



# A IMPORTÂNCIA DO AMORTECIMENTO NO PROJETO DOS TRUQUES PARA A REDUÇÃO DO DESGASTE DAS RODAS

Paulo Mauricio Costa Furtado Rosa\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Diretor de Engenharia da Amsted Rail Brasil Equipamentos Ferroviários

Área Sítio São João s/n, Jd São Camilo, Hortolândia-SP CEP 13184-902

Email: [pmauricio@amstedrail.com](mailto:pmauricio@amstedrail.com)

**Resumo:** Este trabalho descreve o conceito estabelecido para os truques radiais para sua inscrição em curvas horizontais, de forma a minimizar o desgaste de rodas e trilhos sem a necessidade de inclusão de qualquer elemento externo ao seu projeto original como suportes ou barras especiais (*braces*). O trabalho pretende mostrar que o componente já hoje existente nos truques para controlar e absorver as vibrações oriundas da normal operação ferroviária, também pode ser empregado para melhorar a inscrição por meio da aplicação de uma força variável com a carga do vagão, nas áreas de contato entre travessa e laterais. Atuando desta forma, será mantido o esquadro da estrutura e minimizado o contato dos frisos das rodas com os trilhos, o que causa consideráveis desgaste a ambos.

**Palavras-Chaves:** Vagões; Truques; Rodas; Dinâmica Ferroviária

## 1. INTRODUÇÃO

Desde sua introdução no serviço ferroviário ao final do século 19, nunca os truques representaram tanto para a correta operação, garantindo que velocidades maiores sejam obtidas com segurança e que a interação com a via permanente esteja dentro de níveis de desgaste aceitos para controle de custos.

Além disso, o aspecto intercambiabilidade dos truques e seus componentes toma uma importância muito grande, demandando que as soluções adotadas possam ser estendidas à toda frota para que um círculo virtuoso de bons resultados seja criado e mantido.

Os truques tradicionais possuem um histórico de projeto que se mostrou inicialmente adequado para a distribuição das cargas verticais dos vagões aos trilhos, dormentes e lastro e destes para o leito da via ou para as obras de arte existentes.

Porém, com a constante solicitação por aumento de carga por eixo e velocidade operacional, o papel desempenhado pelos truques foi modificado e ampliado, já que o aspecto dinâmico gerou uma nova realidade em termos de garantia da segurança contra descarrilamentos e sobretudo no controle do desgaste de todas as partes em contato.

No momento que um vagão precisa se inscrever em uma curva, seu truque líder sofre um momento que tende a deslocar lateralmente um rodeiro em relação ao outro, resultando em uma condição conhecida como "*warp*". Este efeito é totalmente indesejado pois gera um grande ângulo de ataque do rodeiro 1, resultando em altas taxas de desgaste tanto nas rodas como nos trilhos.

Com o aparecimento do "*warp*", a perda de esquadro dos componentes da estrutura (travessa e laterais) e o correspondente deslocamento dos rodeiros entre si, nos tem mostrado a real necessidade de administrar

a rigidez ao cisalhamento, a qual conduz a uma boa performance de roda desde que o ponto de contato entre a travessas e as laterais seja bem entendido.

O projeto de cada tipo de truque é baseado na sua capacidade não apenas de dispersar forças provenientes do trem sobre a via como dissemos, mas também de controlar as vibrações resultantes da operação.

Cada um destes projetos foi pensado para absorver por atrito as possíveis instabilidades geradas com o movimento. Entretanto, muitos destes projetos de amortecimento desenvolvidos a partir dos anos 1940, se mostraram ineficientes para resistir ao movimento de distorção (*yaw*) entre travessa e lateral.

Na tentativa de conter este movimento, muitos projetistas de truques optaram por criar soluções externas ao projeto básico de três peças, nascendo então componentes tais como braços de travamento (*frame braces*) que se mostraram de início eficientes para segurar o “*warp*” mas que agregavam mais peso aos vagões e exigiam um rígido controle na sua montagem inicial e principalmente nas manutenções.

