



REDUÇÃO DE ESFORÇOS LONGITUDINAIS NO CONJUNTO CHOQUE-TRAÇÃO DE VAGÕES DA EFC APÓS AJUSTES OPERACIONAIS EM VIRADORES TKS: VALIDAÇÃO COM VAGÃO INSTRUMENTADO

Paulo Costa¹; Marcos Silva²; Edivalber Cantanhede³; Giovanni Dias⁴; Hamilton Silva⁵;

Samuel Silvestre ⁶

¹Vale EFC, MA – Brasil

²Vale EFC, MA – Brasil

³Vale EFC, MA – Brasil

⁴Vale EFC, MA – Brasil

⁵Vale EFC, MA – Brasil

⁶Vale PORTO, MA – Brasil

RESUMO

A confiabilidade do sistema de descarga de vagões em ferrovias de carga pesada depende do controle dos esforços dinâmicos aplicados ao conjunto choque-tração, especialmente em condições operacionais severas. Na Estrada de Ferro Carajás, a estratificação histórica de quebras de trem apontou maior incidência em viradores de fabricação TKS operando a 1,39 m/s, sugerindo relação entre parâmetros de posicionamento dos lotes e a intensidade dos esforços longitudinais. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto de ajustes operacionais realizados nesses viradores denominados ciclo 1 e ciclo 2 sobre as solicitações mecânicas impostas aos vagões. A metodologia integrou análise histórica dos eventos, revisão dos parâmetros operacionais e teste experimental com vagão instrumentado durante ciclos de descarga antes e depois dos ajustes. No Virador 08, observou-se redução dos picos de tração de 130 tf para 105 tf e dos picos de compressão de 120 tf para 78 tf, indicando quedas de 19,2% e 35,0%, respectivamente. Para o componente engate após a avaliação observou-se um aumento de 37% na vida em fadiga. A comparação desses resultados com as curvas de desempenho dos aparelhos de choque evidenciou deslocamento da operação para faixa menos severa, com potencial redução de desgaste acelerado e menor risco de quebra de trem. Conclui-se que a combinação entre diagnóstico histórico, ajustes operacionais e validação experimental constitui uma abordagem eficaz para elevar a confiabilidade dos vagões e orientar decisões de padronização.

Palavras-chave: *Viradores de vagões, Esforços longitudinais, Choque-tração, Vagão instrumentado, Confiabilidade ferroviária.*



1. INTRODUÇÃO

Em operações ferroviárias de carga pesada, a confiabilidade do material rodante e dos sistemas de descarga depende da interação entre parâmetros operacionais, dinâmica longitudinal e robustez dos componentes do trem, sobretudo em cenários com elevada repetitividade de carregamentos e alta disponibilidade requerida dos ativos (IKEDA; ESVELT, 2006; WITTE et al., 2019). Na Estrada de Ferro Carajás (EFC), o aumento da demanda de transporte de minério de ferro reforça a necessidade de controlar mecanismos que aceleram a degradação dos componentes do sistema choque-tração durante carregamento, circulação e descarga dos vagões.

No contexto da descarga portuária, a quebra de trem em viradores de vagões representa uma anomalia operacional com impacto em segurança, disponibilidade, exposição de equipes a corretivas emergenciais e perda de desempenho do sistema logístico. A análise histórica dos eventos apontou concentração do problema em poucos ativos e em poucos componentes críticos: os viradores do fabricante TKS responderam por 27 de 32 ocorrências mapeadas, equivalente a 84,4% do total, enquanto o engate rotativo foi o componente mais recorrente, com 15 eventos, seguido pela mandíbula, com 8 ocorrências. Também foi observada uma concentração por ativo, com maior incidência nos viradores (VV02, VV01, VV07, VV03 e VV08), reforçando a hipótese de que o fenômeno não é aleatório e pode estar associado à severidade dinâmica do processo de posicionamento para descarga.

Do ponto de vista mecânico, a literatura de dinâmica veicular ferroviária indica que solicitações longitudinais repetitivas, principalmente associadas a acelerações e desacelerações abruptas, podem produzir carregamentos cíclicos relevantes em elementos do trem, influenciando fadiga, desgaste e confiabilidade do sistema (IKEDA; ESVELT, 2006). Em linha com esse entendimento, o Documento Técnico 635, elaborado na EFC, demonstrou historicamente que o processo de posicionamento dos vagões nos viradores gera picos de tração e compressão capazes de impor elevada dissipação de energia aos aparelhos de choque, inclusive em níveis superiores à capacidade do modelo Mark 50 nas condições avaliadas à época (SANTOS, 2008).

