

SEGURANÇA COM SUPERLEVAÇÃO INSUFICIENTE: UMA ABORDAGEM PRÁTICA PARA FERROVIAS DE CARGA

Josué C. Bastos, MRS Logística, Brasil

Armando Sisdelli, MRS Logística, Brasil

Paula M. Cavalheiro, MRS Logística, Brasil

Jehan P. de O. Secafim, MRS Logística, Brasil

RESUMO

As velocidades cada vez mais altas de operação ferroviária de trens de carga nem sempre podem ser acomodadas por um aumento correspondente da superelevação em curvas. Traçados geométricos pré-existent, incompatibilidade de velocidades de diferentes veículos e restrições de manutenção comumente resultam em valores de superelevação significativamente aquém do que é requerido para o equilíbrio teórico dos trens de maior velocidade. Medições de aceleração lateral de vagões comerciais são apresentadas e ilustram valores acima de $0,65 \text{ m/s}^2$, que é o limite de manutenção implícito nas leis estado-unidenses estabelecidas pela Federal Railway Administration (FRA). Sem cuidados adicionais, essas condições operacionais podem trazer riscos para trens de carga, tais como: i) abertura de bitola, ii) quadramento de trilho, iii) escalada de roda, iv) alívio de roda, v) deslocamento lateral da grade ferroviária e vi) tombamento de veículos. Esse trabalho aborda esses seis riscos e traz limites de segurança e recomendações de boas práticas para mitigá-los mesmo com altos valores de aceleração lateral descompensada.

Palavras-chaves: Superelevação; Segurança; Velocidade; Geometria; Curvas.

1. INTRODUÇÃO

A superelevação ferroviária é definida como a elevação de uma fila de trilhos em relação à outra em uma curva. Embora a superelevação teórica de equilíbrio seja um conceito simples (BRINA, 1988), sua implementação muitas vezes não é viável devido às complexidades práticas de traçado, operação e manutenção. Com os constantes aumentos de velocidades máximas autorizadas (VMA's) motivados por produtividade ou atendimento a requisitos regulatórios, esse desafio tem se tornado cada vez maior para as ferrovias de carga no Brasil.

Curvas de raio apertado e com espirais muito curtas, oriundas de projetos centenários, não têm extensão suficiente para o desenvolvimento gradual da superelevação de equilíbrio. Além disso, a superelevação instalada deve acomodar simultaneamente trens rápidos e trens lentos, sendo impossível que todos trafeguem na condição de equilíbrio teórico. E as limitações práticas de máxima superelevação admissível para a manutenção da linha também contribuem para as ocorrências de superelevação insuficiente para as maiores velocidades. Assim, torna-se importante entender em que circunstâncias o déficit de superelevação pode prejudicar a operação ferroviária.

O desequilíbrio pode facilmente ser entendido como a parcela da aceleração lateral que não é compensada pela superelevação existente na via permanente. Conforme a Eq. 1, o efeito da aceleração proveniente do movimento circular é reduzido pela parcela da aceleração da gravidade paralela ao plano inclinado criado pela superelevação (Figura 1). O símbolo de ‘aproximadamente igual’ é usado porque o cosseno da inclinação da via é arredondado como sendo igual a um, uma abordagem comum para pequenos ângulos. Além disso, deve-se destacar que essa abordagem teórica não deve ser considerada isoladamente, pois não inclui a influência de outros fatores relevantes, como os esforços de engate por exemplo (DICK; RUPPERT JR., 2019). No entanto, ela serve como um indicador prático de déficit de superelevação para qualquer bitola.

$$a_{desc} \approx \frac{Vel^2}{R} - g \frac{s}{B} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

a_{desc} = aceleração lateral descompensada (no plano de rolamento), m/s²;

Vel = velocidade, m/s;

R = raio de curva, m;

g = aceleração da gravidade, m/s²;

s = aceleração da gravidade, m; e

B = distância entre centros das superfícies dos boletos, m.