O método projetado para otimizar os truques de três peças conduz a um controle do “*warp*” enquanto mantém um ótimo amortecimento das vibrações, ou seja, o ponto principal deste trabalho é mostrar que as cunhas de fricção, em função de suas dimensões e da força variável sobre a coluna das laterais, podem balancear estas funções, permitindo que os rodeiros possam se inscrever nas curvas horizontais sem a necessidade de que os frisos das rodas toquem os trilhos ou tenham contatos mais brandos em trechos críticos como entrada e saída de pátios.

## 2. CONCEITO DE CONTROLE

O conceito para controle de um truque de três peças é baseado na hipótese de que a força variável exercida pela cunha sobre as colunas pode ajustar e manter a estrutura em

esquadro sem a necessidade de aplicação de qualquer componente não existente no projeto original. A força variável com a carga efetiva do vagão, produz um balanceamento por meio do atrito para as situações nas quais as solicitações de rotação nas curvas direcionem para a formação do “*warp*” Estando este efeito ajustado, o papel dos rodeiros para uma inscrição radial ficará facilitado.

Analisemos então cada função:

### 2.1 FUNÇÃO A: AMORTECIMENTO

Nesta primeira função encontramos o amortecimento das vibrações oriundas da circulação ferroviária. Usamos nesta etapa a teoria de Coulomb, a qual se baseia na absorção de energia cinética e sua conversão em energia térmica por meio do atrito seco.

A definição do movimento vertical realizado pelas cunhas contra as chapas de desgaste das colunas nas laterais é feita pela definição do atrito cinético, o qual sempre ocorre na direção contrária à direção da força exercida sobre o sistema. O atrito entre as duas superfícies é produzido de forma independente da área de contato entre elas, caso o sistema seja excitado inicialmente e permaneça oscilando até sua total paralização.

Vamos observar os modelos a seguir para melhor compreender tal teoria:

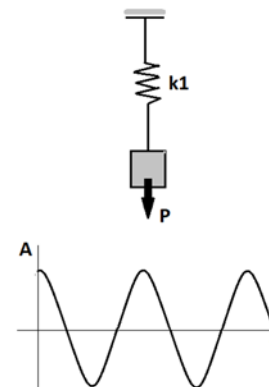


Fig 1 Modelo sem amortecimento

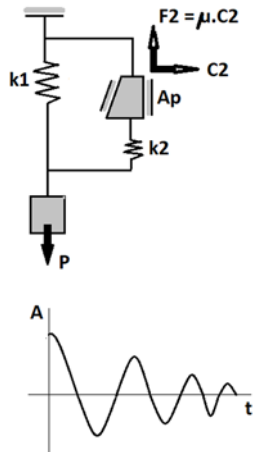


Fig. 2 Modelo com absorção constante

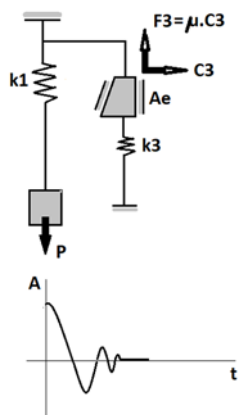


Fig. 3 Modelo com absorção variável

É sempre muito importante lembrar que embora o atrito existente seja oriundo das características dos materiais de cada um dos componentes e não especificamente da área de contato entre eles, o período de oscilação será reduzido caso uma força externa seja aplicada ao sistema.

No esquema da Figura 1, vemos um sistema sem amortecimento, que permanecerá oscilando até que o contato com o ar atue e o estabilize. Já no esquema da Figura 2, vemos que a força feita pela mola de constante  $k_2$  sobre o elemento amortecedor terá valor  $F_2$ , reduzindo o tempo de estabilização, porém mantendo uma taxa constante de absorção de energia.

Agora, analisando a Figura 3, vemos que a força reativa da mola de constante  $k_3$  irá variar com o deslocamento do sistema, aumentando a força  $F_3$  e reduzindo ainda mais o tempo de estabilização do sistema.

