3 Mola tensora

Sua principal função é promover tensão as sapatas, podendo ser ajustada conforme a quantidade de graxa aplicada. Ela também é responsável por absorver impactos e choques provenientes da roda guia. A Figura 2 mostra um esquema da mola tensora em conjunto com a roda guia (Komatsu, 2013).

Para Shigley *et al.* (2005) molas exercem uma força quando deformadas podendo ser de compressão ou extensão. Dentre os diversos tipos de mola os autores mencionam que molas helicoidais possuem geometria controlada, proporcionando flexibilidades a sistemas de acordo com sua necessidade e aplicação.

Na Figura 2 é apresentada a mola tensora e seus componentes.

Figura 2 – Mola tensora



Fonte: Komatsu (2013).

Indicado na Figura 2, estão os componentes da mola tensora, que são: 8- Retentor; 9- Haste; 10,18- Mola tensora; 11- Anel de desgaste; 12- Junta em U; 13- Porca; 14- Lubrificador; 15- Cilindro; 16- Bucha; 19- Folga entre o pistão e a bucha.

2.2.4 Roda guia

A roda guia está localizada na parte dianteira das esteiras, ela é responsável por receber a tensão da mola e manter as sapatas esticadas. Komatsu (2018), diz que a roda guia é autoajustável, permitindo uma tensão constante, diminuindo vibrações e aumentando a vida útil de todo o material rodante. Ricardo e Catalani (2008) mencionam que a roda guia proporciona tensão e alinhamento, pois tem seu movimento em relação a armação.

2.2.5 Rolete inferior

São blocos circulares que rotacionam no seu próprio eixo, projetados para suportar e distribuir o peso do equipamento sobre as correntes (Ricardo; Catalani, 2008). Também possuem a incumbência de manter a corrente alinhada, dando estabilidade e suavizando o deslocamento, evitando assim descarrilhamento em terrenos irregulares. O D51EX possui 7 roletes cada lado, como estão sempre em contato com a corrente deve-se atentar ao desgaste e efetuar a troca quando necessário (Komatsu, 2013).

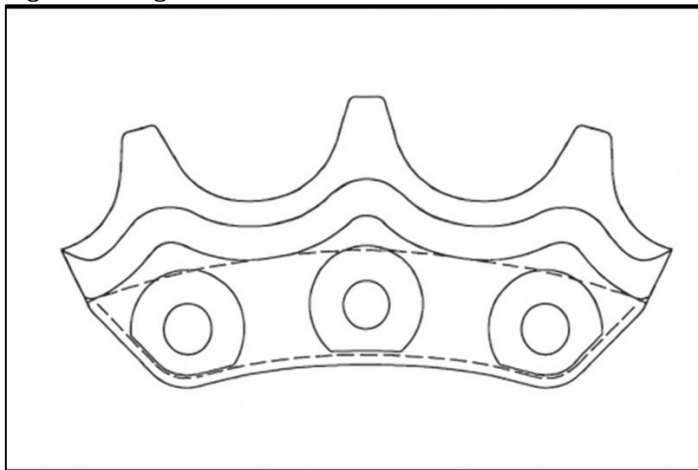
2.2.6 Rolete superior

Tem como principal função manter a tensão da corrente e suportar o peso mantendo-a alinhada (Komatsu, 2018).

2.2.7 Roda motriz

Responsável por receber o movimento do comando final e transmitir para a corrente. É uma engrenagem dividida em vários segmentos como o mostrado na Figura 3, formando uma coroa quando fixadas ao comando final.