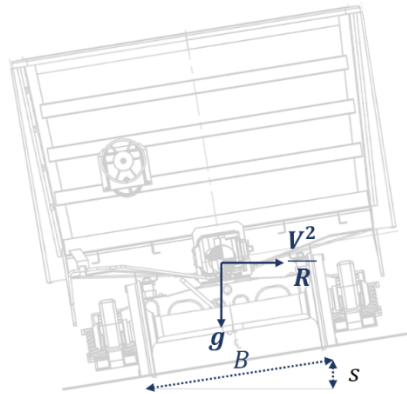


Figura 1. Acelerações, bitola e superelevação em curva.

Nos Estados Unidos, para a bitola standard de 56,5 in (1435 mm), a Federal Railway Administration (FRA) estabelece que o déficit de superelevação não deve ultrapassar 3 in (76,2 mm) em projeto e 4 in (101,6 mm) em manutenção (FRA, 2018a). Esses valores de déficit de superelevação na bitola standard resultam em um desequilíbrio teórico em torno de 0,50 e 0,65 m/s² para projeto e manutenção, respectivamente. No entanto, a AMTRAK (operadora de passageiros norte americana) tem permissão para trabalhar com até 7 polegadas de insuficiência de superelevação, o que resulta em 1,16 m/s² de aceleração lateral descompensada (DICK; RUPPERT JR., 2019). Na Europa, há relatos de testes de conforto de passageiros com aceleração lateral descompensada de até 2,0 m/s² (LAURIKS et al., 2003). Obviamente trens de passageiros de alta velocidade têm truques e sistemas de amortecimento com melhores características dinâmicas do que trens

convencionais de carga. No Brasil, a NBR 16810:2023 (ABNT, 2023) estabelece $0,65 \text{ m/s}^2$ como o máximo valor admissível em aparelhos de mudança de via (AMV). A literatura ferroviária tradicional comumente associa valores similares de desequilíbrio ao bem estar de passageiros (Tabela 1). De fato, o limite de $0,50 \text{ m/s}^2$ é conhecido popularmente como o ‘critério do conforto’.

Tabela 1. Referências de limites de aceleração lateral descompensada

Referência	Limite, m/s^2	Motivo
ESVELD (2014)	1,00	Resistência lateral da grade
HAY (1982)*	0,50	Conforto de passageiros
BRINA (1988)	0,50 – 0,60	Conforto de passageiros em pé
STOPATTO (1987)	0,50 – 1,00	Conforto de passageiros
SCHRAMM (1974)	0,65	Conforto de passageiros e movimentação de objetos

* HAY (1982) menciona 3 polegadas de déficit de superelevação em via de bitola standard.

Para os propósitos deste estudo, curvas com desequilíbrio acima de $0,65 \text{ m/s}^2$ serão classificadas como tendo ‘superelevação insuficiente’. Diante dessa realidade, o objetivo desse trabalho é trazer recomendações de boas práticas de segurança para operações nessas curvas. A operação de trens com vagões de minério vazios da MRS é usada como exemplo, ilustrando operações com desequilíbrio teórico acima de $0,90 \text{ m/s}^2$ nas curvas mais críticas. Especificamente, são apresentados critérios para evitar seis mecanismos de descarrilamento comuns em curvas com alto desequilíbrio: i) abertura de bitola, ii) quadramento de trilho, iii) escalada de roda, iv) alívio de roda, v) deslocamento lateral da grade ferroviária e vi) tombamento de veículos.

2. DESENVOLVIMENTO

A operação ferroviária da MRS na Linha do Centro é marcada pela insuficiência de superelevação. Parte da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil, a Linha do Centro conecta Minas Gerais e Rio de Janeiro em bitola larga e tem suas origens no Governo Imperial. O traçado sinuoso, projetado para seguir cursos de rios e interligar diversos municípios para transporte de passageiros, é o mesmo utilizado hoje para vagões de minério vazios que retornam dos portos para as minas com velocidades de até 60 km/h .

