CÁLCULO PARA DETERMINAR O PESO DO TREM EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

SANTOS, Jean C. dos (Engenharia Civil/UNIBRASIL)

SILVIANO, Edna Cristina (Engenharia Civil/UNIBRASIL)

SANTOS, Ruan Patrick P. dos (Engenharia Civil/UNIBRASIL)

Resumo: *A movimentação de trens de carga depende do seu peso transportado e das locomotivas utilizadas, no trabalho proposto iremos abordar a fórmula utilizada para calcular o novo peso do trem em função da alteração da sua velocidade. Os trens que descem a serra de Paranaguá no litoral do Paraná, circulam com duas locomotivas GT1 e com quarenta e cinco vagões, o peso total do trem deve estar adequado para está formação, pois se houver um erro de cálculo o maquinista enfrentará sérios problemas na condução do trem, podem perder o controle da composição e causar um grande acidente ferroviário. A fórmula base utilizada será a segunda lei de Newton, também chamada de princípio fundamental da dinâmica f=m.a, onde "m" será igual a L (lotação do trem). A velocidade de descida da serra é fixada pelo freio dinâmico das locomotivas em corrente contínua. Existe uma velocidade em que se obtém a força máxima e é dada pela função Fd= F (V). Também deve ser considerado o coeficiente de atrito das sapatas dos vagões. Quanto menor for a velocidade, maior o coeficiente de atrito. Na fórmula iremos derivar a equação em função da velocidade. No exemplo, será calculado a redução da lotação se o trem passar de 22km/h para 23km/h e de 22km/h para 27km/h. A conclusão é que não se pode usar as lotações calculadas para uma determinada velocidade e conduzir o trem em outra (maior), a menos que se reavalie a lotação para a situação.*

Palavra-chave: Velocidade,Peso,Atrito.

1. AUMENTO DE VELOCIDADE EM DESCIDA DE SERRA:

O objetivo do trabalho é calcular o peso de um trem e a sua velocidade, para que possa descer a Serra de Paranaguá em segurança, sem colocar em risco a operação e os ativos envolvidos.

A velocidade de descida da serra é fixada pelo freio dinâmico das locomotivas em corrente contínua. Existe uma velocidade em que se obtém a força máxima. Ver "Figura 1"