Além da explicação físico-mecânica, a ótica de confiabilidade e manutenção baseada em condição sugere que a mitigação mais robusta de falhas em sistemas complexos depende da combinação entre atuação na origem da solicitação, melhoria da capacidade de absorção dos componentes e monitoramento baseado em dados (DERSIN, 2017; GOURIVEAU; MEDJAHHER; ZERHOUNI, 2016). Nesse sentido, a revisão dos parâmetros operacionais dos viradores TKS surgiu como alavanca de engenharia para redução da severidade dinâmica da descarga, enquanto a instrumentação de vagão foi utilizada como ferramenta de validação experimental em condição real de operação.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a redução de esforços longitudinais no conjunto choque-tração de vagões da EFC após ajustes operacionais em viradores TKS, com validação por meio de um vagão instrumentado, tomando como base a estratificação histórica dos eventos, o referencial técnico dos esforços teóricos já conhecidos e a análise da relação entre os esforços medidos e o desempenho dos aparelhos de choque. A contribuição do estudo está em integrar o diagnóstico do histórico, a intervenção operacional e a validação em campo para suportar decisões de padronização



operacional, aumento de confiabilidade e evolução da estratégia de mitigação de quebras de trem na descarga.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Caracterização Do Problema e Estratificação Histórica Das Ocorrências

A etapa inicial do estudo consistiu na estratificação histórica dos eventos de quebra de trem na descarga, utilizando registros de anomalias associados ao processo de descarregamento nos viradores. Essa estratificação teve por objetivo identificar a concentração por fabricante, por ativo, por componente e por comportamento temporal, direcionando a ação de engenharia para os pontos de maior criticidade.

Conforme figura 1 os dados levantados mostraram que o fabricante TKS concentrou 27 ocorrências, equivalentes a 84,4% do total observado, ao passo que Metso respondeu por 4 ocorrências e Bardela por 1. Conforme figura 2, Entre os viradores, VV02 apresentou 9 ocorrências, VV01 e VV07 apresentaram 5 ocorrências cada, VV03 e VV08 apresentaram 4 ocorrências cada, enquanto VV06, VV05 e VV04 apresentaram menor contribuição. Como mostra a figura 3 na estratificação por componente, o engate rotativo representou a maior parte dos eventos, seguido por mandíbula, braçadeira, haste rígida e engate fixo.

Do ponto de vista de foco do problema, a concentração observada foi suficiente para justificar a priorização dos viradores TKS no escopo das ações de engenharia.

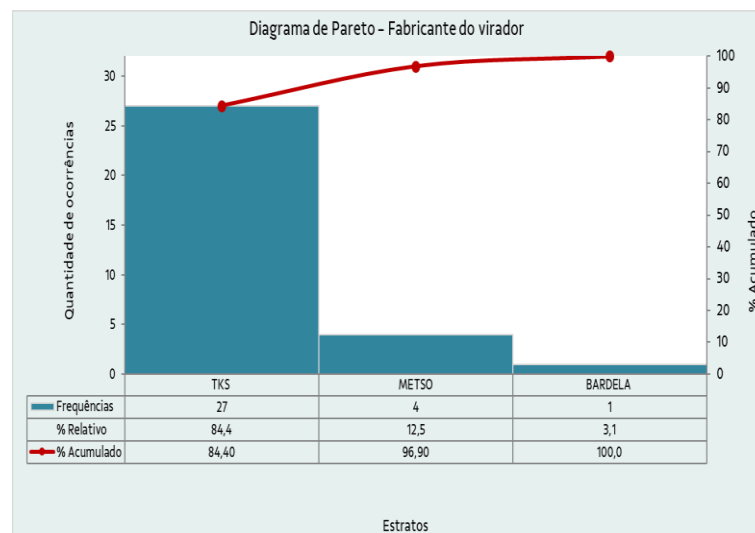


Figura 1. Quantidades de ocorrências por fabricante do virador



Redução dos esforços longitudinais no conjunto choque-tração de vagões da EFC após ajustes operacionais em viradores TKS: Validação com vagão instrumentado