Muitas curvas da Linha do Centro convivem com um elevado desequilíbrio. A **Tabela 2** mostra exemplos em que a aceleração lateral descompensada teórica é maior ou igual a $0,90 \text{ m/s}^2$ baseado na velocidade média dos trens que circulam nas curvas e a superelevação nelas instalada. O coeficiente de segurança contra o tombamento para o lado externo da curva, n , também é indicado e será discutido posteriormente. A tabela mostra ainda resultados de medições com um vagão instrumentado, como a aceleração lateral da caixa na porção circular da curva e o maior L/V inferido na curva. A medição foi feita pelo 63º vagão de uma composição de 136 vagões vazios de minério. Claramente, os indicadores teóricos e medidos confirmam que a insuficiência de superelevação pode ser uma realidade em operações ferroviárias.

Local (PK)	Sentido	Raio (m)	n	$a_{desc_teórica}$ (m/s ²)	a_{desc_medida} (m/s ²)	L/V máx.	$V_{medição}$ (km/h)	Tração no engate (tf)
160,1	Esq	161	7,3	1,06	0,90	0,90	47	19,7
210,5	Esq	146	7,3	1,07	0,77	0,69	48	20,8
215,8	Esq	154	7,4	1,06	0,90	0,44	53	26,2
221,2	Dir	194	8,2	0,95	1,41	0,49	49	30,6
224,3	Dir	192	7,3	1,06	1,20	0,84	48	33,7
374,0	Esq	174	8,6	0,90	0,64	1,19	53	25,4
374,7	Esq	168	7,5	1,04	0,73	0,78	51	36,6
375,7	Esq	168	8,1	0,95	0,33	0,52	43	39,7
450,7	Esq	233	8,4	0,92	0,63	0,41	51	16,5

452,9	Esq	179	7,8	0,99	0,66	0,58	52	16,9
-------	-----	-----	-----	------	------	------	----	------

Além de aumentar o desgaste de trilhos, Hay (1982) destaca que um excessivo déficit de superelevação pode contribuir para abertura de bitola, quadramento de trilhos, descarrilamento de rodas e insegurança de vagões altos. Esses problemas são abordados a seguir, com pequenas modificações. O tópico descarrilamento de rodas é subdividido em alívio de roda e escalada de roda. Além disso, o problema de deslocamento lateral da grade ferroviária também é abordado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os mecanismos de risco que podem ser agravados em casos de insuficiência de superelevação em curvas. São também apresentadas variáveis que podem ser monitoradas e geridas para mitigar os riscos levantados.

3.1. Abertura de Bitola

A abertura de bitola é uma das causas mais comuns de descarrilamento com origem na via permanente. Em curva, os esforços laterais exigem uma boa rigidez de bitola por parte da fixação para evitar um eventual descarrilamento (Figura 3). Em caso de superelevação insuficiente, esses esforços são majorados, e podem contribuir para uma abertura de bitola excessiva, principalmente quando se houver desgaste lateral dos trilhos.



Figura 3. Descarrilamento por abertura de bitola em curva

Diante dessa realidade, fica evidente a necessidade de constante monitoramento de bitola carregada e do desgaste lateral dos trilhos. Também é recomendável monitorar a inclinação dos trilhos (rail cant), tendo em vista que a degradação do apoio pode facilitar a rotação do boleto para o lado de campo. Mesmo que não aconteça o quadramento das filas de trilhos, pequenas movimentações influenciam diretamente a bitola, principalmente para os maiores perfis de trilho.