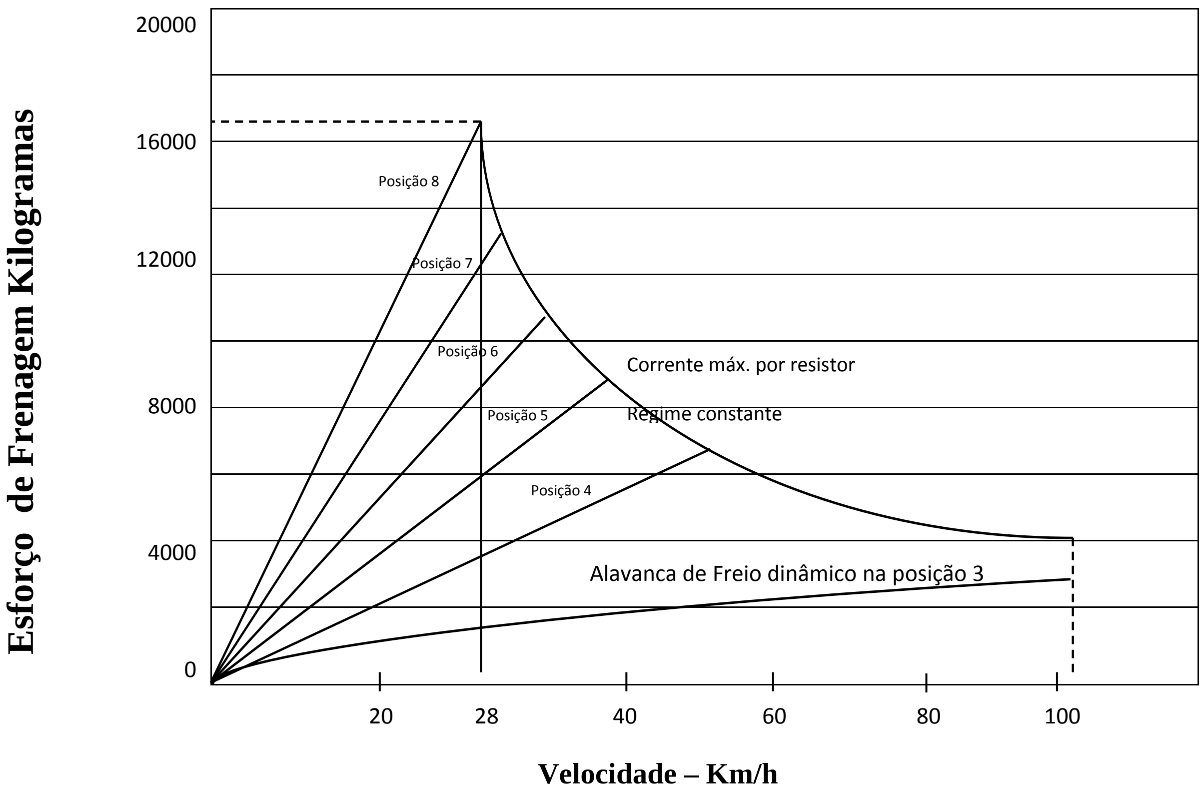

Figura 1 - Curva do Freio Dinâmico.

Força máxima em V = 28 km/h. FD = f(V).

Também deve ser considerado o coeficiente de atrito das sapatas. Quanto menor for a velocidade, maior o coeficiente de atrito. Ver o gráfico da "Figura 2"

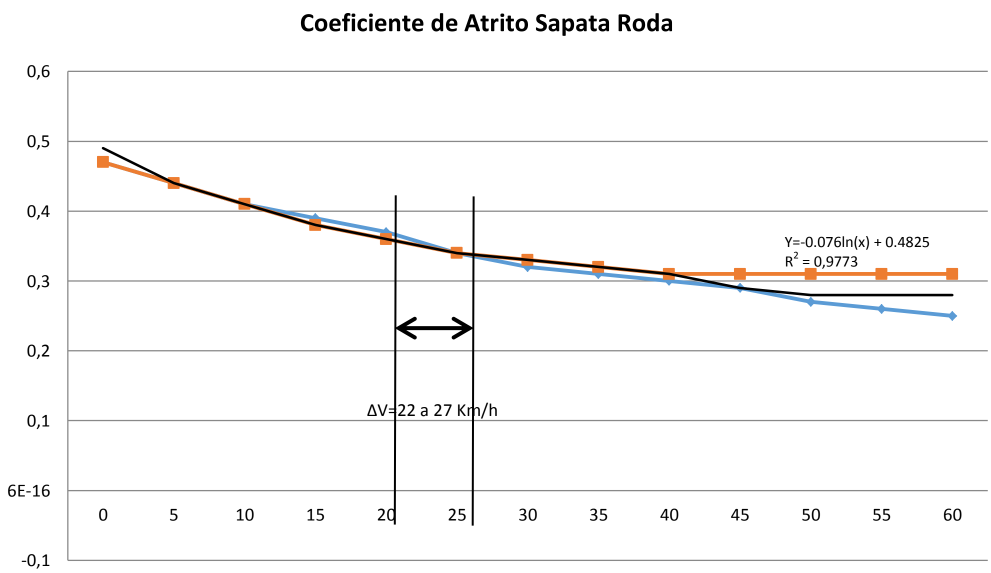

Figura 2 - Coeficiente de atrito x Velocidade (km/h). μ = f(V).

A principal equação será a segunda lei de Newton, também chamada de princípio fundamental da dinâmica, onde “m” será igual a L (lotação do trem).

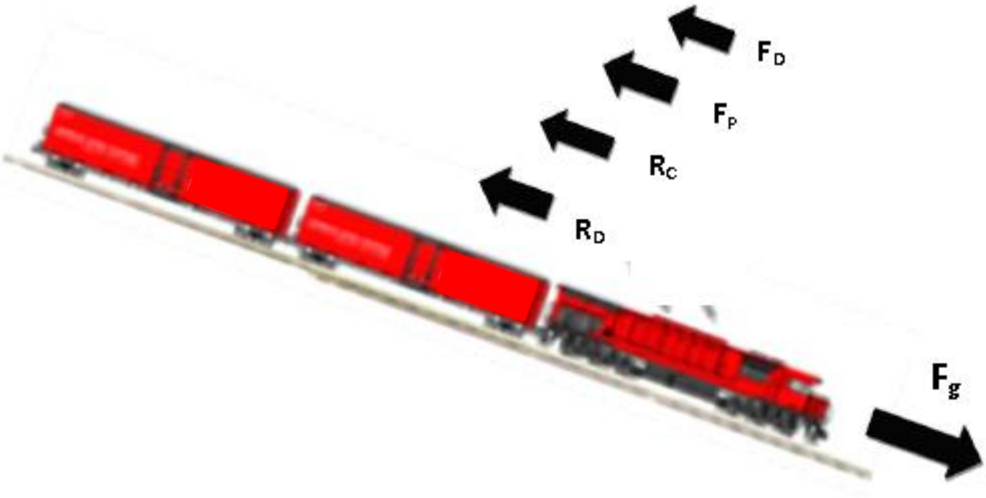

Figura 4–Forças atuantes.