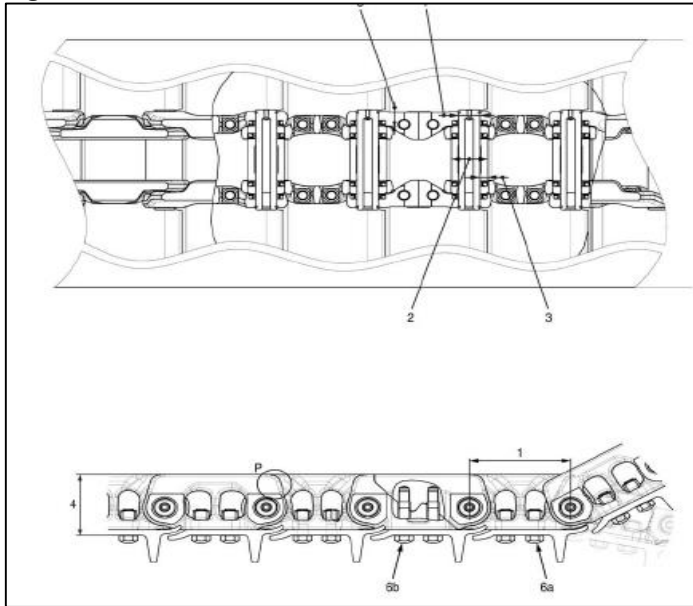
Figura 3 – Segmento roda motriz



Fonte: Komatsu (2013).

2.2.8 Correntes

As correntes são formadas pela união de elos, buchas e pinos, com movimentos livres entre si. É movimentada pela roda motriz e orientada pela roda guia e roletes. Ela serve como base para afiação das sapatas. A Figura 4 apresenta vistas superior e lateral da corrente com as sapatas fixadas.

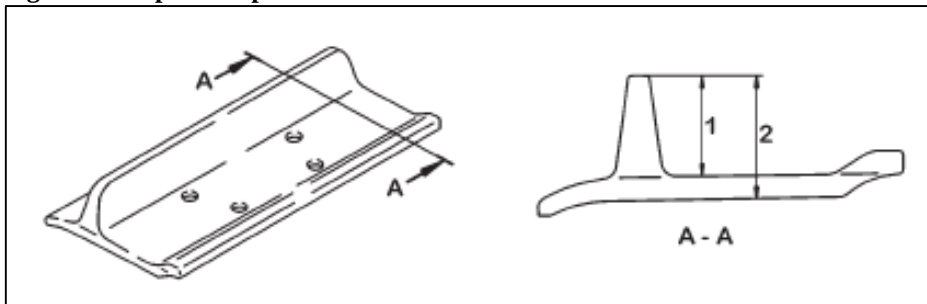
Figura 4 – Corrente

Fonte: Komatsu (2013).

A Figura 4 indica componentes da corrente, 1- Passo do elo; 2; Diâmetro da bucha; 3- Espessura da bucha; 6(a)- Elo regular; 6(b)- Elo mestre.

2.2.9 Sapata

A sapata simples mostrada na Figura 5, é o componente do material rodante que entra em contato com o solo e gera atrito para deslocar o trator. É feita de aço sólido e possui uma garra de 55 mm para aumentar a tração e evitar deslizamento. Cada esteira possui 44 sapatas proporcionado uma área de contato com o solo de 28000 cm^2 .

Figura 5 – Sapata simples

Fonte: Komatsu (2013).

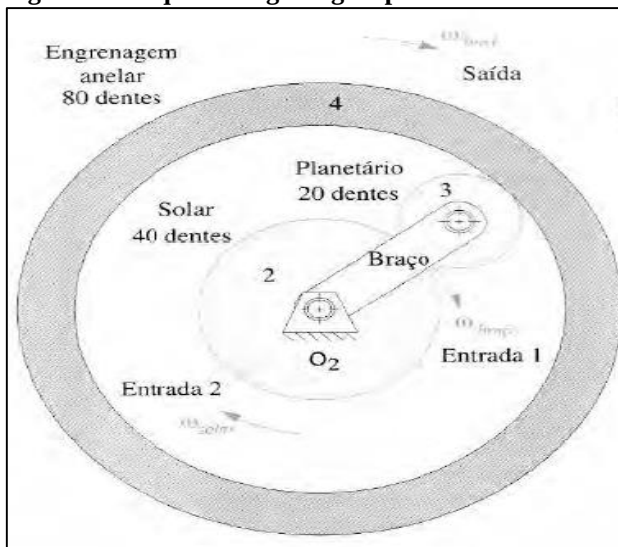
A Figura 5 ilustra a sapata em uma vista tridimensional e um corte A-A na sessão transversal, indicando 1- Altura da garra; 2- Espessura da garra.