Boas práticas para curvas com alto desequilíbrio incluem o uso de materiais com alta resistência à abertura de bitola e gestão do atrito na face e topo de boleto. A lubrificação de face de boleto reduz o desgaste de trilhos, o que contribui para manutenção de bitola. E a aplicação de modificador de atrito no topo do boleto contribui para o controle de micro deslizamentos (creepages), limitando as forças laterais nas curvas, as quais podem aumentar se houver apenas lubrificação de face de bitola (MAGEL, 2017).

3.2. Quadramento de Trilho

Embora menos comum do que a simples abertura de bitola, o quadramento de trilho também é potencializado em casos de superelevação insuficiente. Um exemplo aconteceu com o trem de passageiros da AMTRAK operando na rede da BNSF em 2005 (NTSB, 2006). Na ocasião, a operação estava com um desequilíbrio teórico em torno de $1,73 \text{ m/s}^2$. Mesmo se tratando de transporte de passageiros, a força lateral foi suficiente para quadrar o a fila de trilhos que estava apoiada sobre dormentes com extrema degradação da mesa de apoio (Figura 4).



Figura 4. Quadramento de trilhos nos EUA em curva com degradação do dormente na região da mesa de apoio (MARQUIS; MUHLANGER; JEONG, 2012).

O monitoramento da inclinação dos trilhos é, portanto, primordial para garantir a segurança contra o quadramento de trilhos. Outros fatores que possam agravar os esforços também devem ser controlados, como o desgaste de trilhos e rodas. Um caso de quadramento de trilhos ocorreu na malha da Norfolk Southern em dormentes de madeira em 2017 (Figura 5) e foi causado por rodas com ‘hollow’ entre outros fatores (KERCHOF, 2022).

Um indicador de esforços excessivos de material rodante sobre uma mesma fila de trilhos, como quando há truques fora do esquadro, é o indicador $(L/V)_{\text{lado do truque}}$ (WU; KERCHOF, 2014). Nessa fórmula, o numerador é a soma das forças laterais das duas rodas de um lado do truque, e o denominador é a soma das forças verticais dessas mesmas rodas. A FRA estabelece que esse indicador não deve ultrapassar 0,6, embora o requisito seja específico para linhas de Classe 6 a 9 (FRA, 2018b). Finalmente, não se pode deixar de mencionar a importância do controle dos coeficientes de atrito para mitigar

o quadramento de trilhos tendo em vista que uma lubrificação efetiva do topo dos trilhos pode reduzir significativamente os esforços laterais.



Figura 5. Acidente de quadramento de trilhos nos EUA, com desgaste hollow de rodas como causa contributória (KERCHOF, 2022).

3.3. Escalada de Roda

A escalada de rodas é um mecanismo altamente dependente das condições de geometria, atrito e força no contato roda-trilho. Quanto maior for o déficit de superelevação, maior será a força lateral, podendo contribuir para que alguma roda transponha o trilho externo de uma curva (principalmente tratando-se de vagões leves). Tradicionalmente, o indicador de risco mais comum é a razão de força lateral por força vertical de uma roda, $(L/V)_{roda}$. Em uma inspeção com vagão instrumentado por exemplo, foi detectado um alto $(L/V)_{roda}$ em uma das curvas da Linha do Centro que estava com manutenção programada (Figura 6). Essa curva ficou com velocidade restrita temporariamente até que toda a atividade de manutenção fosse concluída.



Figura 6. Essa curva teve uma restrição de velocidade temporária devido a um alto índice de L/V de roda. Raio de 174 m em bitola larga. Velocidade autorizada de 60 km/h.

O valor limite de $(L/V)_{roda}$ a ser adotado é um ponto de debate, mas comumente usa-se o critério de Nadal, descrito a seguir (Eq.2).

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{roda_limite} = \frac{\tan\beta - COF}{1 + COF\tan\beta} \quad (\text{Eq.2})$$

Em que:

$(L/V)_{roda_limite}$ = máximo valor admissível de $(L/V)_{roda}$;

β = ângulo do friso da roda; e

COF = coeficiente de atrito (coefficient of friction).