Onde:
Ft: esforço de tração – em descida é igual a 0.
Rc: resistência de curva (locomotiva e vagão).
RD: resistência ao movimento (de Davis – locomotiva e vagão).
Fg: força da gravidade (negativo para rampas descendentes).
Fi: força inercial dada pela variação de velocidade – zero, pois a velocidade ficaconstante durante a descida.
FP: força do freio pneumático (automático).
FD: força do freio dinâmico.

Escrevendo a equação a ser usada:

$$(M_L + L).g.i = n_v.\mu.p_c.A_c.R_a.e + n_L.F'_D + M_L.R'_{C_L} + L.R'c_V + M_L.R'_{D_L} + L.R'_{D_V}$$

Isolando “L” e agrupando M_L

$$L.g.i - L\left(R'_{C_V} + R'_{D_V}\right) = n_v.\mu.p_c.A_c.R_a.e + n_L.F'_D - M_L.g.i + M_L.R'_{C_L} + +M_L.R'_{D_L}$$

$$L.\left[g.i - R'_{c_V} - R'_{D_V}\right] = n_v.\mu.p_c.A_c.R_a.e + n_L.F'_D - M_L.\left[g.i - R'_{c_L} - R'_{D_L}\right]$$

$$L = \frac{n_v.\mu.p_c.A_c.R_a.e}{g.i - R'_{c_V} - R'_{D_V}} + \frac{n_L.F'_D}{g.i - R'_{c_V} - R'_{D_V}} - \frac{M_L.(g.i - R'_{c_L} - R'_{D_L})}{g.i - R'_{c_V} - R'_{D_V}}$$

Reescrevendo a equação anterior de uma forma mais clara:

$$L = \left(\frac{n_v.\mu.p_C.A_C.e}{g.i - R'_{C_V} - R'_{D_V}}\right).Ra + \left(\frac{n_L.F'_D}{g.i - R'_{C_V} - R'_{D_V}}\right) - M_L.\left(\frac{(g.i - R'_{C_L} - R'_{D_L})}{g.i - R'_{C_V} - R'_{D_V}}\right) \quad (1)$$

Freio Pneumático Freio Dinâmico Peso Locomotiva

Equação 1 – Cálculo da lotação do trem.

O primeiro termo do lado direito da “Equação 1”é a contribuição do freio pneumático para a lotação. Como é o principal freio do trem, fornece a maior parcela. Haverá necessidade de se multiplicar por 0,4536 para transformar lbf em kgf.
O segundo termo é a contribuição do freio dinâmico para a lotação. Portanto, o freio dinâmico ao contribuir para a lotação precisa estar em plena capacidade ou a lotação deverá ser reduzida.
O terceiro termo se refere ao preço a pagar por ter locomotivas no trem para contribuir com o freio dinâmico. Locomotivas mais leves, mas com elevada força no dinâmico, desde que mantidos os níveis de aderência, são preferíveis.
Deve-se observar também que L é “m” (massa). O numerador do primeiro termo do lado direito é basicamente pressão vezes área corrigido por fatores de ordem mecânica, portanto é uma força “F”. O numerador do segundo termo é a força do dinâmico “F” e o numerador do terceiro termo é massa vezes aceleração que é Força “F”. O denominador de todos os termos do lado direito é aceleração em cada vagão, onde:
g.i: aceleração da gravidade sobre a rampa i (kgf/t).
Rc e RD: são resistências de curva e normais ao movimento (kgf/t).
Em suma, a “Equação 1” é basicamente: m = F/a.

Vamos verificar quais são as variáveis da “Equação 1” que dependem da velocidade e responder às seguintes perguntas:
1. Como variará a lotação do trem em função da velocidade, mantendo a pressão do cilindro constante?
2. Como variará a aplicação de freio em função da velocidade, mantendo a lotação constante?