2.3 COMANDO FINAL

Trens de engrenagens planetários são frequentemente utilizados em projetos, pois podem alcançar grandes relações de redução em pequenos espaços e com grande eficiência. Possibilitam a variação das razões de velocidade por meio de controle de duas entradas, e a inversão do sentido de rotação (Collins; Busby; Staab, 2019).

Segundo Norton (2010), engrenagens planetárias ou epicicloidais são um sistema de transmissão de velocidade e torque que possuem dois graus de liberdade, no seu sistema mais básico de funcionamento à necessidade de três tipos engrenagens trabalhando em conjunto para se obter uma saída útil, a engrenagem solar, engrenagem planetária e engrenagem anelar como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema engrenagem planetária



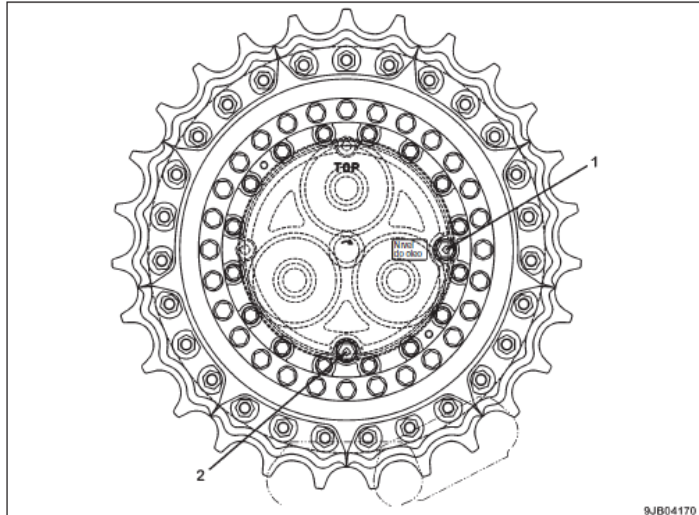
Fonte: Norton (2010, p. 506).

O comando final representado na Figura 7 é um sistema de engrenagens planetárias de 2 estágios, representando uma razão de redução de 45,282. Lubrificado por salpicos quando à rotação das engrenagens. Ele se destaca como uma unidade única podendo ser removido como uma única peça ou desmontado no local removendo suas engrenagens (Komatsu, 2013).

A transmissão da potência através do comando final sucede-se através das engrenagens planetárias, tendo início com o recebimento da força do motor HST pela engrenagem solar nº 1 através do pinhão das planetárias nº 1, reduzindo e rotacionando em direção oposta ao motor HST, assim movendo a engrenagem anelar. Deste modo, o pinhão das planetárias forma uma unidade com o suporte das planetárias que por sua vez transmite sua força para a engrenagem solar nº 2. A engrenagem solar nº 2 transmite sua força para o pinhão das planetárias nº 2,

reduzindo e transmitindo o movimento para a engrenagem anelar, seguindo para o cubo que está ligado a roda motriz. A redução é feita em dois estágios, pois passa pela unidade planetária nº 1 e nº 2 (Komatsu, 2013).

Figura 7 – Comando final



Fonte: Komatsu (2013).

Pode-se identificar na Figura 7 do comando final o 1- Bujão de nível de óleo; 2- bujão de dreno.

2.4 ENGRENAGENS DE DENTES RETOS

Todas as engrenagens do comando final são engrenagens de dentes retos. Possuem um formato simples e de fácil fabricação, seus dentes são paralelos ao eixo da engrenagem (Norton, 2010).

Uma das principais geometria de dentes utilizada em engrenagens de dentes retos é a involuta de profundidade total. Quando engrenados desde a entrada até o desengate, a velocidade é constante e proporcional, permitindo um engrenamento suave, sem vibrações e ruídos (Mott, 2015).

O esforço normal em uma engrenagem de dentes retos possui dois componentes, sendo um radial e um tangencial. A componente tangencial está relacionada ao torque transmitido e a radial se refere a força aplicada no centro da roda (Almeida, 2022).