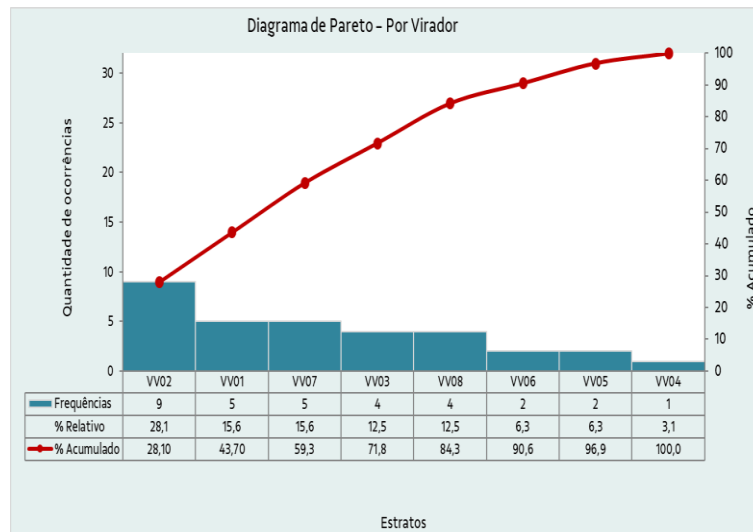


Figura 2. Quantidades de ocorrências por virador de vagões EFC

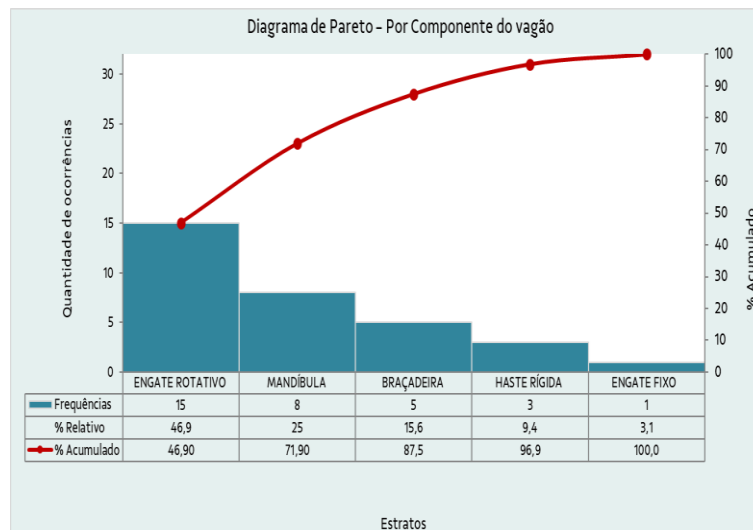


Figura 3. Quantidades de ocorrências por componente do vagão

2.2. Análise da energia dissipada nos aparelhos de choque durante a descarga.

A análise que sustenta a hipótese deste trabalho foi realizada considerando diferentes fabricantes de viradores, com velocidades de campo, e comparadas com os limites de capacidade dos aparelhos de choque Mark 50 (52,78 kJ) e Power Guard (63,80 kJ). Conforme figura 4 os viradores TKS operam acima da capacidade nominal dos aparelhos de choque Mark 50, porém permanecem dentro dos limites do modelo Power Guard.

Já os viradores Bardela e Metso operam com segurança dentro das especificações de ambos os modelos. A velocidade de referência para operação segura é de 1,03 m/s, considerando uma massa de 126.000 kg, aplicável aos aparelhos Mark 50 e Power Guard.



Tabela 1. Energia dissipada nos viradores

	VIRADORES	VELOCIDADES (m/s)	ENERGIA TOTAL DISSIPADA (kJ)	ENERGIA POR VAGÃO (kJ)	ACT MARK 50 (52,78 kJ)	POWER GUARD (63,80 KJ)
A	TKS (VV 1,2,3,7,8)	1,39	121,72	60,86	FORA	OK
B	Metso (VV 5,6)	1,10	76,23	38,12	OK	OK
C	Bardela (VV 4)	1,03	66,84	33,42	OK	OK

Dada as velocidades de operação dos viradores é possível calcular a energia dissipada nos aparelhos de choques:

$$E = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

E = Energia

m = Massa da dupla de vagões [kg]

V = Velocidade final e inicial respectivamente [m/s]

Complementada pelo Documento Técnico 635, elaborado na EFC para medição de esforços longitudinais no virador de vagões. Nesse estudo, foi utilizada uma haste rígida instrumentada, calibrada pelo IPT para esforços entre +200 tf e -200 tf, instalada entre vagões posicionados na cauda do lote durante o processo de descarga. As medições mostraram que, em cada posicionamento, os picos positivos estavam associados à partida do lote, caracterizando esforço de tração, enquanto os picos negativos estavam associados à parada, caracterizando esforço de compressão.

Com mostra na análise histórica figura 4 concluiu que, naquele cenário, os aparelhos de choque tipo Mark 50 já trabalhavam além da capacidade nominal de dissipação de energia. O estudo calculou na época uma velocidade de choque da ordem de 1,31 m/s e energia dissipada por aparelho em torno de 54 kJ, superior à capacidade aproximada de 52,8 kJ. Superior à capacidade aproximada de 52,8 kJ do modelo analisado (SANTOS, 2008). Em termos de engenharia, isso significa que, mesmo sem ruptura imediata por falha estrutural do engate, a energia longitudinal não dissipada adequadamente tende a ser absorvida por deformações, ruídos e sobrecarga de regiões vulneráveis do vagão, acelerando a degradação do sistema choque-tração.

Esse entendimento é compatível com a literatura de dinâmica ferroviária, segundo a qual a resposta longitudinal do trem depende da interação entre massa, aceleração, dissipação de energia e rigidez dos dispositivos de acoplamento, sendo especialmente sensível em cenários de transição operacional com altos gradientes de aceleração e desaceleração (IKEDA; ESVELT, 2006). Em operações heavy haul, a repetição desses eventos ao longo da vida dos vagões tende a aumentar a criticidade do sistema, tornando desejável a atuação sobre os parâmetros operacionais que originam tais carregamentos, em paralelo à melhoria da robustez dos componentes (WITTE et al., 2019).



Redução dos esforços longitudinais no conjunto choque-tração de vagões da EFC após ajustes operacionais em viradores TKS: Validação com vagão instrumentado

A partir dessa base, o problema investigado neste trabalho pode ser sintetizado da seguinte forma: o processo de posicionamento dos vagões para descarga impõe esforços longitudinais ao conjunto choque-tração; quando esses esforços atingem faixas severas de operação do aparelho de choque, a absorção de energia torna-se menos eficiente, elevando desgaste, risco de degradação acelerada e probabilidade de ocorrência de quebra de trem.