O limite de Nadal tende a ser uma medida conservadora, pois não é ajustado para pequenos ângulos de ataque nem curtos períodos de exposição a um alto esforço lateral (WU; WILSON, 2006). Nesse cálculo, algumas ferrovias adotam valores de β e COF de acordo com a realidade de cada ramal ou corredor, usando um valor representativo baseado em medições de perfil e coeficiente de atrito. A FRA, para Classes 6 a 9, determina que o coeficiente de atrito no cálculo do limite deve sempre ser igual a 0,50, independentemente de haver ou não lubrificação (FRA, 2018b). Em certo aspecto, essa abordagem conservadora aumenta a margem de segurança para eventos de desativação de lubrificadores, esmerilhamento, ou outras condições que aumentam o COF temporariamente em uma linha normalmente lubrificada.

Além disso, o perfil do trilho também é um fator relevante nesse contexto. Trilhos com altos valores de desgaste lateral podem gerar pontos de contato com elevados esforços e proporcionar uma geometria superficial que facilite a escalada de roda. Assim, torna-se importante monitorar os perfis de roda e trilho e gerenciar o atrito. Nesse aspecto, simulações numéricas de dinâmica veicular podem ser uma ferramenta útil em tomadas de decisões, gerando resultados rapidamente, com baixo custo e sem risco operacional. A Figura 7 é um exemplo de uso de simulação dinâmica em uma análise de sensibilidade de risco diante de vários fatores e velocidades na Linha do Centro.

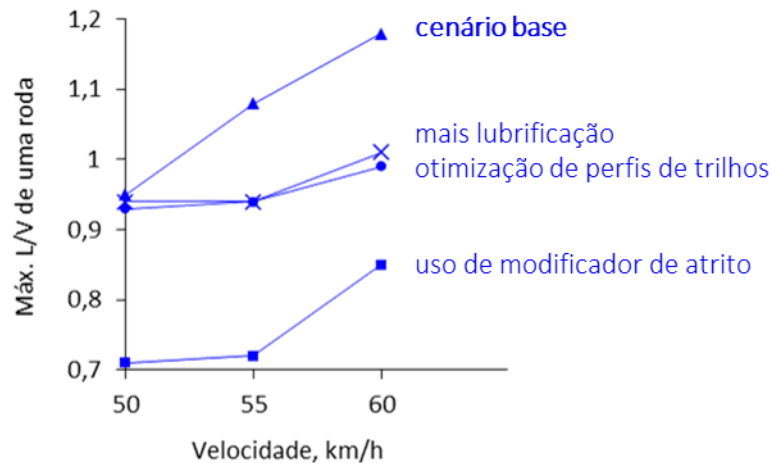


Figura 7. Simulações dinâmicas de várias alternativas para redução de L/V a várias velocidades em uma curva da Linha do Centro.

3.4. Alívio de Roda

Outra forma de descarrilamento é o alívio excessivo de roda. Enquanto a escalada de roda é tipicamente caracterizada por um ataque da roda ao trilho na porção circular da curva, o alívio de roda é mais associado a oscilações de nivelamento, especialmente à variação de superelevação nas transições das curvas, mesmo com baixos valores de força lateral. Obviamente, a insuficiência de superelevação pode ser um fator agravante, desestabilizando uma roda com alto nível de alívio.

Assim, o primeiro índice de controle é a razão da carga de uma roda em relação a sua carga estática nominal, $V/V_{estático}$. A FRA limita esse índice a 0,15 para Classes 6 a 9, o que significa um alívio máximo de 85% (FRA, 2018b). Mas para aprovar projetos de curvas com mais do que 3 polegadas de insuficiência de superelevação (aprox. $0,50 \text{ m/s}^2$ de desequilíbrio) para Classes 1 a 5, a FRA exige que o pior alívio médio na circular não ultrapasse 40% (FRA, 2018a). Para homologação de vagões novos, a AAR (Association of American Railroads) estabelece um alívio máximo de 90% (AAR, 2015).