2.5 FALHAS EM ENGRENAGENS

Engrenagens estão suscetíveis a diversos modos de falhas, podendo ocorrer de acordo com fatores como aplicação de cargas, velocidades, aplicação da engrenagem, materiais, processo e precisão na fabricação, condições de montagens, entre outros fatores. Levando em consideração requisitos de engrenamento, particularidades de carregamento variável e contato e deslizamento entre dentes, tornam a análise de possíveis falhas em engrenagens mais difíceis e complexas (Collins; Busby; Staab, 2019).

2.5.1 Falha por fadiga

Falhas por fadiga iniciam a partir de trincas, podendo estar presente desde o processo de fabricação ou surgirem ao longo do tempo devido a deformações em regiões de concentração de tensões. O processo de fadiga ocorre em três estágios, início da trinca envolvendo uma pequena duração, propagação da trinca caracterizando o maior tempo da falha e de forma instantânea por consequência a ruptura (Norton, 2013).

A falha no estágio III pode ocorrer de forma dúctil, frágil ou de ambas as formas. Fatores como tensões residuais, temperaturas elevadas, ciclagem térmica e de alta frequência podem ser as causas ou acelerar o processo de falha por fadiga (Shigley *et al.*, 2005).

2.5.2 Falha por desgaste

Segundo Collins; Busby; Staab, (2019), durante o engrenamento ocorre um componente de deslizamento. Esse deslizamento pode provocar desgaste adesivo e abrasivo. Quando a lubrificação é insuficiente o desgaste adesivo evolui para um desgaste por contato causando danos mais severos. Caso ocorra esse processo a engrenagem pode apresentar variações de velocidade angular, folgas, impactos e elevar o nível de vibração.

2.6 LUBRIFICAÇÃO

Conforme Carreteiro; Belmiro, (2006) existe formação de uma película de óleo entre as saliências microscópicas dos dentes. Para sistemas de engrenagens fechadas existem dois tipos de lubrificação, por salpicos onde o próprio movimento das engrenagens é responsável pelo transporte do óleo até pontos de engrenamento e mancais. E por circulação, no qual o óleo é distribuído para as engrenagens através de uma bomba. A escolha do lubrificante bem como

sua viscosidade devem seguir características, faixas de trabalho e pelo seu número AGMA (American Gear Manufacturers Association).

O grau de viscosidade pode ser determinado por classes ISO (International Organization for Standardization) e SAE (Society Automotive Engineers), padrões internacionais usados para a classificação de óleos lubrificantes. As duas classificações divergem quanto ao método de classificação de lubrificantes. A viscosidade SAE utiliza classificação por duas series, a partir da temperatura de trabalho do fluido, a letra “W” é utilizada para simbolizar faixas de trabalhos a frio (Bosch, 2005).

De acordo com Komatsu (2013), o grau de viscosidade recomendado para a lubrificação do comando final é o SAE 30. De acordo com a tabela apresentada por Bosch (2005) o grau de viscosidade SAE 30 é um monograu específico para trabalhos em temperaturas constantemente quentes, a 100 °C sua viscosidade cinemática deve variar entre 9,3 e 12,5 mm²/s.

2.7 MANUTENÇÃO

Almeida (2014) define a manutenção mecânica como um conjunto de atividades técnicas destinadas a preservação, restauração e otimização de ativos mecânicos, englobando componentes básicos como rolamentos e mancais até sistemas complexos como transmissão, lubrificação, hidráulicos e pneumáticos. Deste modo, a manutenção não consiste em somente operações corretivas, mas envolve processos sistematizados, com uma sequência de desmontagem e montagem correta, alinhamento e lubrificação, assim estendendo a vida útil do equipamento.

A manutenção preventiva de acordo com Kardec e Nascif (2013) é definida como uma intervenção realizada em intervalos predeterminados de acordo com critérios técnicos, com proposito de reduzir falhas.

Para Gregório e Silveira (2018), manutenção preditiva tem como objetivo analisar e monitorar componentes, de forma a utilizá-lo ao máximo antes de sua troca. Esse tipo de manutenção permite detectar alterações anormais como, por exemplo, desgaste, contaminação e trincas de forma sistemática.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade está relacionada a ausência de falhas ou quebras de um sistema ou item. Estando diretamente associada a probabilidades, pode ser expressa por modelos matemáticos, permitindo uma análise do momento da falha. A confiabilidade é definida como função de um período de tempo e considera conceitos complementares como qualidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança e confiança.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma empresa privada do setor de terraplenagem e escavações do oeste de Santa Catarina. Teve como objeto de estudo um sistema rodante e comando final de um trator de esteira Komatsu D51EX, ano de fabricação 2013, registrando 13500 horas de funcionamento, indicado na Figura 8, destacando o sistema rodante e a posição do comando final através da seta.