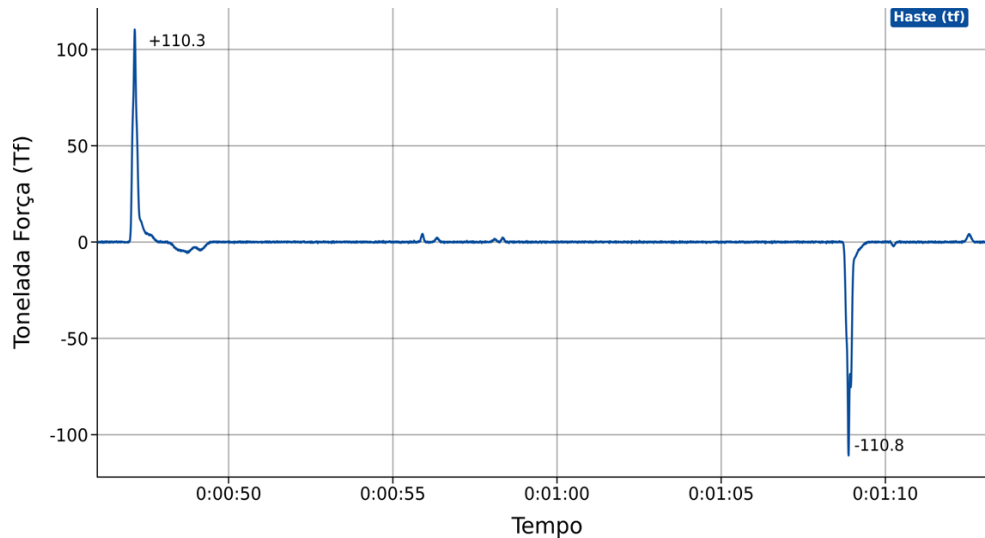


Figura 4. Esforços de tração e compressão no virador. Adaptado (SANTOS,2008)

2.3. Intervenção de engenharia: Ajustes operacionais nos viradores TKS

O Virador de Vagões é um equipamento capaz de realizar a descarga dos lotes, normalmente formados por 110 Vagões com carga de 126 tonelada por vagão, girando uma dupla de vagão por vez como ilustra a figura 5. Sua capacidade de projeto alcança a capacidade de tração para 120 vagões com até 150 Tonelada.



Figura 5. Virador de Vagões TKS EFC

O sistema de posicionamento dos vagões durante a operação é realizado através do carro posicionador, uma estrutura móvel acionada por um conjunto de acionamento de 800CV conforme figura 6.

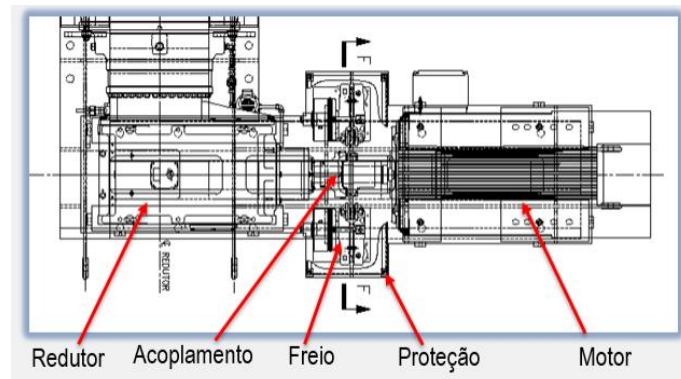


Figura 6. Carro posicionador do virador de vagões TKS EFC

O eixo de saída do redutor do acionamento é conectado ao tambor de cabos por meio de um acoplamento flexível. O posicionador é movido por dois cabos de aço, um para cada direção de deslocamento conforme figura 7.

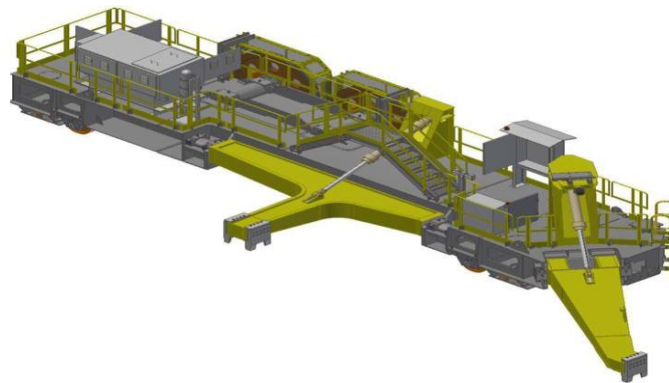


Figura 7. Braço posicionador do virador de vagões

Conforme figura 7 os vagões são movimentados pelo braço lateral principal, enquanto os dois últimos recebem impulso do braço auxiliar angular. O posicionador se desloca guiado pelos trilhos, rodas de translação e rodas guia.

Conforme a figura 8 a tração do sistema é fornecida por um guincho e transmitida ao posicionador via cabos de aço acoplados no tambor.



Figura 8. Tambor de acionamento do carro puxador do virador TKS



Com base na estratificação histórica e no racional físico-mecânico apresentado, foi definida a revisão dos parâmetros operacionais dos viradores TKS como principal ação de mitigação na origem da solicitação dinâmica. O material de análise disponível já indicava que os viradores TKS operavam acima da capacidade nominal dos aparelhos de choque Mark 50, embora permanecessem dentro dos limites do modelo Power Guard em determinadas condições, e que a velocidade de referência segura considerada era da ordem de 1,03 m/s para massa de 126.000 kg.

No plano de ação da engenharia, foi explicitada a necessidade de alterar os parâmetros de velocidade de posicionamento, inclusive no VV08, aproximando-os dos níveis observados em viradores considerados menos severos. A matriz de parametrização aplicada aos viradores TKS contemplou ajustes na velocidade e em rampas de aceleração, e desaceleração em posicionamento, com implementação nos viradores (VV01, VV02, VV03, VV07 e VV08) conforme tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros operacionais revisados nos viradores TKS contemplados na padronização da configuração.