Assim, a área de contato  $A$  de cada situação de amortecimento, passará da condição de Área Aparente ( $A_p$ ) verificada no esquema da Figura 2, para uma Área Efetiva ( $A_e$ ) verificada no esquema da Figura 3.

Em palavras diretas, podemos afirmar que um sistema de amortecimento variável como o da Figura 3, poderá absorver mais energia por sua melhor condição de contato entre as superfícies, já que o elemento amortecedor reagirá com valores de força maiores ou menores conforme o conjunto possa ser excitado externamente.

Concluimos então de forma clara que em um sistema com absorção controlada, a atuação de uma força externa de valor variável de amortecimento, sem dúvida reduzirá o tempo de oscilação, restabelecendo mais rapidamente sua estabilidade.

Analisando agora estes fatos e fazendo um paralelo com a operação dos truques ferroviários bem como seus elementos amortecedores que são as cunhas de fricção, poderemos conhecer as forças de reação sobre as chapas de desgaste das colunas, as quais irão gerar as forças de atrito necessárias à estabilidade do sistema.

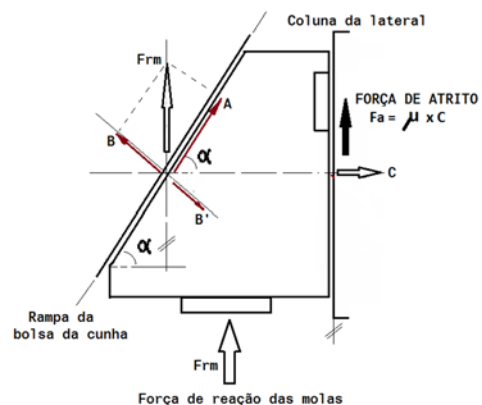


Fig. 4 Esquema de forças nas cunhas

A Figura 4, nos mostra um esquema de forças atuantes sobre as cunhas de fricção quando estas estão montadas nas extremidades da travessa.

As cunhas de fricção são elementos que podem ser projetados para atenderem a condições específicas e podem conter valores dimensionais que auxiliem no tempo e na forma de absorção de energia.

Como normalmente são montadas nas extremidades das travessas em bolsas que possuem ângulos de inclinação, elas trabalham basicamente por reação de suas molas de controle, direcionando contra as chapas de desgaste uma pressão de contato que pode ser constante ou variável com a carga do vagão.

## 2.2 FUNÇÃO B: CONTROLE DO WARP

Como vimos a perda de esquadro (*warp*) é o grande vilão em termos de consumo de vida de roda em um truque ferroviário.

Estudando o jogo de forças que atua no conjunto de um truque na sua condição de inscrição, vemos que precisamos dotar o projeto de reações a sua natural tendência ao "*warp*" sempre, porém, considerando as possibilidades de que o vagão possa estar vazio ou plenamente carregado.

Na Figura 5, vemos um truque em circulação em curva, sujeito ao momento que causa sua perda de esquadro.

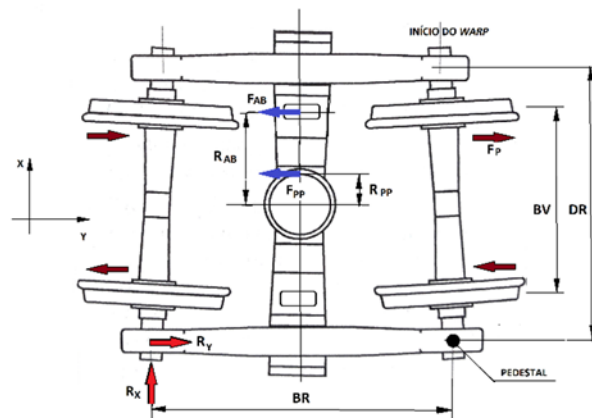


Fig. 5 Balanço de forças no truque

Estando o vagão vazio, o máximo momento gerador do "*warp*" pode ser verificado pela determinação do momento que induz à inscrição:

$$Mv = Fp \times Bv$$

$$Mv = \left( \frac{P}{4} \times \mu_{RT} \right) \times Bv \quad (1)$$

Representado por P o peso da tara em cada uma das rodas; por  $\mu_{RT}$  o coeficiente de atrito roda x trilho e BV a bitola da via.