Figura 8 – D51EX Com indicação do comando final



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

O equipamento operava em diferentes tipos de terrenos, principalmente em solos argilosos, solos rochosos com pedregulho e relevos diversificados, planos e inclinados.

A pesquisa foi conduzida com uma abordagem exploratória, por meio de levantamento bibliográfico, que criou familiaridade com o objeto de estudo e o problema. O tipo da pesquisa foi um estudo de caso, detalhando o objeto e descrevendo-o com maior profundidade.

Adotou-se uma abordagem qualitativa, em que os resultados dos dados analisados foram fruto da interpretação do pesquisador e da forma que ele compreendeu o objeto estudado (Mascarenhas, 2018). Para este estudo, a descrição do trem de força teve como base uma revisão bibliográfica, baseada em livros e manuais pertinentes ao assunto, descrito na fundamentação teórica do presente trabalho.

Os dados e histórico do equipamento foram disponibilizados pela empresa, através de registros de trabalho da máquina, abordando informações de manutenções realizadas, locais de

trabalho e condições operacionais. Em um curto período diferentes operadores trabalharam com o equipamento, cada qual utiliza diferentes métodos de trabalho influenciando na padronização de operações. A empresa relatou diferentes tipos de terrenos em que o equipamento era utilizado, incluindo área de relevo acentuado e com presença de rochas o que influencia diretamente na durabilidade do sistema. Estas condições foram consideradas para a interpretação da falha do comando final.

A coleta de dados do comando final realizou-se através de inspeção visual do conjunto de engrenagens após a falha, na oficina mecânica responsável pelo reparo, no mês de abril de 2025. Os componentes foram identificados e registrados por meio fotográfico. De acordo com a empresa para a desmontagem seguiu-se as instruções detalhadas no manual de oficina da Komatsu.

Para elaboração do plano de manutenção foram consideradas informações do fabricante encontradas no manual de operação e manutenção e no manual de oficina do equipamento, detalhando pontos importantes e destacando uma linguagem de fácil entendimento para operadores e mecânicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DAS ENGRENAGENS DO COMANDO FINAL

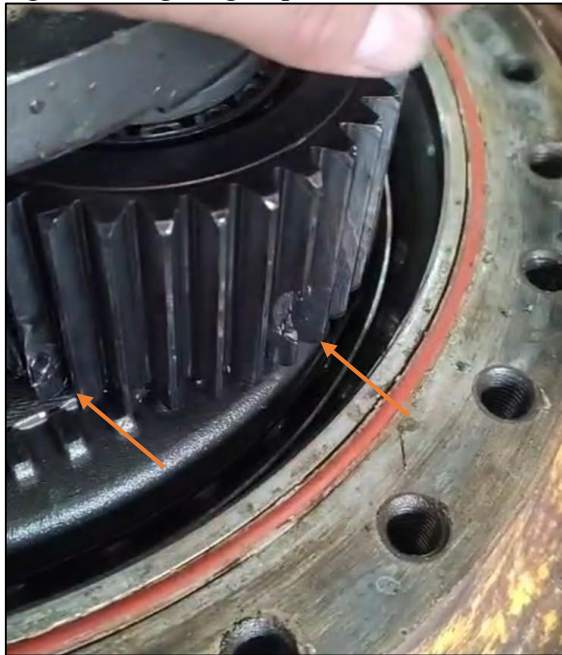
O conjunto do comando final foi desmontado conforme indica o manual de oficina da Komatsu. Foi possível identificar inicialmente de forma visual danos severos causados na maioria dos mecanismos que compõem o conjunto como engrenagens, rolamentos e retentores.

Foi observado que a maioria das engrenagens apresentaram fraturas envolvendo diversos dentes, sem marcas de desgaste natural ou excessivo por abrasividade. Isso indica que a ruptura ocorreu de forma abrupta chegando ao estágio III falhando de forma instantânea, não suportando as tensões e cargas aplicadas como menciona Shigley *et al.*, (2005).