	VARIÁVEIS	PARÂMENTROS INICIAIS	NOVOS PARÂMENTROS
A	Velocidade de avanço	60,00%	42,93%
B	Velocidade de avanço (m/s)	1,39	1,03
C	Rampa de Aceleração Inicial (s)	13,00	18,00
D	Rampa de Aceleração Inferior (s)	12,00	12,00
E	Rampa de Aceleração Superior (s)	14,00	18,00
F	Rampa de Desaceleração Inicial (s)	10,00	13,00
G	Rampa de Desaceleração Inferior (s)	9,00	13,00
H	Rampa de Desaceleração Superior (s)	11,00	13,00
I	Posição de Desaceleração Inicial (m)	15,50	16,00
J	Posição de Desaceleração Inferior (m)	15,50	16,00
K	Posição de Desaceleração Superior (m)	17,00	17,50
L	Ciclo de posicionamento (s)	95	95

Do ponto de vista conceitual, a intervenção operacional aqui proposta segue o princípio de mitigação na origem do descarregamento: ao reduzir a severidade de



aceleração e desaceleração no posicionamento do lote, busca-se reduzir os picos de tração e compressão impostos aos dispositivos de acoplamento e, consequentemente, deslocar o aparelho de choque para regiões mais favoráveis de operação. Essa estratégia é coerente com abordagens de confiabilidade que priorizam, sempre que possível, a eliminação ou redução da excitação antes da dependência exclusiva da robustez do componente para absorvê-la (DERSIN, 2017; GOURIVEAU; MEDJAHAR; ZERHOUNI, 2016).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL COM VAGÃO INSTRUMENTADO

A validação experimental do efeito dos ajustes operacionais foi realizada por meio da circulação de um vagão instrumentado na EFC, cujo objetivo foi monitorar e analisar os esforços de tração e compressão durante a circulação e, principalmente, durante a movimentação dos lotes no processo de descarga nos viradores. A dupla instrumentada foi composta por 2 vagões GDT. O plano experimental contemplou ciclos em diferentes posições de lote e do trem, com prioridade de descarga no virador VV08 modelo TKS.



Figura 9. Haste rígida instrumentada instalada na dupla de GDT.

Como mostra a figura 9 a instrumentação compreendeu: dois extensômetros uniaxiais instalados na haste, alinhados à direção predominante do esforço longitudinal; duas rosetas triaxiais instaladas na viga central, para avaliação do estado plano de tensões e orientação da tensão principal máxima; e sensores no encanamento geral para leitura de fluxo de ar relacionado à frenagem. Essa arquitetura experimental foi concebida para aumentar a capacidade de observação do fenômeno, permitindo correlação entre condição operacional e resposta mecânica do vagão.

Para efeito de comparação direta neste artigo, foi utilizada a passagem do vagão instrumentado no VV08 modelo TKS, considerando-se Ciclo 1 como condição anterior ao ajuste operacional e Ciclo 2 como condição posterior ao ajuste usando a configuração do vagão durante a descarga na posição 70 de um lote de 110 vagões. O tratamento dos resultados concentrou-se nos maiores picos de tração e compressão observados em cada ciclo, por serem os indicadores mais diretamente associados à severidade do evento longitudinal no processo de posicionamento.

Embora os demais viradores TKS tenham sido posteriormente padronizados para a mesma configuração operacional do VV08, a validação instrumental direta documentada, permanece válida no VV08, devendo qualquer extrapolação para os



demais ativos ser entendida como replicação de parâmetro e não como medição experimental direta em todos os casos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da validação experimental no Virador 08 modelo TKS EFC

A comparação entre os dois ciclos monitorados no virador 08 mostrou redução relevante dos esforços longitudinais após a aplicação da nova configuração operacional. Conforme figura 10 na condição anterior ao ajuste (Ciclo 1), os maiores picos observados foram de 130 tf em tração e 120 tf em compressão.

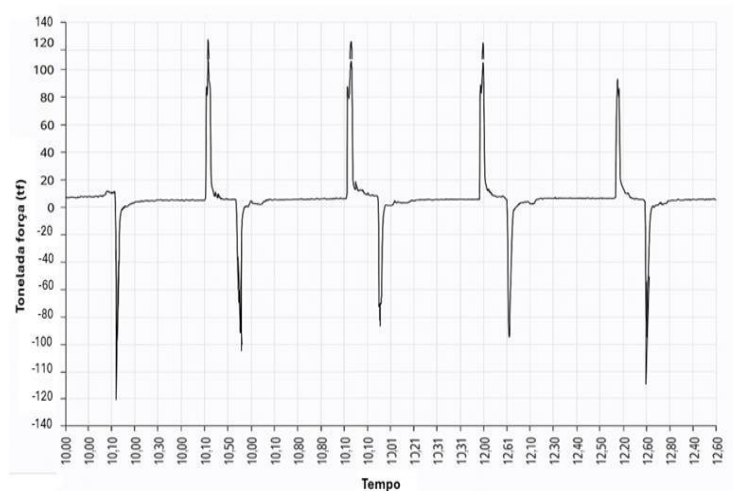


Figura 10. Esforços longitudinais medidos no VV08 antes (Ciclo 1)

Conforme figura 11 na condição posterior ao ajuste (Ciclo 2), os maiores picos foram reduzidos para 105 tf em tração e 78 tf em compressão.