Lotação:
As variáveis que dependem da velocidade são: μ, FD , . Como o efeito é muito pequeno nas resistências ao movimento, iremos desprezar estas variações.

$$L(V) = \left(\frac{n_v.\mu(V).p_C.A_C.e}{g.i - R'_{C_v} - R'_{D_v}}\right).0{,}4536.Ra + \left(\frac{n_L.F'_{D(V)}}{g.i - R'_{C_v} - R'_{D_v}}\right) - M_L.\left(\frac{(g.i - R'_{C_L} - R'_{D_L})}{g.i - R'_{C_v} - R'_{D_v}}\right) \quad (1)$$

Coeficiente de atrito da sapata:

Pelo gráfico da “Figura 2”, e estreitando a faixa da velocidade para 22 a 27 km/h, a curva que melhor representa a função é:

$$\mu(V) = -0{,}052 lnV + 0{,}5203 \quad (2)$$

Denominaremos os coeficientes numéricos de “a” e “b”:
a = 0,052.
b = 0,5203.

$$\boxed{\mu(V) = -a\ln V + b} \qquad (3)$$

Freio dinâmico:
Pelo gráfico da “Figura 1”, a velocidade em que se obtém a força máxima do freio dinâmico é em 28 km/h, para uma locomotiva GT1. Porém, está curva foi deslocada para que a força máxima ficasse na velocidade de 22 km/h.
Para a faixa de velocidade que pretendemos analisar (22-27 km/h), vemos que a curva que melhor representa a função é:

$$\boxed{F'_D = \frac{3{,}6n_T \cdot R \cdot I^2}{n \cdot g \cdot V} = \frac{c}{V} \, (4)} \qquad sendo \qquad c = \frac{3{,}6n_T \cdot R \cdot I^2}{n \cdot g} \, (5)$$

V = velocidade do trem em km/h.

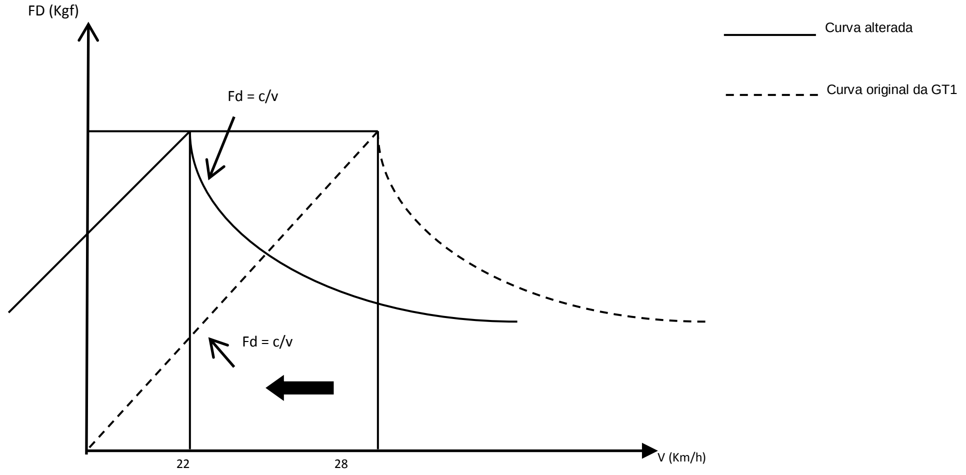

Figura 4 - Força do freio dinâmico versus velocidade.

Para facilitar os cálculos vamos chamar de α, β e γ os seguintes termos da “Equação 1”:

1º termo: $a = \left(\frac{n_v.p_c.A_c.e.R_a}{g.i - R'_{c_v} - R'_{D_v}}\right) \cdot 0{,}4536 \quad (t)$ (6)

2º termo: $\beta = \left(\frac{n_L}{g.i - R'_{c_v} - R'_{D_v}}\right) \qquad (t/kgf)$ (7)

3º termo: $\gamma = M_L \cdot \left(\frac{(g.i - R'_{c_L} - R'_{D_L})}{g.i - R'_{c_v} - R'_{D_v}}\right) (t)$ (8)

Substituindo (6) a (8) em (1):

$$L(V) = a \cdot \mu(V) + \beta \cdot F'_D(V) - \gamma \tag{9}$$

Substituindo (3) a (4) em (9):

$$L(V) = a \cdot (-alnV + b) + \beta \cdot \frac{c}{V} - \gamma$$

$$L(V) = -(a \cdot a)lnV + (c \cdot \beta) \cdot \frac{1}{V} + (\mathrm{a} \cdot \mathrm{b} - \gamma)$$