A inspeção permitiu visualizar de forma detalhada quais engrenagens sofreram danos mais significativos.

O conjunto planetário nº 2 foi o que apresentou mais falhas, as engrenagens planetárias nº 2 de 37 dentes foram as mais prejudicadas indicando falhas em diversos dentes nas três engrenagens constituintes como mostra a Figura 9 (A) e (B).

Figura 9 – Engrenagens planetárias n° 2 indicando falha nos dentes



(A)

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

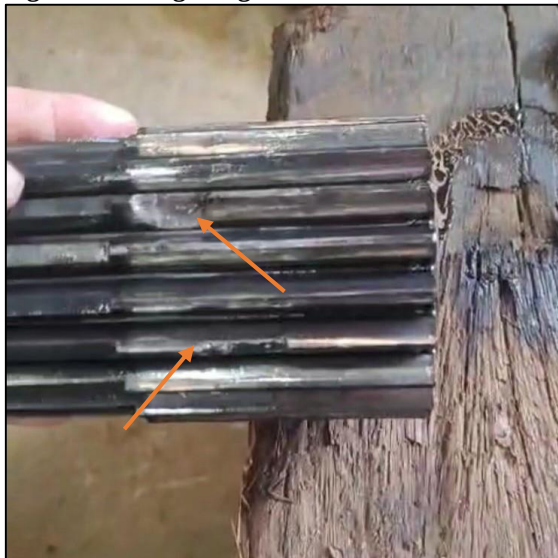


(B)

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A engrenagem solar n° 2 do conjunto também apresentou ruptura nos dentes, evidenciado na Figura 10.

Figura 10 – Engrenagem solar n° 2 indicando falhas nos dentes



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A engrenagem anelar é que recebe cargas distribuídas pelos dois conjuntos planetários exibiu fraturas de dentes em regiões de contato com o conjunto planetário n° 2 mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Engrenagem anelar indicando falha nos dentes



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

As engrenagens do conjunto planetário n° 1 e a engrenagem solar n° 1, não apresentaram fraturas ou trincas superficiais, nem desgaste evidente. Foi possível identificar apenas marcas de contato dispostos em alguns dentes, como aponta a Figura 12.

Figura 12 – Engrenagem planetária n° 1 indicando marcas



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Além de danos em engrenagens, também foram comprometidos outros componentes que compõem o comando final, podendo ser identificado danos em rolamentos e elementos de vedação, acarretados por fragmentos e partículas metálicas das engrenagens avariadas.

No óleo lubrificante foi encontrado apenas contaminação por partículas metálicas provenientes da fratura das engrenagens. Não houve identificação de partículas e impurezas externas. Para verificação do sistema foi drenado o óleo do comando final do lado oposto, que apresentou óleo limpo, sem contaminantes e em bom estado. Com base em registros da empresa o óleo havia sido substituído a aproximadamente 500 horas indicando lubrificação adequada e propriedades como viscosidade dentro do limite aceitável.

Visualmente não é possível identificar qual foi a motivação inicial para a ocorrência da falha ou qual componente deu início as fraturas. De modo geral, deduz-se que a falha ocorrida foi de forma instantânea ocorrendo a ruptura de dentes, visto que, as engrenagens não apresentarem desgaste prévio por abrasão ou deslizamento.

Collins; Busby; Staab, (2019) diz que falhas podem ocorrer de uma combinação ou qualquer combinações de diferentes respostas a cargas. Podendo ser ocasionada por pouca deformação plástica ou progressão de trincas relacionadas a sobrecargas e ambientes agressivos. Os autores listam diversos modos de falhas, dentre elas as que mais se correlacionam com o estudo é a falha por fadiga, caracterizada por uma separação repentina catastrófica ocasionando a separação em duas partes ou mais de um componente, resultante de cargas e deformações cíclicas por um período de tempo. E a falha por impacto, sendo causadas por ondas de tensões pela aplicação de carregamentos repentinos, onde deformações são suficientes para causar a separação em diversas partes.