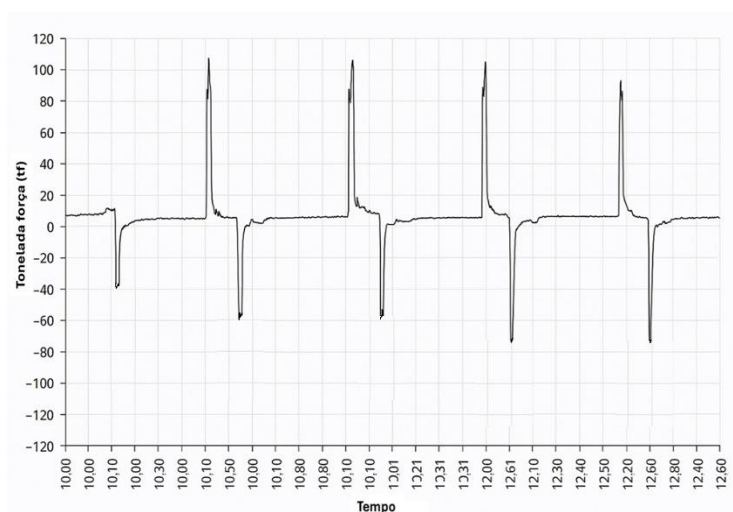


Figura 11. Esforços longitudinais medidos no VV08 antes (Ciclo 2)



Como mostra a tabela 3, a intervenção resultou na redução de 25 tf em tração e 42 tf em compressão, equivalendo a quedas de 19,2% e 35,0%, respectivamente.

A maior redução na compressão indica que os ajustes foram mais eficazes na fase de desaceleração/parada do lote, coerente com a revisão das rampas de desaceleração dos viradores TKS. Esse efeito é relevante porque os picos de compressão estão associados aos eventos mais severos de parada abrupta, que transferem elevada energia longitudinal ao conjunto choque-tração. A queda de 120 tf para 78 tf representa não apenas melhoria estatística, mas redução material da severidade do carregamento longitudinal. O resultado está alinhado ao racional de Santos (2008), que aponta a desaceleração abrupta no posicionamento como principal geradora de choques longitudinais relevantes nos viradores.

Tabela 3. Comparação dos picos máximos de esforço longitudinal no VV08 antes e depois do ajuste operacional.

	CONDICÃO	PICO DE TRACÇÃO (tf)	PICO DE COMPRESSÃO (tf)	VARIAÇÃO ABSOLUTA 9(tf)	REDUÇÃO RELATIVA (%)
A	Antes do ajuste (Ciclo 1)	130	120	-	-
B	Depois do ajuste (Ciclo 2)	105	78	-	-
C	Diferença (depois - antes)	-25	-42	25 / 42	19,2 / 35,0

4.2 Relação entre os esforços medidos e o desempenho do aparelho de choque Power Guard

A análise da curva força versus deslocamento do aparelho de choque Power Guard permite interpretar de maneira mais robusta os efeitos da redução observada. Conforme figura 12 destaca, no setor BC, curso aproximado de 3,375 in. Uso de quase todo o curso disponível, ausência de reserva, rigidez elevada (27.043 kgf/mm) e baixo índice de amortecimento (0,8%), indicando condição severa de operação para choques superiores a aproximadamente 250.000 lbf, equivalentes a cerca de 113 tf.

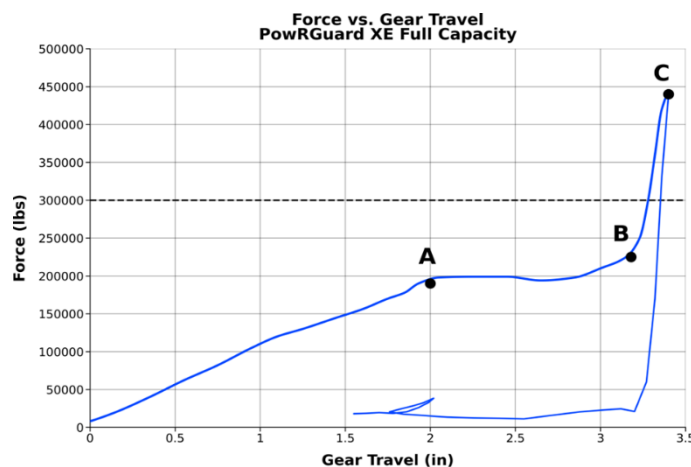


Figura 12. Curva força versus deslocamento do aparelho de choque Power Guard



Sob esse referencial, os picos de 130 tf e 120 tf observados no Ciclo 1 posicionam a solicitação dentro da faixa severa BC do Power Guard, caracterizada por maior propensão a desgaste acelerado do ACT. Já no Ciclo 2, os picos de 105 tf em tração e 78 tf em compressão permanecem abaixo do limiar de 113 tf, deslocando a solicitação para uma região menos severa de trabalho do aparelho.