No caso do vagão estar carregado, a principal dificuldade a ser vencida será a tendência que o truque terá de não girar adequadamente em função das altas cargas por eixo e dos pontos de contato com a caixa que são o prato pião e os ampara-balanços, que atualmente compensam a instabilidade das caixas com forças de pré-compressão.

Desta forma, podemos representar:

$$Mc = \left[ \left( \frac{P}{2} \times \mu_{PP} \right) \times R_{PP} \right] + \left[ \left( 2S_{AB} \times \mu_{AB} \right) \times R_{AB} \right] \quad (2)$$

Representados agora por P o peso da carga e tara da caixa (massa suspensa) em cada roda;  $\mu_{PP}$  o coeficiente de atrito no contato do centro de pião;  $R_{PP}$  o raio do centro de pião;  $S_{AB}$  a parte do peso da massa suspensa;  $\mu_{AB}$  o coeficiente de atrito no contato dos ampara-balanços e  $R_{AB}$  a distância desde o centro dos ampara-balanços ao centro de giro do truque.

Mas fica a necessidade de entendermos o que ocorre no detalhe do contato das cunhas de fricção com as chapas das colunas e para isso, vamos ampliar nossa visão de análise.

Quando as laterais tendem a se deslocar longitudinalmente em relação à travessa, a grande e mais importante reação ocorre nesta região de contato, sendo como vimos, as cunhas de fricção extremamente solicitadas estruturalmente contra as superfícies inclinadas das rampas das bolsas da travessa, sendo em consequência apertadas contra as chapas de desgaste das colunas.

Pela Figura 6, vemos um esquema de forças que ocorrem nesta região e que impedem que o “warp” aconteça ou seja minimizado.

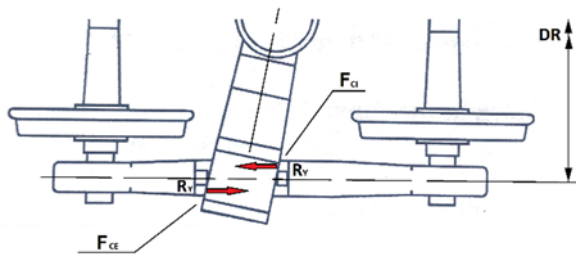


Fig. 6 Pontos de reação nas colunas

Vemos claramente que a distorção é diretamente combatida pelas cunhas de fricção, estando os picos de reação localizados nas extremidades das áreas de contato interna Aci e externa Ace.

As forças de reação Ry, as quais atuam na linha que passa pelo ponto de referência localizado do lado oposto à tendência de distorção, tem sua magnitude relacionada com a largura das cunhas Lcf, como vemos nas duas equações de equilíbrio mostradas a seguir:

$$R_Y = 2 \times F_{CI} \times \frac{L_{CF}}{L_{CF} + D_R} \quad (3)$$

$$R_Y = 2 \times F_{CE} \times \frac{L_{CF}}{D_R - L_{CF}} \quad (4)$$

Vai da análise do projetista do truque a determinação do par de reações entre as cunhas de fricção, colunas das laterais e bolsas das cunhas na travessa, a qual conduzirá a um correto dimensionamento da força Ry que atuará formando o momento reativo em relação à distância ao pedestal oposto (DR).

### 3. O EQUILÍBRIO DO SISTEMA

O principal direcionamento deste trabalho não é de demonstração de cada uma das fórmulas indicadas nas funções descritas. Na realidade o grande foco é fazer com que

seja entendido o conceito de funcionamento dos truques modernos e chamados de Radiais em comparação com os exemplares mais antigos, totalmente desprovidos desta visão. Ficam aqui então colocadas algumas questões:

- i. Como “engenheirar” o controle à natural tendência dos truques ao “warp” de forma a não permitir ou minimizar sua ocorrência?
- ii. Como buscar a otimização do projeto dos truques sem incluir componentes que não façam parte de sua estrutura natural?