Com o auxílio de simulações dinâmicas e medições com vagões instrumentados, é possível monitorar o alívio de rodas. Na Linha do Centro, já houve casos em que a velocidade máxima autorizada não foi aumentada por questões de alívio de roda (Figura 8). No entanto, esse acompanhamento nem sempre é acessível e há outros indicadores indiretos que podem auxiliar na prevenção de alívio excessivo de rodas.



Figura 8. Essa transição de curva apresentou resultados elevados de alívio de roda em simulação a 64 km/h. A velocidade máxima autorizada foi mantida em 60 km/h.

Um desses indicadores é a taxa máxima de variação de superelevação em curvas. A NBR 16810:2023 (ABNT, 2023), por exemplo, limita essa taxa a 2,0 mm/m para velocidades inferiores a 65 km/h e 1,0 mm/m para velocidades superiores. Limites de empeno e torção na via também devem ser acompanhados. O desvio padrão do nivelamento, ou algum índice de qualidade da via, é ainda mais um indicador de quão estável está a operação. Pode-se ainda complementar a análise com medições embarcadas de acelerações verticais e laterais, o que tem se tornado cada vez mais comum entre as ferrovias.

3.5. Deslocamento Lateral da Grade Ferroviária

O deslocamento lateral da grade ferroviária não se restringe a curvas e muitas vezes pode ser oriundo de tensões térmicas (flambagem). No entanto, a passagem sucessiva de vagões em curvas com superelevação insuficiente também pode contribuir para esse fenômeno (ESVELD, 2014; SCOTT CUMMINGS; RB WILEY; DWIGHT CLARK, 2016) (Figura 9).



Figura 9. Deslocamento lateral da grade após a passagem de várias composições (SCOTT CUMMINGS; RB WILEY; DWIGHT CLARK, 2016)

Para causar o deslocamento da grade, deve haver uma combinação de alta força lateral e baixa força vertical nas rodas de um mesmo eixo (PRUD'HOMME, 1967). Assim, chega-se à razão $(L/V)_{eixo}$, em que o numerador é a soma das forças laterais das duas rodas de um eixo, e o denominador é a soma das forças verticais das mesmas rodas. Uma abordagem experimental realizada pelo então TTCI (Transportation Technology Center, Inc.), hoje MxV, gerou resultados para embasar o limite proposto na Eq. 3 (SCOTT CUMMINGS; RB WILEY; DWIGHT CLARK, 2016). Um limite mais conservador é estabelecido pela FRA para Classes 6 a 9 (FRA, 2018b), conforme mostrado na Eq. 4.

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{eixo_limite_TTCI} = \frac{26,7 \text{ kN}}{V_{eixo}} + 0,5 \quad (\text{Eq.3})$$

$$\left(\frac{L}{V}\right)_{eixo_limite_FRA} = \frac{22,2 \text{ kN}}{V_{eixo}} + 0,4 \quad (\text{Eq.4})$$

Em que:

$(L/V)_{eixo_limite_TTCI}$ = máximo valor admissível de $(L/V)_{eixo}$ do TTCI;

$(L/V)_{eixo_limite_FRA}$ = máximo valor admissível de $(L/V)_{eixo}$ da FRA; e

V_{eixo} = soma da carga vertical das duas rodas de um mesmo eixo, em kN.

3.6. Tombamento de Veículos

O tombamento de veículos rápidos em curvas é uma preocupação principalmente para veículos com alto centro de gravidade operando em bitola estreita. Para evitar o tombamento, o momento estabilizante deve ser grande o suficiente para garantir a segurança (Figura 10).