Esse deslocamento é tecnicamente importante porque significa que a atuação do ACT deixa de ocorrer em região com quase esgotamento de curso e baixa capacidade adicional de amortecimento, passando a operar em faixa mais favorável do ponto de vista de dissipação de energia. Em termos práticos, isso tende a reduzir desgaste acelerado, necessidade de corretivas associadas à degradação do sistema e risco de amplificação da severidade dinâmica ao longo do tempo. A interpretação é compatível com a literatura de confiabilidade, segundo a qual a redução da excitação mecânica em regime severo aumenta a previsibilidade e a vida útil dos componentes (DERSIN, 2017; WITTE et al., 2019).

4.3 Relação entre os esforços medidos e o desempenho do aparelho de choque Mark 50

Como ilustra a figura 13 a curva de desempenho do Mark 50 mostra comportamento mais restritivo para ingresso na faixa de maior severidade. No material analisado, o setor AB foi associado a curso aproximado de 2,5 in, rigidez de 1.136 kgf/mm e nível de referência em torno de 205.000 lbf (aproximadamente 93 tf), enquanto o setor BC foi associado a curso de 3,1 in, utilização de quase todo o curso, ausência de reserva, rigidez de 6.308 kgf/mm, baixo amortecimento (3,0%) e limiar de criticidade acima de aproximadamente 210.000 lbf, equivalentes a cerca de 95 tf.

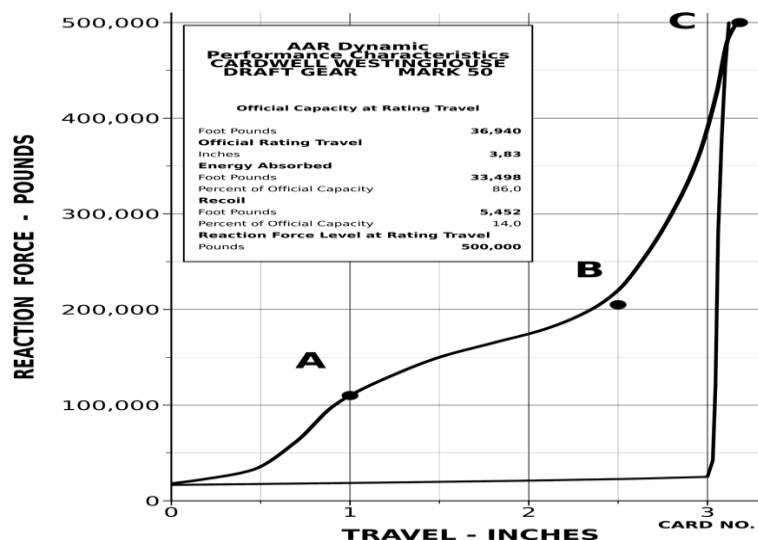


Figura 13. Curva força versus deslocamento do aparelho de Mark 50

Com este comportamento, os picos de 130 tf e 120 tf do Ciclo 1 encontram-se claramente acima do limiar de 95 tf, indicando solicitação em região severa para o Mark 50.

Após o ajuste, a compressão máxima de 78 tf passa a ficar abaixo desse limiar, sinalizando retorno a faixa menos crítica, enquanto a tração máxima de 105 tf ainda permanece acima de 95 tf.



Isso indica que a mitigação observada com o ajuste operacional foi parcial quando analisada sob o ponto de vista do Mark 50: a severidade do evento cai materialmente, mas a margem remanescente ainda pode ser limitada em determinadas condições operacionais. Esses dados têm relação direta com a conclusão histórica, SANTOS (2008), que já apontava sobrecarga energética do Mark 50 no contexto de viradores, e reforça a necessidade de combinar redução dos esforços com ações de substituição em andamento dos aparelhos de choque Mark 50 na frota EFC por Power Guard voltada a ampliar a robustez do sistema frente aos esforços residuais remanescentes após a mitigação operacional. Sob a lógica de múltiplas barreiras, essa combinação tende a ser superior a qualquer ação isolada, pois reduz a excitação na origem e, simultaneamente, eleva a capacidade de absorção de energia do sistema (DERSIN, 2017; GOURIVEAU; MEDJAHHER; ZERHOUNI, 2016).

4.5 Análise dos engates na vida em fadiga durante a descarga nos viradores modelo TKS.

As análises mostraram que as condições operacionais do virador influenciam diretamente os danos por fadiga nos engates. A combinação de extensometria experimental e modelagem por elementos finitos conforme figura 14 revelou que o posicionamento no Ciclo 1 gera maiores cargas compressivas e históricos de carga mais severos. Na região do pino da mandíbula, não houve aumento relevante de vida em fadiga entre os ciclos, enquanto a cabeça do engate apresentou ganho de cerca de 37% no Ciclo 2 devido à redução das solicitações mecânicas conforme tabela 4.

Os resultados confirmam a forte dependência entre operação e durabilidade do engate, destacando que a escolha do posicionamento adequado é essencial para aumentar a vida útil. O estudo demonstra que ajustes operacionais podem reduzir danos por fadiga e reforça a importância de critérios robustos de operação e projeto.