4.2 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Segundo o manual de operação da Komatsu métodos e condições de operações estão diretamente ligados com a durabilidade do material rodante e devem ser levados em consideração para garantir uma maior vida útil. Desta forma, é importante seguir requisitos indicados pelo fabricante para prevenir falhas.

Entre as principais recomendações estão: evitar esforços além da capacidade do equipamento, partidas bruscas e trocas de direções rápidas, como alternância entre marchas de avanço e ré, que podem sobrecarregar o comando final. A operação deve ser em linha reta sempre que possível, curvas fechadas devem ser evitadas principalmente quando a lâmina está carregada. Outro cuidado necessário indicado pelo manual é o deslizamento das sapatas em

relação ao solo, em terrenos rochosos esse deslizamento provoca desgaste ao comando final e outros componentes que geram atrito entre si como sapatas, correntes e roletes. Operações em terrenos acidentados devem ser sempre em sentido paralelo a inclinação, de modo a evitar deslocamentos e cortes no sentido transversal. Esta orientação também é válida para execução de taludes, onde inclinações podem ser superiores a 30°. A prevenção não acelera o desgaste e previne acidentes como capotamento.

Verificou-se a inexistência de um plano de manutenção preventiva ou preditiva para o sistema rodante, sendo registrada apenas manutenções corretivas após a falha de componentes, destacando-se proteções laterais e roletes inferiores.

A presença de diversos operadores relatado pela empresa causa a ausência de padronização da operação, levando a variações bruscas de métodos de trabalho não seguindo as indicações descritas acima, que podem impactar diretamente na vida útil do conjunto.

4.3 PLANO DE MANUTENÇÃO

Um dos fatores que podem contribuir positivamente para minimizar o desgaste natural é a rotina de inspeção visual realizada pelos operadores antes e depois da operação. Levando isso em consideração foi elaborado um *checklist* para a verificação e registro de componentes do material rodante antes da operação, seguido o métodos de manutenção preventiva onde os operadores participam da rotinas básicas de manutenção do equipamento. O Quadro 1 indica requisitos a serem cumpridos com base no manual do fabricante.

Quadro 1 – Checklist para inspeção.

Intervalo	Componentes	Inspeção visual	Status	Observações
Diário	Geral	Verificar desgaste geral e integridade do conjunto		
Diário	Correntes	Verificar tensão das esteiras e alinhamento da corrente		
Diário	Roletes	Verificar vazamentos de óleo/ liberdade de rotação		
Diário	Proteções	Verificar integridade proteções		
Diário	Roda Guia	Verificar folgas e vazamentos de óleo		
Semanal	Sapatas	Verificar aperto dos parafusos		
250 h	Comando Final	Verificar nível do óleo		
Diário	Limpeza	Remover lama e rochas em áreas de contato		

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Juntamente com as inspeções visuais, um plano de manutenção preventivo e preditivo são importantes para quantificar o desgaste e avaliar a necessidade de substituição ou reparo de componentes, antes que ocorra uma parada forçada. Desta forma, foi elaborada uma tabela para registrar medições realizadas periodicamente, a fim de acompanhar a evolução de desgaste e utilizar ao máximo cada componente antes da ocorrência de falha.

A Quadro 2 contempla itens a serem observados com maior atenção e cuidado, disponibilizando valores de referência estipulados pela fabricante para a análise de substituição ou reparo, assegurando intervenções planejadas com registro documentado.

Quadro 2 – Ficha de Manutenção Preditiva

Componentes	Tarefa	Valores de referência (mm)	Medição realizada	Intervalo	Observações
Comando Final	Troca do óleo e inspeção visual das engrenagens	TO30 (SAE30)		1000 horas	
Tensão da Esteira	Medição da folga	Folga de 20 a 30 mm		1000 horas	
Passo do Elo	Medição de desgaste	Padrão: 175,3 mm Limite: 178,3 mm		1000 horas	
Altura da Garra	Medição de desgaste	Padrão: 55 mm Limite: 25 mm		1000 horas	
Roda Motriz	Desgaste da raiz do dente	Padrão: 74 mm Limite: 65 mm		1000 horas	
Roda Motriz	Espessura da raiz do dente	Padrão: 22,7 mm Limite: 13,7 mm		1000 horas	
Roda Guia	Ajuste da folga lateral	Folga padrão abaixo de 4 mm		1000 horas	
Parafusos das sapata	Torque de aperto	296 ± 20 Nm		1000 horas	
Rolete Inferior	Desgaste do diâmetro externo	Padrão: 185 mm Limite: 160 mm		1000 horas	