Fazendo: $\alpha_1 = \mathrm{a}\alpha$; $\beta_1 = c\beta$; $\gamma_1 = \alpha b - \gamma$

$$L(V) = -\alpha_1 \cdot lnV + \beta_1 \cdot \frac{1}{V} - \gamma_1 \tag{10}$$

Derivando a equação (9) em função da velocidade:

$$\frac{dL(V)}{dV} = -\alpha_1 \cdot \frac{1}{V} - \beta_1 \cdot \frac{1}{V^2}$$

$$\boxed{\frac{dL(V)}{dV} = -\left(\alpha \cdot \alpha \cdot \frac{1}{V} + c \cdot \beta \cdot \frac{1}{V^2}\right)} \tag{11}$$

O sinal negativo na equação (11) revela que o aumento de velocidade trará redução de lotação, pois tanto o coeficiente de atrito da sapata como a força do freio dinâmico diminuem com o aumento da velocidade.

Substituindo os valores de “a” e “c” e as equações (6) e (7) em (11):

$$\frac{dL(V)}{dV} = -\left[0{,}052 \cdot \left(\frac{n_v \cdot p_c \cdot A_c \cdot e \cdot R_\alpha}{g \cdot i - R'_{c_v} - R'_{D_v}}\right) \cdot 0{,}4536 \cdot \frac{1}{V} + \left(\frac{3{,}6 n_T \cdot R \cdot I^2}{n \cdot g}\right) \cdot \frac{n_L}{(g \cdot i - R'_{D_v})} \cdot \frac{1}{V^2}\right] \tag{12}$$

Exemplo: Considerando os dados do exemplo 12, calcular a redução de lotação se o trem passar de 22 km/h para 23 km/h e de 22 km/h para 27 km/h.

$$\frac{dL(V)}{dV} = -\left[0{,}052 \cdot \left(\frac{45{\cdot}42{,}43{\cdot}78{,}54{\cdot}0{,}65{\cdot}4{,}21}{10{\cdot}3{,}1-2-1-1{,}755}\right) \cdot 0{,}4536 \cdot \frac{1}{22} + \left(\frac{3{,}6{\cdot}6{\cdot}1{,}52{\cdot}280^2}{0{,}9{\cdot}10}\right) \cdot \frac{2}{(10{\cdot}3{,}1-2-1{,}755)} \cdot \frac{1}{22^2}\right]$$

$$\frac{dL(V)}{dV} = -[16{,}15 + 43{,}38] = -59{,}5t$$

Lotação a 22 km/h: 3.232 t.
Lotação a 23 km/h: 3.232 – 59,5. (23-22) = 3.172,5 t.
Lotação a 27 km/h: 3.232 – 59,5. (27-22) = 3.232 - 297,5 = 2.934,5 t.

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

A conclusão é que não se pode usar as lotações calculadas para uma determinada velocidade e conduzir o trem em outra (maior), a menos que se reavalie a lotação para a nova situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livro:
HUNGRIA, Luiz Henrique. Segurança operacional de trens de carga. Curitiba: Não publicado 2014.
STOPATTO, Sérgio. Via permanente Ferroviária, Conceitos e Aplicações. Editora da USP,1987.
BRINA, Helvécio Lapertosa, Estradas de Ferro. Editora UFMG, 1988.

CALCULATION TO DETERMINE THE TRAIN WEIGHT SPEED FUNCTION

Abstract: The movement of freight trains transported depends on your weight and locomotives used in the proposed work will address the index used to calculate the new weight of the train due to the change of its speed. The trains that go down the hills of Paranagua in Parana coast, circulating with two GT1 locomotives and forty-five wagons, the total weight of the train must be suitable for is training, because if there is a driver miscalculation will face serious problems in driving the train, may lose control of the composition and cause a major railway accident. The base formula used is the Newton's second law, also called the fundamental principle of dynamics f = m / a, where "m" is equal to L (train capacity). The lowering speed of the saw is fixed by the dynamic brake of locomotives in DC. There is a speed at which you get maximum strength and is given by the function Fd = F (V). Also to be considered the coefficient of friction of shoes wagons. The lower the speed, the greater the coefficient of friction. In the indexwe derive the equation in terms of speed. In the example, the reduction in capacity is calculated if the train going from 22km/h to 23km/h and 22km/h to 27km/h. The conclusion is that one can not use the manning calculated for a given speed and drive the train into another (larger), unless you re-evaluate the capacity for the situation.

Keyword: Train, Speed, Weight, Friction.