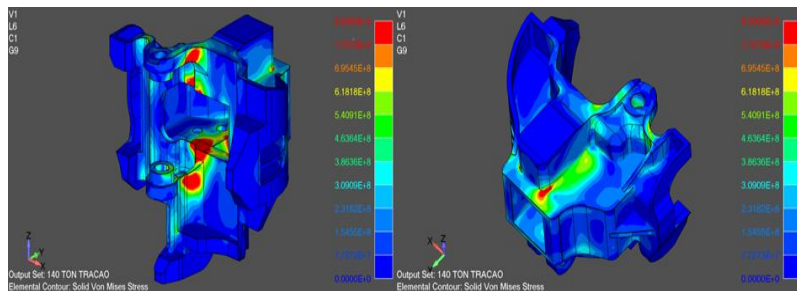


Figura 14. Avaliação do modelo em elementos finitos com maiores tensões no engate

Tabela 4. Vida em fadiga do engate e pino da mandíbula

	CONDIÇÃO	PINO DA MANDÍBULA	CABEÇA DO ENGATE
A	(Ciclo 1)	112329	39694
B	(Ciclo 2)	117439	54294
C	Aumento de vida útil (%)	5	37



5. CONCLUSÃO

A estratificação histórica das ocorrências de quebra de trem na descarga demonstrou forte concentração do problema em viradores do fabricante TKS e em componentes do sistema choque-tração, com destaque para engate rotativo e mandíbula, justificando a priorização desses ativos no escopo das ações de engenharia.

A validação experimental realizada com vagão instrumentado no VV08 confirmou que os ajustes operacionais implementados reduziram os maiores picos de tração de 130 tf para 105 tf e de compressão de 120 tf para 78 tf, representando reduções de 19,2% e 35,0%, respectivamente. Esses resultados demonstram que a atuação sobre os parâmetros de virador é uma alavanca efetiva para reduzir a severidade dinâmica da descarga sobre os engates.

A interpretação desses resultados em relação as curvas dos aparelhos de choque indicam que a nova configuração deslocou a solicitação para uma faixa menos severa de operação, com benefício claro para o comportamento do Power Guard e mitigação material, ainda que parcial, para o Mark 50. Assim, a combinação entre redução da solicitação na origem e a substituição progressiva dos ACTs Mark 50 por Power Guard configura uma estratégia coerente de múltiplas barreiras para aumento da confiabilidade do processo de descarga, isso implica no aumento da vida útil em fadiga dos engates em 37%.

Conclui-se, portanto, que os ajustes operacionais nos viradores TKS constituem uma medida de engenharia efetiva para mitigação de esforços longitudinais no conjunto choque-tração dos vagões da EFC, fornecendo base técnica para padronização operacional, redução de desgaste, mitigação de quebras de trem e evolução da estratégia de confiabilidade do sistema de descarga dos vagões.

6. REFERÊNCIAS

DERSIN, P. **Prognostics and Health Management in Railways. Safety and Reliability – Theory and Applications**. 2017.

GOURIVEAU, R.; MEDJAHAR, K.; ZERHOUNI, N. **From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance 1: Monitoring and Prognostics**. 2016.

GUILLÉN, A. J.; GONZÁLEZ-PRIDA, V.; GÓMEZ, J. F.; CRESPO, A. **Standards as Reference to Build a PHM-Based Solution**. In: KOSKINEN, K. et al. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*. Cham: Springer, 2016.

IKEDA, M.; ESVELT, C. A. (Ed.). **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

SANTOS, Guilherme Fabiano Mendonça dos. **Medição dos esforços longitudinais no virador de vagões da EFC**. Documento Técnico 635. EFC, 2008.

WITTE, M. et al. **Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations. Management of Rolling Stock. Volume 1: Freight Wagons**. Virginia Beach: International Heavy Haul Association, 2019.



REDUCTION OF LONGITUDINAL FORCES IN THE COUPLER - DRAFT GEAR ASSEMBLY OF EFC FREIGHT WAGONS AFTER OPERATIONAL ADJUSTMENTS IN TKS CAR DUMPERS: VALIDATION WITH AN INSTRUMENTED WAGON

ABSTRACT

The reliability of unloading systems in heavy-haul railways is strongly influenced by the dynamic forces transmitted to the coupler-draft gear assembly, particularly under severe operating conditions. On the Carajás Railway (EFC), historical analysis of train break occurrences identified a higher concentration of events in TKS car dumpers operating at 1.39 m/s, indicating a possible relationship between batch positioning parameters and the intensity of longitudinal loads. This study assessed the effect of operational adjustments implemented in these dumpers, designated as Cycle 1 and Cycle 2, on the mechanical demands imposed on wagons. The approach comprised historical failure analysis, review of operating parameters, and full-scale experimental validation using an instrumented wagon during unloading cycles performed before and after the adjustments. Results obtained at Dumper 08 showed a reduction in peak tensile loads from 130 tf to 105 tf and in peak compressive loads from 120 tf to 78 tf, corresponding to decreases of 19.2% and 35.0%, respectively. In addition, the evaluation of the coupler component indicated a 37% increase in fatigue life after implementation of the new operating condition. When compared with draft gear characteristic curves, the post-adjustment measurements indicate migration of the operating condition to a less critical load range, suggesting lower susceptibility to accelerated wear and reduced risk of train breakage. These findings demonstrate that integrating historical diagnosis, operational optimization, and field instrumentation is an effective strategy for increasing wagon reliability and supporting the standardization of unloading practices in heavy-haul rail operations.

Keywords: car dumpers; longitudinal forces; coupler-draft gear system; instrumented wagon; railway reliability.