De forma prática, a NBR 16810:2023 (ABNT, 2023) estabelece que o coeficiente de segurança contra o tombamento deve ser de pelo menos 4,5 para bitola larga e 3,6 para bitola métrica. Esse coeficiente é a razão entre o momento estabilizante e o momento

tombador, e está diretamente relacionado à aceleração lateral descompensada (Eq. 5). Para a bitola larga e vagões vazios, dificilmente esse coeficiente atinge valores limítrofes (Tabela 2).

$$n = \frac{\text{momento estabilizante}}{\text{momento tombador}} \approx \frac{g \times (B/2 - d)}{a_{desc} \times h} \quad (\text{Eq.5})$$

Em que:

n = fator de segurança contra o tombamento de veículos rápidos;

h = altura do centro de gravidade do material rodante, m; e

d = deslocamento do centro de gravidade do material rodante (normalmente aproximado para 0,10 m), m.

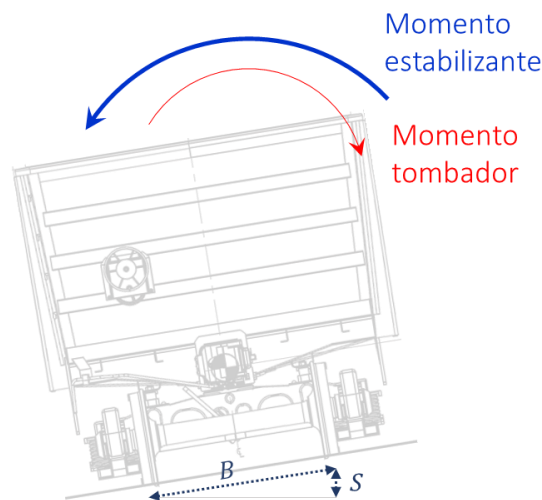


Figura 10. O momento estabilizante deve sempre garantir a segurança contra o tombamento

Uma observação relevante é que o deslocamento do centro de gravidade do material rodante, d , pode ser significativo se houver excentricidade de carga que provoque desbalanceamento lateral.

3.7. Discussão

Os seis mecanismos de risco que são potencializados em curvas com alto desequilíbrio e as variáveis para monitoramento apresentadas neste estudo estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis para monitoramento e controle dos mecanismos de risco

Mecanismo de risco	Variáveis para monitoramento
Abertura de bitola	Bitola, inclinação dos trilhos
Quadramento de trilho	Inclinação dos trilhos, coeficientes de atrito, perfil das rodas, $(L/V)_{lado\ do\ truque}$
Escalada de roda	Coeficientes de atrito, perfil dos trilhos, $(L/V)_{roda}$

Alívio de roda	Taxa de variação de superelevação, $V/V_{estático}$, acelerações verticais, índices de desvio padrão de nivelamento
Deslocamento da grade	$(L/V)_{eixo}$
Tombamento de veículos	n , desbalanceamento lateral de cargas

4. CONCLUSÃO

É possível ter segurança em operações com superelevação insuficiente, como exemplificado em curvas da Linha do Centro. No entanto, é necessário haver uma gestão atenta de manutenção da via férrea e do material rodante. Destaca-se a importância de boas práticas de gestão do contato roda-trilho, o uso de dormentes e fixações de alto desempenho e a manutenção de uma geometria regular da via permanente.

5. REFERÊNCIAS

AAR. Chapter 11 - Service Worthiness Tests and Analyses for New Freight Cars. Em: **AAR Manual of Standards and Recommended Practices - Section C, Part II**. Washington: Association of American Railroads, 2015.

ABNT. **NBR 16810 Via Férrea – Superelevação em Curvas**. BrasilAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2023.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro: via permanente**. 2. ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 1988. v. 1

DICK, T.; RUPPERT JR., C. **Mixed Freight and Higher-Speed Passenger Trains: Framework for Superelevation Design**. Washington, D.C., USA: Federal Railroad Administration (FRA), Outubro 2019.