Lembrando do esquema da Fig. 4 e levando em consideração as equações reativas (3) e (4), todas ligadas às características das cunhas de fricção, vemos que a força de equilíbrio Ry aplicada por estas poderá ser escrita de forma única como força de reação FR, a qual comporá o momento de equilíbrio total do sistema, que será contrário ao “warp”. Como vimos, controlando o “warp”, controlaremos a inscrição e com isso o desgaste nos frisos das rodas e nos boletos dos trilhos.

Vamos então escrever a forma final desta equação:

$$F_R = F_{RII} \times \frac{(\cos \alpha \times (L_{CI} \times \sin \alpha))}{(\sin \alpha) - (L_{CI} \times \cos \alpha) - (L_{CE} \times \sin \alpha) - (L_{CE} \times \cos \alpha)} \times \frac{L_{CF} \times D_R}{B_V \times (L_{CF} + D_R)} \quad (5)$$

Esta complexa equação pode fazer com que reavaliemos as dimensões do truque em comparação com os dados obtidos e definir:

- A- A melhor dimensão de largura da cunha (LCF), já conscientes que ela não poderá estar em uma faixa de valores que tornem a força reativa (FR) insuficiente para evitar o “warp”;
- B- O melhor ângulo α da cunha, lembrando que valores acima dos 45° poderão inverter a tendência da reação;
- C- A melhor especificação de material das cunhas e das chapas de desgaste das colunas das laterais para que os coeficientes

de atrito tenham valores compatíveis com as necessidades de amortecimento das vibrações e realmente contribuam para que a força reativa (FR) seja o mais efetiva possível;

D- Os melhores valores para as constantes e as alturas de recalque das molas de controle das cunhas de fricção para que a sua força de reação específica (FRM) tenha suas duas parcelas (FA) e (FR) de acordo com o que precisamos para que a estrutura permaneça em esquadro, sob controle vibracional e com rodeiros alinhados com o centro da curva.

#### 4. A ABERTURA DOS PEDESTAIS

Os truques Radiais, como já largamente difundido, possuem rodeiros que se direcionam para o centro da curva no momento da inscrição. Isto se torna possível pois com a atuação da força de reação (FR) da equação (5) na estrutura, o esquadro fica mantido e os dois rodeiros se ajustam lateralmente em função da abertura nos pedestais e a angularidade das pistas das rodas.

Para calcularmos a abertura de cada pedestal devemos observar a Figura 7, abaixo:

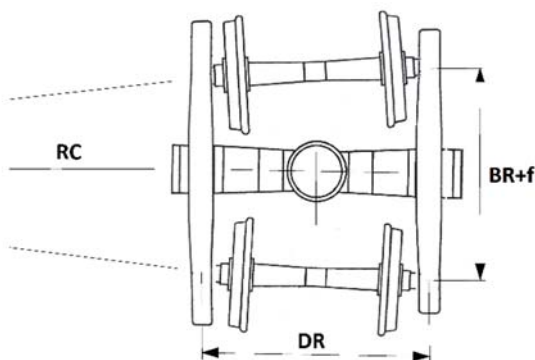


Fig. 7 Inscrição de um truque Radial

Pela Figura 7 vemos que deverá haver uma área de movimentação lateral (f) que aumenta o valor da base rígida para que o

rodeiro possa se deslocar nos pedestais de forma a assumir a posição Radial.

Esta folga lateral (f) mostrada na Figura 8, a ser acrescida aos pedestais pode ser obtida em função da distância transversal entre os pedestais (DR), a base rígida (BR) e o raio da curva (R).