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Este caso em específico reforça a importância de operar equipamentos com base em orientações fornecidas pelo fabricante, realizar inspeções rotineiras e adotar um sistema de manutenção preditiva, garantindo maior durabilidade e confiança ao material rodante e ao trem de força.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do trabalho foi analisar a falha ocorrida no comando final de um trator de esteiras D51EX, correlacionando as evidências observadas com as condições de operação e práticas de manutenção adotadas pela empresa. A partir da análise visual das engrenagens e da

forma como a falha ocorreu, foi possível identificar possíveis causas mencionadas em literaturas. Fica como proposta para trabalhos futuros a análise laboratorial como ensaio de dureza e análise metalográfica, a fim de identificar tratamentos térmicos e estruturas das engrenagens danificadas.

O trem de força e componentes do material rodante foram descritos na fundamentação teórica através de levantamento bibliográfico de manuais do fabricante, contextualizando a importância do conjunto e destacando a função do comando final. A análise visual evidenciou danos severos principalmente no conjunto planetário nº 2, engrenagem solar nº 2 e anelar, caracterizado por fraturas de dentes de forma repentina e inesperada, sem desgaste excessivo ou falta de lubrificação.

A avaliação das condições de operação apontaram fatores relevantes para a vida útil do material rodante, atuando em terrenos acidentados e rochosos. A inexistência de um plano de manutenção preventiva ou preditiva para o material rodante, resultou na elaboração de um plano de manutenção incluindo um *Checklist* para inspeções rotineiras e um plano preditivo, para acompanhar a evolução do desgaste natural através de medições periódicas baseadas em valores estipulados pela fabricante.

O plano proposto ajuda a mitigar falhas principalmente em componentes externos do material rodante como roletes, corrente e roda guia, e por consequência diminui a sobrecarga no comando final, assegurando maior disponibilidade do equipamento e redução de custos de operação.

O estudo reforça a relevância de associar conhecimento técnico e boas práticas de operação para a prevenção de falhas em equipamentos de terraplenagem. Espera-se que o presente trabalho sirva de referência para empresas e contribua para melhorar o planejamento e aperfeiçoar a gestão de tratores de esteira.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Júlio Cesar de; LIMA, Key Fonseca de; BARBIERI, Renato. **Elementos de máquinas**: projeto de sistemas mecânicos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2022. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 17 set 2025.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção mecânica industrial**: conceitos básicos e tecnologia aplicada. São Paulo - SP: Saraiva, 2014.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

CARRETEIRO, Ronald P.; BELMIRO, Pedro Nelson A.. **LUBRIFICANTES & LUBRIFICAÇÃO INDUSTRIAL**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

COLLINS, Jack A.; BUSBY, Henry; STAAB, George. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**: uma perspectiva de prevenção de falha. 2. ed. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2019.
GREGÓRIO, Gabriela Fonseca Perreira; SILVEIRA, Aline Moraes da. **Manutenção industrial**. Porto Alegre: Sagah, 2018.

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção**: Função Estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013. 440 p.

KOMATSU. **KOMATSU D51EX-22**, 2018. Disponível em:
<https://www.komatsu.com.br/uploads/produtos/catalogo/536343d895.pdf>.

KOMATSU. **Manual de Oficina GALEO D51EX-22 D51PX-22**, 2013.

MASCARENHAS, Sidnei Augusto (org.). **Metodologia científica**. 2. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MOTT, R. L. **Elementos de máquina em projetos mecânicos**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 17 set. 2025.

NORTON, Robert L.. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2010. Tradução de: Alessandro P. de Medeiros.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Brookman, 2013.

RICARDO, Hélio de Souza; CATALANI, Guilherme. **Manual prático de escavação**: terraplenagem e escavação de rocha. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.

SHIGLEY, Joseph E. *et al.* **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.