ESVELD, C. **Modern Railway Track (2014)**. Digital ed. La Couronne, Nouvelle-Aquitaine, France: MRT-Productions, 2014. v. 3.4

FRA. Chapter 1 - Track Safety Standards, Classes 1 Through 5. Em: **Track and Rail Infrastructure Integrity Compliance Manual**. Tradução: FRA. Washington, DC, USA: US Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2018a. v. Iip. 189.

FRA. Chapter 2 - Track Safety Standards, Classes 6 Through 9. Em: **Track and Rail Infrastructure Integrity Compliance Manual**. Tradução: FRA. Washington, DC, USA: US Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2018b. v. Iip. 189.

HAY, W. W. **Railroad Engineering**. Second ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1982. v. 1

KERCHOF, B. **Case study: investigating a rail rollover derailment.** . Em: FRA TRACK SAFETY SYMPOSIUM. Saint Louis, 2022.

LAURIKS, G. et al. **UIC comfort tests : Investigation of ride comfort and comfort disturbance on transition and circular curves.** [s.l.] Statens väg- och transportforskningsinstitut, 2003.

MAGEL, E. E. **A survey of wheel/rail friction:** Tech Report. Washington: Federal Railroad Administration (FRA), 2017. Disponível em: <<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37426>>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MARQUIS, B. P.; MUHLANGER, M.; JEONG, D. Y. **Effect of Wheel/Rail Loads on Concrete Tie Stresses and Rail Rollover.** . Em: ASME 2011 RAIL TRANSPORTATION DIVISION FALL TECHNICAL CONFERENCE. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 8 mar. 2012. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1115/RTDF2011-67025>>. Acesso em: 25 mar. 2024

NTSB. **Derailment of Amtrak Passenger Train No. 27 Home Valley, Washington April 3, 2005:** Railroad Accident Brief. Washington: National Transportation Safety Board, 2006. Disponível em: <<https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/RAB0603.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2024.

PRUD'HOMME, A. **The resistance of the permanent way to the transversal stresses exerted by the rolling stock.** Bulletin International Railway Congress Association. Anais...1967.

SCHRAMM, G. **A Geometria da Via Permanente.** Porto Alegre, Brasil: Meridional Emma, 1974.

SCOTT CUMMINGS; RB WILEY; DWIGHT CLARK. **Analysis of Potential Track Panel Shift at WILD Sites:** Technology Digest. Pueblo: Transportation Technology Center, 2016.

STOPATTO, S. **Via Permanente Ferroviária: Conceitos e Aplicações.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo., 1987.

WU, H.; KERCHOF, B. Management of wheel/rail interface to prevent rail rollover derailments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 228, n. 6, p. 673–686, 1 ago. 2014.

WU, H.; WILSON, N. Railway vehicle derailment and prevention. Em: SIMON IWNICKI (Ed.). **Handbook of railway vehicle dynamics.** Boca Raton: CRC Press, Taylor & Fran-cis Group, 2006. p. 209–238.

SAFETY IN HIGH CANT DEFFICIENCY OPERATIONS: A PRACTICAL APPROACH FOR FREIGHT RAILWAYS

Abstract

The ever-increasing speeds of freight rail operations cannot always be accommodated by a corresponding increase in superelevation on curves. Existing geometric layouts, incompatibility of different vehicle speeds, and maintenance constraints commonly result in superelevation values significantly below the required for the theoretical equilibrium of faster trains. Measurements of lateral acceleration in commercial railcars are presented, illustrating values above 0.65 m/s^2 , which is the implicit maintenance limit set by United States laws according to the Federal Railway Administration (FRA). Without additional precautions, these operational conditions can pose risks for freight trains, including: i) gauge widening, ii) rail rollover, iii) wheel climbing, iv) wheel unloading, v) track panel shift, and vi) vehicle overturning. This work addresses these six failure modes and provides safety limits and best practice recommendations to mitigate them even with high values of uncompensated lateral acceleration.

Keywords: Superelevation; Safety; Speed; Geometry; Curves.