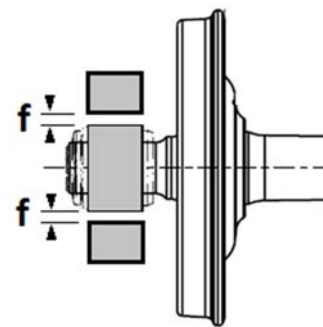


Fig. 8 Folga Radial

A folga de inscrição poderá ser calculada pela relação das variáveis como segue:

$$f = \frac{D_R \times B_R}{2 \times R} \quad (6)$$

O valor obtido deve ser dividido para cada lado do pedestal, dando igual liberdade de movimento lateral para curvas ora à direita e ora à esquerda. Importante considerar que a abertura nos pedestais também deve ser definida para as curvas horizontais que estão ao longo do perfil longitudinal da ferrovia e que têm raios maiores, que são os raios de curva que realmente consomem roda.

Nos pátios, onde os raios são menores e os vagões circulam a baixa velocidade, os rodeiros a princípio terão maior dificuldade de tomar a inscrição radial calculada.

Importante: Não calcular a abertura dos pedestais para as curvas dos pátios e terminais pois como a folga varia em função do raio, uma abertura excessiva comprometerá a segurança operacional do vagão e conseqüentemente do trem.

## 5. CONCLUSÕES

Diante de todos os pontos levantados, podemos concluir o seguinte:

5.1- Pela otimização do projeto das cunhas de fricção e suas molas de controle, poderemos simultaneamente controlar as vibrações dinâmicas e a distorção da estrutura (“*warp*”), garantindo a inscrição radial dos rodeiros sem a necessidade de que os mesmos toquem os trilhos nas curvas horizontais;

5.2- O truque convencional de três peças não possui resistência suficiente ao “*warp*” para manter o desgaste das rodas sob controle de maior quilometragem;

5.3- Os truques radiais dotados de cunhas mais largas e pressão variável aplicada nas chapas de desgaste das laterais, não necessitam de componentes externos ao seu projeto básico para que as rodas tenham melhor condição contra o desgaste, eliminando em consequência qualquer possibilidade de aumento de peso;

5.4- Os truques convencionais que já possuam laterais com colunas com maior área de contato, poderão passar por modernização (“*retrofit*”) para que venham a trabalhar como radiais, alongando a vida útil das rodas;

5.5- Como os truques radiais, por sua melhor capacidade de inscrição, minimizam o contato das rodas com os trilhos, além da redução do consumo destes dois itens, também poderá obter vantagens na redução do consumo de combustível estimado em 5% e na manutenção da via permanente, principalmente nas curvas

5.6- Uma vez que os truques radiais não têm a aplicação de componentes externos ao seu projeto original, possibilitarão ao seu proprietário custos de instalação e manutenção muito próximos dos truques convencionais;

5.7- Por conceito, como os truques radiais otimizados utilizam “*pads*” fabricados em

borracha ou polímero, é igualmente aguardada uma melhor performance ao defeito de roda conhecido como “*shelling*”, responsável por muitos desgastes nas pistas das rodas;

5.8- De forma genérica, os truques radiais otimizados podem vir a dobrar a vida de suas rodas em serviço regular ferroviários em relação aos truques convencionais.

## 6. AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos colegas de todas as concessionárias e da indústria, os quais têm procurado estudar e entender mais sobre o tema da dinâmica ferroviária, conseqüentemente estimulando-me a igualmente estudar e evoluir.

## 7. REFERÊNCIAS

[1] **Taylon, Armand** – “The optimized three piece bogie”, 7<sup>th</sup> International Heavy Haul Conf, Brisbane – Australia, June 2001;

[2] **Hungria, Luiz** – Livro “Segurança Operacional de Trens de Carga”, AllPrint Editora, São Paulo - SP, 2017;

[3] **High Tech in Heavy Haul** - International Heavy Haul Association – Proceedings, Kiruna - Sweden, June 2007.

[4] **Amsted Rail Company** – Motion Control bogie maintenance manual, Chicago - USA, 2019.